

В рамках проведения Фестиваля науки в Тамбовской области

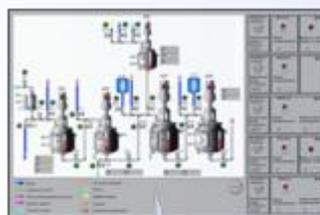
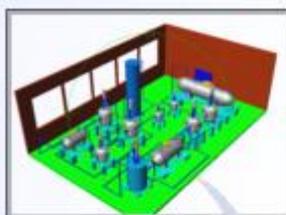
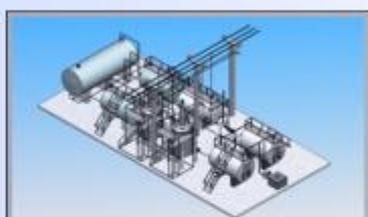


ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Выпуск 6, Том I

VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

Issue 6, Volume I



Тамбов

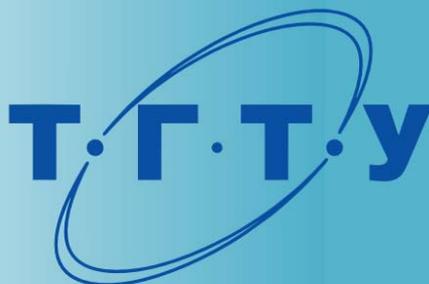
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»

2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

В рамках проведения Фестиваля науки в Тамбовской области



Всероссийский
Фестиваль
науки

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Материалы VI Международной научно-практической конференции

г. Тамбов, 16 – 18 октября 2019 г.

Выпуск 6, Том I

VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

Issue 6, Volume I

Научное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2020

УДК 658.512.2
ББК Ж18я43
В52

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор М. Н. Краснянский (общая редакция);
д-р техн. наук, профессор В. А. Немтинов;
д-р техн. наук, профессор В. Г. Мокрозуб;
д-р техн. наук, профессор С. В. Карпушкин;
канд. техн. наук, доцент А. Б. Борисенко;
канд. техн. наук С. В. Карпов

В52 **Виртуальное** моделирование, прототипирование и промышленный дизайн [Электронный ресурс] : материалы VI Международной научно-практической конференции : в 2 т. / под общ. ред. М. Н. Краснянского ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – Вып. 6.
ISBN 978-5-8265-1836-6.

Т. I. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 13,6 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-2192-2.

Опубликованы материалы пленарных и секционных докладов Международной научно-практической конференции, которая посвящена проблемам научно-технического и социально-экономического развития регионов. Целью конференции является обсуждение и публикация научных достижений ученых, а также определение возможных путей решения проблем разработки методов и алгоритмов создания и применения виртуальных моделей и прототипов объектов различного назначения и сложности.

В настоящее время виртуальное моделирование и прототипирование технических систем широко используется при решении задач промышленного дизайна, проектирования, модернизации, перепрофилирования производств различных отраслей промышленности. Еще одна популярная сфера применения виртуального моделирования и прототипирования – создание моделей культурно-исторических объектов в целях сохранения первоначанного облика памятников архитектуры, в том числе утраченных, мемориальных и культурных сооружений.

Материалы конференции могут быть полезны преподавателям вузов и средних учебных заведений, научным работникам, руководителям и специалистам предприятий, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

Все научные работы, представленные на конференции, прошли двойное рецензирование программным комитетом и редакционной коллегией.

УДК 658.512.2
ББК Ж18я43

Материалы статей предоставлены в электронном виде и сохраняют авторскую редакцию.

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Незаконное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2192-2 (т. I)
ISBN 978-5-8265-1836-6 (общ.)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2020

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Приходько Вячеслав Михайлович – председатель программного комитета, советник ректора ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН.

Краснянский Михаил Николаевич – сопредседатель программного комитета, ректор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (ТГТУ), д-р техн. наук, проф., профессор РАН.

Воеводин Владимир Валентинович – сопредседатель программного комитета, зам. директора НИВЦ МГУ, зав. кафедрой Суперкомпьютеров и квантовой информатики ВМК МГУ, д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН.

Мищенко Сергей Владимирович – почетный ректор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

Позднеев Борис Михайлович – директор ИИСТ ФГБОУ ВО МГТУ «Станкин», д-р техн. наук, проф.

Монастырев Павел Владиславович – директор Института архитектуры, строительства и транспорта ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

Громов Юрий Юрьевич – директор Института автоматизации и информационных технологий ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

Тютюнник Вячеслав Михайлович – профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ», генеральный директор Международного Информационного Нобелевского Центра, д-р техн. наук, проф.

Куликов Геннадий Михайлович – исполнитель государственной работы «Организация проведения научных исследований» в ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р физ.-мат. наук, проф.

Каррера Эразмо – профессор аэрокосмических конструкций и аэроупругости Туринского политехнического института, Турин (Италия), д-р техн. наук, проф.

Нобель Микаэл Свен – учредитель и глава Нобелевского благотворительного фонда, полный профессор университета Сока (Япония), д-р наук, проф. (Стокгольм, Швеция).

Горлач Сергей Петрович – зав. кафедрой «Параллельные и распределенные системы» Вестфальского университета имени Вильгельма, г. Мюнстер (Германия), д-р наук, проф.

Яегер Магнус – заместитель декана факультета экономического инжиниринга Восточнобаварского института Амберг-Вайден (Германия), проф.

Аверченков Владимир Иванович – зав. кафедрой «Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

Остроух Андрей Владимирович – профессор кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», д-р техн. наук, проф.

Сердюк Анатолий Иванович – директор Аэрокосмического института ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», д-р техн. наук, проф.

Морозов Михаил Николаевич – зав. кафедрой информатики и системного программирования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», канд. техн. наук, проф.

Фролов Сергей Владимирович – зав. кафедрой «Биомедицинская техника» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Мокрозуб Владимир Григорьевич – председатель, зав. кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (КИСМ) ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Немтинов Владимир Алексеевич – зам. председателя, профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Соколов Михаил Владимирович – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, доц.

Карпушкин Сергей Викторович – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

Егоров Сергей Яковлевич – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф.

СЕКРЕТАРИАТ КОНФЕРЕНЦИИ

Борисенко Андрей Борисович – доцент кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», канд. техн. наук, доц.

Карпов Сергей Владимирович – доцент кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ», канд. техн. наук.

Кшенникова Татьяна Михайловна – ведущий программист кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «ТГТУ».

СОДЕРЖАНИЕ

Секция I. Виртуальное моделирование, визуализация и прототипирование технических систем	9
<i>Мордасов М. Д., Савенков А. П., Мордасов Д. М.</i> Влияние свинцово-марганцевого нафтената на изменение динамического краевого угла смачивания при растекании стирол-акриловой дисперсии	10
<i>Туровский Я. А.</i> Альтернативные интерфейсы человек–компьютер, основанные на бионических принципах: перспективы развития	14
<i>Черемисин А. П., Карпов С. В., Хрусталева Р. В., Бочарова А. Н.</i> Системный анализ проектных решений при проектировании рамы электробайка	18
<i>Черемисин А. П., Карпов С. В., Хрусталева Р. В., Бочарова А. Н.</i> Проектирование рамы электробайка с использованием методов топологической оптимизации	24
<i>Шурыгина Э. В.</i> Особенности функционирования и ремонта техники специального назначения	29
<i>Новиков А. Е., Филимонов М. И., Ламскова М. И., Поддубский А. А., Чамурлиев Г. О.</i> Моделирование ферментативной очистки сточных вод	33
<i>Фидаров В. Х., Кузина Е. В.</i> Разработка конструкций и испытание специальных резцов для обработки заготовок из отбеленного чугуна	40
<i>Сергеева А. С., Немтинова Ю. В.</i> Технологии анализа совершенствования процессов в бережливом производстве	47
<i>Савилова У. А., Шибков Д. А., Яковлева Д. А., Машкова О. С.</i> Модели взаимодействия агентов защищенной мультиагентной системы на примере роя беспилотных летательных аппаратов	53
<i>Волков А. А., Вехтева Н. А., Сухин А. А., Обухов А. Д.</i> Применение одноплатных компьютеров семейства Raspberry Pi в дистанционно-управляемых мехатронных и роботизированных системах	59
<i>Седых И. А., Истомин В. А.</i> Реализация нейросетевой модели цементного производства	63
<i>Корнаев А. В., Корнаева Е. П.</i> Численный метод расчета течений в тонких каналах на основе комбинации вариационного принципа и искусственных нейронных сетей	67
<i>Архипов А. Е., Дедов Д. Л., Сидорчук А. О., Бочарова А. Н.</i> Применение системы захвата движения и инверсной кинематики в тренажерных комплексах	73
<i>Карпушкин С. В., Инина Е. А.</i> Оптимизация конструкций пресс-форм с целью снижения перепада температур по объему обрабатываемого изделия	77
<i>Карпушкин С. В., Чичканов Н. В.</i> Выбор плана вычислительного эксперимента при оптимизации параметров системы нагрева прессового оборудования	82
<i>Рыжков А. В., Мачкарин А. В.</i> Дисковый почвообрабатывающий агрегат для внесения растворов концентратов микроорганизмов	88
<i>Балашов А. А., Левин В. Н.</i> Исследование задачи Стефана для полимерных материалов в условиях плавления	94

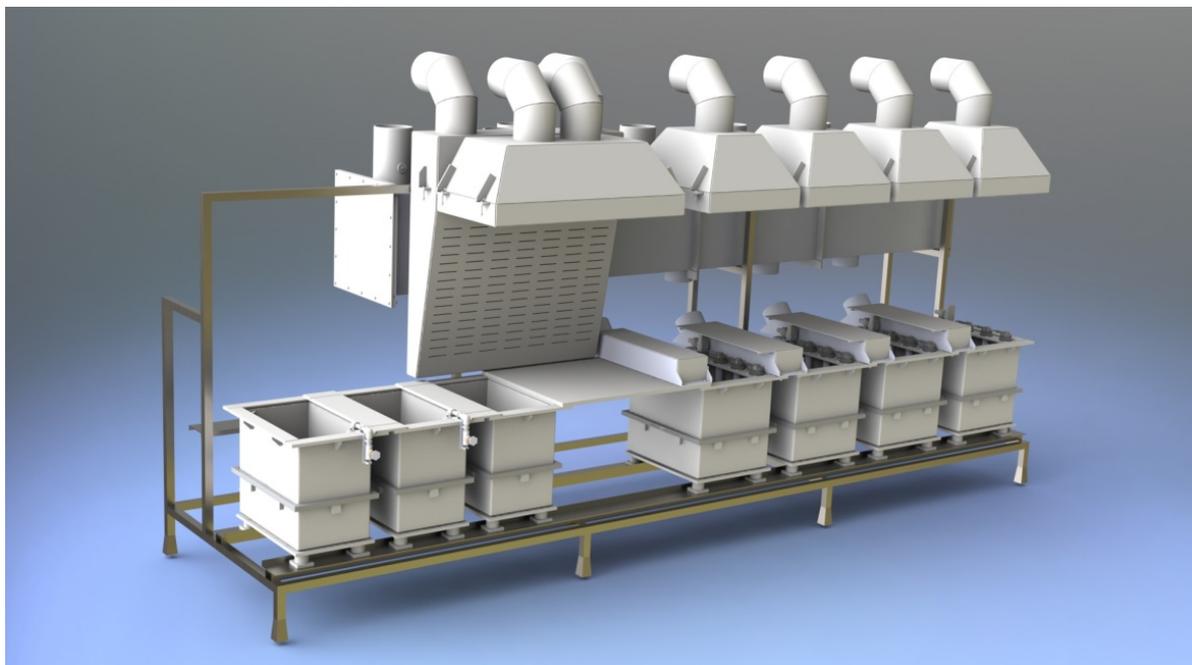
<i>Голубовский В. В., Коновалов В. В., Родионов Ю. В., Гумаров Г. С.</i> Исследование влияния гидравлических сопротивлений на статические характеристики измерительного преобразователя типа «сопло–заслонка»	98
<i>Калинин Д. И., Соколов М. В.</i> Методика исследования формообразующих операций обработки корпусных деталей	105
<i>Зайцев В. В., Кравцов А. В., Коновалов В. В., Родионов Ю. В., Петров А. М., Петрова С. С.</i> Аналитическое обоснование движения частиц в вертикальном конфузоре	109
<i>Немтинов В. А., Матрохин М. А., Крылов А. В., Храмцов В. В.</i> Процесс цинкования в установке покрытия насыпью	118
<i>Мордасов С. А., Негуляева А. П., Чернышов В. Н.</i> Адаптивная информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий	123
<i>Селиванова З. М., Куренков Д. С., Хоан Т. А.</i> Моделирование теплофизического эксперимента при дистанционном контроле качественных свойств объекта	129
<i>Маматказин Т. Р., Мордасов Д. М.</i> Влияние температуры отжига на структуру сплава с эффектом памяти формы	135
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Черикова К. В., Меренцов Н. А.</i> Моделирование структуры потока в трубопроводе по профилю скорости	137
<i>Мартьянов Е. И., Малыгин Е. Н.</i> Исследование влияния конструкции мешалки на интенсивность перемешивания	143
<i>Страинов Е. В., Торгашев М. А.</i> Моделирование движения колесных роботов по ровной поверхности в системах виртуального окружения	149
<i>Страинов Е. В., Мироненко И. Н.</i> Моделирование трения скольжения и верчения в задаче захвата виртуальных объектов	155
<i>Кроть О. С., Соколов В. И., Цанков П. Г.</i> Моделирование вертикальной шпиндельной головки обрабатывающего центра	160
<i>Дмитриевский Б. С., Башкатова А. В., Терехова А. А.</i> Моделирование электрической дуги сталеплавильной печи	168
<i>Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Прохоренко Н. А., Шибитова Н. В., Меренцов Н. А.</i> Анализ математических моделей рабочих линий для газовой и жидкой фаз с учетом одновременной продольной диффузии в насадочном абсорбере и ректификационной колонне	173
<i>Мальцев А. В., Финагин Л. А.</i> Распределенные методы реалистичного рендеринга на GPU виртуальных сцен с имитацией непрямого затенения объектов	179
<i>Мальцев А. В., Тимохин П. Ю.</i> Методы имитации искажений видеосигнала при моделировании камер в виртуальной среде с использованием параллельных вычислений на GPU	186
<i>Лабутин А. Н., Загаринская Ю. Н., Невиницын В. Ю., Волкова Г. В.</i> Система управления концентрацией в химическом реакторе на базе регулятора состояния	192

<i>Невиницын В. Ю., Загаринская Ю. Н., Волкова Г. В., Лабутин А. Н.</i> Синергетический синтез системы каскадно-связанного управления тепловым режимом химического реактора	199
<i>Гриднев В. А., Дидрих В. Е., Дидрих И. В.</i> Виртуальное моделирование криптозащиты канала передачи данных между наземным пунктом управления и беспилотным воздушным судном большой продолжительности полета	205
<i>Карпушкин С. В., Афанасьев В. М.</i> Применение информационных моделей для решения задач аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств	212
<i>Карпушкин С. В., Афанасьев В. М., Тюрин Р. Э.</i> Задачи автоматизированного проектирования прессового оборудования, используемого для изготовления резинотехнических изделий	217
<i>Болотов М. А., Печенин В. А., Печенина Е. Ю.</i> Прогнозирование вибраций ротора газотурбинного двигателя	223
<i>Скоков А. А., Соколов М. В.</i> Методика исследования технологий изготовления корпуса регулятора давления из нержавеющей стали на станке с ЧПУ	230
<i>Дежа А. А., Соколов М. В.</i> Защита от коррозии алюминиевых сплавов на стадии технологической подготовки производства изделий	236
<i>Дежа А. А., Соколов М. В.</i> Методика исследования способов повышения качества обработки деталей из алюминиевых сплавов на токарных станках ЧПУ	239
<i>Соколов М. В., Усман Ф. Д.</i> Акустический метод прогнозирования износа инструмента при токарной обработке	246
<i>Мокрозуб В. Г., Родина А. А., Соловьева Т. И., Минаев С. Г.</i> Использование единого пространства ресурсов для формирования виртуального предприятия	252
<i>Левашов А. В., Пыкин И. С., Калистратов М. С.</i> Функциональная модель проектирования бункеров	255
<i>Шемонаев И. А., Кулешов И. В., Романенко И. М., Черешнев В. О.</i> Разработка автоматизированной теплицы на базе микроконтроллера Arduino	259
<i>Немтинов В. А., Крылов А. В., Матрохин М. А., Храпцов В. В.</i> Модернизация пенного газопромывателя	265
<i>Дмитриев О. С., Живенкова А. А., Дмитриев А. О.</i> Визуализация работы модулей ИИС исследования характеристик отверждения полимерных композитов	268
<i>Соколов В. И., Кроть О. С., Романченко А. В., Харламов Ю. А., Батулин Е. А.</i> Моделирование динамических характеристик автоматического электрогидравлического привода технологического оборудования	273
<i>Плутикова А. Н., Абрамова Л. В.</i> Принципы разработки ГИС-системы для лесозаготовительных предприятий	281
Секция II. Виртуальное моделирование, визуализация и прототипирование социально значимых объектов	286
<i>Вехтева Н. А., Волков А. А., Дедов Д. Л.</i> Моделирование и анимация персонажей в рамках реконструкции исторических событий для виртуальной реальности	287

<i>Немтинов В. А., Горелов А. А., Борисенко А. Б., Трюфилькин С. В., Немтинова Ю. В.</i> Виртуальная реконструкция памятных мест в Тамбове, связанных с пребыванием архиепископа Луки	292
<i>Немтинов В. А., Борисенко А. Б., Трюфилькин С. В.</i> Автоматизированное рабочее место дизайнера-визуализатора виртуальной среды	296
<i>Немтинов В. А., Пьяных Н. С.</i> Анализ проектных решений трассировки газопроводной системы муниципального образования	300
<i>Вязинкин А. Ю., Двухжилова И. В., Немтинов К. В.</i> Коммеморативные материалы виртуальной реконструкции памятного места «Имение дворян Сатиных “Ивановка”»	309
<i>Ельчищева Т. Ф., Преображенская Е. М., Филимонова Е. П.</i> Разработка прототипа объекта для отдыха на открытом воздухе при помощи 3D-моделирования	313
<i>Ельчищева Т. Ф., Преображенская Е. М., Филимонова Е. П.</i> Виртуальное моделирование главного усадебного дома купца Ефанова в г. Тамбове	319
<i>Ельчищева Т. Ф., Преображенская Е. М., Красивская Д. А.</i> Подготовка виртуальной модели здания выставочного павильона к выращиванию прототипа на 3D-принтере	326
<i>Токарева М. А., Зубкова Т. М.</i> Создание автоматизированной информационной системы учета объектов археологического наследия	333
<i>Ельчищева Т. Ф., Преображенская Е. М., Жоркина Д. Г.</i> Виртуальное проектирование общественного кафе в программной среде ArchiCAD	339
Секция III. Проектирование и применение компьютерных имитационных моделей, виртуальных тренажеров и систем машинного зрения	346
<i>Корнаев Н. В.</i> Выявление неисправностей роторных систем с применением искусственных нейронных сетей	347
<i>Казаков Ю. Н.</i> Система компьютерного зрения шестистепенного робота-манипулятора	354
<i>Захарова Т. Ю., Прокудина Н. Н., Дедов Д. Л., Печатнова Е. С.</i> Организация сетевого взаимодействия игрового движка Unity с другим программным обеспечением	358
<i>Прокудина Н. Н., Печатнова Е. С., Дедов Д. Л., Захарова Т. Ю.</i> Сравнение подходов к реализации систем частиц в Unity	362
<i>Печатнова Е. С., Захарова Т. Ю., Прокудина Н. Н., Дедов Д. Л.</i> Выбор способов взаимодействия с виртуальной средой в Unity с точки зрения качества обучения	366
<i>Тимохин П. Ю., Мальцев А. В.</i> Моделирование на GPU динамических теней от облачного покрова в космических видеотренажерах	370
<i>Уварова Е. А., Пыкин И. С., Попов А. В.</i> Методика автоматизированного расчета расхода электродов	376
<i>Пыкин И. С., Попов А. В., Лагутин Д. А., Грудинин Н. С.</i> Информационная модель определения размеров тарелок колонных аппаратов	379

Секция I

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



УДК 66.065.7

Мордасов М. Д., Савенков А. П., Мордасов Д. М.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630469, e-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru)

**ВЛИЯНИЕ СВИНЦОВО-МАРГАНЦЕВОГО НАФТЕНАТА
НА ИЗМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ
ПРИ РАСТЕКании СТИРОЛ-АКРИЛОВОЙ ДИСПЕРСИИ**

Mordasov M. D., Savencov A. P., Mordasov D. M.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752) 630469, e-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru)

**INFLUENCE OF LEAD-MANGANESE NAPHTHENATE ON CHANGES
IN THE DYNAMIC EDGE WETTING ANGLE UPON SPREADING
OF STYRENE-ACRYLIC DISPERSION**

Аннотация. Проведены исследования влияния свинцово-марганцевого нафтената на изменение динамического краевого угла смачивания при растекании стирол-акриловой дисперсии. Получены зависимости изменения динамического краевого угла смачивания во времени при различных концентрациях свинцово-марганцевого нафтената в растворе. В результате анализа экспериментальных данных выявлена область концентраций, в которой динамический угол смачивания изменяется в наиболее широком диапазоне с наименьшей, по сравнению с растворами других концентраций, скоростью. Результаты проведенных исследований будут использованы при оптимизации состава полимер-минерального композиционного материала и позволят получить полимерную матрицу, наиболее полно смачивающую минеральные наполнители, а полученный композит будет обладать наибольшей подвижностью и живучестью.

Ключевые слова: угол смачивания, растекание, стирол-акриловая дисперсия, свинцово-марганцевый нафтенат.

Abstract. The effect of lead-manganese naphthenate on the change in the dynamic contact angle during spreading of a styrene-acrylic dispersion is studied. The dependences of the change in the dynamic contact angle in time are obtained for various concentrations of lead-manganese naphthenate in solution. As a result of the analysis of the experimental data, a concentration region was revealed in which the dynamic wetting angle varies in the widest range with the lowest speed compared to solutions of other concentrations. The results of the research will be used to optimize the composition of the polymer-mineral composite material and will make it possible to obtain a polymer matrix that most wets the mineral fillers, and the resulting composite will have the greatest mobility and vitality.

Keywords: wetting angle, spreading, styrene-acrylic dispersion, lead-manganese naphthenate.

Развитие рынка строительно-отделочных материалов требует поиска и разработки новых материалов, обладающих повышенными эксплуатационными и технологическими свойствами.

В последнее время широким потребительским спросом пользуются составы для обустройства наливных полов, в том числе и для промышленных помещений. Одной из актуальных задач при создании полимер-минеральных композиций для наливных полов является обеспечение эффективного их твердения при одновременном сохранении подвижности смеси в процессе ее укладки. Разработка таких композиций возможна только при тщательном подборе всех компонентов рецептуры и подробного исследования их комплексного влияния.

В рамках оптимизации состава полимер-минерального композиционного материала нами проведены исследования влияния свинцово-марганцевого нафтената на изменение динамического краевого угла смачивания при растекании стирол-акриловой дисперсии.

Стирол-акриловая водная дисперсия представляет собой продукт эмульсионной полимеризации стирола, акриловой кислоты и бутилакрилата. Динамическая вязкость дисперсии составляет 1,3 Па·с, массовая доля нелетучих веществ $50 \pm 1\%$, размер частиц не превышает 90 нм.

Благодаря высокой атмосферо- и кислотостойкости дисперсии, ее низкому водопоглощению, высокой пигментоемкости и адгезии к различного вида основаниям, она является эффективным компонентом полимер-минеральных композитов на основе эпоксидных смол [1].

Выбор свинцово-марганцевого нафтената для ускорения процесса пленкообразования стирол-акриловой дисперсии обусловлен его преимуществами, заключающимися в синергетическом действии компонентов: ионы свинца обладают каталитической активностью по отношению к реакции поглощения кислорода, а ионы марганца ускоряют реакцию полимеризации.

Методика проведения исследований включала в себя следующие основные этапы:

а) дозирование и перемешивание компонентов (стирол-акриловая дисперсия и свинцово-марганцевый нафтенат);

б) нанесение капли подготовленной смеси на поверхность стекла;

в) видеорегистрация процесса растекания капли;

г) компьютерная обработка видеоряда и измерение динамического краевого угла смачивания;

д) повторение пунктов а) – д) для ряда заданных концентраций свинцово-марганцевого нафтената в стирол-акриловой дисперсии;

е) построение и анализ зависимости изменения динамического краевого угла во времени при вариации концентрационных параметров.

На рисунке 1 показаны фотографии капель в моменты времени, соответствующие началу ($t = 0$) и концу ($t \rightarrow \infty$) растекания. На рисунке 2 представлены графики изменения во времени краевого угла смачивания при растекании капель смесей с концентрациями свинцово-марганцевого нафтената 1, 5 и 8%.

Анализ динамики изменения краевого угла смачивания в зависимости от концентрации свинцово-марганцевого нафтената в растворе показал, что в области концентраций 5,0...6,5% динамический угол смачивания изменяется в наиболее широком диапа-

зоне, при этом скорость его изменения наибольшая по сравнению с растворами других концентраций.

На графиках изменения краевого угла смачивания во времени (рис. 2) можно выделить два характерных участка (обозначены цифрами I и II), которые, в зависимости от концентрации, имеют различную протяженность.

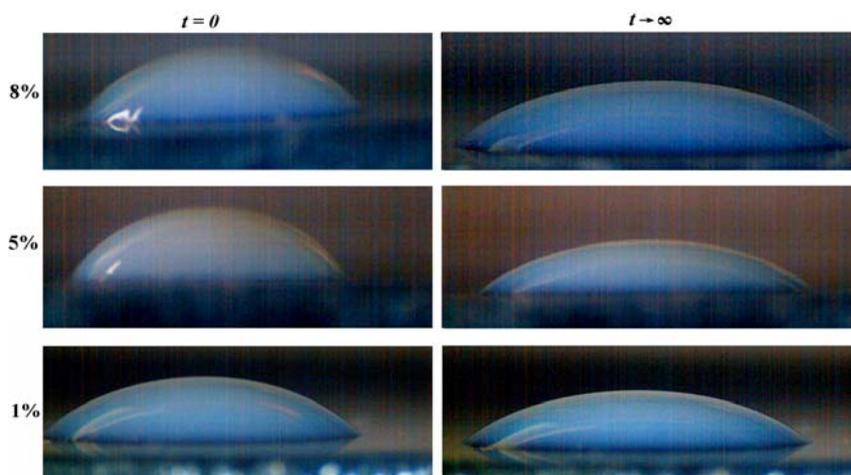


Рис. 1. Капли смесей на начальной ($t = 0$) и конечной ($t \rightarrow \infty$) стадиях растекания

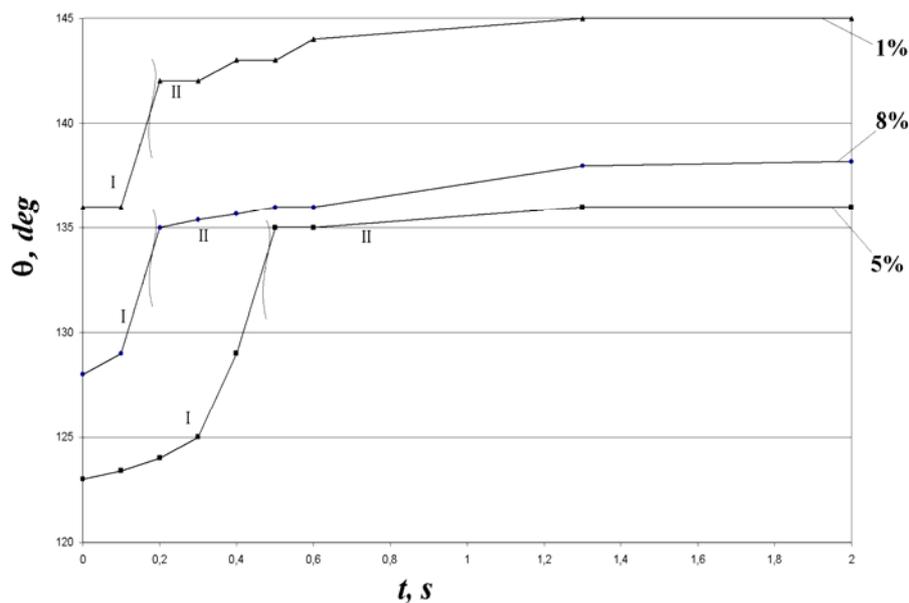


Рис. 2. Изменение динамического угла смачивания

Согласно имеющимся представлениям о физико-химических особенностях смачивания и растекания жидкой капли по поверхности твердого тела [2, 3] движущими силами процесса являются

- сила межфазного натяжения на границе раздела «твердое тело–жидкость»;
- сила тяжести;
- сила межфазного натяжения на границе раздела «жидкость–газ»;
- сила вязкого сопротивления.

Применительно к рассматриваемому случаю, когда растекание капли происходит при одновременном ее высыхании и полимеризации, ускорение растекания происходит лишь при увеличении силы межфазного натяжения на границе раздела «твердое тело – жидкость».

На участке I в растекание капли наибольший вклад вносит сила межфазного натяжения. Благодаря действию оптимально подобранного количества добавляемого свинцово-марганцевого нафтената (~5%) уже на начальной стадии растекания происходит увеличение поверхностного натяжения раствора на 25% относительно смеси с 1% добавкой нафтената, при этом скорость изменения краевого угла смачивания уменьшается на 16%, что позволяет раствору более длительное время сохранять свою подвижность и смачивать твердые поверхности. На участке II растекание происходит преимущественно под действием силы вязкого сопротивления. Анализ кривых, представленных на рис. 2, показывает, что протяженность временного интервала действия сил вязкого сопротивления в случае оптимально введенной добавки свинцово-марганцевого нафтената уменьшается на 30%, а скорость растекания снижается на 60%

Таким образом, добавка 5,0...6,5% свинцово-марганцевого нафтената к стирол-акриловой дисперсии на начальной стадии твердения ускоряет процесс пленкообразования при одновременном сохранении подвижности смеси, а на завершающей стадии ускоряет процесс полимеризации. При применении такого состава в качестве полимерного вяжущего в полимер-минеральной композиции, минеральные наполнители будут смачиваться наиболее полно, а смесь будет сохранять свою «живучесть» в течение необходимого для ее укладки времени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Тамбовской области в рамках научного проекта № 19-43-680003.

Список использованных источников

1. **Исследование** структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д. М. Мордасов, П. В. Макеев, Д. Л. Полушкин, М. Д. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25. – № 1. – С. 136 – 141.
2. **Новосадов, В. С.** Физико-химические особенности смачивания поверхности малоразмерной каплей в металлических системах / В. С. Новосадов // Фазовые переходы, межфазные границы и наноматериалы. – 2018. – № 2. – С. 69 – 74.
3. **Лесев, В. Н.** Аналитический метод исследования кинетики процесса растекания капли / В. Н. Лесев // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 89(05). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2013/05/pdf/40.pdf>.

УДК 004.5

Туровский Я. А.

Воронежский государственный университет, Россия, г. Воронеж
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва
(Тел. (4732)208384, e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru)

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ ЧЕЛОВЕК–КОМПЬЮТЕР,
ОСНОВАННЫЕ НА БИОНИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ:
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Turovsky Ya. A.

Voronezh State University, Voronezh, Russia
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow (Tel: (4732)208384, e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru)

**ALTERNATIVE HUMAN COMPUTER INTERFACES BASED ON BIONIC
PRINCIPLES: DEVELOPMENT PROSPECTS
TITLE OF THE MANUSCRIPT
CAN CONTAIN SEVERAL LINES**

Аннотация. Представлены результаты разработки, совершенствования и апробации эргатических систем, программно-аппаратной частью которых является компьютер или устройства под его управлением. К таковым устройствам можно отнести самоходные шасси, летающие платформы и собственно сами ПК. В основу работы положено моделирование и проектирование эргатической системы с использованием бионических подходов на следующих этапах: обработка полученных сигналов, моделирование архитектуры системы принятия решений, моделирование функционирования системы, обратная связь система–пользователь.

Ключевые слова: эргатические системы, интерфейс человек–компьютер, интерфейс мозг-компьютер, бионические подходы.

Abstract. The paper presents the results of the development, improvement and testing of ergatic systems, the software and hardware of which is a computer or devices under its control. Such devices include self-propelled chassis, flying platforms and the PC itself. The basis of the work is the modeling and design of an ergatic system using bionic approaches at the following stages: processing the received signals, modeling the architecture of the decision-making system, modeling the functioning of the system, system-user feedback.

Keywords: ergatic systems, human-computer interface, brain-computer interface, bionic approaches.

В разработке и совершенствовании эргатических систем в последнюю четверть века наметился существенный прогресс, связанный, во многом, с появлением новых аппаратных решений, позволяющих реализовать ресурсоемкие алгоритмы управления. Как следствие, развитие современных информационных технологий в сочетании с достижениями медицины и, особенно, физиологии, дало возможность создать большое

количество устройств, относящихся к классу интерфейсов человек–компьютер, действующих «в обход» или как альтернатива традиционным каналам коммуникации: клавиатуры, джойстика, мыши и т.п. При этом области применения данных технологий достаточно обширны. Так, решения в области реабилитации могут быть направлены, например, на восстановление физиологических функций пациента. Они могут осуществляться в двух основных направлениях: тренировка самого пациента путем совершенствования оставшихся у пациента функций и тренировка с целью замещения утраченных функций программно-аппаратными решениями; усовершенствование уже существующих интерфейсов управления, например, компьютером или автомобилем за счет появления новых возможностей в рамках концепции так называемого «дополненного управления», когда новые коммуникационные каналы не подменяют существующие, а дополняют их. Развитием этого подхода являются попытки использования подобных разработок в сфере конструирования вооружений, в основном, в авиации.

Считается, что, например, интерфейс мозг–компьютер (нейрокомпьютерный интерфейс, ИМК, НКИ) имеет потенциальную скорость передачи команд, значительно превышающую существующие программно-аппаратные решения, в первую очередь, за счет исключения из цепочки передачи команд временной задержки, вызванной перемещением «команды» по проводящим путям головного мозга и мышцам. Однако фактические параметры реализации группы так называемых альтернативных (классическим) интерфейсов человек–компьютер существенно уступают как теоретически возможным, так и ожидаемым, если сравнивать прогнозы 10 – 15-летней давности. Большинство используемых подходов, несмотря на существенный теоретический задел, в целом, не решают проблему увеличения скорости управления внешними устройствами и в рамках концепции «дополненного управления». Потенциально перспективные решения в области реабилитации больных пока не позволяют определить, для каких групп пациентов они будут достаточно успешными, в первую очередь, потому, что не решена проблема эффективности освоения того или иного типа альтернативных интерфейсов. Несмотря на наличие ряда основополагающих работ, научным сообществом не уделено достаточно внимания проблеме ограниченности коммуникаций с использованием классических интерфейсов «человек–компьютер» и «человек–компьютер–человек», как правило, использующих либо текстовые сообщения, либо достаточно ограниченный набор звукового и(или) визуального ряда. Таким образом, ключевыми проблемами, стоящими на данном этапе развития интерфейсов человек–компьютер, являются: увеличение скорости коммуникации, улучшение эргономичности, расширение спектра коммуникационных возможностей. Работа над разрешением указанных проблем в направлении совершенствования распознавания паттернов мозговой активности, формирование гибридно-интеллектуальных систем, непроизвольно управляемых интерфейсов позволит достигнуть значимых результатов в совершенствовании процессов реабилитации, будет способствовать выходу на новый уровень общения «человек–компьютер» и «человек–компьютер–человек» в том числе и в задачах маркетинга, генерации мультимедийного контента, появлению новых подходов

к исследованию мозга человека и операторской деятельности, что станет существенным шагом в создании новых эргатических систем.

В рамках исследования была осуществлена разработка методологии создания человеко-машинных интерфейсов на основе анализа спектральных особенностей биомедицинских сигналов и гибридного интеллекта; обобщение научных достижений, разработка теоретических основ и практических решений в создании интерфейсов человек–компьютер с использованием парадигмы непроизвольного управления и гибридного интеллекта для улучшения параметров человеко-машинного взаимодействия.

Получены следующие результаты. Разработана методология создания систем интерфейсов мозг-компьютер на основе активностной (в психофизиологическом понимании) парадигмы и гибридного интеллекта, на базе которых получены и апробированы модели, реализованные в виде программно-аппаратной эргатической системы синхронных нейрокомпьютерных интерфейсов. Наибольший прогностический вес успешности работы системы имеет коэффициент синергии, который обеспечивает классификацию до 11% уровня ошибок. При этом граница его значений, по которой осуществлялась классификация достижения или недостижения цели пользователем, проходила в области малых положительных и(или) отрицательных значений ($-0,11$, $0,26$; учитываются статистически значимые коэффициенты).

Разработана модель, методы и алгоритмы увеличения скорости работы интерфейса мозг–компьютер на основе гибридного интеллекта. Наиболее значимыми параметрами для оценки скорости работы гибридного НКИ является индекс гибридизации, отражающий долю числа команд, генерируемых человеком, в общем числе команд. Показано, что в пределах рассмотренной структуры нейрокомпьютерного интерфейса модальный выигрыш по времени работы интерфейса может составить величину $\approx 50\%$.

Модели, методы и алгоритмы, разработанные в диссертации, позволяют, используя эмпирические результаты работы разных типов НКИ, определить потенциальную эффективность дополнительного канала связи компьютер–человек и, как следствие, оценить возможность его реализации.

Разработаны принципы, методы и алгоритмы работы интерфейса человек–компьютер для передачи непроизвольных, генерируемых человеком команд с целью изменения параметров функционирования операционной системы и иных программных продуктов с временем реакции не более $5...15$ с в зависимости от значений параметров variability сердечного ритма пользователя.

Низколатентные непроизвольно-управляемые интерфейсы с использованием variability сердечного ритма реализованы на основе либо СКО (латентность $5 - 10$ кардиоциклов), либо Фурье-образа HF-частотного диапазона (латентность до 15 кардиоциклов), существенно превосходят интерфейсы на основе вейвлет-преобразования и преобразования Фурье в HF- и LF-диапазонах.

Непроизвольно-управляемые интерфейсы, зависимые от функционального напряжения пользователя, существенно расширяют возможности деятельности эргатических систем в области формирования эмоционального искусственного интеллекта, включая оценку и коррекцию работы НКИ в условиях выбора из множества алгоритмов обра-

ботки ЭЭГ-сигналов, нейромаркетинга, создания новых игровых приложений, мессенджеров, элементов социальных сетей.

Методы и алгоритмы синтеза цифровых фильтров медико-биологических сигналов на основе структуры цепочек локальных экстремумов матрицы вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов, которые индивидуально адаптированы к конкретным паттернам сигналов, используемых для генерации команд в эргатических системах, обеспечивают приближающуюся к 100% точность выделения значимого сигнала при отношении сигнал/шум 1/100.

Реализована система распределенно-параллельных вычислений на основе разработанных методов и алгоритмов. Она позволяет выполнять обработку данных ЭЭГ, ЭКГ, ВСР и видеопотоков с минимальной временной задержкой, формируя команды управления на самоходное шасси, дрон, миозлектрический протез, компьютер. Программы, являющиеся элементами комплекса, зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

УДК 519.816

Черемисин А. П., Карпов С. В., Хрусталев Р. В., Бочарова А. Н.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89106584528, e-mail: pozhiloy.chelovek@yandex.ru),
Детский технопарк «Кванториум», Россия, г. Тамбов
(Тел. +7(4752) 72-13-71, e-mail: kvantorium68@yandex.ru)

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАМЫ ЭЛЕКТРОБАЙКА

Cheremisin A. P., Karpov S. V., Khrustalev R. V., Bocharova A. N.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89106584528, e-mail: pozhiloy.chelovek@yandex.ru),
Children's Technopark "Quantorium", Russia, Tambov
Tel. +7(4752) 72-13-71, e-mail: kvantorium68@yandex.ru)

SYSTEM ANALYSIS OF DESIGN DECISIONS IN DESIGN OF ELECTRIC BIKE FRAME

Аннотация. Аналитики рынка электротранспорта прогнозируют стремительный рост популярности данной индустрии. В связи с активным развитием транспортной отрасли требуется внедрение новых наиболее актуальных технологий в процесс проектирования конструкций каркасов современных транспортных средств. Значительно ускорить и упростить процесс проектирования, а так же повысить точность расчетов позволяет использование методов топологической оптимизации. Для внедрения данной технологии в процесс проектирования требуется разработать особый алгоритм разработки конструкции, проведя системный анализ проектных решений. В качестве проекта послужила разработка рамы электробайка. Проведен системный анализ и разработан алгоритм проектирования, отражающий взаимосвязь выбора проектных решений и требуемых параметров конечного продукта.

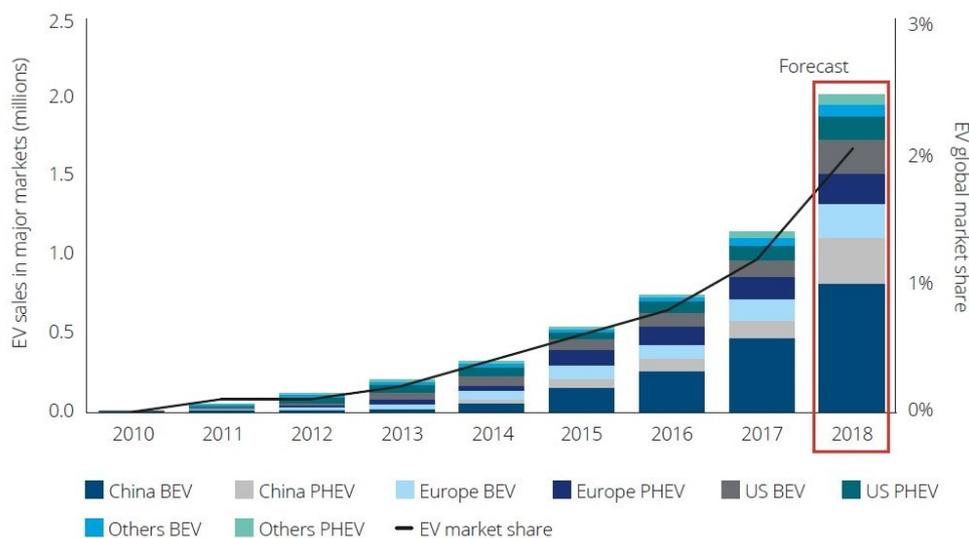
Ключевые слова: системный анализ, проектирование, автоматизированное проектирование, топологическая оптимизация, электротранспорт, электробайк.

Abstract. Electric transport market analysts predict a rapid increase in the popularity of this industry. In connection with the rapid development of the transport industry, the introduction of new most relevant technologies in the design process of carcass structures of modern vehicles is required. The use of topological optimization methods can significantly speed up and simplify the design process, as well as increase the accuracy of calculations. To introduce this technology into the design process, it is necessary to develop a special design development algorithm by conducting a system analysis of design decisions. As a project, an electric bike frame was developed. A system analysis is carried out and a design algorithm is developed that reflects the relationship between the choice of design decisions and the required parameters of the final product.

Keywords: system analysis, designing, computer-aided design, topological optimization, electric transport, electric bike.

Актуальность разработок транспорта, работающего на электротяге растет с каждым днем. Электродвигатели экономичны, безопасны для окружающей среды, имеют высокую мощность и малый вес, а также просты в устройстве. С 2010 года крупные мировые концерны Renault-Nissan, GM, Mitsubishi, Ford и др. приступили к серийному производству легковых автомобилей на электротяге. Популяризация и массовый запуск электротранспорта является очень серьезным вызовом для энергетической отрасли. Аудиторско-консалтинговая компания «большой четверки» Deloitte опубликовала исследование «Электромобили. Новые рынки. Новые игроки. Новые вызовы». В работе речь идет о тенденциях развития электрического транспорта, точнее – электромобилей, имеющих в своем составе электродвигатель и блок аккумуляторов (Battery Electric Vehicles) [2]. В своем докладе компания опубликовала график статистики продаж электромобилей в разных странах с 2010 по 2017 гг., а также прогноз на 2018 г.

Figure 1. EV annual passenger car and light duty vehicle sales in major regions



Source: International Energy Agency (IEA), IHS Markit

Рис. 1. Статистика продаж электромобилей

В 2018 году производство электромобилей действительно достигло рубежа, когда во всем мире было продано около 2 миллионов единиц. К 2030 году Deloitte прогнозирует увеличение на 950% до 21 млн.

Исходя из имеющейся статистики, можно сделать вывод о том, что на данном этапе стремительного развития индустрии электротранспорта наиболее актуальны исследования в сфере проектирования данного вида техники.

Существующие на сегодняшний день исследования в сфере разработки каркасов подобных транспортных средств имеют высокую научную и практическую важность. Тем не менее данная тема недостаточно подробно раскрыта, а имеющиеся знания мало систематизированы. Для получения более подробных и систематизированных знаний требуется разработать особый алгоритм проектирования, основанный на зависимости желаемых требований к конструкции от ее конструктивных параметров.

Объектом для изучения была выбрана разработка конструкции байка с электродвигателем.

Для систематизации и описания этапов проектирования и вариантов проектных решений была выбрана методология функционального моделирования IDEF0.

При помощи данного метода была разработана функциональная модель, позволяющая более просто произвести системный анализ проектных решений при проектировании рамы электробайка.

Особенностью данной методологии является использование методов автоматизированной топологической оптимизации. Данная технология позволяет получить наиболее оптимальную геометрию, опираясь на заданные проектировщиком граничные условия.

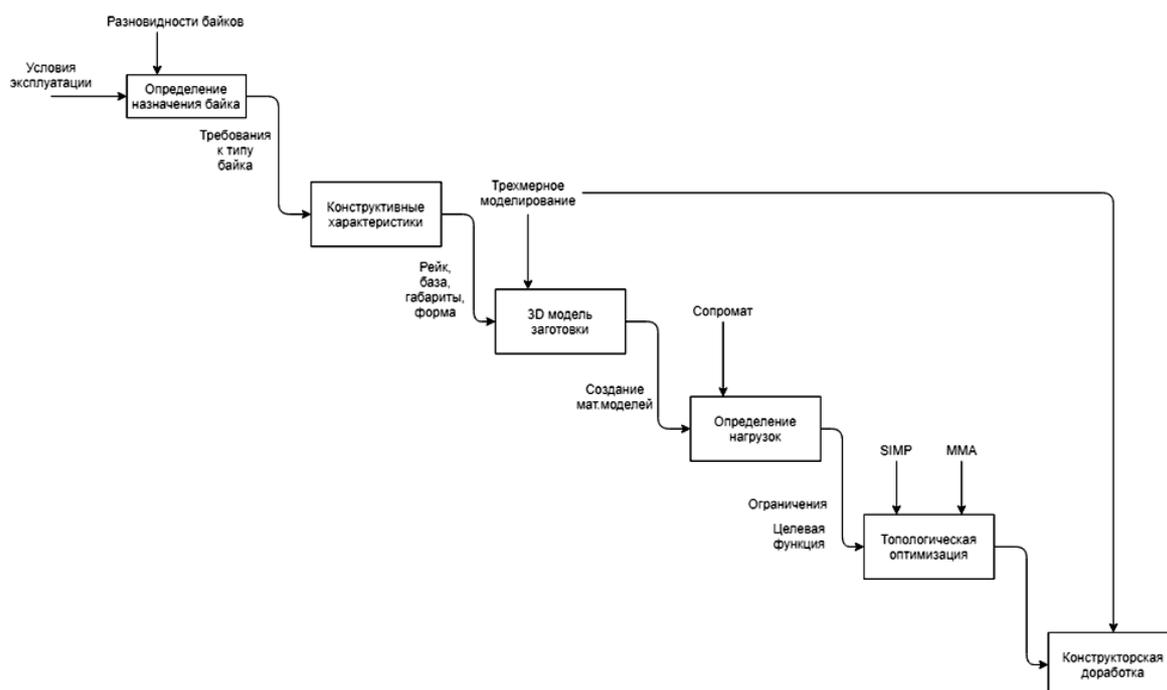


Рис. 2. Процесс проектирования рамы мотоцикла с использованием ТО

Далее разобраны основные процессы описанные в приведенной графической нотации.

- *Определение назначения байка.* От назначения байка зависит определение величин нагрузок, а также конструктивные параметры. Каждый вид байка адаптирован под определенные условия и предусматривает конкретный набор характеристик, а также имеет особый запас прочности и уникальную конструкцию. Для данного пункта была составлена отдельная графическая нотация, систематизирующая основные типы мотоциклов.

- *Конструктивные характеристики.* Определение требуемых характеристик (таких как управляемость, прочность, аэродинамика, эргономика и др.) дает представление о нужных параметрах конструкции, таких как рейк, длина колесной базы, величина габаритов, форма.

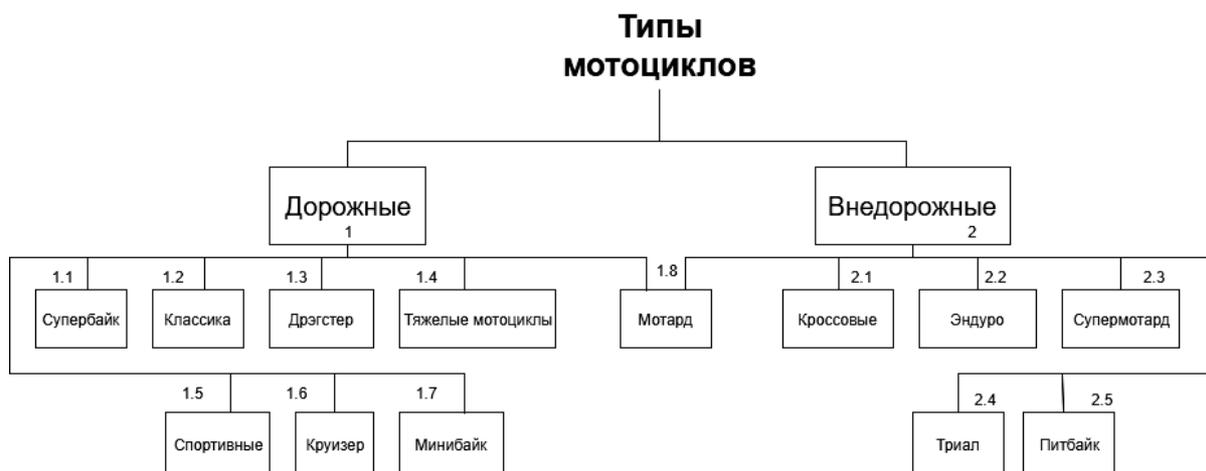


Рис. 3. Основные типы мотоциклов

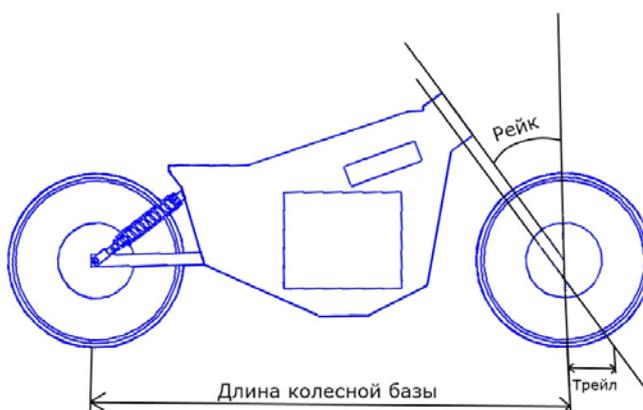


Рис. 4. Основные параметры мотоцикла, зависящие от конструкции рамы

- *3D-модель монолитной конструкции.* Для дальнейшей оптимизации геометрии требуется создать заготовку. 3D-модель заготовки представляет собой геометрию, построенную на основе выбранных нами конструктивных параметров и ограниченную снаружи только выбранной нами формой (рис. 5). В случае наличия ограничений в выборе места расположения внутренних компонентов и механизмов могут быть ограничения геометрии и внутри конструкции. Все заполненное пространство предназначено для дальнейшей оптимизации.

- *Определение максимальных нагрузок.* На данном этапе следует составление задач по определению влияния сил на конструкцию. Число задач будет зависеть от количества подобранных условий нагрузок для определенного вида байка (падения в различных положениях, торможение, резкий поворот, удары колесами и др.). Целью этих задач является определение величины и направления действия сил в точках конструкции.

Наиболее универсальной можно считать задачу для расчета классических байков: определяют величину силы G составленной из полного веса мотоцикла и водителя за вычетом веса колес и передней вилки (в среднем этот вычет составляет 35 кг). Для учета динамической нагрузки, полученная разность увеличивается втрое [1].

$$G' = 3(G - 35). \quad (1)$$

Сила G' воздействует на центр тяжести рамы.

Коэффициент 3, которым учитывается соотношение статической и динамической нагрузок, принят по следующим основаниям. Прогиб пружин передней вилки в статическом состоянии не превышает обычно 2...3 см. При ударах, возникающих во время езды по плохой дороге, этот прогиб увеличивается иногда на 5...6 см. Так как сжатие пружин можно считать пропорциональным нагрузке, то отсюда и следует, что динамическая нагрузка превышает статическую приблизительно в 3 раза [1].

Современные методы расчетов позволяют получить более точный результат, задав действия сил в различных областях отдельно (рис. 5)

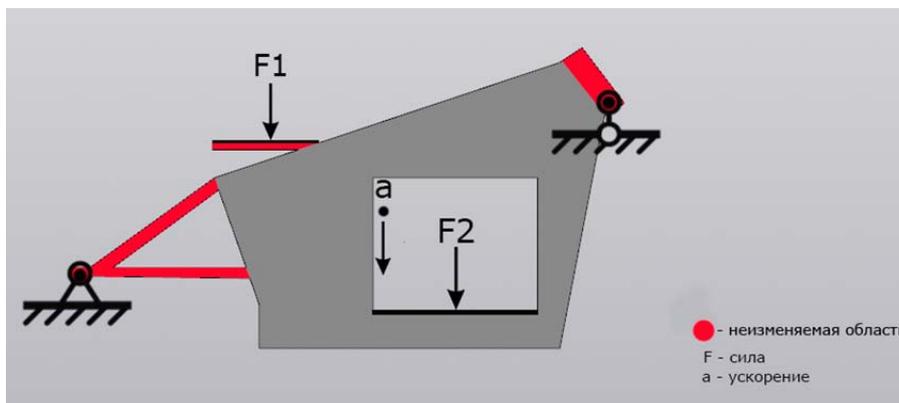


Рис. 5. Условия задачи ТО

Так была приложена увеличенная втрое нагрузка на сидение ($F1$) и на место размещения блока аккумуляторов ($F2$) отдельно от G' рамы. Сила G' рамы была задана в виде ускорения (a), чтобы исключить погрешность в нахождении центра масс. Его величина составила $29,42 \text{ м/с}^2$ и найдена по формуле

$$a = \frac{F}{m}, \quad (2)$$

где F – сила, действующая от увеличенного втрое веса рамы; m – средняя масса рам подобного типа с иными элементами конструкции взятая за 80 кг. Сила $F1$ равна 300 кгс, так как средний вес человека с учетом наличия элементов экипировки, а также дополнительного груза как правило составляет 100 кг. В данной конструкции пассажирские места не предусмотрены, поэтому учитывается вес одного человека. Сила $F2$ составляет 90 кгс, так как известен точный вес блока аккумуляторов – 30 кг.

- *Топологическая оптимизация.* Когда стали известны максимальные нагрузки и определены требуемые характеристики конструкции следует этап топологической оптимизации при помощи наиболее распространенного метода SIMP – Solid Isotropic Material with Penalization (метод пенализации для твердого изотропного тела).

Результатом данного этапа является получение равнопрочного объекта в рамках рассматриваемой задачи (рис. 6)

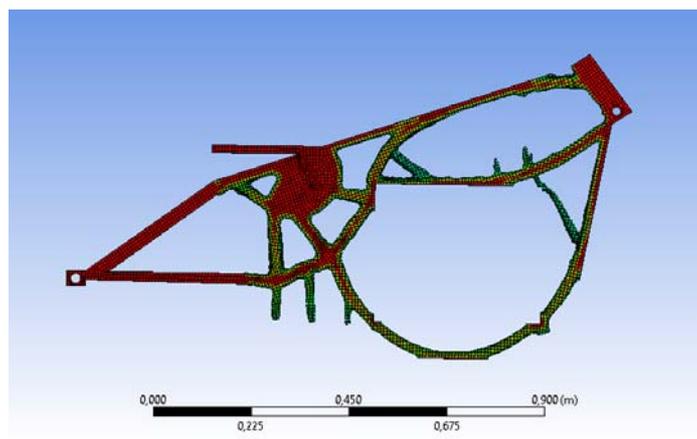


Рис. 6. Геометрия полученная в результате ТО

Вес цельной заготовки составлял 165 кг 900 г. Проведение топологической оптимизации позволило уменьшить вес до 67 кг 997 г без заметной потери прочности.

- *Конструкторская доработка.* Геометрия, полученная в результате топологической оптимизации не может являться конечным результатом проектирования, т.к имеет «заусенцы» (рис. 6), оставшиеся в результате подбора оптимального диапазона плотности для сохраняемых элементов сетки модели, а также имеет неровную поверхность, нуждающуюся в конструкторской доработке.

Конструкторская доработка заключается в адаптации полученной геометрии для дальнейшего изготовления и сборки. На этом этапе требуется переработать полученную трехмерную модель, предав форму, адаптированную для производства (рис.7).

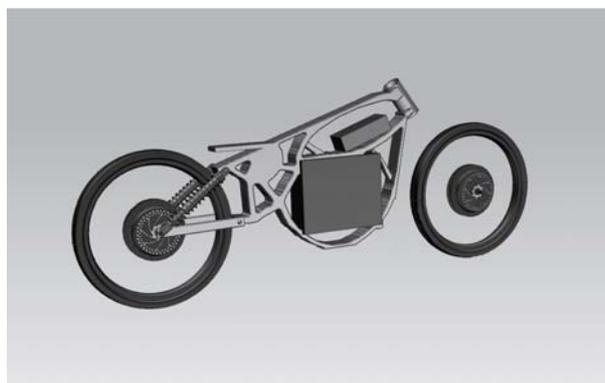


Рис. 7. Результат конструкторской доработки рамы в сборке

В случае переработки каркаса из цельного в трубчатый или профильный необходимо провести прочностной расчет модели/сборки для определения изменения прочностных характеристик после переработки.

Разработанный алгоритм проектирования дает понимание о взаимосвязях различных параметров, влияющих на результат и порядке их определения.

Список использованных источников

1. **Иерусалимский, А. М.** Теория, конструкция и расчет мотоцикла / А. М. Иерусалимский. – 1947. – С. 358 – 362.

УДК 519.816

Черемисин А. П., Карпов С. В., Хрусталев Р. В., Бочарова А. Н.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

(Тел. 89106584528, e-mail: pozhiloy.chelovek@yandex.ru),

Детский технопарк «Кванториум», Россия, г. Тамбов

(Тел. +7(4752) 72-13-71, e-mail: kvantorium68@yandex.ru)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАМЫ ЭЛЕКТРОБАЙКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Cheremisin A. P., Karpov S. V., Khrustalev R. V., Bocharova A. N.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

(Tel. 89106584528, e-mail: pozhiloy.chelovek@yandex.ru),

Children's Technopark “Quantorium”, Russia, Tambov

Tel. +7(4752) 72-13-71, e-mail: kvantorium68@yandex.ru)

ELECTRIC BIKE FRAME DESIGN USING TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS

Аннотация. Современные виды транспортных средств нуждаются в наиболее точных и быстрых методах проектирования. Автоматизация данного процесса является важнейшим условием в развитии отрасли машиностроения. Одним из наиболее эффективных и актуальных способов автоматизации проектирования является метод топологической оптимизации. Для проверки эффективности данного способа и поиска дальнейших направлений развития технологий автоматизированного проектирования была осуществлена разработка рамы электробайка с использованием методов топологической оптимизации, а также проведено испытание полученной модели. Результатом произведенных исследований стало подтверждение эффективности метода топологической оптимизации и выявление потребности в автоматизации конструкторской доработки полученной конструкции.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, проектирование, топологическая оптимизация, электробайк, экотранспорт

Abstract. Modern types of vehicles need the most accurate and rapid design methods. Automation of this process is the most important condition in the development of the mechanical engineering industry. One of the most efficient and up-to-date ways to automate design is through topological optimization. In order to check the effectiveness of this method and to find further directions of development of automated design technologies, the electric bike frame was developed using topological optimization methods, as well as the obtained model was tested. The result of the research was confirmation of the effectiveness of the topological optimization method and revealed the need to automate the design improvement of the obtained design.

Keywords: the automated design, design, topological optimization, the electrobike, ecotransport.

Одной из наиболее актуальных задач при создании транспорта с электродвигателем является снижение энергозатрат, позволяющее повысить эффективность использования ресурсов блока аккумуляторов. Целесообразным в данном случае является уменьшение массы конструкции при сохранении прочностных характеристик. Для решения этой задачи предлагается использовать современные методы топологической оптимизации (ТО).

Для решения задач ТО конструкций часто применяется SIMP-метод (Solid Isotropic Material with Penalization, метод пенализации для твердого изотропного тела) [2]. Идея метода заключается в создании поля виртуальной плотности, представляющей аналог некоторой реальной характеристики объекта. Вся область модели разделяется на отдельные элементы и для каждого из них рассчитывается показатель плотности величиной от 0 до 1. Ставится задача перераспределения материала в рассматриваемой области при сохранении податливости системы при известных граничных условиях [1].

Начальная геометрия рамы электробайка при решении задачи выглядит следующим образом (рис. 1).

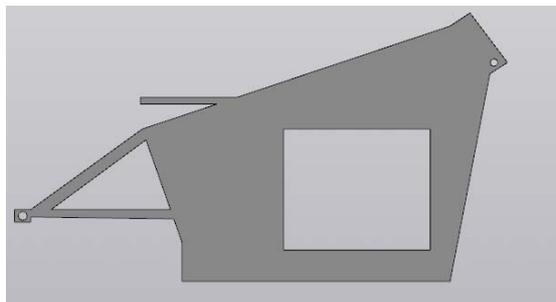


Рис. 1. Вид начальной геометрии конструкции рамы

В качестве метода решения задачи ТО используется метод подвижных асимптот (ММА) [4]. Преимуществом данного метода является возможность решения задач с сотнями и даже тысячами проектных переменных с довольно малым увеличением затрат на вычисления по мере увеличения числа переменных [2]. Полученное поле относительной плотности материала представлено на рис. 2

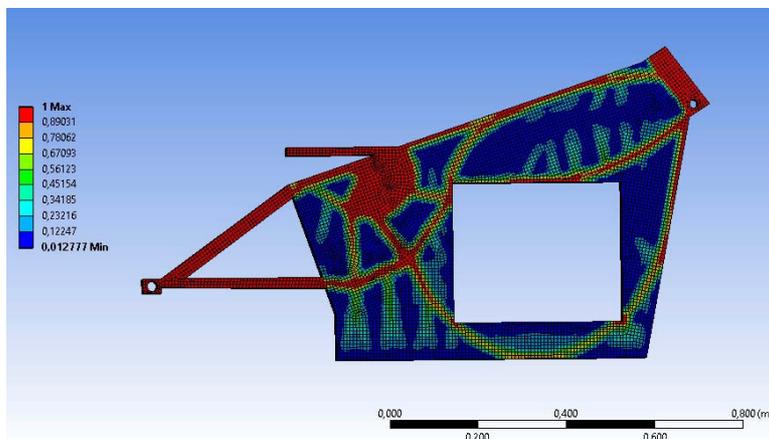


Рис. 2. Поле плотности элементов сетки модели

Интерпретируя результаты расчета, в качестве геометрии рамы электробайка используем распределение материала, представленное на рис. 3.

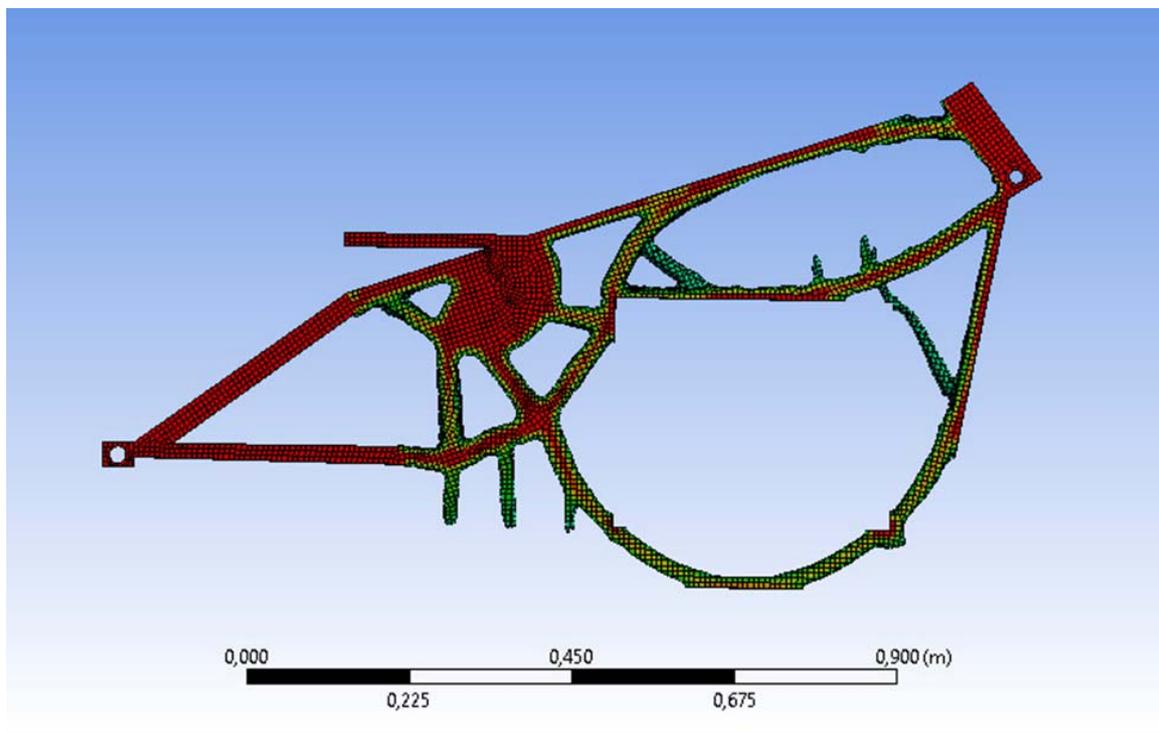


Рис. 3. Геометрия, полученная в результате ТО

ТО рамы электробайка позволила уменьшить вес конструкции со 165,9 кг до 67,9 кг без изменения прочностных характеристик.

Для выявления особенностей полученной конструкции было проведено испытание модели рамы, изготовленной из пластика по технологии послойного наплавления FDM. Была использована испытательная машина Testometric M350-5AT. В конструкцию рамы были внесены изменения: создана имитация маятника и вилки руля, которые в процессе испытания служили опорами (рис. 4).

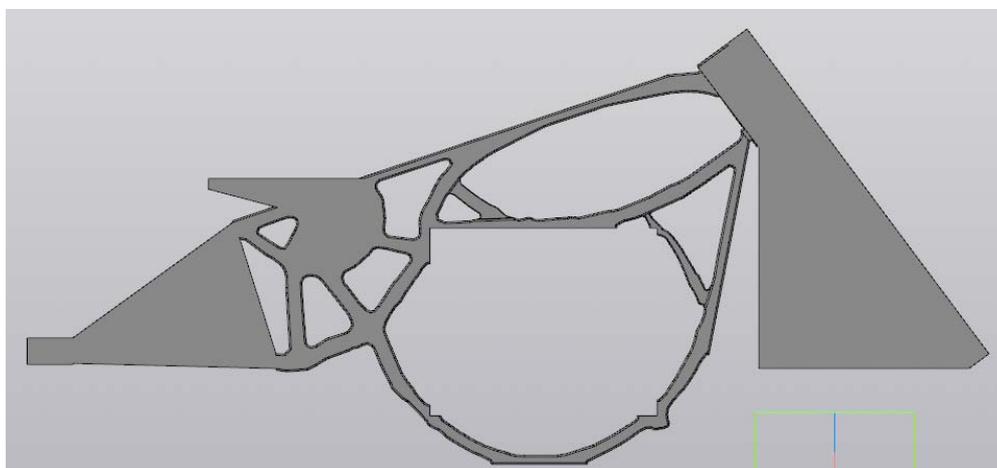


Рис. 4. Модель рамы для установки на испытательную машину

Раму размещали на базе 228 мм (рис. 5). Скорость испытаний 1мм/мин.



Рис. 5. Начало испытания рамы

Перемещение нагружающего ролика осуществлялось до потери прочности конструкции. Оценивая характер разрушений модели рамы (рис. 6) можно отметить отсутствие поперечных разрушений.

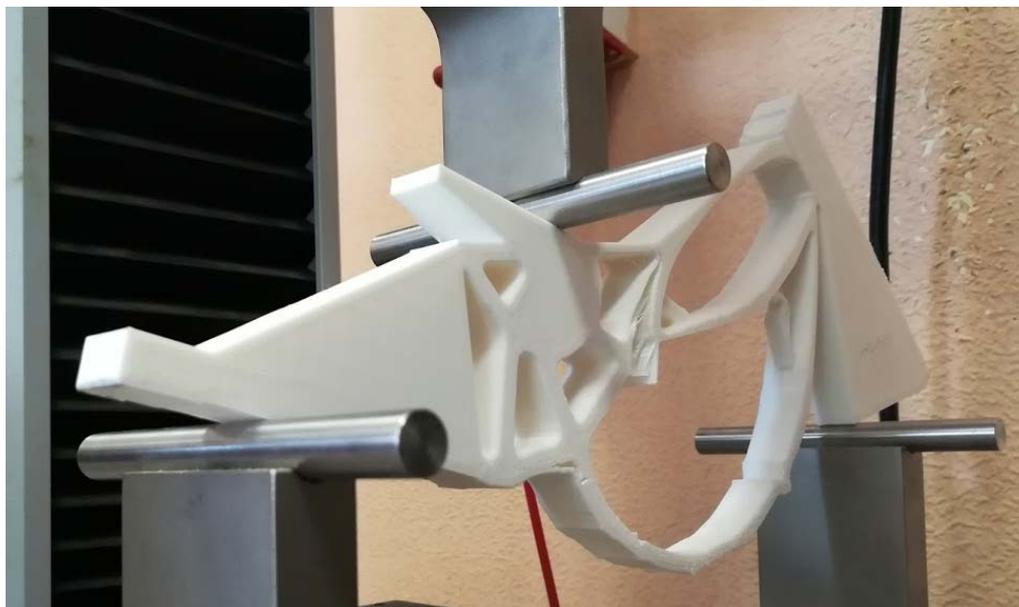


Рис. 6. Разрушенная в результате испытания рама

На рисунке 7 представлены снятые в ходе эксперимента зависимости усилия на нагружающем ролике от его перемещения для исследуемого образца. Резкие умень-

шения величины нагрузки при перемещениях 7.6-7.7 11.7-12, и др. свидетельствуют о разрушениях узлов конструкции. Можно сделать вывод, что конструкция разрушилась при приложении силы, равной 277 Н. Большое количество локальных экстремумов кривой говорит о разрушении внутренней структуры изделия.

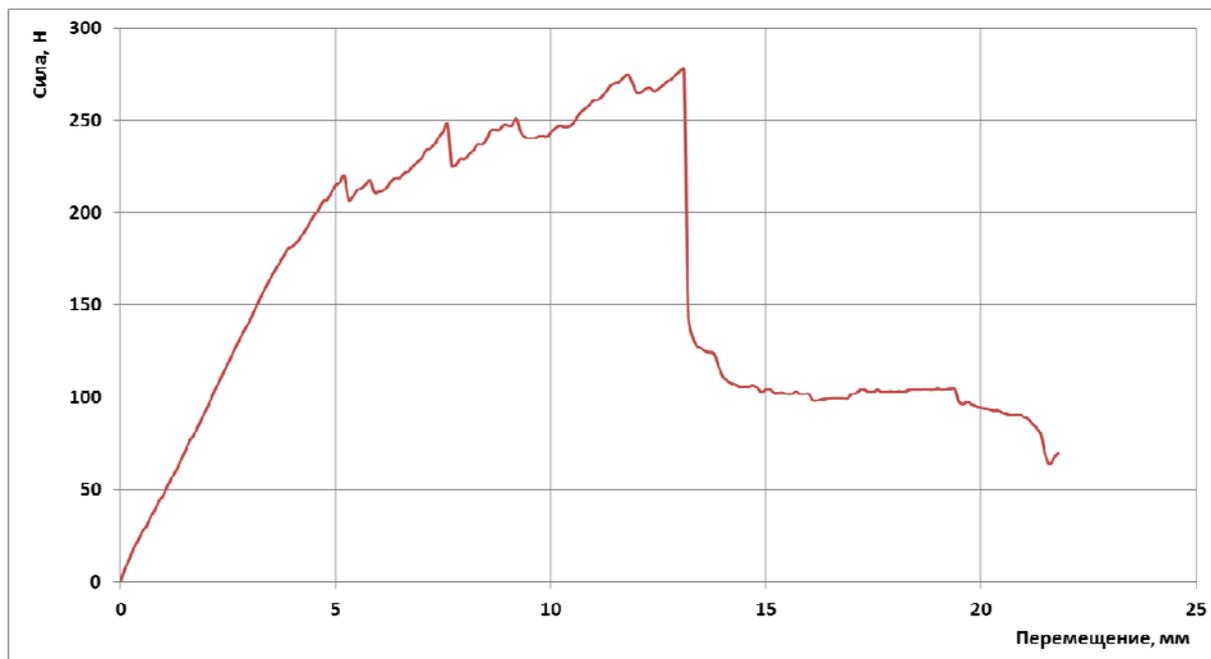


Рис. 7. Результаты трехточечного изгиба рамы

Найденная в ходе решения задачи ТО конструкция рамы соответствует требуемым параметрам жесткости, при значительном снижении массы. Следует отметить, что такая геометрия малопригодна для внедрения ввиду сложности изготовления. Поэтому конструкторская проработка полученных результатов имеет важное практическое значение. Это является одним из направлений дальнейшей работы при проектировании новых несущих конструкций электротранспорта.

Список использованных источников

1. **Bendsøe, M. P.** Optimal shape design as a material distribution problem / M. P. Bendsøe // Struct. Optim. – 1989. – Т. 1, № 4. – С. 193 – 202.
2. **Bendsøe, M. P.** Topology optimization by distribution of isotropic material / M. P. Bendsøe, O. Sigmund. – 2004.
3. **Svanberg, K.** A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations / K. Svanberg // Soc. Ind. Appl. Math. – 2002. – V. 12, № 2. – P. 555 – 573.

УДК 62-529

Шурыгина Э. В.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89204857658, e-mail: feder68@mail.ru)

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РЕМОНТА ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Shurugina E. V.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89204857658, e-mail: feder68@mail.ru)

FEATURES OF FUNCTIONING AND REPAIR OF TECHNIQUES OF SPECIAL PURPOSE

Аннотация. Рассматриваются особенности функционирования и ремонта техники специального назначения, оценка технического состояния техники специального назначения, приводятся характеристики способов проверки работоспособности, представлена функциональная модель ремонта.

Ключевые слова: ремонт техники, способы проверки работоспособности, техника специального назначения.

Abstract. This article discusses the features of the functioning and repair of special-purpose equipment, the assessment of the technical condition of special-purpose equipment, provides the characteristics of the methods for checking operability, presents a functional repair model.

Keywords: repair of equipment, methods of checking operability, special-purpose equipment.

Вооруженные силы РФ представляют собой вооруженную организацию государства, созданную для защиты его суверенитета и территориальной целостности в случае агрессии или войны. Особую роль в них играет техника специального назначения, предназначенная для ведения и обеспечения боевых действий, обучения войск и обеспечения заданного уровня ее готовности к использованию по назначению.

Современная техника специального назначения является большой и сложной системой. Эффективность ее использования по целевому назначению в повседневной жизнедеятельности и боевого применения определяется не только тактико-техническими характеристиками, но и профессионализмом и выучкой личного состава, эксплуатирующего, обслуживающего и ремонтирующего технику специального назначения.

Любая техника при высоких тактико-технических характеристиках, может быть не эффективной, если при ее эксплуатации не будут реализовываться полностью или при обслуживании будут ухудшаться. Поэтому необходимо научно обосновывать требования не только к техническим, но и эксплуатационным свойствам техники специ-

ального назначения и поддержанию требуемого уровня во всех ситуациях деятельности войск. На сегодняшний день это особенно важно, когда у государства стоят задачи строительства Вооруженных Сил РФ, отвечающие требованиям XXI века.

Представителем техники специального назначения является Урал – 4320. Он отлично зарекомендовал себя в непростых условиях Афганистана, в горах Северного Кавказа, астраханских песках, безводных степях Калмыкии и в условиях высокогорного разреженного воздуха Приэльбрусья. В отрасли военного автомобилестроения «Торнадо-У» закрепил успех грузовика в качестве спецтехники многоцелевого назначения. Его база стала основой для создания целой линейки армейского автотранспорта грузоподъемностью от 6 до 30 тонн, в которую входят не только грузовые автомобили, также присутствует техника, конструктивно приспособленная для монтажа военного оборудования и оружия. Безопасность водителя и двух пассажиров находится под надежной защитой системы скрытого бронирования, которой оснащена кабина грузовика. Комплект дополнительной защиты соответствует пятому классу, согласно которому бронебойные пули калибра 7,62 мм, выпущенные из АКМ с расстояния до 5 – 10 метров, не смогут причинить большого вреда. Для защиты двигателя предусмотрена установка бронекапсулы. Под днищем сконструирована специальная противоминная защита. Урал-4320 продолжает оставаться незаменимым и в мирной жизни. Отдаленные регионы нуждаются в совершенном грузовике, конструкция которого способна противостоять интенсивной эксплуатации в рискованных для любой другой техники условиях.

Особенности и преимущества Урала-4320, предопределяющие его опережающее развитие, связаны с мобильностью и гибкостью доставки грузов и пассажиров «от двери до двери», «точно в срок» и соблюдением расписания. Эти свойства Урала-4320 определяются уровнем его работоспособности и техническим состоянием, зависящими, от надежности конструкции автомобиля и от мер по обеспечению его работоспособности в процессе эксплуатации.

Поддержание Урала-4320 в работоспособном состоянии обеспечивается при:

- рациональных затратах трудовых и материальных ресурсов;
- нормативных уровнях дорожной и экологической безопасности;
- нормативных условиях труда специалистов ремонтной роты.

Основное назначение технического обслуживания – 1 – снижение интенсивности изнашивания деталей, выявление и предупреждения отказов и неисправностей путем своевременного выполнения контрольных, диагностических, крепежных, регулировочных, смазочных и других работ. Техническое обслуживание – 1 обеспечивает безотказную работу подвижного состава в пределах установленных периодичностей по воздействиям, включенным в обязательный перечень операций

Периодичность технического обслуживания. Техническое обслуживание – 1 выполняется через каждые 4000 км пробега и корректируется в зависимости от категории условий эксплуатации автомобиля и климатических районов согласно ГОСТ 21624 – 81 и Положению о техническом обслуживании и ремонте подвижного

состава автомобильного транспорта. На рисунке 1 приведена функциональная модель ремонта Урала-4320, на основе которой планируется к разработке информационно-логическая модель принятия решений при проведении ремонтных работ.

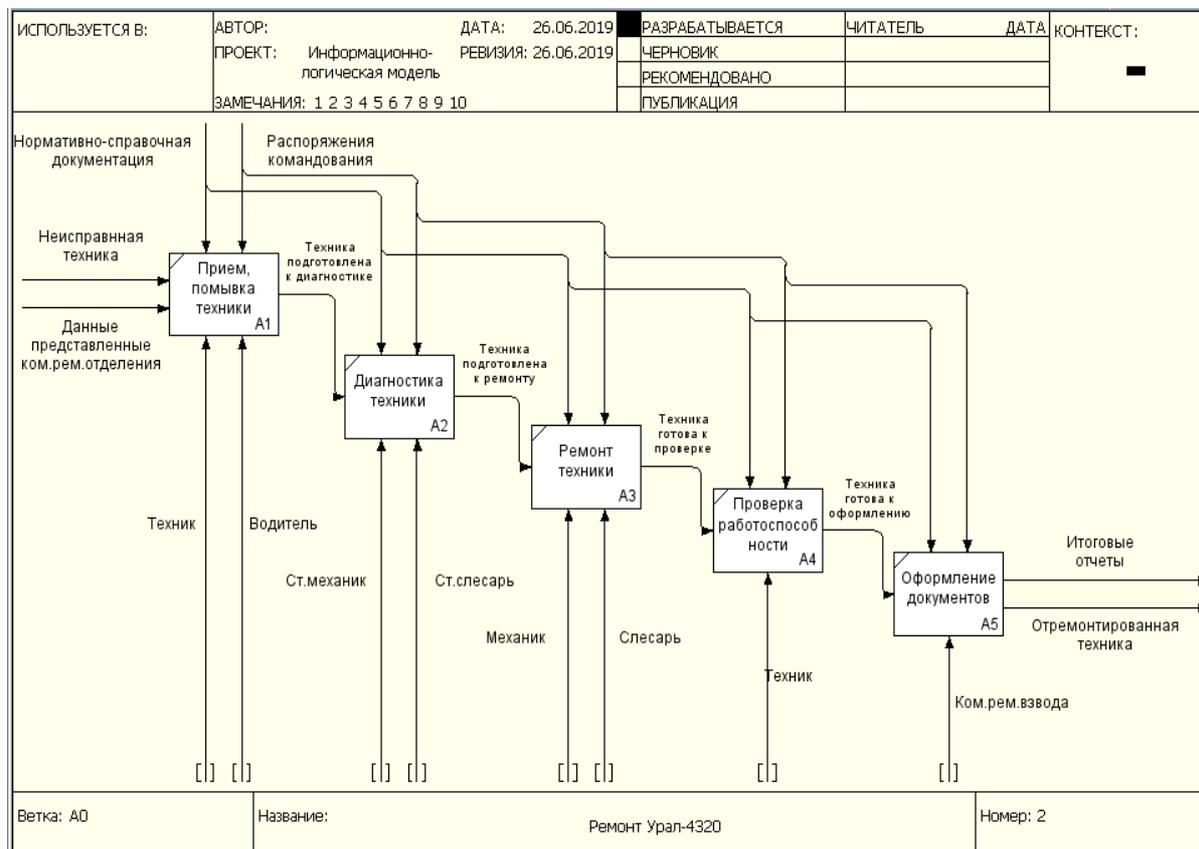


Рис. 1. Функциональная модель ремонта Урала-4320

Из функциональной модели ремонта Урала-4320 видно, что для эффективной ее работы необходимо объединение многих функций таких, как снабжение, хранение, ремонт (обслуживание), обучение (повышение квалификации) специалистов.

Список использованных источников

1. **Степшин, М. Л.** Особенности технического обеспечения российских войск в локальных войнах и вооруженных конфликтах / М. Л. Степшин // Военная мысль. – 2008. – № 11. – С. 28 – 34.
2. **Шурыгина, Э. В.** Методика проверки работоспособности специальной техники / Э. В. Шурыгина ; под общ. ред. В. А. Немтинова // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики – 2018 : IV Всерос. открытый конкурс студентов ВУЗов и молодых исследований. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018.
3. **Немтинов, В. А.** Применение теории нечетких множеств и экспертных систем при автоматизированном выборе элемента технической системы / В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, П. И. Пахомов // Информационные технологии. – 2009. – № 10. – С. 34 – 38.

4. **Мокрозуб, В. Г.** Процедурные и информационно-логические модели планирования выпуска продукции и ремонтов технологического оборудования многоассортиментных производств / В. Г. Мокрозуб, С. Я. Егоров, В. А. Немтинов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 2. – С. 72 – 76.

5. **Немтинов, В. А.** Использование системы моделирования динамических процессов для оперативного управления промышленным производством / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 7.

6. **Пахомов, П. И.** Технология поддержки принятия решений по управлению инженерными коммуникациями / П. И. Пахомов, В. А. Немтинов. – М., 2009.

7. **Немтинов, В. А.** Использование интернета при информационной поддержке принятия решений по управлению промышленным предприятием / В. А. Немтинов, А. М. Манаенков, В. В. Морозов, Е. С. Егоров // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28) – С. 8 – 12.

8. **Устройство** военной автомобильной техники [Электронный ресурс]. – URL : <https://infopedia.su/3x782c.html>

9. **Торнадо** перевозка [Электронный ресурс]. – URL : <https://perevozka24.ru/news/voennye-doverili-uralu-pushechnuyu-nadstroyku> [Электронный ресурс]. – URL : http://moskva.ural-servis.ru/shop_ural/?_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTsxNTIwNzIxMzs0ODU5NzM2NDY3O2h1bHBpa3Mub3JnOmd1YXJhbnRlZQ&yclid=3868811327131915642

УДК 628.3

**Новиков А. Е.^{1,2,3}, Филимонов М. И.^{1,2}, Ламскова М. И.¹,
Поддубский А. А.³, Чамурлиев Г. О.³**

¹Волгоградский государственный технический университет, Россия, г. Волгоград

²Всероссийский НИИ орошаемого земледелия, Россия, г. Волгоград

³Российский университет дружбы народов, Россия, г. Москва
(Тел. +79275137065, e-mail: novikov-ae@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

**Novikov A. E.^{1,2,3}, Filimonov M. I.^{1,2}, Lamskova M. I.¹,
Poddubskiy A. A.³, Chamurliiev G. O.³**

¹Volgograd State Technological University, Russia, Volgograd

²All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Russia, Volgograd

³Peoples' Friendship University of Russia, Russia, Moscow
(Tel. +7 9275137065, e-mail: novikov-ae@mail.ru)

MODELING OF ENZYMATIC WASTE WATER TREATMENT

Аннотация. Скорость протекания процессов биологической очистки сточных вод и обработки иловых осадков связана с ферментативной активностью бактериальных клеток, осуществляющих биodeградацию загрязнений. В микропузырьковой среде в условиях мезофильного процесса – температура 40 °С и pH = 7 ед. – наблюдается максимальная активность ферментов. Для ускорения биохимической трансформации загрязняющих веществ разработан ферментно-кавитационный метод, в основе которого заложено стимулирование ростовых процессов микроорганизмов в биореакторах кавитацией низкой и высокой интенсивности, создаваемой турбоджетам. Установлено, что качество и продолжительность обработки иловых осадков зависит от давления субстрата на входе в оксиджеты. Доказано, при давлении $p = 0,30...0,35$ МПа время обработки осадка до стабилизации ХПК на уровне 16% составляет 8 часов. Микроскопическими исследованиями установлено, что переработанный субстрат это скопление микроорганизмов с суммарной поверхностью до 100 м² на 1 грамм сухого вещества, обеспечивающее ему высокие сорбционные свойства по отношению к влаге.

Ключевые слова: сточные воды, иловой осадок, биологическая очистка, ферментация, кавитация, биореактор, ресурсоэффективность, органическое удобрение.

Annotation. The rate of biological wastewater treatment and sludge treatment processes is associated with the enzymatic activity of bacterial cells that carry out biodegradation of contaminants. In a microbubble medium under the conditions of a mesophilic process, the temperature is 40 °С and pH = 7 units – maximum enzyme activity is observed. To accelerate the biochemical transformation of pollutants, an enzyme-cavitation method has been developed, which is based on the stimulation of growth processes of microorganisms in bioreactors by low and high intensity cavitation created by turbojets. It has been established that the quality and duration of sludge treatment depends on the pressure of the substrate at the entrance to the oxidizing jets. It has been proven that at a pressure $p = 0.30...0.35$ МПа, the processing time of the sludge

before stabilization of the COD at 16% is 8 hours. Microscopic studies found that the processed substrate is an accumulation of microorganisms with a total surface of up to 100 m² per 1 gram of dry matter, providing it with high sorption properties with respect to moisture.

Keywords: wastewater, silt sediment, biological treatment, fermentation, cavitation, bioreactor, resource efficiency, organic fertilizer.

Введение. Принцип работы типовых станций очистки сточных вод основан на аэробных или анаэробных принципах биологического воздействия на органические компоненты поступающих стоков. Такие очистные сооружения занимают большие площади, характеризуются высокой энергоемкостью компрессорного хозяйства и экологически небезупречны [1 – 3].

Процесс аэробной деструкции органических веществ сопровождается удалением соединений азота, который в сточных водах находится в виде ионов аммония. Окончательно процесс нитрификации выражается уравнением:



т.е. реакции протекают под действием кислорода.

На развитие и жизнедеятельность микроорганизмов, в том числе ферментов, которые расщепляют молекулы органических веществ, благоприятное воздействие оказывает микрокавитационная или микропузырьковая среда. При температуре $t \leq 0$ °C и $t \geq 80$ °C ферменты не проявляют признаков жизнедеятельности, а их максимальная активность фиксируется при $t \approx 40$ °C (рис. 1), т.е. находится в диапазоне температур мезофильного процесса, и pH = 7 [2 – 4].

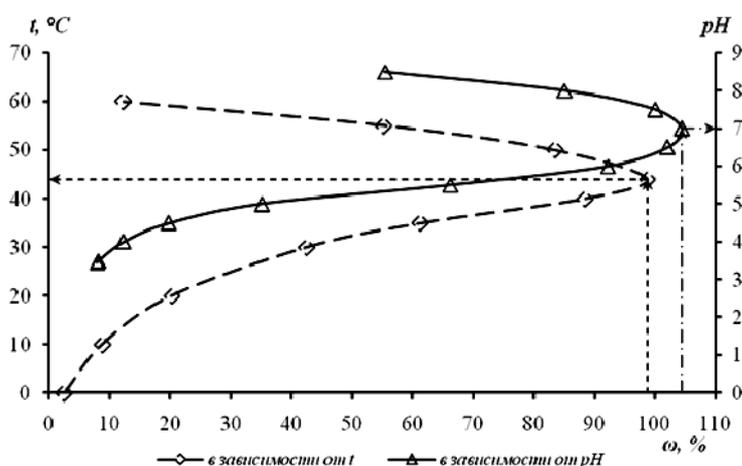


Рис. 1. Активность ферментов ω в зависимости от температуры t и водородного показателя pH

Материалы и методы. Для интенсификации процесса очистки сточных вод и обработки иловых осадков, а также повышения ресурсоэффективности технологии биохимической деструкции загрязнений, поступающих на очистные сооружения, разработан ферментно-кавитационный метод [5 – 7], реализуемый в биореакторах. Принципиальная схема такой установки представлена на рис. 2 [8].

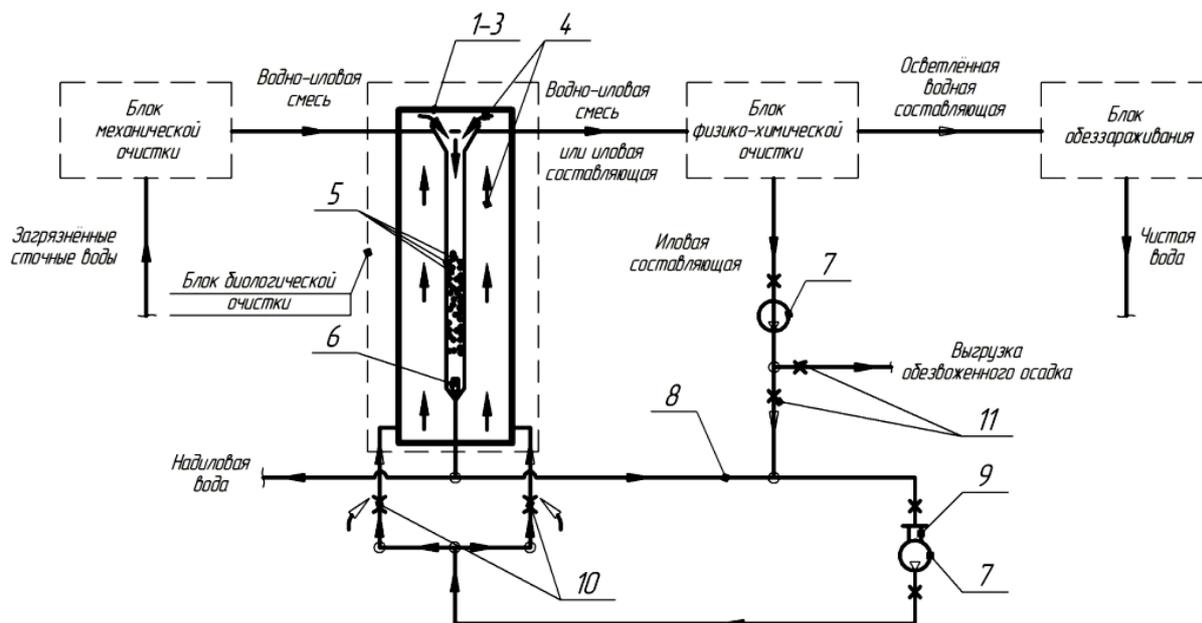


Рис. 2. Схема установки очистки сточных вод

Загрязненные сточные воды пройдя блок механической очистки, включающий улавливание грубо- и мелкодисперсных примесей с использованием процесса гравитационного осаждения, а гидрофобных веществ с использованием процесса флотации, и усреднение сточных вод, включающее обработку кавитацией низкой интенсивности, стимулирующее рост микроорганизмов, попадают в блок биологической очистки. Этот блок включает три автономных аэробно-анаэробных биореактора 1, 2, 3, связанные между собой системой транспорта, которая включает оборудование для перемещения жидкостей и газов 7 с необходимыми трубопроводами 8, укомплектованными турбоджетами 9 и оксиджетами 10, запорно-регулирующую арматуру с контрольно-измерительными приборами 11.

Реакторы представляют собой вертикально расположенные колонные аппараты, в которых происходит сорбция и окисление водно-иловой смеси в биоценозе активного ила и на биопленке, иммобилизованной на носителях 5. В каждом реакторе формируется свой биоценоз активного ила и биопленки, отличающийся от предыдущего более широким видовым составом.

Биоочистка сопровождается не менее чем двукратной (в зависимости от степени загрязнения сточных вод) рециркуляцией водно-иловой смеси через каждый реактор и последовательным ее перетоком из реактора в реактор. В процессе рециркуляции водно-иловой смеси по трубопроводам в реакторах достигается насыщение водно-иловой смеси воздухом.

Водно-иловый поток в реакторах движется по восходяще-нисходящей траектории 4, сначала обтекает внешнюю зону реакторов (восходящая ветвь), а затем опускается вниз по центральной части реакторов (нисходящая ветвь) и проходит через биопленку, иммобилизованную на носителях. Смешение активного ила с водно-иловой

смесью происходит последовательно в восходяще-нисходящем потоке путем его турбулизации.

Восходящие ветви потока более обогащены кислородом, чем внутренние, что создает возможность протекания поочередно процессов нитрификации и денитрификации, при которых окисляющий загрязнение биоценоз сначала поглощает кислород из водно-иловой смеси, а затем интенсивно его расходует на окисление загрязнений.

После блока биологической очистки водно-иловая смесь, содержащая вспухший активный ил, поступает в блок физико-химической очистки на стадию разделения водно-иловой смеси на составляющие с использованием не менее чем двухступенчатого (в зависимости от количества вспухшего активного ила) процесса отстаивания и флокуляции. Осветленная водная составляющая отводится в блок обеззараживания с использованием традиционных методов, а иловая составляющая при достижении критического объема разделяется на два потока:

1) первый поток – от 10 до 15% иловой составляющей возвращается в реактор 1 для осуществления процесса регенерации путем не менее чем двукратной циркуляции в условиях аэрации оксиджетами и кавитационной обработки низкой интенсивности турбоджетами;

2) второй поток – от 85 до 90% иловой составляющей возвращается в реактор 3 для осуществления процесса лизиса путем не менее чем трехкратной циркуляции в условиях аэрации оксиджетами и кавитационной обработки низкой и высокой интенсивности турбоджетами.

Для процессов регенерации и лизиса соответствующих потоков иловой составляющей реакторы 1 и 3 изолируются на время их протекания, а процесс биологической очистки останавливается.

В процессе лизиса иловой составляющей в реакторе 3 за счет кавитации оболочки микроорганизмов разрушаются и выделяются ферменты, которые и обеспечивают работу живой микрофлоры в реакторе 3. После не менее чем трехкратной циркуляции в условиях аэрации оксиджетами и кавитационной обработки низкой и высокой интенсивности турбоджетами процесс останавливается, при этом величина дегидрогеназной активности достигает своего минимума. Насыщение иловой составляющей воздухом обеспечивает ее всплытие и уплотнение в реакторе 3. Надиловая вода с ферментами за счет большей плотности, чем у иловой составляющей, легко отводится через нижний выход реактора 3 на начальную стадию очистки. Иловая составляющая поступает на стадию обезвоживания блока физико-химической очистки с использованием процесса центрифугирования и прессфилтрования.

Результаты и обсуждение. Качество и продолжительность обработки иловых осадков по ферментно-кавитационному методу существенно зависит от давления субстрата на входе в оксиджеты. На действующей установке варьировали давлением потока на входе в диапазоне 0,20...0,35 МПа (рис. 3). Критерием качества обработки иловых осадков было уменьшение показателя химическое потребление кислорода ХПК до постоянной величины, указывающей на завершение процесса.

Исходное значение ХПК $\approx 100\%$ свидетельствует о прочной связи органики с другими нежелательными компонентами в субстрате. Переработки илового осадка завершается, когда показатель ХПК стабилизируется и составляет $\approx 16\%$ (после сушки до влажности 35...45%). Это достигается при $p = 0,30 \dots 0,35$ МПа после 8 часов обработки. Процесс реализуется и при $p = 0,25$ МПа, но время обработки возрастает до 11 часов.

В ходе статистического анализа [9] экспериментальных данных, представленных на рис. 3, было получено уравнение регрессии, характеризующее зависимость ХПК от времени обработки осадков τ при различном давлении в системе:

$$\text{ХПК} = ae^{b\tau}, \tag{2}$$

где a, b – коэффициенты регрессионного уравнения (табл. 1).

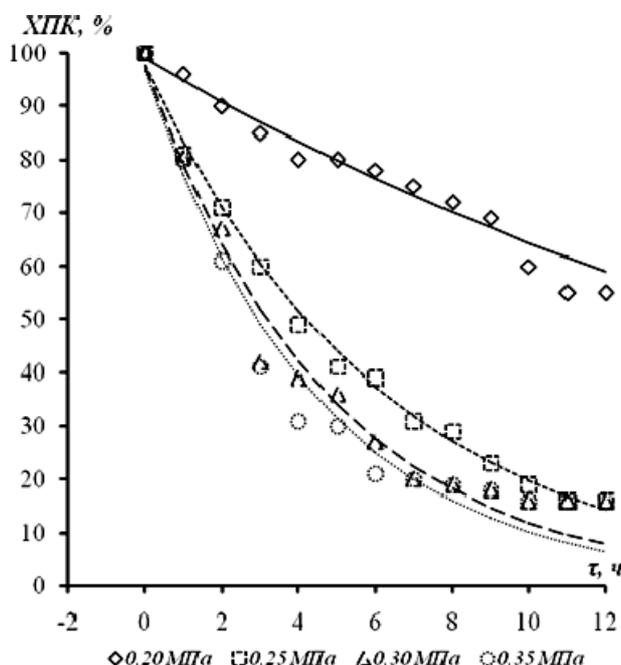


Рис. 3. Изменение ХПК в зависимости от давления и времени обработки илового осадка: маркеры – данные эксперимента; кривые – теоретические данные

Сопоставляя расчетные и критические значения критерия Фишера F (табл. 2) установлено, что полученное регрессионное уравнение адекватно описывает характер изменения ХПК в зависимости от τ .

Установлено, что средняя относительная ошибка $|\bar{\delta}|$ для всех опытов не превышает 6%, а полученные значения коэффициентов корреляции R и детерминации R^2 близки к единице, что свидетельствует о тесной связи между значениями ХПК и τ .

По результатам расчета χ^2 доказано, что зависимость ХПК от времени обработки τ не противоречит закону нормального распределения, а по критерию Кохрена G – влияние случайных факторов на целевую функцию незначительно и гипотеза об однородности дисперсий не отвергается. Гипотеза о значимости коэффициентов регрессии также не отвергается, так как $t_p > t_{кр}$ (табл. 2).

1. Значения и значимость коэффициентов регрессии

Давление <i>p</i> , МПа	Значения коэффициентов		Критерий Стьюдента <i>t</i>		
	<i>a</i>	<i>b</i>	кр.	расч. <i>a</i>	расч. <i>b</i>
0,20	99,0	-0,043	2,05	69704	30,3
0,25	97,7	-0,16	2,05	2870	4,7
0,30	97,4	-0,21	2,05	2068	4,5
0,35	96,5	-0,23	2,05	1877	4,4

2. Результаты статистического анализа регрессии

Давление <i>p</i> , МПа	R^2	<i>R</i>	$ \bar{\delta} $, %	Критерий Пирсона χ^2		Критерий Кохрена <i>G</i>		Критерий Фишера <i>F</i>	
				расч.	кр.	расч.	кр.	расч.	кр.
0,20	0,96	0,98	2,50	1,52	3,84	0,22	0,37	1,23	2,18
0,25	0,99	0,99	1,76	1,75	3,84	0,22	0,37	1,01	2,18
0,30	0,97	0,98	4,90	1,43	3,84	0,16	0,37	1,07	2,18
0,35	0,98	0,99	5,30	1,87	3,84	0,15	0,37	1,05	2,18

Заключение. Обработка найденных коэффициентов методом полиномиального регрессионного анализа[9] позволила вывести общее уравнение зависимости ХПК от времени обработки осадка и рабочего давления в системе:

$$\text{ХПК} = 93,53 \cdot 1,01^{1/p} \cdot e^{(10,2p^2 - 6,8p + 0,91)\tau}, \quad (3)$$

решение которого представлено также на рис. 3.

После переработки осадка, полученный субстрат представляет органическое вещество, содержащее доступные формы азота (2,5%), фосфора (4,2%), калия (1,2%) и серы (до 2-х г/кг). Микроскопическими исследованиями установлено, что субстрат это скопление микроорганизмов с суммарной поверхностью $\approx 100 \text{ м}^2$ на 1 грамм сухого вещества, обеспечивающее ему высокие сорбционные свойства по отношению к влаге. Таким образом, ферментно-кавитационный метод очистки сточных вод и обработки иловых осадков позволяет решать не только проблемы ликвидации органосодержащих отходов при экономии энергоресурсов, но и получения эффективных органических удобрений для сельского хозяйства [10 – 13].

Список использованных источников

1. Туровский, И. С. Обработка осадков сточных вод [Текст] / И. С. Туровский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1988. – 256 с.

2. **Яковлев, С. В.** Биологические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С. В. Яковлев, Т. А. Карюхина. – М. : Стройиздат, 1981. – 200 с.
3. **Яковлев, С. В.** Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – 3-е изд., перераб. и доп.– М. : Изд-во АСВ, 2004. – 701 с.
4. **Биологическая химия** [Текст] : учеб. пособие / Ю. Б. Филиппович, Н. И. Ковалевская, Г. А. Севастьянова и др. ; под ред. Н. И. Ковалевской. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2009. – 256 с.
5. **Модернизация** и снижение энергоемкости станций очистки сточных вод [Текст] / В. И. Пындак, Ю. А. Чернова, А. Е. Новиков, Е. А. Дугин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2016. – № 6. – С. 27 – 29.
6. **Степкина, Ю. А.** Совершенствование технологий и систем обработки осадка при очистке сточных вод, получение и апробация комплексного удобрения [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Ю. А. Степкина. – Волгоград, 2009. – 206 с.
7. **Пындак, В. И.** Оптимизация систем очистки органосодержащих сточных вод и обработки иловых осадков [Текст] / В. И. Пындак, А. Е. Новиков, В. Н. Штепа // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 5. – С. 103 – 107.
8. **Пат. № 173774** Российская Федерация, МПК С02F 3/02, С02F 3/10, С02F 3/28. Устройство биологической очистки сточных вод [Текст] / Овчинников А. С., Новиков А. Е., Дугин Е. А. и др. – Оpubл. 11.09.2017.
9. **Большев, Л. Н.** Таблицы математической статистики [Текст] : справ. пособие / Л. Н. Большев, В. Н. Смирнов. – М. : Наука, 1983. – 416 с.
10. **Пындак, В. И.** Решение проблем отходов и плодородия деградированных земель (на примере Нижнего Поволжья) [Текст] / В. И. Пындак, А. Е. Новиков, Ю. А. Степкина // Научное обозрение. – 2013. – № 4. – С. 85 – 89.
11. **Пындак, В. И.** Агротехническая мелиорация земель в аридных условиях Нижнего Поволжья [Текст] / В. И. Пындак, А. Е. Новиков // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2013. – № 4. – С. 15 – 17.
12. **Пындак, В. И.** Адсорбционные свойства удобрений на основе осадков сточных вод / В. И. Пындак, А. Е. Новиков, А. С. Межевова [Текст] // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. – 2016. – № 4. – С. 61 – 64.
13. **Wastewater treatment and disposal of individual residential buildings in agriculture** / A. Novikov, A. Poddubskiy, E. Dugin, O. Poddybskaya, M. Filimonov, R. Gurina // 18th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development» (Jelgava, Latvia, May 22 – 24, 2019) : Proceedings. V. 18 / Latvia University of Life Sciences and Technologies, Faculty of Engineering. – Jelgava (Latvia), 2019. – P. 397 – 406. – URL : <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/>. – doi: 10.22616/ERDev2019.18.N207.

УДК 621.9.06-529(035)

Фидаров В. Х.¹, Кузина Е. В.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. 89108533961, e-mail: fidval@mail.ru),

²(Тел. 89158642318, e-mail: sergeychuk-95@mail.ru)

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ И ИСПЫТАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ РЕЗЦОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ОТБЕЛЕННОГО ЧУГУНА

Fidarov V. K.¹, Cousina E. V.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. 89108533961, e-mail: fidval@mail.ru),

²(Tel. 89158642318, e-mail: sergeychuk-95@mail.ru)

FDEVELOPMENT OF THE STRUCTURES AND THE SPECIAL RESULTS FOR THE WORK OF THE WHITE CHUGOS

Аннотация. Представлены разработанные и испытанные в производственных условиях конструкции специальных резцов для обработки заготовок деталей машин из отбеленного чугуна с целью повышения производительности обработки. Даны рекомендации по назначению оптимальных режимов обработки при использовании разработанных конструкций резцов.

Ключевые слова: токарная обработка, заготовка, отбеленный чугун, специальный резец, производительность.

Abstract. The work presents the designed and tested in production conditions designs of special incisors to handle the blanks of machine parts from bleached cast iron in order to improve processing performance. Recommendations have been given on how best treatment modes are used for the developed incisor designs.

Keywords: turning, blank, bleached cast iron, special cutter, performance.

Развитие техники связано с созданием и освоением технологии обработки заготовок из материалов с высокой удельной прочностью и твердостью поверхностного слоя. К таким заготовкам принадлежат плунжеры, изготавливаемые из отбеленного серого чугуна. У плунжеров для высокой износостойкости поверхностный слой должен оставаться отбеленным. Отбеленный же слой обладает высокой твердостью и трудно поддается обработке резанием. Несмотря на определенный опыт изготовления деталей из отбеленных чугунов, машиностроительные заводы испытывают значительные трудности при освоении технологии обработки резанием заготовок из этих материалов. По существующему на заводе «Тамбовполимермаш» технологии обработка заготовок из отбеленного чугуна производится стандартными резцами, оснащенными в основном напайными твердосплавными пластинами из твердого сплава ВК8, на малых скоростях резания и при интенсивном износе режущей части инструмента [1, 2]. Для повышения прочности резца и снижения шероховатости обрабатываемой поверхности режущая часть резца затачивается специальным образом (рис. 1).

Уменьшение скоростей резания для снижения скорости износа инструмента приводит к существенному возрастанию трудоемкости токарной обработки таких изделий и к уменьшению производительности их изготовления.

Поэтому разработка обоснованных технологических рекомендаций по выбору рациональных режимов резания и оптимальных конструкций инструмента для операций механической обработки заготовок из отбеленных чугунов с целью повышения производительности обработки и износостойкости инструмента является актуальной задачей

Значения параметров режущей части резцов для машиностроения. Решению этой задачи посвящена данная работа, выполненная в Тамбовском государственном техническом университете (ТГТУ) для завода «Тамбовполимермаш».

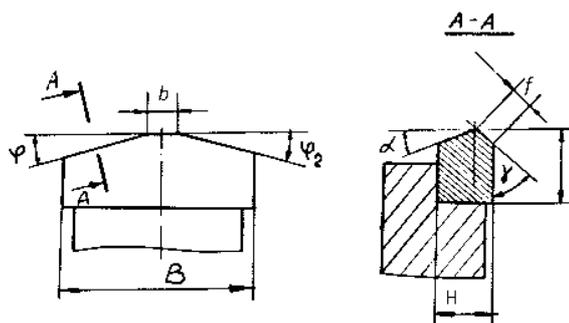


Рис. 1. Параметры режущей пластины резца

Параметр	Величина, град	Параметр	Величина, мм
φ	10...12	H	10
φ_2	10...12	L	14
γ	-(5...8)	B	30
α	6...10	B	1...3
		f	1...2

Поскольку заготовки из отбеленного чугуна обладают высокой твердостью то при резании с большими скоростями подачи и глубиной резания возникают большие силы резания и высокие температуры в зоне резания, что ведет к снижению режущих свойств резцов, повышенному их износу и к выкрашиванию режущих пластин. Чтобы избежать этого приходится обработку вести при пониженных режимах резания, т.е. снижать производительность. Кроме того, применение резцов с напайными пластинами имеет тот недостаток, что при напайке на режущих пластинах могут образоваться микротрещины, что ведет к их выкрашиванию при обработке. Из-за интенсивного износа резцы с напайными пластинами приходится часто перетачивать и после нескольких переточек их утилизируют, что ведет к их большому расходу. Применение же стандартных резцов с механическим креплением и неперетачиваемыми пластинами не обеспечивает оптимальных геометрических параметров резца.

В связи с этими задачами работы были: повышение производительности обработки и снижение расхода резцов.

Поставленная задача решалась путем подбора оптимального инструментального материала для режущей части резцов и разработкой специальных конструкций резцов.

Для повышения производительности токарной обработки плунжеров из отбеленного чугуна, были разработаны ряд конструкций специальных резцов. В этих конструкциях предусматривается механическое крепление режущих пластин различной формы и из различных материалов.

Для лучшего отвода тепла от режущих пластин державки резцов выполнены массивными по сравнению со стандартными. С целью экономии металла державки некоторых резцов использовались с двух концов для создания разных конструкций резцов. Закрепляя державку в резцедержателе станка соответствующим образом, можно вводить в работу ту или иную конструкцию резца.

Для снижения тепловой и механической нагрузки на каждый резец были разработаны державки с несколькими резцами, работающие по принципу разделения припуска. В качестве материала режущей части резцов используются твердые сплавы ВК3, ВК4, ВК6, ВК6ОМ, ВК8, ВК10, ВК10ХОМ, МС321, МС3210, МС318, ВП3325, ТТ7К8, Т7К8, пластины из минералокерамики ВОК60, ВОК71, кортинит; пластины из сверхтвердых материалов: композит 01, композит 05, композит 10Д. Конструкции резцов представлены ниже.

На рисунке 2 представлена конструкция резца для механического крепления одной режущей пластины. Державка 1 выполнена из стали 45, термообработанной до твердости HRC 45...50. Закрепление режущей пластины 4 осуществляется двуплечим прижимом 2 винтом 3. Прижимная пластина выполняется из стали У7, У8 или Р6М5, закаливается до твердости HRC 62...65 и выполняет роль стружколома. Подложка 5 выполняется из того же материала, что и режущая пластина. Конструкция державки обеспечивает установку режущей пластины 4 с отрицательным передним углом $\gamma = -(6...8)^\circ$. Задний угол $\alpha = (7...8)^\circ$ обеспечивается соответствующей установкой пластины в державке и конструкцией пластины.

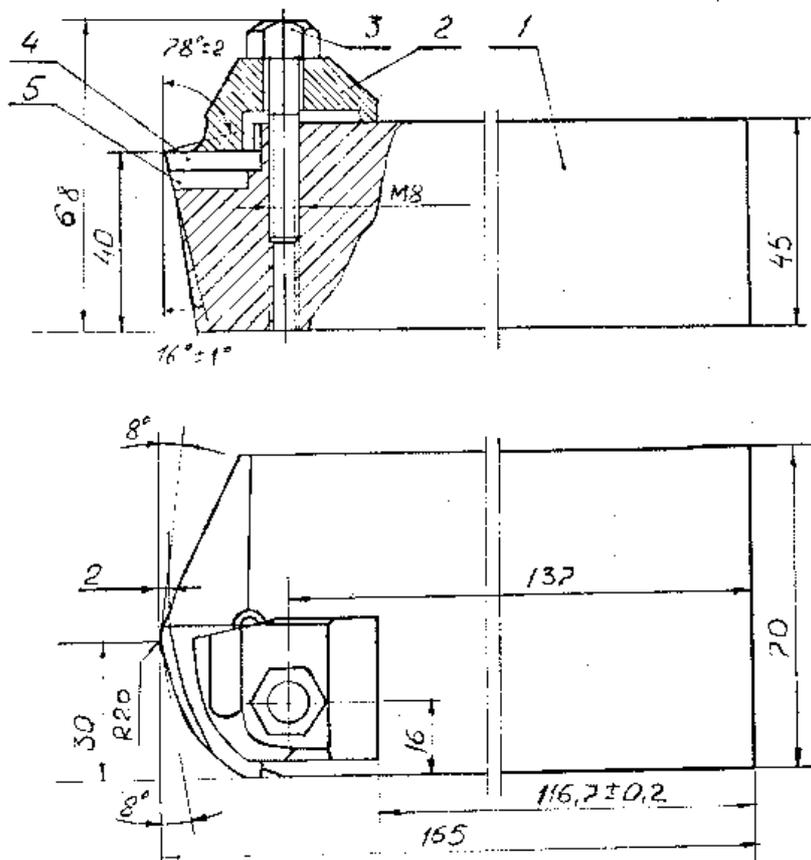


Рис. 2

На рисунках 3, 5 и 6 показаны конструкции комбинированных резцов для чернового и чистового обтачивания плунжера по методу разделения припуска, подобно тому, как это показано на рис. 4.

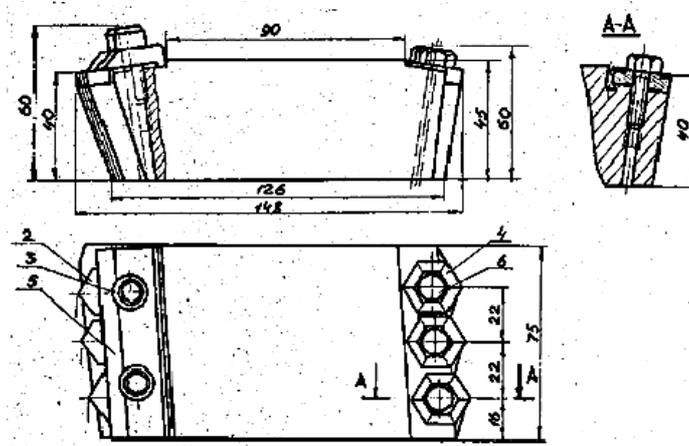


Рис. 3. Конструкция комбинированного резца

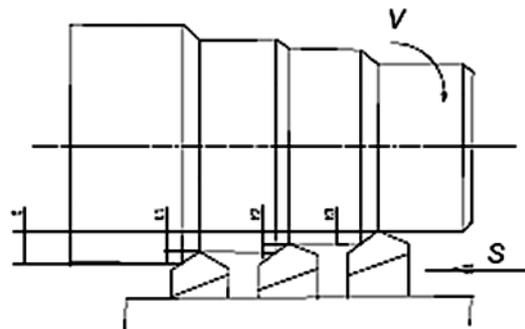


Рис. 4. Обработка заготовки методом разделения припуска тремя резцами

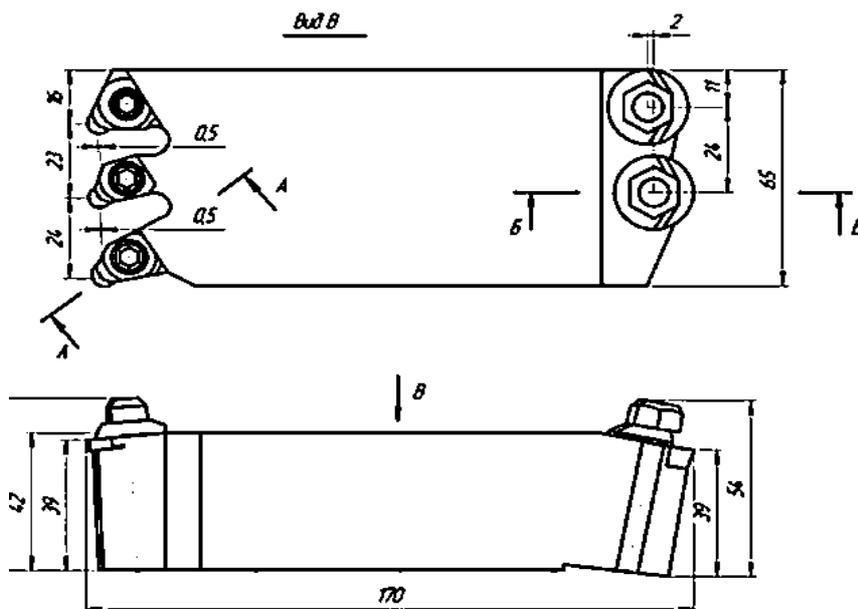


Рис. 5. Комбинированный резец с круглыми пластинами из композита (слева) и BK10OM (справа)

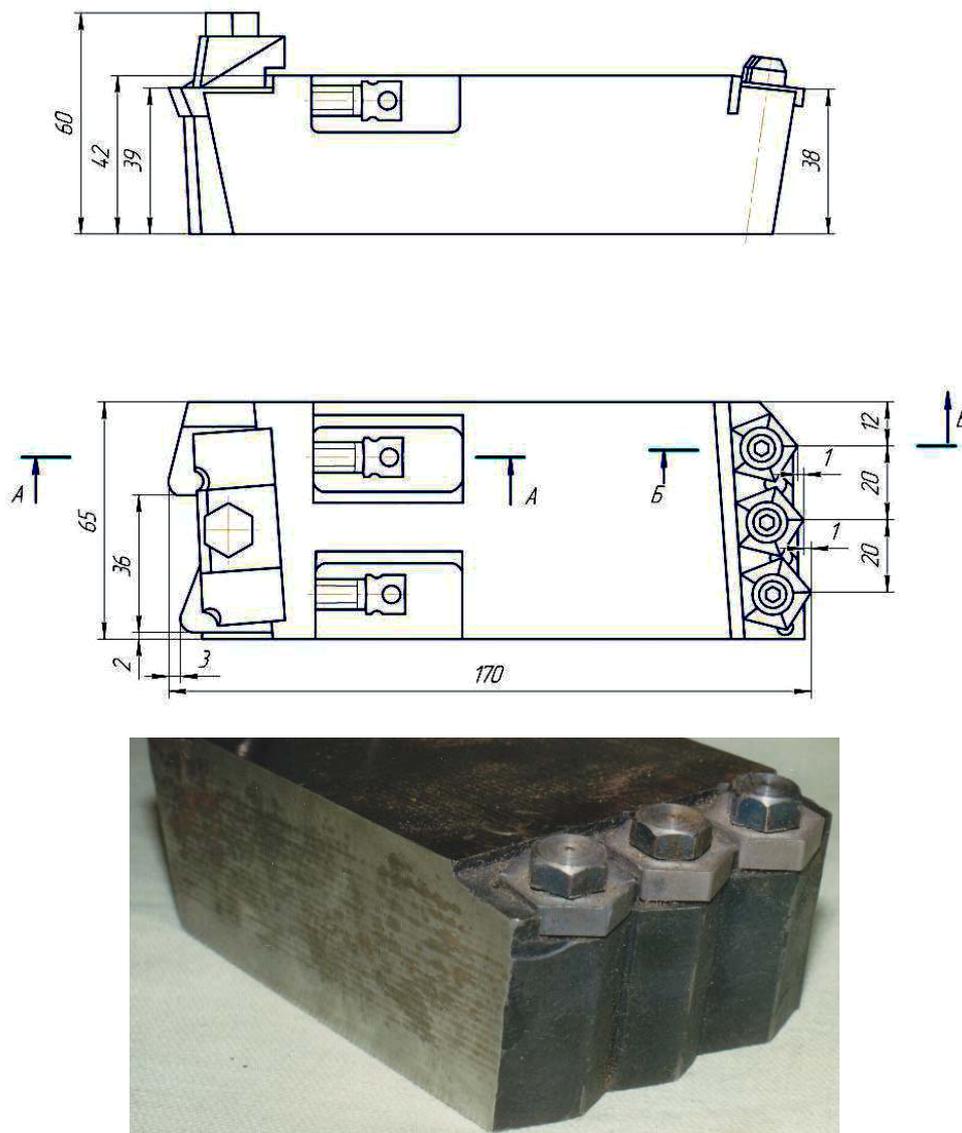


Рис. 6. Комбинированный резец с многогранными неперетачиваемыми пластинами (справа) и регулируемым вылетом двух пластин (слева)

В державке резца (рис. 5) справа установлены две пластины круглой формы из твердого сплава типа ВК диаметром 22,5 мм и слева – три пластины круглой формы из сверхтвердого материала типа композит 10Д диаметром 7 мм (ТУ 2-035-808–81).

На рисунке 3 представлен комбинированный резец для чернового и получистового обтачивания, работающий методом разделения припуска. Справа устанавливаются три многогранные неперетачиваемые пластины 5 и прижимаются винтами 6, слева – призматические пластины 62311 ГОСТ 25595–82 и 61431 ГОСТ 25395–82.

Материал державки 1 – сталь 45 твердостью HRC 45...50, прижим 2 – из инструментальной стали HRC 62...65. По мере износа и переточки призматические пластины могут выдвигаться посредством регулировочных винтов 4.

На рисунке 7 представлен специальный резец для черновой, получистовой и чистовой обработки твердосплавными призматическими пластинами 62311 и 61431 ГОСТ 25395–82.

Режущая пластина 6 крепится в корпусе 1 винтом 8 через прижимную планку 2 и по мере износа для очередной переточки может выдвигаться из корпуса резца посредством регулировочного винта 4. Таким образом, по мере износа резца перетачивается только режущая пластина, а корпус резца остается целым и его можно многократно и долго эксплуатировать, что обеспечивает экономию металла и средств.

Важным средством повышения эффективности исследования и расширения объема получаемой информации является проведение испытаний в условиях производства. В связи с использованием для изготовления плунжеров специальных заготовок из отбеленного серого чугуна, обладающих большой массой (~515 кг) и размерами (диаметр-350 мм, длина 1500 мм), и в связи с тем, что лаборатория вуза не располагает соответствующим технологическим оборудованием, все экспериментальные испытания проводились в производственных условиях на заводе «Тамбовполимермаш» на реальных заготовках и действующем заводском оборудовании.

Испытания резцов проводились в два этапа. На первом этапе испытывались резцы заводской конструкции при различных режимах резания, а на втором этапе проверялась работоспособность разработанных и изготовленных в ТГТУ резцов с различными инструментальными материалами при различных режимах резания.

В результате выполненных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Применение специальных резцов конструкции ТГТУ с механическим креплением и регулируемым вылетом режущей пластины (рис. 7) при использовании пластин из сплава ВК6-ОМ обеспечивает повышение производительности токарной обточки плунжеров в 2,85 раза. Для обработки плунжеров рекомендуются следующие режимы обработки: два черновых прохода: частота вращения шпинделя $n = 16 \text{ мин}^{-1}$; скорость подачи $S = 3 \text{ мм/об}$; глубина резания $t = 2 \text{ мм}$; получистовой проход: $n = 16 \text{ мин}^{-1}$; $S = 5 \text{ мм/об}$; $t = 2 \text{ мм}$; чистовой проход: $n = 19 \text{ мин}^{-1}$; $S = 5 \text{ мм/об}$; $t = 0,5 \dots 1,0 \text{ мм}$.

2. Удовлетворительную работоспособность при обточке плунжеров показали комбинированные резцы с многогранными неперетачиваемыми пластинами (рис. 3 и 6) при использовании режущих пластин из сплава VC28 (США). Резцы, оснащенные пластинами из VC28, можно рекомендовать для обточки по корке, получистового и чистового обтачивания. Производительность токарной обработки при режимах обработки: $n = 9,5 \dots 16,0 \text{ мин}^{-1}$; $S = 2,00 \dots 2,85 \text{ мм/об}$; $t = 1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$ увеличивается в 2,0...2,5 раза по сравнению с заводской технологией.

3. При обточке плунжера резцом, оснащенного тремя пластинами из композита 05 (рис. 5), происходило разрушение пластин. Причинами разрушения режущих пластин являются, на наш взгляд, недостаточная жесткость и высокая степень износа элементов станка, вибрации системы и неудовлетворительные температурные условия работы пластин из-за отсутствия охлаждения. Стружка, имеющая высокую температуру, накапливается на поверхности резца между суппортом и заготовкой и препятствует охлаждению пластин. В результате столь тяжелого температурного режима работы пластин и наложения вибраций технологической системы происходит их разрушение. В связи с этим для установления истинной стойкости и работоспособности пластин из СТМ следует провести дополнительные опыты с обильным охлаждением СОЖ и на станке, обладающего достаточной жесткостью.

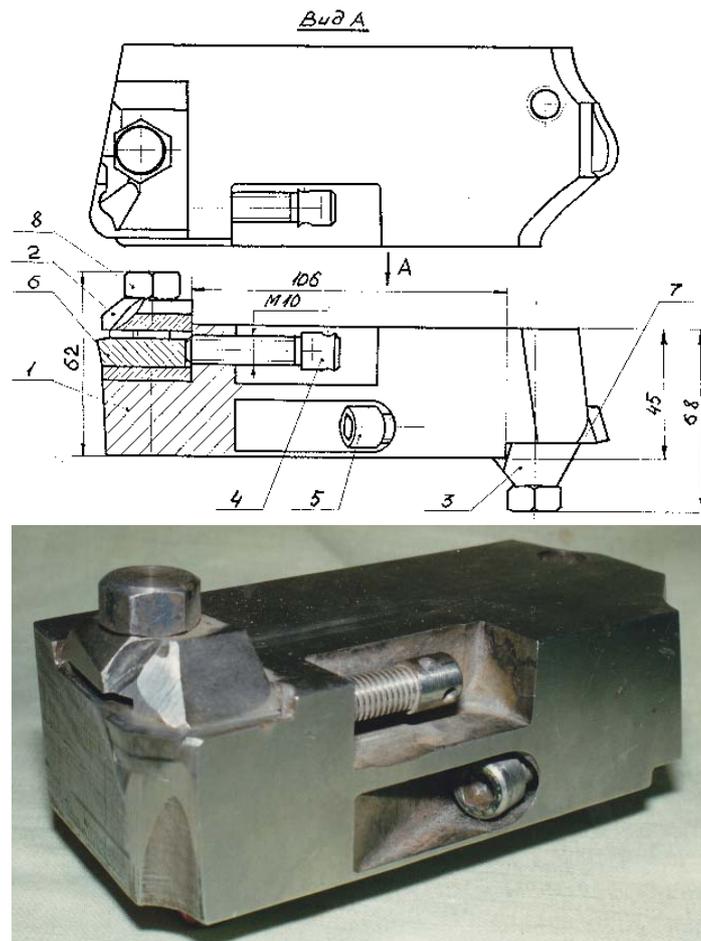


Рис. 7. Резец специальный с механическим креплением и регулируемым вылетом режущей пластины:

1 – корпус резца; *2, 3* – планка прижимная; *4, 5* – винт регулировочный;
6 – режущая пластина; *7, 8* – винт

Список использованных источников

1. **Малыгин, Е. Н.** Изготовление плунжера из серого чугуна марки СЧ-20 [Электронный ресурс] / Е. Н. Малыгин, В. Х. Фидаров, А. В. Дашков // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов : матер. Междунар. науч.-практ. конф. В 5 т. – 2016. – Т. 3. – С. 44 – 47.
2. **Фидаров, В. Х.** Обработка заготовок деталей машин из труднообрабатываемых материалов / В. Х. Фидаров. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 162 с.

УДК 338.32

Сергеева А. С.¹, Немтинова Ю. В.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (910)6504601, e-mail: anya1255@yandex.ru),

²(Тел. 8(920)4742886, e-mail: jnemtinova@hotmail.com)

ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Sergeeva A. S.¹, Nemtinova J. V.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. 8(910)6504601, e-mail: anya1255@yandex.ru),

²(Tel. 8(920)4742886, e-mail: jnemtinova@hotmail.com)

TECHNOLOGIES FOR ANALYSIS OF IMPROVEMENT OF PROCESSES IN LEAN PRODUCTION

Аннотация. Производственные процессы – важнейшее составляющее деятельности предприятия. В данной статье рассматриваются технологии анализа для совершенствования данных процессов в рамках бережливого производства (БП). В настоящее время используются различные технологии, помогающие детально проанализировать проблемы производства и устранить причины их появления. В работе мы подробно разберем такие методы как 5W2H, 3MU, 4M, VSM. Их общая задача состоит в системном анализе производственных процессов, их детальном описании, обеспечении визуализации, прозрачности, а также непрерывном совершенствовании. Другими словами, требуется наглядно увидеть, как устроен производственный процесс, обнаружить скрытые потери, глубинные проблемы, чтобы в конечном итоге их устранить и сделать производство более эффективным.

Ключевые слова: система, производство, технология, метод, анализ.

Abstract. Production processes – the most important component of the enterprise. This article discusses analysis technologies for improving these processes in the framework of lean manufacturing (BP). Currently, various technologies are used to help analyze in detail production problems and eliminate the causes of their occurrence. In the work, we will analyze in detail such methods as 5W2H, 3MU, 4M, VSM. Their common task is a systematic analysis of production processes, their detailed description, providing visualization, transparency, as well as continuous improvement. In other words, you need to visually see how the production process works, detect hidden losses, underlying problems, in order to ultimately eliminate them and make production more efficient.

Keywords: system, production, technology, method, analysis.

Производственная система компании Toyota, как писал в своих работах Тайити Оно, стоит из двух основополагающих элементов, еще их часто называют «столпами TPS». К таким элементам, в первую очередь относится метод джидока (Jidoka) – это метод частичной автоматизации оборудования, а также автоматизации с использова-

нием интеллекта. Частичная автоматизация позволяет найти проблему автоматически и предотвратить производство дефектной продукции. Один работник может наблюдать за работой нескольких оборудований, это уменьшает издержки, помогает обнаружить и решить проблемы качества. Так, на кондитерской фирме, один человек контролирует процесс производства сразу на двух линиях упаковки готовых изделий. Вторым элементом является метод «точно в срок» (Just in time, JIT). Метод производства и поставки, который направлен на «вытягивание» такого количества готовых изделий, которые необходимы контрагенту в данный момент. Это лучший способ снижения запасов готовых изделий, и постепенное снижение к нулю складских площадей. Например, в кондитерской фирме, во время производственного процесса необходимое для изготовления сырье оказывается на производственной линии точно в то время, когда это нужно, и в точно нужном количестве. В настоящее время существует множество других технологий, в том числе технологии анализа. К технологиям анализа относятся методы 5W2H, 3MU, 4M, VSM [1]. Разберем каждый из них более детально.

Автор метода 5W2H – Сакити Тоета (1930 г.), данная аббревиатура означает английские слова: What (что), Why (почему), Where (где), When (когда), Who (кто), How (как), How much (сколько). Также, данную технологию называют пять «почему?». Это системный способ обнаружения причины возникновения конкретной проблемы. Главная идея состоит в том, что для нахождения первопричины проблемы следует как минимум пять раз задать вопрос «почему?» и только после того, как это причина определена, нужно браться за разработку и далее реализацию мероприятий по устранению возникшей проблемы. При этом нужно помнить и соблюдать правило, что проблемы состоят не в людях, а кроются в процессах и системе в целом.

Рассматривая логику в направлении «Почему?», мы постепенно раскрываем всю цепь последовательно связанных между собой причинных факторов, оказывающих влияние на проблему.

На примере кондитерской фирмы это будет выглядеть так:

Проблема: Мукопросеиватель MP-500 не работает.

Почему? – Не осуществили замену просеивающего элемента.

Почему? – Запасной детали не оказалось.

Почему? – Требуется изготовление детали под заказ, заранее не заказали.

Почему? – Деталь еще не исчерпала указанный ресурс, но сломалась.

Почему? – Машина не проходила плановое техобслуживание.

Остановившись в изучении проблемы после первого или второго ответа, мы сможем устранить только симптомы проблемы. Скажем, если мы удовлетворимся ответом «не осуществили замену просеивающего элемента», решением будет тем или иным способом «осуществить замену детали». Но деталь требуется изготавливать на заказ, поэтому машина все это время будет в простое. Остановившись на третьем ответе «требуется изготовление детали под заказ, заранее не заказали», мы сделаем срочный заказ нужного элемента. В этом случае решение будет более эффективным, так как деталь может быть изготовлена за один рабочий день. Однако и в этом случае придется заплатить большую сумму для осуществления срочного заказа. Пройдет время, и ситуация

может повториться, поэтому проблема решена только в том случае, если она больше не повторяется.

Задаваясь снова и снова вопросом «почему» можно выявить глубокие проблемы, устранение которых может предотвратить повторение проблемы либо очень надолго, либо вообще навсегда. К сожалению, столь приятные результаты анализа омрачаются одним фактом: чем более глубокую проблему мы находим, тем сложнее реализовать решение [2]. В некоторых случаях это требует существенных вложений финансов, в некоторых – пересмотра устоявшихся правил и подходов к работе. Описание метода приведено в табл. 1 [3].

1. Описание метода 5W2H

Аспект	5W2H	Описание
Суть предмета	Что?	Что делается? Что нужно сделать? Что еще должно быть сделано?
Персонал	Кто?	Кто это делает в настоящее время? Кто это делает постоянно? Кому следует это делать? Кто еще мог бы это делать?
Размещение	Где?	Где это сделано? Где это следует делать? Где это еще можно сделать?
Последовательность	Когда?	Когда это нужно сделать? Когда это было сделано? Когда это следует делать? Когда это еще можно сделать? Когда это еще следует делать?
Обоснование	Почему?	Почему это он делает? Почему это следует делать? Почему это следует делать здесь? Почему это следует делать именно сейчас? Почему это делается именно таким образом?
Метод	Как?	Как это нужно сделать? Как это сделано? Как это должно быть сделано? Можно ли использовать данный метод в другом месте? Есть ли другой способ сделать это?
Затраты	Сколько?	Сколько это стоит сейчас? Сколько это будет стоить после улучшений?

3МУ – аббревиатура от английских слов: Muda (бесполезные действия), Muri (перегрузка), Mura (неравномерность). Означают три симптома наличия потерь в соответствии с лишними действиями, перезагрузкой, неравномерность. Главная задача состоит в том, чтобы свести к нулю данные характеристики [3].

Технология анализа 4 М. Контрольный список 4 М позволяет определить, куда смещается акцент проблем, и позволяет принять управленческое решение по исправлению ситуации. Контрольный список 4 М представлен в табл. 2 [4].

2. Контрольный список 4 М

Сотрудник	Оборудование	Материал	Метод
Соблюдает ли он стандарты?	Соответствует ли оно требованиям производства?	Есть ли брак?	Эффективен ли метод?
Приемлема ли эффективность его работы?	Достаточно ли имеющегося в наличии оборудования?	Есть ли ошибки в качестве?	Безопасен ли метод?
Восприимчив ли он к решению проблем?	Производится ли проверка и обслуживание?	Удовлетворительны ли стандарты качества?	Обеспечивает ли данный метод производство качественной продукции?
Ответственен ли он?	Как часто приходится останавливать работу из-за проблем?	Есть ли ошибки в объеме?	Удовлетворительны ли рабочие стандарты?
Обладает ли он квалификацией?	Соответствует ли оборудование требованиям к точности?	Оптимальный ли уровень запасов?	Обновлены ли эти стандарты?
Есть ли у него опыт?	Издает ли оно какие-то необычные шумы?	Есть ли потери?	Рационален ли алгоритм работы?
Подходит ли ему порученная работа?	Находится ли оно в исправном состоянии?	Правильно ли обращение с материалами?	Соответствует ли нормам температура и влажность?
Стремится ли он к совершенствованию?	Есть ли запасные детали?	Есть ли незавершенное производство?	Соответствует ли нормам освещенности и вентиляция?
Умеет ли ладить с людьми?		Адекватна ли раскладка?	
Здоров ли он?			

VSM – это карта потока создания ценности, инструмент, который помогает наглядно увидеть и понять связь материальных и информационных ценностей, а также определить, где происходят потери [5].

Необходимость построения VSM связана со следующими причинами:

1) карта помогает увидеть весь поток в целом, а не только отдельные производственные процессы;

- 2) позволяет определить источники потерь в потоке ценности;
- 3) демонстрирует поток наглядно, делает его ясным и понятным для обсуждения, показывает связь между информационным и материальным потоками;
- 4) связывает концепцию БП и методы;
- 5) становится чертежом для внедрения БП;
- 6) подробно описывает, как должен работать цех или конкретный участок [6].

Для того чтобы карта потока создания ценности получилась максимально точной, необходимо строго соблюдать этапы выполнения работ [7]. Этапы построения карты создания ценности представлены на рис. 1.



Рис. 1. Построение карты потока создания ценности

В первую очередь составляется карта потока создания ценности, которая отражает текущее состояние производственных процессов. Другими словами, это карта фактического состояния. Далее, с помощью получившейся карты формируется видение того, каким должен стать данный процесс в будущем, т.е. это карта будущего состояния. При построении карты нужно использовать понятные символы. Символьное обозначение, во-первых, обеспечивают визуализацию, во-вторых, на этапе построения позволяет проводить анализ описываемых процессов.

Предприятия, использующие VSM, способны в несколько раз увеличить производительность, сократить производственные площади, а также избавиться от ненужных потерь.

Список использованных источников

1. **Дао Toyota**: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Джеффри Лайкер ; пер. с англ. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2005 – 402 с.
2. **Методы** и алгоритмы создания виртуальных моделей химико-технологических систем : монография / В. А. Немтинов, С. В. Карпушкин, В. Г. Мокрозуб, Ю. В. Немтинова ; М-во обр. и науки РФ, ГОУ ВПО «Тамб. гос. технич. ун-т». – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2011. – 236 с.
3. **Вумек, Дж.** Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Джеймс Вумек, Дэниел Джонс ; пер. с англ.. – 9-е изд. – М. : Альпина Паблишер, 2016. – 472 с.
4. **Кононова, В. Ю.** Модернизация производственных систем на российских предприятиях/ В. Ю. Кононова ; отв. ред. Е. Г. Ясин // Модернизация экономики и общественное развитие : сб. ; Гос. ун-т – Высшая школа экономики. – М. : Изд. дом ГУ ВШЭ, 2007. – 556 с.
5. **Вэйдер, М.** Инструменты бережливого производства: Мини-руководство по внедрению методик бережливого производства / Майкл Вэйдер ; пер. с англ. – 9-е изд. – М. : Альпина Паблишер, 2016. – 125 с.
6. **Немтинов, В. А.** Создание информационных справочных систем с использованием технологии Internet / В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, В. Г. Мокрозуб // Информационные технологии. – 1999. – № 7. – С. 37 – 39.
7. **Давыдова, Н. С.** Бережливое производство: монография / Н. С. Давыдова. – Ижевск : Изд-во Института экономики и управления, ГОУВПО «УдГУ», 2012 – 138 с.

УДК 004.896

Савилова У. А., Шибков Д. А., Яковлева Д. А., Машкова О. С.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630054, e-mail: shibkov.d.a@yandex.ru)

**МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ ЗАЩИЩЕННОЙ
МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ
РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Savilova U. A., Shibkov D. A., Yakovleva D. A., Mashkova O. S.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630054, e-mail: shibkov.d.a@yandex.ru)

**MODELS INTERACTION AGENTS OF PROTECTED MULTI-AGENT SYSTEM
ON EXAMPLE HIVE UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Аннотация. Представлен алгоритм взаимодействия подсистем беспилотного летательного аппарата на основе архитектуры Touring Machine и предложены модели защищенной мультиагентной системы и интеллектуального агента для такой системы.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультиагентная система, архитектура Touring Machine, защищенная мультиагентная система, интеллектуальный агент, конфликт

Abstract. This article presents an interaction algorithm between the subsystems of an unmanned aerial vehicle based on the Touring Machine architecture and offers models of a protected multi-agent system and of intelligent agent for such a system.

Keywords: unmanned aerial vehicle, multiagent system, Touring Machine Architecture, protected multi-agent system, intelligent agent, conflict

Введение. В настоящее время развивается тенденция использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в военной авиации. Это связано тем, что пилотируемые летательные аппараты (ПЛА) теряют свою эффективность из-за ряда факторов, таких как усталость пилота, предельные физиологические нагрузки. Также ПЛА требуют затраты не только непосредственно на летательные аппараты, но и на летчиков. БПЛА не обладают данными недостатками и имеют такие преимущества, как малый вес и меньшее потребление топлива, возможность использования относительно большого количества таких средств (роя БПЛА) при нанесении массированного удара.

Задачи и цели БПЛА. Основные задачи БПЛА: наблюдение и сбор информации, целеуказание и координация огня, нанесение удара по наземным целям [1].

Использование группы (роя) БПЛА для достижения поставленных задач может как повысить точность, так и сократить время их выполнения. В то же время такие задачи, как бомбометание и разведка, требуют от БПЛА способности адаптации к изменяющимся условиям, автономной работе и обучению, благодаря чему использование мультиагентной системы в рое оправдано.

Как правило, в роле БПЛА выделяют одного ведущего, а остальные выступают в роли ведомых. Архитектура Touring Machine является наиболее простой, но при этом по эффективности сопоставима с другими архитектурами [2].

Глобальной целью любого субъекта вооруженного конфликта, в том числе и роля БПЛА, является выживание. Локальные цели роля БПЛА: достижение определенной позиции, сопровождение союзника, уничтожение противника и другие цели.

Взаимодействие подсистем БПЛА. После оценки обстановки ведущий в соответствии с текущей локальной целью отдает команды ведомым, а также принимает решение, как действовать дальше. На каждом БПЛА ведется история команд, включающая условия, при которых команды были отданы. Если цепочка отданных команд приводит к выполнению локальной цели, то БПЛА запоминает ее и в будущем при подобных условиях действует схожим образом. Цепочка команд может быть неоптимальной при резкой и частой смене обстановки.

Если ведомый не может выполнить команду, отданную ведущим, то сообщает ему об этом. В таком случае ведущий корректирует команду, а ведомый до получения новой команды действует самостоятельно (рациональным образом).

Если ведущий выходит из строя (например, в случае уничтожения или потери связи), то БПЛА выбирают нового ведущего на основе наименьшего GUID– глобально уникального идентификатора, который назначается каждому БПЛА перед вылетом [3].

Алгоритм взаимодействия подсистем БПЛА представляет следующие действия.

1. Принять данные (условия) с «Подсистемы восприятия» на «Управляющий блок».
2. Передать их на блок «Управляющих правил, активируемых контекстом».
3. Блок «Управляющих правил, активируемых контекстом» выполняет поиск подобных условий и выдает команду (или последовательность команд) «Управляющему блоку» или сигнализирует о неудаче (команда NULL).
4. Если на «Управляющий блок» пришла команда NULL, то данные, принятые на шаге 1, передаются на «Уровень планирования», иначе выполняется шаг 7.
5. «Уровень планирования» вырабатывает план действий, оптимальный с точки зрения принятых условий, и передает его на «Уровень реакции».
6. «Уровень реакции» представляет план действий в виде последовательности команд, которые затем передает «Управляющему блоку».
7. «Управляющий блок» передает команду или последовательность команд в «Подсистему действий».
8. «Подсистема действий» осуществляет принятые команды.
9. Данные, принятые на шаге 1, и последовательность действий, принятая на шаге 6, сохраняются в «Истории команд».
10. Если последовательность команд, принятая на шаге 6, при условиях, принятых на шаге 1, приводит к достижению цели, то выполняется сохранение вместе с условиями в блоке «Управляющих правил, активируемых контекстом».

На рисунке 1 представлено взаимодействие подсистем БПЛА.

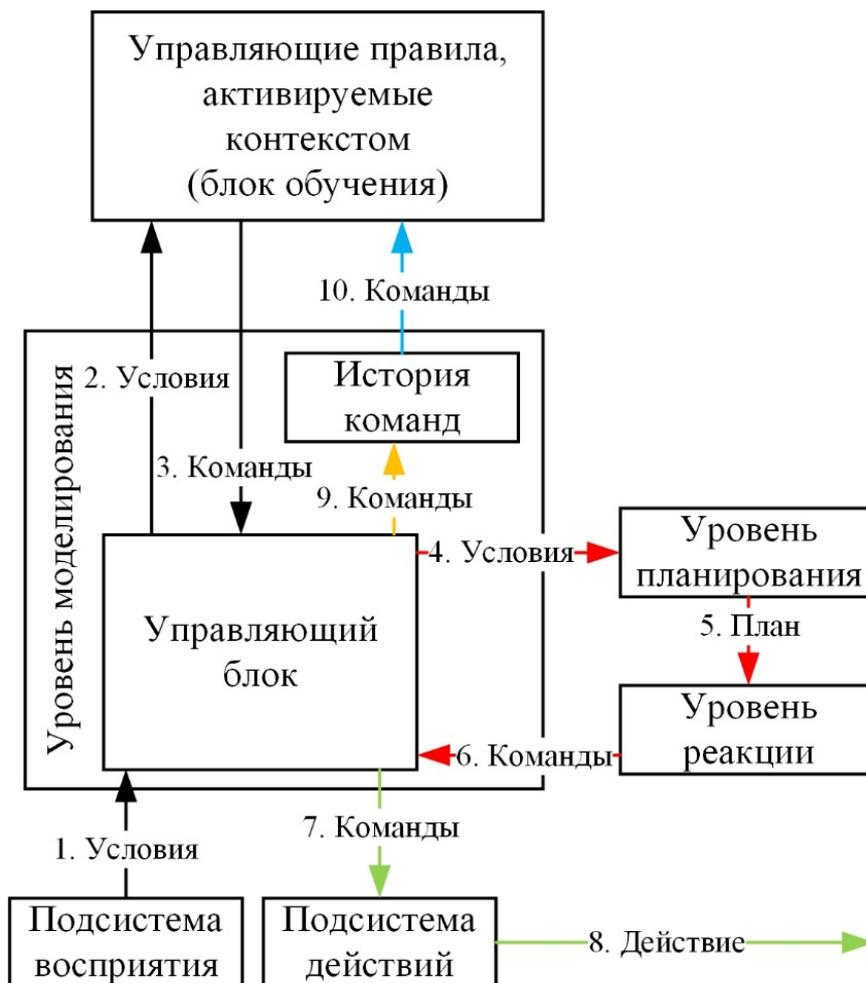


Рис. 1. Схема взаимодействия подсистем БПЛА

В случае смены роли БПЛА с ведомого на ведущего на блок «Управляющих правил, активируемых контекстом» может резко возрасти нагрузка в зависимости от количества БПЛА в рое и сложности обстановки. Для снижения нагрузки при большом количестве БПЛА ведущий может дать команду на разбиение роя на звенья БПЛА, назначив в каждом из них по одному ведущему.

Увеличение количества агентов способствует увеличению эффективности принятия решений и сокращению времени промежуточных вычислений [4]. Компрометация или взлом хотя бы одного из агентов снижает эффективность мультиагентной системы и может способствовать ее последующему отказу.

Модели защищенной мультиагентной системы и интеллектуального агента для такой системы. Мультиагентная система должна быть защищена как от внешних, так и от внутренних источников угроз конфиденциальности, целостности и доступности.

Модель мультиагентной системы может быть представлена в виде графа, формализующего состояние агента и взаимодействия с остальными агентами системы. Каждая вершина графа соответствует агенту и представляет собой набор параметров, характеризующих ее состояние в текущий момент времени. Динамическое изменение характе-

ристик модели позволяет прогнозировать действия и выявлять «узкие» места системы взаимодействующих агентов.

Защищенная мультиагентная система $MAS = \{AG, ST, ENV, SEC, SAF\}$:
 $AG = \{ag_i \mid i = 2, \dots, n\}$ – множество интеллектуальных агентов (n – количество агентов);
 $ST = \{st_j \mid j = 1, \dots, m\}$ – множество состояний внешней среды (m – количество состояний внешней среды);
 $ENV : ST \times A_{ag_1} \times \dots \times A_{ag_n} \rightarrow 2^{ST}$ – функция, формализующая возможную реакцию внешней среды на действия всех агентов системы (A – множество действий агента);
 $SEC : R(T_{IN}^{EXT}, T_{AV}^{EXT}, T_{CON}^{EXT}) \rightarrow 0$ – функция, формализующая защищенность мультиагентной системы (R – риск, подразумевающий вероятность реализации внешних угроз);
 $SAF : R(T_{IN}^{INT}, T_{AV}^{INT}, T_{CON}^{INT}) \rightarrow 0$ – функция, формализующая безопасность мультиагентной системы (R – риск, подразумевающий вероятность реализации внутренних угроз).

Под защищенностью понимается способность мультиагентной системы противостоять несанкционированному доступу к данным, а также их случайному искажению или разрушению. Под безопасностью понимается способность мультиагентной системы сохраняться при разрушающих воздействиях.

$IN = \{IN_{TRD}, IN_{STD}, IN_{AG}\}$ – целостность данных: $IN_{TRD} = \{ES, TCP\}$ – целостность передаваемых данных, которая обеспечивается путем использования электронной подписи и протокола TCP ; $IN_{STD} = \{H\}$ – целостность хранимых данных, которая достигается благодаря хешированию; $IN_{AG} = \{H, OB\}$ – целостность агента, которая достигается путем хеширования и проверки перед запуском программного обеспечения, а также обфускацией кода.

$AV = \{AV_{TRD}, AV_{STD}\}$ – доступность данных: $AV_{TRD} = \{RT, DUP\}$ – доступность передаваемых данных, обеспечиваемая с помощью таблиц маршрутизации и дублирования информации (передача информации от агента i на главный узел, если агент j недоступен); $AV_{STD} = \{BKP, REP\}$ – доступность хранимых данных, обеспечиваемая с помощью резервного копирования и репликации баз данных.

$CON = \{CON_{TRD}, CON_{STD}\}$ – конфиденциальность данных: $CON_{TRD} = \{EN_D\}$ – конфиденциальность передаваемых данных, обеспечиваемая шифрованием данных; $CON_{STD} = \{EN_D, EN_{F/DIR}\}$ – конфиденциальность хранимых данных, обеспечиваемая шифрованием данных и файла/директории.

Мультиагентная система содержит от 2 до n агентов. У каждого агента есть глобальная цель W , которая может совпадать с глобальными целями других агентов, и одна или несколько локальных целей W_i , которые ведут к осуществлению глобальной [5].

Цели W, W_1, W_2, \dots, W_n считаются измеримыми. Существуют функции полезности $q(ag), q_1(ag), q_2(ag), \dots, q_n(ag)$ такие, что если $ag_i \succ^W ag_j$ (\succ^W – лучше в смысле W), то $q(ag_i) > q(ag_j)$ для всех $i, j = 1, \dots, n (i \neq j)$, $ag_i \succ^{W_k} ag_j$, если $q_k(ag_i) > q_k(ag_j)$, где $k = 1, \dots, n$ [3].

Если у нескольких агентов совпадают глобальные цели, а функция полезности при взаимодействии агентов: уменьшается ($q(ag_1, ag_2, \dots, ag_n) < q(ag_1) + q(ag_2) + \dots + q(ag_n)$), то агенты конфликтуют ($ag_i > I ag_j$, где ag_i – множество агентов, функция полезности которых больше нуля, ag_j – множество агентов, функция полезности которых меньше нуля, причем $S_i \cap S_j = \emptyset$ (противоположная ситуация – $> \bar{I}$)); не изменяется ($q(ag_1, ag_2, \dots, ag_n) = q(ag_1) + q(ag_2) + \dots + q(ag_n)$), то агенты нейтральны друг к другу, т.е. не оказывают никакого взаимодействия друг на друга ($ag_i > \bar{I}_H ag_j$); увеличивается ($q(ag_1, ag_2, \dots, ag_n) > q(ag_1) + q(ag_2) + \dots + q(ag_n)$), то агенты сотрудничают ($ag_i > \bar{I}_C ag_j$), где ag_i – множество агентов с высокой функцией полезности, а ag_j – множество агентов с низкой функцией полезности)) [6].

Устранение конфликта связано с изменением окружения, с генерированием условий $\{U\}$, позволяющих обеспечить выполнение равенства $U(ag_i > I ag_j) = ag_i > \bar{I} ag_j$ (ag_i и ag_j – конфликтующие агенты), например, путем воздействия на оба агента ($U(ag_i) > \bar{I} U(ag_j)$) или на одного из них ($U(ag_i) > \bar{I} ag_j$ или $ag_j > \bar{I} U(ag_i)$).

Примером разрешения конфликта может быть назначение других агентов для решения задачи, с которой не справились конфликтующие агенты, или исключение какого-либо агента (группы агентов).

Легитимные агенты могут конфликтовать, сотрудничать или быть нейтральными. Нелегитимные агенты конфликтуют с легитимными или нейтральны к ним (например, если отсутствует связь между ними по какой-либо причине).

Агент ag_i на основании данных о состоянии каждого агента и их текущих действий вырабатывает следующее действие, при котором ΔW максимально, и отправляет информацию об этом другим агентам. Если агент ag_k ($k \neq i$) после проверки получает положительное заключение, то подает соответственно положительный голос за ag_i и уведомляет об этом других агентов. В итоге каждый агент подсчитывает количество положительных и отрицательных голосов, которые были поданы за него, вычисляет доверие к ag_i . Доверие – мера, характеризующая готовность агента ag_i взаимодействовать с агентом ag_j ($i \neq j$) в данной ситуации [1].

Ситуация, когда внедряется группа нелегитимных агентов, оценивающих друг друга положительно, а легитимных агентов отрицательно, ведет к компрометации легитимных агентов [6, 7]. Примером устранения конфликта может быть следующее решение: если репутация агента ниже определенного порога, то взаимодействие других агентов с ним прекращается, т.е. происходит занесение в «черный список».

Модель интеллектуального агента для защищенной мультиагентной системы представляет собой $AG = \{ST, A, ENV, I, REF, ACT\}$: $ST = \{st_j \mid j = 1, \dots, m\}$ – множество состояний внешней среды (m – количество состояний внешней среды); $A = \{a_k \mid k = 1, \dots, q\}$ –

множество действий агента; $ENV : S \times A \rightarrow 2^S$ – функция поведения внешней среды, сопоставляющая текущему состоянию внешней среды и выбранному агентом действию множество возможных следующих состояний внешней среды; I – множество внутренних состояний агента; $REF : I \times S \rightarrow I'$ – функция обновления состояния, сопоставляющая предыдущему внутреннему состоянию и новому состоянию внешней среды новое внутреннее состояние агента; $ACT : I \times S \times A \rightarrow A'$ – функция принятия решения, сопоставляющая текущему внутреннему состоянию агента некоторое действие.

Множество внутренних состояний агента представляет собой $I = \{COM, RCT, PCT, DI, PI\}$: $COM : I \times W \rightarrow I'$ (свойство коммуникативности), W – цель, которую агент стремится достичь; $RCT : I \times ENV \rightarrow A$ (свойство реактивности); $PCT : I \times ST \times W \rightarrow A$ (свойство проактивности); $DI = \{DI_{self}, DI_{env}, DI_{ag}\}$ (декларативная информация); $PI = \{PI_{self}, PI_{env}, PI_{ag}\}$ (процедурная информация).

Заключение. Таким образом, рассмотренная модель роя БПЛА, демонстрирует возможность решения ряда специфических задач, таких как рассредоточение роя при преодолении противоздушной обороны противника, перенацеливание в зависимости от сложившихся условий, распределение сил и средств для выполнения удара или ведения разведки на основе использования мультиагентных систем.

Список использованных источников

1. **Общие** виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов / А. Г. Гребеников и др. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 377 с.
2. **The Touring** Machine system / M. Arango et al. // Communications of the ACM. – 1993. – V. 36, Is. 1. – P. 69 – 77.
3. **Руководство** по GUID. Часть 1 [Электронный ресурс]. – URL: <https://blogs.msdn.microsoft.com/ruericlippert/2012/07/31/guid-1> (дата обращения: 24.09.2019).
4. **Лоскутников, А. А.** Системы автоматического управления БПЛА / А. А. Лоскутников, Н. С. Сенюшкин, В. В. Парамонов // Молодой ученый. – 2011. – № 9. – С. 56 – 58.
5. **Гимаров, В. В.** Информационные мультиагентные технологии в экономике / В. В. Гимаров, В. А. Гимаров, И. В. Иванова // Транспортное дело России. – 2011. – № 3. – С. 35–36.
6. **Сысоев, В. В.** Формирование конфликта в структурном представлении систем / В. В. Сысоев // Информационные технологии и системы. – 1996. – № 1. – С. 26 – 30.
7. **Построение** модели доверия и репутации к объектам мультиагентных робототехнических систем с децентрализованным управлением / И. А. Зикратов и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 3. – С. 30 – 38.

УДК 004.9, 004.35

Волков А. А., Вехтева Н. А., Сиухин А. А., Обухов А. Д.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +79537030619, e-mail: didim@eclabs.ru)

**ПРИМЕНЕНИЕ ОДНОПЛАТНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ СЕМЕЙСТВА
RASPBERRY PI В ДИСТАНЦИОННО-УПРАВЛЯЕМЫХ МЕХАТРОННЫХ
И РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ**

Volkov A. A., Vekhteva N. A., Siukhin A. A., Obukhov A. D
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. +79537030619, e-mail: didim@eclabs.ru)

**APPLICATION OF THE RASPBERRY PI SINGLE-BOARD COMPUTERS
IN THE REMOTE CONTROLLED MECHATRONIC AND ROBOTIC SYSTEMS**

Аннотация. Описывается семейство одноплатных компьютеров Raspberry Pi, приводятся их особенности и технические характеристики, а также рассматривается возможность их применения в дистанционно управляемых или автономных роботизированных комплексах.

Ключевые слова: одноплатный компьютер, Raspberry Pi, программно-аппаратный комплекс, удаленное управление, мехатронная система, роботизированная система.

Abstract. The article describes Raspberry Pi single-board computers family, gives their features and technical characteristics, and also considers possibility of their usage in remotely controlled or autonomous robotic complexes.

Keywords: single-board computer, Raspberry Pi, hardware-software complex, remote control, mechatronic system, robotic system.

Одной из основных тенденций современной индустрии является автоматизация. Применение автоматических и автоматизированных комплексов позволяет как повысить эффективность выполнения работ, так и снизить уровень опасности для жизни и здоровья персонала. Роботы, управляемые дистанционно или полностью автономные, способны решать задачи в различных неблагоприятных условиях, таких как агрессивная атмосфера, наличие вредных для здоровья излучений или труднодоступное расположение места проведения работ [1, 2].

При создании различных специализированных роботов одной из основных решаемых задач, наряду с разработкой кинематики и силовой электроники, является реализация системы управления. Система управления роботом представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий корректную работу всех его узлов, а также при необходимости взаимодействие с оператором. Если управляющие алгоритмы робота достаточно просты и не требуют большого объема вычислений, в качестве основного элемента системы управления может быть использован микроконтроллер. Современные микроконтроллеры позволяют в реальном времени обрабатывать сигналы с нескольких

датчиков и управлять несколькими исполнительными устройствами. Однако, в тех случаях, когда управление роботом требует серьезных вычислительных ресурсов (например, обработка изображений, потоковая передача видеосигнала или алгоритмы с применением нейронных сетей [7]), мощности даже самых продвинутых микроконтроллеров становится недостаточно.

В подобных случаях наиболее подходящим решением становятся одноплатные компьютеры. Одноплатные компьютеры, как и микроконтроллеры, имеют на борту различные низкоуровневые интерфейсы, такие как GPIO, SPI, UART и т.д. При этом располагают на несколько порядков более быстрым процессором и на 2–3 порядка большим объемом оперативной памяти, чем типичные микроконтроллеры, а также работают под управлением полноценной операционной системы. Одним из наиболее распространенных решений в данной области является семейство мини-компьютеров Raspberry Pi, разработанное британской компанией Raspberry Pi Foundation [3, 4]. Внешний вид одного из представителей данного семейства – модели 3B+, представлен на рис. 1, а ее технические характеристики приведены в табл. 1.



Рис. 1. Внешний вид Raspberry Pi 3B+

1. Технические характеристики Raspberry Pi 3B+

CPU	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit @ 1.4 ГГц
RAM	1Гб LPDDR2 SDRAM
Внешняя память	Слот для карт памяти Micro SD
Беспроводные интерфейсы	Wi-Fi 2.4ГГц и 5ГГц IEEE 802.11 b/g/n/ac, Bluetooth 4.2, BLE
Аудио/видео	HDMI, композитный видеовыход, аналоговый стерео выход
Периферия	26 GPIO, 4 ШИМ, 2 SPI, I ² C, UART, CSI, DSI, 4 USB 2.0, Ethernet
Питание	5В/2.5А постоянного тока

Компьютеры семейства Raspberry Pi представляют собой миниатюрные устройства, по размерам сопоставимые с кредитной картой. Они построены на базе системы на кристалле (SoC) от Broadcom, включающей 1 (в устройствах первого поколения) или 4 ядра с архитектурой ARM Cortex-A, а также видеоядро Broadcom VideoCore IV или Broadcom VideoCore VI (в устройствах 4-го поколения), которое поддерживает OpenGL ES 2.0 и аппаратное кодирование/декодирование видео различных форматов вплоть до 1080p60. Компьютеры поставляются с оперативной памятью объемом от 256 Мб, чего уже достаточно для работы полноценной операционной системы и решения множества различных задач управления, до 1 Гб (от 1 до 4 Гб в 4-м поколении), что позволяет проводить достаточно тяжелые вычисления, такие как обработка и анализ потока изображений. В качестве энергонезависимой памяти используются карты памяти microSDHC (полноразмерные SD в первом поколении), что позволяет хранить все необходимые для работы данные непосредственно на устройстве [5].

Среди цифровых интерфейсов, аппаратно реализованных в компьютерах семейства Raspberry Pi, можно отметить специализированный разъем для подключения видеодатчика – CSI (Camera Serial Interface), который позволяет подключать видеодатчик напрямую к SoC, что дает возможность аппаратно захватывать и обрабатывать видеопоток в реальном времени. Также на борту имеются такие привычные для микроконтроллеров интерфейсы как GPIO с поддержкой аппаратной ШИМ, SPI, I²C и UART, что в ряде случаев позволяет управлять исполнительными устройствами и читать состояние датчиков без необходимости использовать отдельный внешний микроконтроллер. Однако при жестких временных ограничениях, в случае когда даже написание модуля ядра не позволяет уложиться в интервалы, требуемые для управления тем или иным устройством, можно использовать для данного конкретного устройства внешний микроконтроллер, который будет общаться с основной системой посредством любого цифрового интерфейса [6].

Большинство представителей семейства также имеет встроенный адаптер беспроводных сетей Wi-Fi (вплоть до стандарта 802.11ac) и Bluetooth, что позволяет создавать системы ближнего радиуса действия, управляемые дистанционно по радиоканалу, без использования каких-либо внешних модулей связи. В том числе позволяет организовать беспроводную передачу видеопотока в реальном времени с минимальной задержкой (менее 300 миллисекунд).

Raspberry Pi поддерживается множеством различных операционных систем, большинство из которых базируются на ядре Linux (доступны такие дистрибутивы как Raspbian, Ubuntu, Arch Linux ARM, openSUSE и др), а также Windows 10 IoT Core, RISC OS Pi и некоторые другие специализированные ОС. Официальной системой, рекомендуемой Raspberry Pi Foundation, является Raspbian – дистрибутив Linux, основанный на Debian и оптимизированный для работы на Raspberry Pi. Использование Linux в качестве основного компонента программой составляющей позволяет как использовать различные готовые программные решения от сторонних разработчиков, так и реализовывать собственные приложения на различных языках программирования среднего и высокого уровня, начиная от чистого Си (там где нужно максимальное быстроедействие) и заканчивая такими высокоуровневыми языками, как Python, Java, Go и другие [7].

Таким образом, мини-компьютеры семейства Raspberry Pi могут быть использованы в качестве основного компонента системы управления роботизированными комплексами как самостоятельно, так и в связке с различными дополнительными модулями, такими как внешние микроконтроллеры или специализированные модули связи. Такое решение позволяет получить достаточно производительную систему непосредственно на устройстве, без необходимости задействовать для управления внешние вычислительные мощности.

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение».

Список использованных источников

1. **Волков, А. А.** Применение микроконтроллера ESP8266 при разработке аппаратного обеспечения для тренажерных комплексов / А. А. Волков, Н. А. Чеботов, Н. А. Вехтева / Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы V-й Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – С. 242 – 245.
2. **Артеменко, М. Н.** Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей / М. Н. Артеменко, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 416 – 430.
3. **Low cost real-time system monitoring using Raspberry Pi** / H. Q. Nguyen et al. // Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks. – IEEE. – 2015. – P. 857 – 859.
4. **Supersensors: Raspberry Pi devices for smart campus infrastructure** / K. Hentschel et al. // IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud). – IEEE. – 2016. – P. 58 – 62.
5. **Vanitha, M.** Monitoring and controlling of mobile robot via internet through raspberry Pi board / M. Vanitha, M. Selvalakshmi, R. Selvarasu // Second International Conference on Science Technology Engineering and Management (ICONSTEM). – IEEE. – 2016. – P. 462 – 466.
6. **Remote live-video security surveillance via mobile robot with raspberry Pi IP camera** / X. Jing et al. // International Conference on Intelligent Robotics and Applications. – Springer, Cham, 2017. – P. 776 – 788.
7. **Mathematical Model of Information Processing in Electronic Document Management System** / A. D. Obukhov, M. N. Krasnyansky, D. L. Dedov, S. V. Karpushkin // International Review of Automatic Control. – 2018. – V. 11, № 6. – P. 336 – 345.

УДК 004.852

Седых И. А.¹, Истомин В. А.²

Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк

¹(Тел. (4742)328133, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru),²(Тел. (4742)328133, e-mail: istomin96@mail.ru)**РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА****Sedykh I. A.¹, Istomin V. A.²**

Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk

¹(Тел. (4742)328133, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru),²(Тел. (4742)328133, e-mail: istomin96@mail.ru)**IMPLEMENTATION OF THE NEURAL NETWORK MODEL
OF CEMENT PRODUCTION**

Аннотация. Представлено описание изготовления клинкера на цементном производстве по сухому способу. Моделирование минералогического состава клинкера актуально, так как позволяет выполнять прогнозирование качества получаемого клинкера при заданном химическом составе сырьевого материала. В качестве математической модели используется радиально-базисная нейронная сеть, обучаемая с использованием гибридного алгоритма и реализованная в блоке программирования Mathcad. Показаны основные преимущества разработанной программы, а именно: сохранение и считывание данных в файл Excel, подбор коэффициента обучения, возможность сохранения промежуточных данных и дообучения сети. Приведены итоги обучения нейросетевой модели цементного производства и выполнено сравнение с полученными ранее результатами.

Ключевые слова: цементное производство, клинкер, вращающиеся печи, радиально-базисные нейронные сети, моделирование.

Abstract. The article provides a description of the manufacture of clinker in cement production by the dry method. Modeling the mineralogical composition of clinker is relevant, since it allows predicting the quality of the resulting clinker for a given chemical composition of the raw material. As a mathematical model, a radial basis neural network is used, trained using a hybrid algorithm and implemented in the Mathcad programming unit. The main advantages of the developed program are shown, namely: saving and reading data into an Excel file, selection of a learning coefficient, the ability to save intermediate data and retrain the network. The results of training the neural network model of cement production are presented and a comparison is made with previously obtained results.

Keywords: cement production, clinker, rotary kilns, radial basis neural networks, modeling.

Введение. Рассмотрим сухой способ изготовления клинкера на цементном производстве. Производство клинкера сухим способом обжига экономически и технически наиболее рационально, если начальные сырьевые материалы обладают следующими характеристиками: относительной однородностью по физической структуре и химическому составу, а также влажностью до 10...15%, что позволяет обеспечить возможность получения гомогенной сырьевой муки при измельчении сухого сырья [1].

Прежде чем образуется конечный продукт – клинкер, проводится последовательность физико-химических процессов, результатом которой является приобретение клинкером сложных микрокристаллической структуры и минералогического состава.

При сухом и мокром способах производства обжиг сырьевой смеси [2] осуществляется в основном во вращающихся печах. Вращающиеся печи имеют в своей конструкции расположенный слегка наклонно длинный цилиндр с огнеупорной футеровкой внутри, сваренный из листовой стали. Длина печей – 95...230 м, диаметр составляет 5...7 м. В России стали применять вращающиеся печи, работающие по сухому способу, размером 7×95 м, производительностью 3000 т/сут. при расходе теплоты на обжиг 3400 кДж/кг. Внутри печей ближе к верхнему холодному концу устраивают цепные завесы, чтобы улучшить теплообмен, также устанавливают теплообменники различной конструкции.

Во вращающихся печах используется принцип противотока. При сухом способе сырье в виде порошка подается автоматическим питателем в печь со стороны ее верхнего конца, а со стороны нижнего горячего конца вдувается топливо, сгорающее в виде 20 – 30 метрового факела. Только часть поперечного сечения печи занято сырьем, которое при вращении первой со скоростью 1...2 об/мин медленно движется к нижнему концу навстречу горячим газам через разные температурные зоны [3].

Из вращающейся печи цементный клинкер выходит в виде мелких камнеподобных зерен – гранул темно-серого или зеленовато-серого цвета. По выходе из печи клинкер интенсивно охлаждается с 1000 до 100...200 °С в колосниковых, рекуператорных и других холодильниках воздухом, идущим навстречу клинкеру или просасываемым через слой горячего клинкера. После чего клинкер выдерживается на складе от одной до двух недель. В последние годы сухой способ производства цемента значительно усовершенствован.

Моделирование минералогического состава клинкера на цементном производстве является актуальной задачей, потому что позволяет выполнять прогноз получаемого клинкера при заданном химическом составе сырьевого материала.

В статье [4] были разработаны нейросетевые модели производства клинкера на основе многослойного персептрона с различным количеством нейронов на скрытом слое в программе STATISTICA. Среди полученных сетей выбрана нейронная сеть с наименьшей среднеквадратической ошибкой, позволяющая прогнозировать минералогический состав клинкера. В данной работе рассматривается моделирование производства клинкера на основе радиально-базисной нейронной сети, реализованной в блоке программирования Mathcad [5]. Используется гибридный алгоритм обучения с подбором коэффициента обучения.

Радиально-базисные нейронные сети и их реализация. В общем случае под радиально-базисной нейронной сетью понимается сеть без обратных связей, которая содержит скрытый слой нейронов с радиальными базисными функциями активации.

Радиальные базисные нейронные сети [6] состоят из большего количества нейронов, чем стандартные сети с прямой передачей сигналов и обучением методом обратного распространения ошибки, но на их создание требуется значительно меньше времени.

Эти сети наиболее эффективны, когда доступно большое количество обучающих векторов.

Для реализации радиально-базисной нейросети использовался блок программирования в математическом пакете Mathcad. В программе выполнено взаимодействие с файлами Excel для считывания и записи входных, промежуточных и выходных данных. Имеется возможность сохранения процесса обучения, а также добавлена функция дообучения с последней выполненной итерации. Встроен подбор коэффициента обучения. Обучение проводится в соответствии с гибридным алгоритмом, который разделяется на два этапа:

- 1) подбор линейных параметров сети, т.е. весов выходного слоя, с использованием метода псевдообращения;
- 2) адаптация нелинейных параметров радиально-базисных функций, а именно их центра и ширины [5].

При достижении указанной ошибки нейронная сеть считается обученной и проводит проверку на тестовой выборке, которая является показателем достоверности и точности полученной имитационной модели.

Нейросетевая модель производства клинкера. В моделировании процесса получения клинкера использовались данные предоставленные цементным производством за 12 месяцев работы 3-х вращающихся печей. На рисунке 1 изображена схема получения клинкера с помощью сухого метода [4].

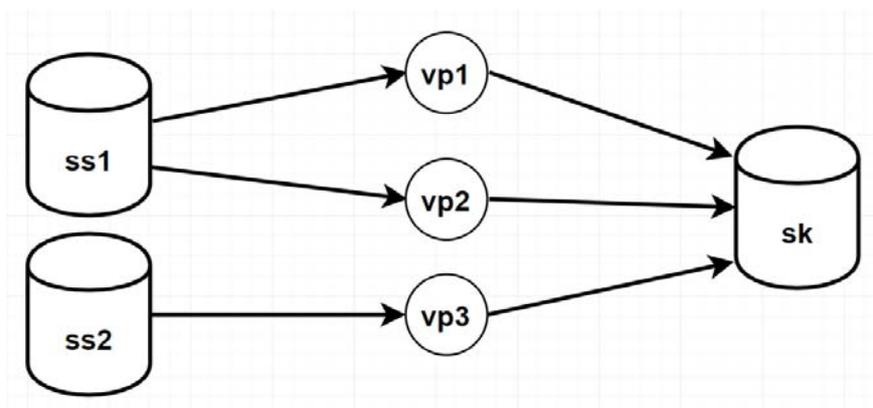


Рис. 1. Схема сухого способа производства цемента

На рисунке 1 используются следующие обозначения:

- ss1, ss2 – силос сырьевой муки;
- vp1, vp2 – вращающиеся печи (№ 1, 2) 4×60 м;
- vp3 – вращающаяся печь (№ 3) 5×75 м;
- sk – склад клинкера.

После проведения анализа часть переменных в сформированной выборке, по сравнению с [4], были исключены, так как не несли существенного влияния на результаты. Полученная выборка включает в себя 5 входных и 4 выходных переменных, где первые относятся к химическому составу и номеру печи, а вторые – к минералогическому

составу. К входным переменным относятся: X_1 – двуокись кремния (SiO_2), X_2 – окись алюминия (Al_2O_3), X_3 – окись железа (Fe_2O_3), X_4 – окись кальция (CaO), X_5 – номер вращающейся печи. Выходные переменные: Y_1 – трехкальциевый силикат ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Y_2 – двухкальциевый силикат ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Y_3 – трехкальциевый алюминат ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), Y_4 – четырехкальциевый алюмоферрит ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).

В результате обучения радиально-базисной сети в разработанной программе и проверки на контрольной выборке найдена следующая среднеквадратическая ошибка: 1,98, что улучшает результаты, полученные в [4].

Заключение. Таким образом, в статье рассмотрен сухой способ обжига клинкера на цементном производстве. Приведены основные характеристики радиально-базисных нейронных сетей. Описана реализация радиально-базисной нейронной сети в программе Mathcad. Представлены основные преимущества программы. Получена нейросетевая модель процесса производства клинкера, улучшающая показанные ранее результаты обучения многослойного персептрона в программе STATISTICA.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-48-480007 p_a).

Список использованных источников

1. **Колокольников, В. С.** Производство цемента [Текст] / В. С. Колокольников. – М. : Высшая школа, 1967. – 303 с.
2. **Классен, В. К.** Обжиг цементного клинкера [Текст] / В. К. Классен. – Красноярск : Стройиздат: Краснояр. отд., 1994. – 319 с.
3. **Алексеев, Б. В.** Технология производства цемента [Текст] / Б. В. Алексеев. – М. : Высшая школа, 1980. – 266 с.
4. **Седых, И. А.** Применение нейронных сетей в цементном производстве [Текст] / И. А. Седых, В. А. Истомина // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения : сб. науч. статей II Всерос. науч. конф. с межд. уч.: 22 – 24 апреля 2019 г. В 2-х ч. Ч. 1. – Тольятти : Качалин Александр Васильевич, 2019. – С. 558 – 564.
5. **Седых, И. А.** Гибридный алгоритм с подбором коэффициента обучения для радиально-базисных нейронных сетей в программе Mathcad [Текст] / И. А. Седых, В. А. Истомина // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2018. – № 2(36). – С. 20 – 25.
6. **Осовский, С.** Нейронные сети для обработки информации [Текст] / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

УДК 51-7

Корнаев А. В.¹, Корнаева Е. П.²

Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Россия, г. Орел

¹(Тел. (4862) 41-98-49, e-mail: rusakor@inbox.ru)

²(Тел. (4862) 41-98-49, e-mail: lenoks_box@mail.ru)

**ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ В ТОНКИХ КАНАЛАХ
НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ ВАРИАЦИОННОГО ПРИНЦИПА
И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Kornaev A. V.¹, Kornaeva E. P.²

Orel State University named after I. S. Turgenev, Russia, Orel

¹(Tel. (4862) 41-98-49, e-mail: rusakor@inbox.ru),

²(Tel. (4862) 41-98-49, e-mail: lenoks_box@mail.ru)

**NUMERICAL APPROACH FOR SUMULATION
OF FLUID FILM FLOW BASED ON COMBINATION
OF VARIOUS PRINCIPLE AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

Аннотация. Рассматривается комбинированный подход к построению численного поля скоростей течений вязких жидкостей в тонких каналах. Математическая постановка задачи представлена в виде обобщенного функционала Лагранжа, с помощью минимизации которого определяется функция тока. Функция тока строится как сложная функция с помощью искусственной нейронной сети с одним скрытым слоем. На скрытом слое в качестве функции активации используется так называемая логистическая функция, на выходном слое – линейная функция. Значения функции тока на границах канала определяются через расход жидкости. Таким образом, задача определения поля скорости сводится к задаче поиска коэффициентов функции тока путем минимизации обобщенного функционала Лагранжа. В работе представлено тестирование численной схемы расчета и подбор параметров модели.

Ключевые слова: Функционал Лагранжа, искусственная нейронная сеть, функция активации, вязкость, среда сложной реологии, поле скоростей.

Abstract. The paper deals with a combined approach to approximation of velocity fields and minimizing the objective functional in solving viscous fluids flow problems. The mathematical formulation of the problem is presented in the form of a generalized Lagrange functional. The flow function is designed using an feed forward artificial neural network of one hidden layer with logistic activation function. The boundary values of the flow function are determined through the fluid flow rate. Thus, the problem of determining the velocity field reduces to the problem of finding the network weights by minimizing the generalized Lagrange functional. The paper presents the results of testing of a numerical calculation scheme and selection of model parameters.

Keywords: Lagrange functional, artificial neural network, activation function, viscosity, medium of complex rheology, velocity field.

Введение. Многие законы физики сводятся к утверждению, что некоторая величина в рассматриваемом процессе должна достигать минимума или максимума. В такой формулировке эти законы носят название вариационных принципов [1, 2]. В решении задач гидромеханики вариационный подход поиска экстремального значения целевого функционала является альтернативой классическому подходу решения уравнений Навье–Стокса и других уравнений математической постановки краевых задач [3, 4]. Вариационные постановки задач о течении вязких сред обычно применяются при исследовании движения сред без учета сил инерции, однако они позволяют выполнять учет неньютоновских свойств сред [5]. В численной реализации прямых вариационных методов вариационная задача сводится к поиску минимума функции многих переменных. Точность решения во многом определяется удачным выбором способа аппроксимации неизвестных функций.

Данная работа посвящена вопросу применения искусственных нейронных сетей в качестве средств аппроксимации и поиска экстремума целевого функционала в вариационной задаче о течении вязкой несжимаемой жидкости.

Концептуальная и математическая модель. Рассматривается течение сплошной среды в области Ω с замкнутой поверхностью S , характеризуемой единичной внешней нормалью \vec{n} . Предполагается, что поле скоростей \vec{v} является вихрем некоторого поля \vec{a} : $\vec{v} = \nabla \times \vec{a}$, а компоненты этого поля a_i являются неизвестными варьируемыми функциями. Тогда поле скоростей тождественно удовлетворяет условию соленоидальности: $\nabla \cdot \vec{v} = \nabla \cdot (\nabla \times \vec{a}) \equiv 0$. Также предполагается, что на границе S значения неизвестных функций a_i и компоненты скорости v_i зафиксированы (рис. 1). Фиксация скорости эквивалентна заданию кинематических граничных условий.

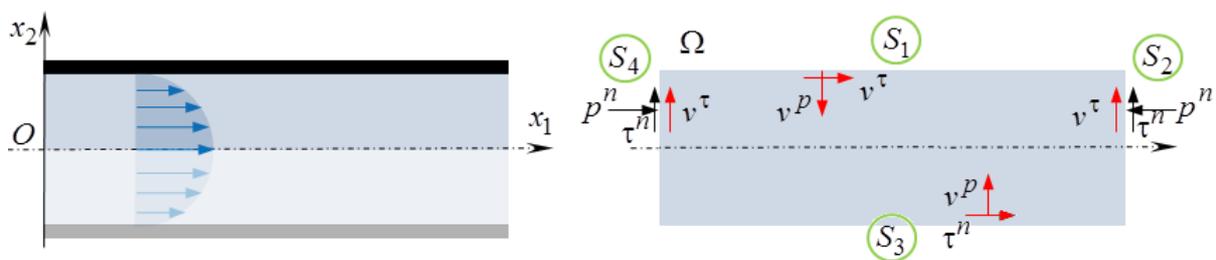


Рис. 1. Область течения и граничные условия

В некоторых случаях фиксация неизвестных функций a_i на границе эквивалентна статическим граничным условиям. В работе [5] показано, что обобщенный функционал Лагранжа вида:

$$J_L^*(a_m) = \int_{\Omega} \Pi_v d\Omega, \quad (1)$$

для вязкопластического потенциала Π_v принимает минимальное значение на реальном поле \vec{a} по сравнению с любым другим полем \vec{a}' с теми же значениями функций компонент поля и их первых производных на замкнутой границе S области течения Ω .

Записанный в декартовых координатах функционал (1) для случая течения сред, описываемых моделью Гершала–Балкли [5, 6] примет вид:

$$J = \int_{\Omega} \left(q_0 \xi_{ij} \xi_{ji} + \frac{q_1}{z+1} \left(2 \xi_{ij} \xi_{ji} \right)^{\frac{z+1}{2}} \right) d\Omega \rightarrow \min, \quad (2)$$

где q_0, q_1, z – параметры реологической модели Гершала–Балкли [6]; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций [5, 7].

На четырех границах задаются граничные условия: на торцах – расход, на неподвижных границах (пластинах) – скорость. Расход можно определить через функцию тока как $Q = \Psi|_{S_4} - \Psi|_{S_2}$, для определенности можно положить $\Psi|_{S_2} = 0$. С учетом вышесказанного граничные условия можно представить в виде:

$$\begin{cases} \Psi|_{S_2} = 0, \\ \Psi|_{S_4} = Q, \end{cases} \quad \begin{cases} V_1|_{S_1} = 0, \\ V_1|_{S_3} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, постановка задачи об определении поля скорости течения жидкости в плоском канале (рис. 1) представлена в виде вариационной задачи (2), (3) с учетом того, что компоненты тензора скоростей деформации определяются с помощью функции тока, фиксированной на границе.

Численный метод расчета полей скоростей на основе ИНС. Функционал (2) можно представить в виде конечной суммы:

$$J = \sum_{k=1}^m \left(q_0 \xi_{ij}^k \xi_{ji}^k + \frac{q_1}{z+1} \left(2 \xi_{ij}^k \xi_{ji}^k \right)^{\frac{z+1}{2}} \right) \Delta x_2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где ξ_{ij}^k – значение компонент тензора скоростей деформации в k расчетной точке; m – количество расчетных точек.

Для простоты обозначений здесь и далее в виду одномерности задачи переменная x_2 заменятся на x . Неизвестные компоненты тензора скоростей деформации предлагается определять через функцию тока $\Psi(x)$. Тогда ненулевые компоненты тензора скоростей деформации определяются как:

$$\xi_{12} = \xi_{21} = \frac{1}{2} \frac{d^2 \Psi}{dx^2}. \quad (5)$$

Вид функции тока определяется с помощью ИНС с одним скрытым слоем с учетом граничных условий (3). Структура ИНС представлена на рис. 2.

На скрытом слое в качестве функции активации используется логистическая функция [8] вида:

$$H(x) = (1 + \exp(-\theta_j x^j))^{-1},$$

где $\theta_j x^{j-1}$ – полином некоторой степени d , $j = \overline{0, d}$.

¹ Здесь и далее используется правило Эйнштейна суммирования по индексам и исключение Лурье.

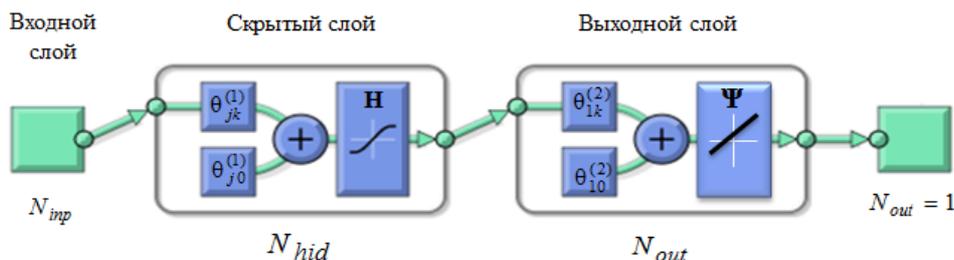


Рис. 2. Архитектура ИНС для аппроксимации функции тока

Для дальнейших расчетов эту формулу удобно представить в матричном виде:

$$\mathbf{H}(\chi) = \left(1 + \exp\left(\chi(\boldsymbol{\theta}^{(1)})^T\right) \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{H}_{[m \times N_{hid}]}$ – матрица с компонентами H_{pk} значений в нейронах скрытого слоя; $\chi_{m \times (d+1)}$ – матрица с компонентами $x_{pj} = x_i^j$, равными значениям слагаемых полинома степени d в каждой расчетной точке; $\boldsymbol{\theta}_{N_{hid} \times (d+1)}^{(1)}$ – матрица весовых коэффициентов для скрытого слоя с компонентами $\theta_{kj}^{(1)}$.

На выходном слое используется линейная функция активации. Тогда функция тока имеет вид:

$$\Psi(\chi) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^{(2)})^T, \quad (7)$$

где $\Psi(\chi)_{[m \times 1]}$ – матрица с компонентами, равными значению функции тока в расчетных точках; $\mathbf{H}_{[m \times (N_{hid} + 1)]}$ – матрица с компонентами H_{pk} значений в нейронах скрытого слоя с учетом единичного; $\boldsymbol{\theta}_{[1 \times (N_{hid} + 1)]}^{(2)}$ – матрица весовых коэффициентов $\theta_p^{(2)}$ для выходного слоя.

Используя ф. (5) и (7), целевая функция (4) преобразуется в функцию от неизвестных весовых коэффициентов $\theta_{jk}^{(1)}$ и $\theta_p^{(2)}$. Тогда определение функции тока сводится к задаче безусловной оптимизации (4). Учитывая граничные условия (3) однозначно выражаются четыре неизвестных коэффициента для выходного слоя нейронной сети (первые четыре компоненты матрицы $\boldsymbol{\theta}^{(2)}$ определяются через остальные компоненты $\theta_p^{(2)}$ и $\theta_{jk}^{(1)}$) из уравнений:

$$\begin{cases} \theta_p^{(2)} H_{1p} = 0, p = \overline{0, N_{hid}}, \\ \theta_p^{(2)} H_{mp} = Q, p = \overline{0, N_{hid}}, \\ \theta_j^{(2)} \frac{dH}{dx} \Big|_{1j} = 0, j = \overline{1, N_{hid}}, \\ \theta_j^{(2)} \frac{dH}{dx} \Big|_{mj} = 0, j = \overline{1, N_{hid}}, \end{cases} \quad (8)$$

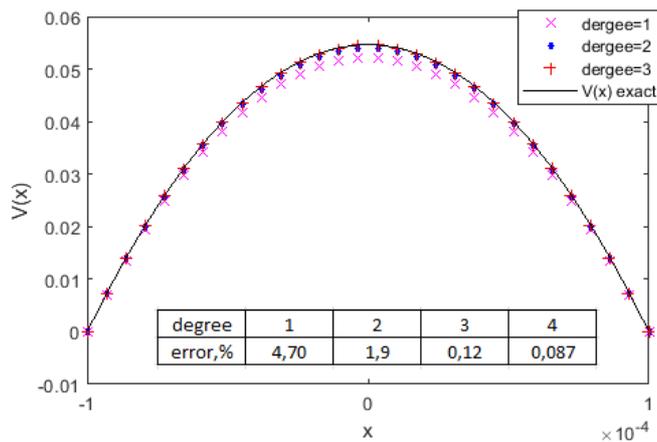
где $\frac{dH}{dx} \Big|_{ij} = (H_{ij}(1 - H_{ij})) (k \theta_{jk}^{(1)} \chi_{ik-1})$, $i = \overline{1, m}$ $k = \overline{1, d}$.

Поиск весовых коэффициентов выполнен с помощью численного метода, реализованного в системе математических вычислений [9] функции `fminsearch()`.

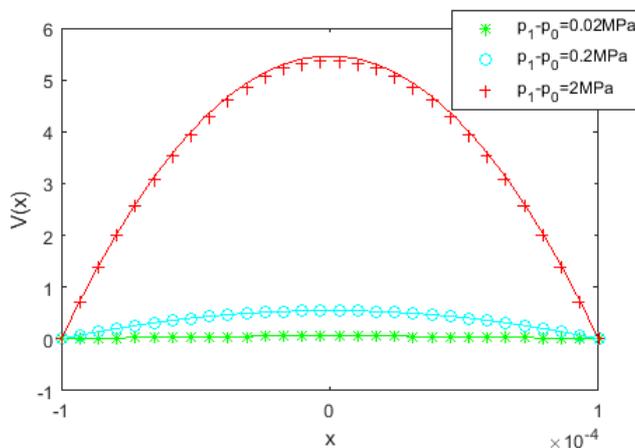
После того как решена задача (4) с учетом (5), (8) однокомпонентное поле скоростей вычисляется как:

$$V_i = \theta_j^{(1)} \frac{dH}{dx} \Big|_{ij}, \quad i = \overline{1, m} \quad j = \overline{1, N_{hid}}. \quad (9)$$

На рисунке 3, а поля скоростей φ . (9), полученные при различном значении параметра d , определяющего степень полинома в функции активации (6), сопоставлены с аналитическим решением [10], и представлена погрешность расчета.



а)



б)

Рис. 3. Сопоставление численного и аналитического решения:

а – варьируется параметр d функции активации φ . (6); б – варьируется перепад давления

Тестирование численного алгоритма в виде программы расчета поля скоростей течения (рис. 1) позволило установить, что погрешность численного решения не превышает 2% при параметре равном $d = 2, d = 3$. Несмотря на то, что с увеличением d погрешность продолжает убывать, большую степень полинома φ . (6) задавать не следует, чтобы избежать так называемого эффекта переобучения модели [8]. При дальнейшем тестировании программы для определения количества нейронов на входе (соответству-

ет количеству расчетных точек m) и количества нейронов скрытого слоя (соответствует количеству слагаемых полинома в ф. (6), но не менее 5, что определяется наличием граничных условий ф.(3)) установлено, что точность решения меняется незначительно при $N_{inp} = m \geq 20$ и $N_{hid} \geq 10$.

Дальнейший вычислительный эксперимент проводился при следующих значениях параметров модели: $d = 2$, $m = 20$, $N_{hid} = 10$. На рисунке 3, б сопоставлены численные и аналитические одномерные поля скоростей, полученные при различных перепадах давления.

Таким образом, в работе представлена возможность применения комбинированных численных методов, основанных на сочетании вариационного принципа и аппарата искусственных нейронных сетей, для решения задач о течении вязких жидкостей в тонких каналах

Статья подготовлена в рамках проекта РНФ № 16-19-00186.

Список использованных источников

1. **Эльсгольц, Л. В.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. В. Эльсгольц. – М. : Эдиториал УРСС. – 2000. – 320 с.
2. **Эйлер, Л.** Диссертация о принципе наименьшего действия с разбором возражений славнейшего проф. Кенига, выдвинутых против этого принципа / Л. Эйлер ; под ред. Л. С. Полака // Вариационные принципы механики : сб. ст. . – М. : Физматгиз. – 1959. – С. 96 – 108.
3. **Слезкин Н. А.** Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н. А. Слезкин. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1955. – 521 с.
4. **Hori, Y.** Hydrodynamic Lubrication / Y. Hori. – Tokyo : Yokendo Ltd. – 2006. – 239 p.
5. **Savin, L.** Variational principle in hydrodynamic lubrication theory / L. Savin, A. Kornaev, E. Kornaeva // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. – 2015. – № 9. – P. 114 – 119.
6. **Encyclopedia of tribology** / Q. J. Wang, Y.-H. Chung (Eds.). – New York : Springer Science + Business Media. – 2013. – 4192 p.
7. **Milne-Thomson, L. M.** Theoretical hydrodynamics / L. M. Milne-Thomson. – Fours edition. – London : Macmilan and Co LTD. – 1960. – 660 p.
8. **Haykin, S.** Neural Network Theory. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2008. – 936 p.
9. **GNU Octave.** – URL : <http://www.gnu.org/software/octave> (дата обращения: 10.09.2019).
10. **Корнаев, А. В.** Обобщенный вариационный принцип Лагранжа применительно к моделированию течений вязких несжимаемых сред сложной реологии / А. В. Корнаев, Е. П. Корнаева // Волны и вихри в сложных средах : сб. тр. 8 Междунар. научной школы молодых ученых. – М. : ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН. – 2017. – С. 90 – 95.

УДК 004.946

Архипов А. Е., Дедов Д. Л., Сидорчук А. О., Бочарова А. Н.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +79082981042, e-mail: alexeiarrh@gmail.com)

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЯ И ИНВЕРСНОЙ КИНЕМАТИКИ В ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ

A.E. Arhipov, Dedov D. L., Sidorchuk A.O., Bocharova A. N.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. +79082981042, e-mail: alexeiarrh@gmail.com)

APPLICATION OF MOTION CAPTURE SYSTEM AND INVERSE KINEMATICS IN TRAINING COMPLEXES

Аннотация. Рассмотрен способ создания системы захвата движений на основе системы виртуальной реальности и инверсной кинематики в контексте тренажерных комплексов.

Ключевые слова: виртуальная реальность, система захвата движений, тренажерные комплексы, обучение персонала.

Abstract. The article describes a method of creating a motion capture system based on virtual reality and inverse kinematics in the context of training complexes.

Keywords: virtual reality, motion capture system, training complexes, personnel training.

Технологии виртуальной реальности находят все более широкое применение во многих областях человеческой деятельности, и довольно широкое распространение они получили в тренажеростроении. Современные тренажерные комплексы позволяют реалистично моделировать как изучаемые объекты (пульты, оборудование, органы управления), так и различные ситуации, с которыми может столкнуться обучаемый. Однако, в некоторых случаях для повышения уровня погружения в виртуальный мир требуется отрисовка аватара – персонажа, представляющего собой модель тела человека в виртуальном пространстве – с возможностью копирования всех движений, которые совершает обучаемый в реальном мире [1, 2].

Данную проблему можно решить с помощью различных технологий захвата движения, большой выбор которых существует на рынке. В основном они представляют из себя комбинезон, оборудованный набором датчиков, которые позволяют отслеживать наиболее подвижные части тела человека. Например, система захвата движения Perception neuron использует 32 последовательно закрепленных датчика для полного отслеживания. Для захвата движения руки используется следующая последовательность закрепленных датчиков: плечевой сустав, плечо, предплечье, кисть, пальцы. Данные технологии используются в основном для создания высокоточной анимации персонажей для компьютерных игр, фильмов, мультипликации и т.д. В контексте тренажерных комплексов не требуется такая высокая точность отслеживания всего тела

человека, достаточно только обозначить основной тип движений и взаимодействия обучаемого с различными предметами виртуального мира. К тому же данные системы имеют довольно высокую стоимость [3].

Одним из методов решения данной проблемы состоит в использовании системы виртуальной реальности HTC Vive и трех отслеживающих трекеров HTC Vive Tracker и инверсной кинематики, на основе которых возможно создать недорогую систему захвата движения.

Определим понятия и термины. Одним из способов анимирования трехмерных моделей является *скелетная анимация*. Принцип ее работы заключается в управлении отдельными элементами – «костями», которые связаны между собой в иерархическую древовидную структуру – «скелет». Далее к таким элементам «привязывается» основная полигональная сетка трехмерного объекта. На рисунке 1 показан пример иерархической зависимости костей руки. Начальная, и родительская кость в данном случае – кость, имитирующая ключицу, следом, дочерняя – плеча, затем, предплечья – и так далее до кончиков пальцев [4].



Рис. 1. Пример иерархии костей руки

Для большей реалистичности используется настройка влияния костей на каждую точку трехмерной модели, что позволяет добиться большой степени реалистичности в движениях готовой модели.

Существует два основных способа создания движений скелета: прямая кинематика (Forward Kinematics – FK) и инверсная, или обратная кинематика (Inverse Kinematics – IK). В первом способе, при перемещении родительской кости равное перемещение производят и все дочерние объекты. На рисунке 2 показан пример работы прямой кинематики: в данном случае при повороте одной кости спины изменили свое положение кости верхней ее части, а также рук и головы.

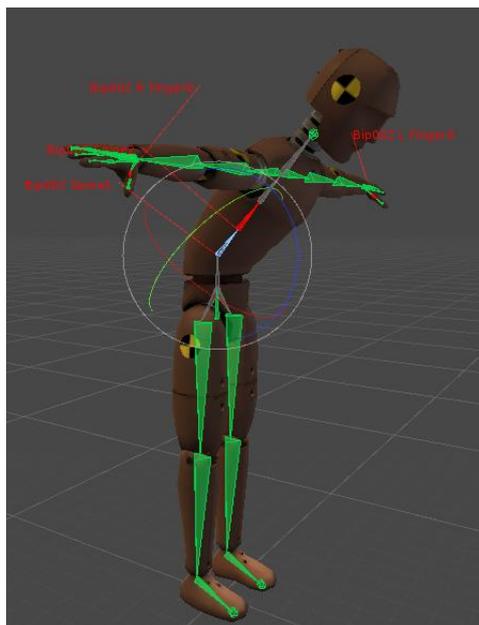


Рис. 2. Пример работы прямой кинематики

В инверсной кинематике способ перемещения ровно противоположный: дочерней кости задается координата, в которую ей следует переместиться, а алгоритм программы, в которой происходит создание анимации, делает всю грязную работу по перемещению всех вышестоящих по иерархии костей. На рисунке 3 показана работа инверсной кинематики: в данном случае самым нижестоящей по иерархии объектом является оружие, зависимое от кистей рук. А зеленый шарик – единственной точкой, с помощью которой можно полностью изменить позу аватара [5, 6].

Однако данный способ требует расстановки ограничений подвижности для «суставов» в готовом скелете, чтобы избежать искажений, неестественных для конкретной трехмерной модели. Например, выгнутых в обратную сторону коленей при анимации модели человека.

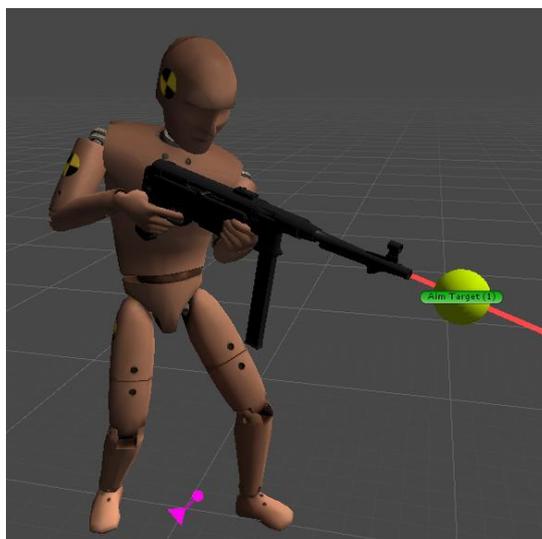


Рис. 3. Пример работы инверсной кинематики

Таким образом, при использовании инверсной кинематики возможно создание системы захвата движения, отслеживая только несколько крайних точек. Ими являются, голова, кисти рук и ступни ног. Комплект виртуальной реальности HTC Vive позволит отслеживать голову с помощью шлема и руки с помощью контроллеров. Для ног можно использовать HTC Vive Tracker, которые по принципу работы представляют собой такие же контроллеры, только без элементов управления, и служат только для отслеживания положения в пространстве какого-либо предмета, на котором закреплены [7,8].

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение» в рамках гранта РФФИ № 19-07-00660 на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение».

Список использованных источников

1. **Design** and development of adaptive simulators using 3D modeling / D. L. Dedov, M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. E. Arkhipov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 20. – P. 10415 – 10422.

2. **Разработка** адаптивных тренажерных систем профессионального назначения для моделирования процесса распространения пожаров / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, А. Е. Архипов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2017. – № 3(65). – С. 149 – 155.

3. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327. – № 2. – P. 022075.

4. **Автоматизированная** информационная система обучения персонала промышленных предприятий на основе виртуальных тренажерных комплексов / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов, А. А. Руднев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 11. – С. 86 – 94.

5. **Краснянский, М. Н.** Обучение операторов нефтехимических производств с применением компьютерных / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, Д. Л. Дедов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 11. – С. 50 – 56.

6. **Formulation** of the Problem of Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin, A. D. Obukhov // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Т. 12, № 3. – P. 2395 – 2409.

7. **Algorithm** for Structural and Parametric Synthesis of Electronic Document Management System of Research and Education Institution / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, A. V. Ostroukh, S. V. Karpushkin // Journal of Applied Sciences. – 2016. – Т. 16, № 7. – P. 332.

8. **Formalization** of document management using multilevel graph model of information processing / M. N. Krasnyanskiy, A. D. Obukhov, E. M. Solomatina et al. // Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2018. – Т. 2.1. – P. 413 – 420.

УДК 621.365.48

Карпушкин С. В.¹, Инина Е. А.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Тел. (4752)630706, e-mail: Elen68rus@mail.ru)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕСС-ФОРМ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР ПО ОБЪЕМУ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ИЗДЕЛИЯ

Karpushkin S. V.¹, Inina E. A.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Tel. (4752)630706, e-mail: Elen68rus@mail.ru)

OPTIMIZING THE DESIGN OF MOLDS TO REDUCE THE TEMPERATURE DIFFERENCE IN VOLUME OF THE PROCESSED WARE

Аннотация. Рассматривается проблема влияния геометрии пресс-форм на качество резинотехнических изделий, изготавливаемых на вулканизационных прессах. Представлены модификации конструкций промышленных пресс-форм, направленные на увеличение площади контакта между всеми их элементами, и результаты расчета температурных полей изделий в пресс-формах существующих и модифицированных конструкций.

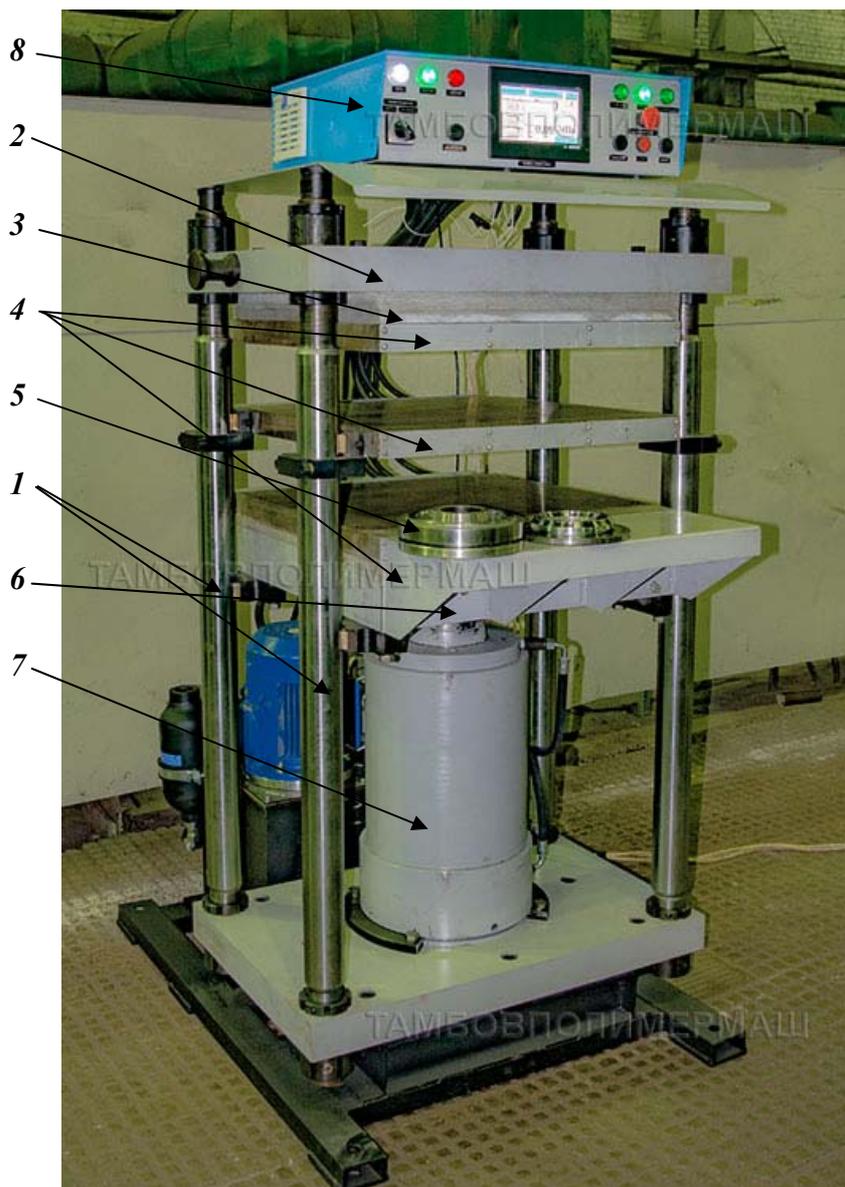
Ключевые слова: вулканизационный пресс, резинотехническое изделие, пресс-форма, перепад температур, оптимизация.

Abstract. The article considers the problem of influence geometry of molds on the quality of rubber products manufactured on vulcanizing presses. Modifications of the designs of industrial molds are presented, aimed at increasing the contact area between all their elements, and results of calculating the product's temperature fields in the molds of existing and modified designs.

Keywords: vulcanizing press, rubber product, mold, temperature difference, optimization.

Наиболее часто резинотехнические изделия (РТИ) изготавливаются методом горячего прессования, который можно представить в виде последовательности следующих операций: вулканизуемая смесь помещается в матрицу пресс-формы, прижимается пуансоном, нагревается и выдерживается при заданных температуре и давлении. Регулирование температуры осуществляется по двухпозиционному закону на основе измерения температуры в местах установки контрольных термопар. Широко применяемым оборудованием для горячего прессования являются гидравлические вулканизационные прессы с индукционным способом нагрева плит (рис. 1).

Следует отметить, что качество продукции во многом определяется равномерностью температурного поля в объеме изделия. На равномерность поля оказывают влияние геометрия пресс-формы и теплофизические свойства ее материала, мощность нагревательных элементов (индукторов) и их расположение в объеме плит прессы, позиционирование пресс-формы на рабочей поверхности плиты, температурное поле этой поверхности в период вулканизации.



**Рис. 1. Пресс колонный вулканизационный 65-600 2Э
производства АО «Завод Тамбовполимермаш»:**

1 – колонны; 2 – верхняя траверса; 3 – теплоизоляционные плиты; 4 – нагревательные плиты;
5 – пресс-форма; 6 – подвижный стол; 7 – гидроцилиндр; 8 – пульт управления

В данной работе рассматривается проблема влияния геометрии пресс-форм на качество РТИ, изготавливаемых на вулканизационных прессах. Для оценки этого влияния согласно методике, предложенной в [1], проведены расчеты конструкций пресс-форм, используемых АО «Завод Тамбовполимермаш» для вулканизации РТИ со сложной геометрией: пыльник 7.01.P.0316.00 и мембрана ВС-9471, см. рис. 1.

Чертежи исходной и модифицированных конструкций пресс-форм, описания модификаций, значения масс и поверхностей контакта между элементами пресс-формы представлены в табл. 1 и 2. Как видно, геометрия применяемых в производстве пресс-форм изменялась таким образом, чтобы увеличить площадь контакта между всеми их элементами. Дополнительно были исключены фаски, канавки и т.п.

Расчет температурных полей изделий в условиях стационарного режима нагрева системы «плита–пресс-форма–изделие–плита» в условиях теплообмена с окружающим воздухом проведен с применением модуля HeatTransfer системы конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics [2]. Результаты расчета представлены в табл. 3 и 4.

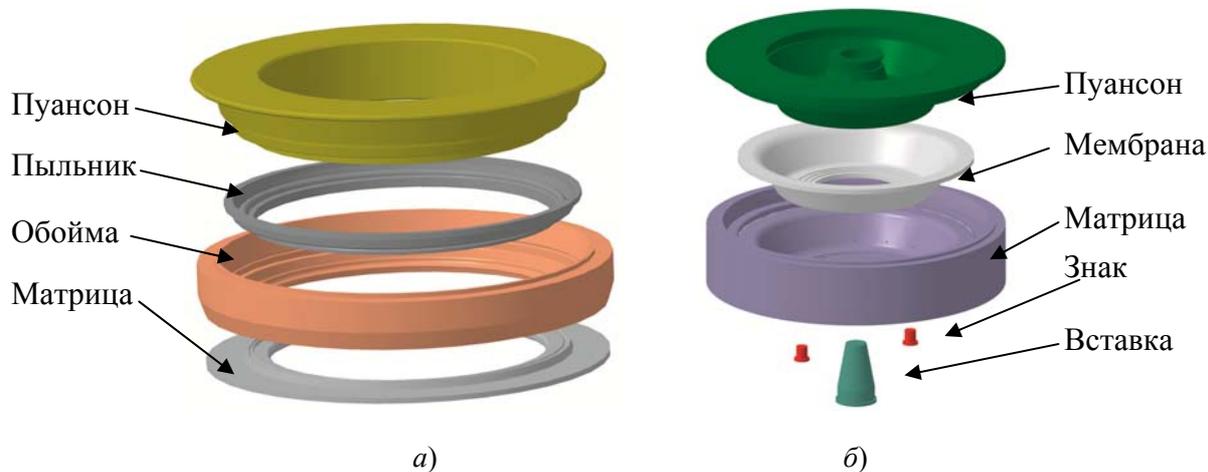
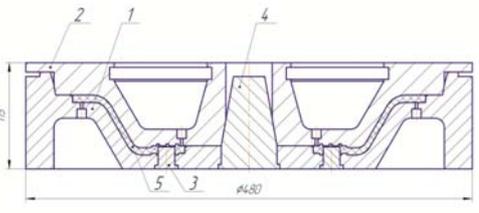
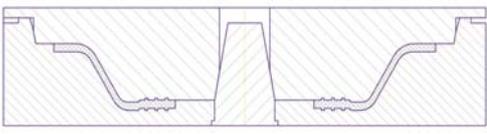
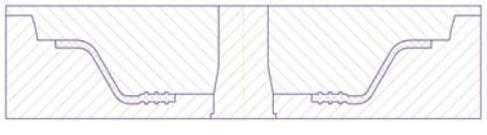


Рис. 1. Пресс-формы для изготовления пыльника (а) и мембраны (б)

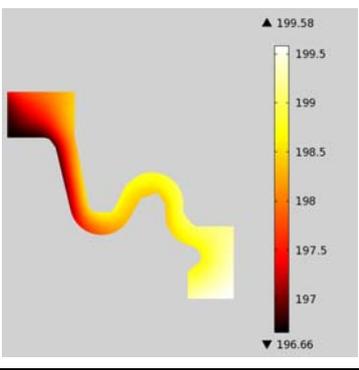
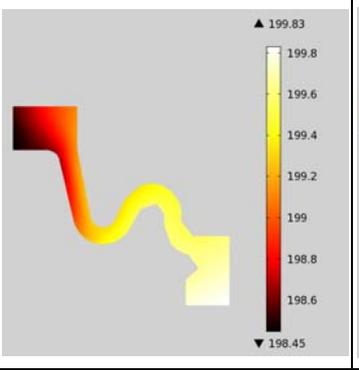
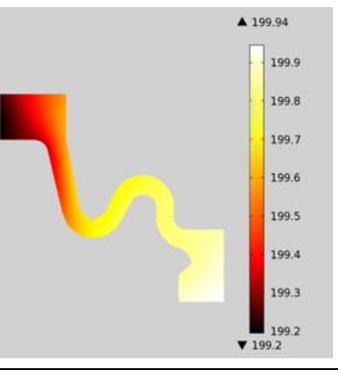
1. Расчетные конструкции пресс-формы для изготовления пыльника

№	Чертеж	Комментарий	Масса пресс-формы, кг	Поверхность контакта, см ²
1а		–	26,394	1021,8
1б		Изменена геометрия пуансона, обоймы и матрицы, убраны фаски и облойные канавки	25,782	1071,95
1в		Геометрия пуансона, обоймы и матрицы изменена таким образом, чтобы обеспечить максимальный контакт между деталями пресс-формы	50,03	1978,98

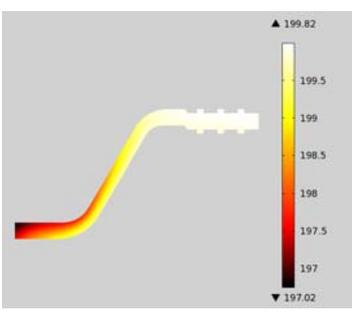
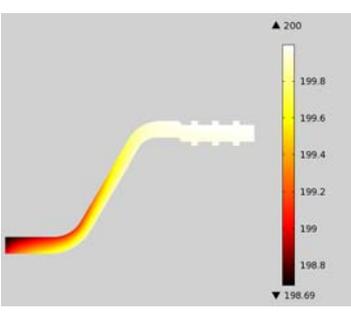
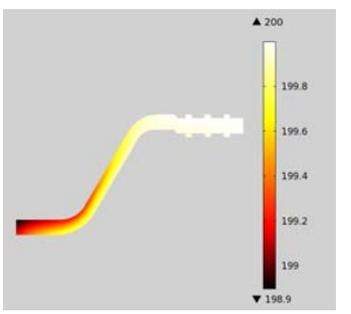
2. Расчетные конструкции пресс-формы для изготовления мембраны

№	Чертеж	Комментарий	Масса пресс-формы, кг	Поверхность контакта, см ²
2а		Не учтены ручки для переноски в пуансоне и матрице, упрощена геометрия облойных каналов	97,651	2197,08
2б		Изменена геометрия пуансона и матрицы: убраны полости (ликвидированы знаки), облойные каналы и канавки	154,08	3597,65
2в		Изменена геометрия пуансона и матрицы и вставки таким образом, чтобы обеспечить максимальный контакт между деталями пресс-формы	155,636	3617,28

3. Температурные поля пыльника в пресс-формах различных конструкций

№	1а	1б	1в
Температурное поле сечения изделия			
$T_{max}, °C$	198,58	199,83	199,94
$T_{min}, °C$	196,66	198,45	199,2
$\Delta T, °C$	1,92	1,38	0,74
$T_{av}, °C$	198,25	199,24	199,64

4. Температурные поля мембраны в пресс-формах различных конструкций

№	2а	2б	2в
Температурное поле сечения изделия			
$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	199,82	200	200
$T_{\min}, ^\circ\text{C}$	197,02	198,69	198,9
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2,8	1,31	1,1
$T_{\text{av}}, ^\circ\text{C}$	198,93	199,61	199,67

Как видно из данных табл. 3 и 4, с одной стороны, изменение геометрии пресс-форм позволило уменьшить значение температурного градиента по сечению изделий примерно в 2,5 раза. С другой стороны, при проектировании пресс-форм необходимо учитывать вопросы удобства зарядки и перезарядки пресс-форм, отвода излишков резиновой смеси, центрирования системы. По этим причинам практическое использование модифицированных конструкций, представленных в табл. 1 и 2, проблематично.

Таким образом, геометрия пресс-формы оказывает существенное влияние на температурное поле, формируемое в изделии. Для существующих технических решений проведение подобных исследований позволяет оценить степень пригодности используемых пресс-форм для изготовления изделий из конкретных резиновых смесей на конкретных вулканизационных прессах. При проектировании новых конструкций пресс-форм целесообразно решать подобные задачи с целью оптимизации температурного поля в вулканизируемом изделии.

Список использованных источников

1. **Малыгин, Е. Н.** Моделирование и расчет процессов индукционного нагрева прессового оборудования при производстве резинотехнических изделий / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, С. В. Карпов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2013. – № 3. – С. 85 – 104.

2. **Material library COMSOL.** – URL : <http://www.comsol.com/products/material-library/>. – Загл. с экрана.

УДК 62-932.4

Карпушкин С. В.¹, Чичканов Н. В.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Тел. (4752)630706, e-mail: p.nikita1994@mail.ru)

**ВЫБОР ПЛАНА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАГРЕВА
ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Karpushkin S. V.¹, Chichkanov N. V.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Tel. (4752)630706, e-mail: p.nikita1994@mail.ru)

**CHOICE OF A CALCULATION EXPERIMENT'S PLAN FOR OPTIMIZATION
OF PRESS EQUIPMENT'S HEATING SYSTEM PARAMETERS**

Аннотация. Сформулирована задача оптимизации параметров конструкции и режима функционирования систем нагрева прессового оборудования. Предложена методика оптимизации, основанная на проведении и обработке результатов вычислительных экспериментов. Обоснован выбор плана вычислительного эксперимента. Приведен пример оптимизации параметров промышленной нагревательной плиты вулканизационного прессы.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, прессовое оборудование, нагревательная плита, оптимизация, план эксперимента.

Abstract. The task of optimizing the design parameters and the functioning mode of the heating systems of press equipment is formulated. An optimization technique based on conducting and processing the results of computational experiments is proposed. The choice of the design of a computational experiment is justified. An example of optimizing the parameters of an industrial heating plate of a vulcanizing press is given.

Keywords: computational experiment, press equipment, heating plate, optimization, experiment's plan.

Прессовое оборудование получило широкое распространение в промышленности. Наиболее часто оно используется для вулканизации резинотехнических изделий в металлических пресс-формах, изготовления различных строительных материалов в форме плит, а также термообработки металлических изделий. К такому оборудованию предъявляются все более строгие требования, связанные, в основном, с точностью поддержания температуры нагрева. Допустимая неравномерность нагрева (максимальный перепад температур по рабочей поверхности нагревательных плит прессы по истечении заданного времени) чаще всего составляет ± 5 °С, однако в последнее время нередки ситуации, когда в техническое задание на разработку прессы закладывается неравномерность ± 1 °С.

Для выполнения этого требования необходима комплексная оптимизация конструктивных и режимных параметров системы нагрева прессового оборудования, однако в научных публикациях отсутствуют методики, позволяющие спроектировать электротермические установки с заданной степенью неравномерности температурного поля для реализации конкретных технологических процессов. Создание такой методики без всестороннего теоретического и экспериментального анализа систем обогрева прессового оборудования невозможно [1].

Общая постановка задачи оптимизации системы нагрева прессового оборудования формулируется следующим образом: необходимо найти такие конструктивные (число и взаимное расположение нагревателей, длина, ширина и положение центра каждого нагревателя) и режимные (мощность нагревателей) параметры нагревательных плит прессы, которые обеспечивают формирование требуемого температурного поля в объеме прессуемых изделий. Данная задача может быть решена двумя способами.

Первый основан на моделировании температурных полей непосредственно в изделиях [2] для минимизации перепада температур в их объеме. Применение этого способа затрудняется сложной геометрией некоторых изделий, отсутствием достоверных данных о теплофизических свойствах материалов, необходимостью учета тепловых эффектов, которые усиливаются с ростом массы изделий. Результаты оптимизации применимы только к конкретным изделиям.

Второй способ основан на моделировании нагрева плит прессы с целью минимизации перепада температур по рабочей поверхности [3]. Данный подход основан на утверждении, что равномерное температурное поле плит будет обеспечивать равномерный прогрев изделий и элементов пресс-форм. Отметим, что применение этого способа существенно упрощает исходную задачу: в расчетную модель включается только нагревательная плита, которую можно представить в виде совокупности тел канонической формы. Кроме того, в результате определяются параметры универсальных нагревательных плит, пригодных для производства изделий широкого диапазона типоразмеров и номенклатуры. По этим причинам принято решение о разработке методики решения задачи оптимизации на основе моделирования нагрева плит прессы.

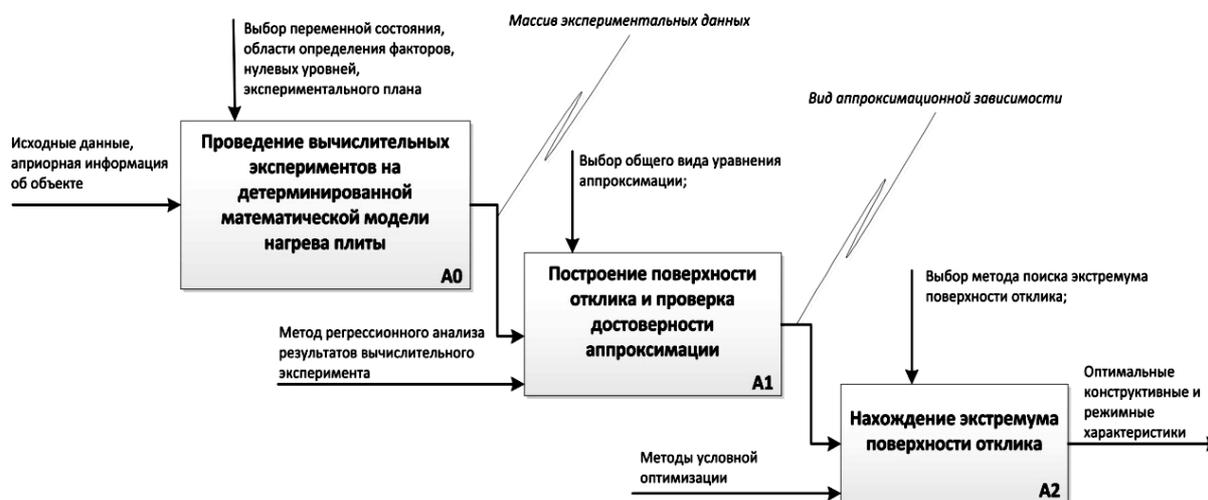


Рис. 1. Схема оптимизации параметров нагревательных плит прессы

Предлагаемая методика решения задачи оптимизации представлена на рис. 1. На первом этапе проводятся вычислительные эксперименты на детерминированной математической модели нагрева согласно теории планирования эксперимента. Второй этап – построение поверхности отклика (зависимости, приближенно связывающей варьируемые переменные с критерием оптимальности) по экспериментальным данным, и проверка достоверности аппроксимации. Значения варьируемых переменных, соответствующие экстремуму поверхности отклика (решение задачи оптимизации параметров нагревательной плиты) определяются на третьем этапе.

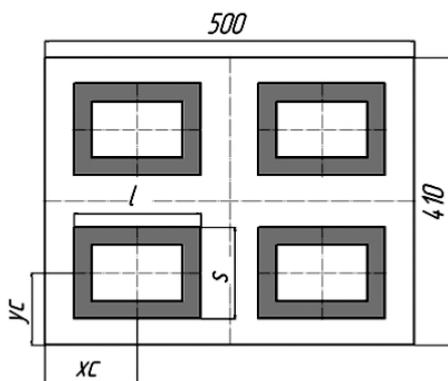


Рис. 2. Конструкция нагревательной плиты

В качестве объекта исследования использована промышленная нагревательная плита с четырьмя прямоугольными индукторами, используемая для производства РТИ на АО «Завод Тамбовполимермаш», см. рис. 2. Размеры плиты: длина $l = 500$ мм, ширина $s = 410$ мм, высота $h = 70$ мм. Индукторы размерами 172×127 мм размещены в пазах сечением 25×25 мм. Средняя мощность плиты 5 кВт.

На этапе проведения вычислительных экспериментов выполняются следующие операции [4]: выбор переменной состояния (перепад температур по рабочей поверхности плиты); выбор факторов эксперимента: $x_1 = Q$ (мощность одного индуктора), $x_2 = l$, $x_3 = s$, $x_4 = xc$, $x_5 = yc$; оценка области определения факторов (значения x_2, x_3, x_4, x_5 должны обеспечивать минимальное расстояние между индукторами, индуктором и краем плиты (25 мм), а значения $4 \cdot x_1$ – нагрев плиты до рабочей температуры за заданное время); выбор нулевых уровней факторов (центр экспериментального плана совмещается с центром области определения факторов); выбор плана эксперимента (порядок плана должен быть не меньше порядка уравнения регрессии); построение поверхности отклика (выбор вида уравнения регрессии, определение значений его коэффициентов, проверка достоверности аппроксимации); поиск экстремума поверхности отклика (решением задачи оптимизации являются значения факторов, соответствующие минимуму поверхности отклика).

Наибольшее влияние на качество результатов оптимизации оказывают выбор плана эксперимента и выбор вида уравнения регрессии. Проведенный в [5] сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов, полученных с применением линейного, квадратичного и кубического уравнений регрессии, показал, что для аппроксимации в данном случае целесообразно применение полинома второго порядка. Выбор оптимального плана эксперимента осуществляется на основе анализа априорной информации об объекте исследования и результатов предварительных экспериментов [6]. Для проведения предварительных экспериментов были выбраны, см. рис. 3, трехуровневый полный факторный эксперимент (ПФЭ), пятиуровневые ортогональные центральные композиционные планы (ОЦКП), трехуровневый границентрированный

центральный композиционный план (ГЦКП), ротатабельный центральный композиционный план (РЦКП), отличающийся от ОЦКП длиной «звездного» плеча, а также некомпозиционный трехуровневый план (НКП) Бокса–Беннета, представляющий собой выборку из ПФЭ [7].

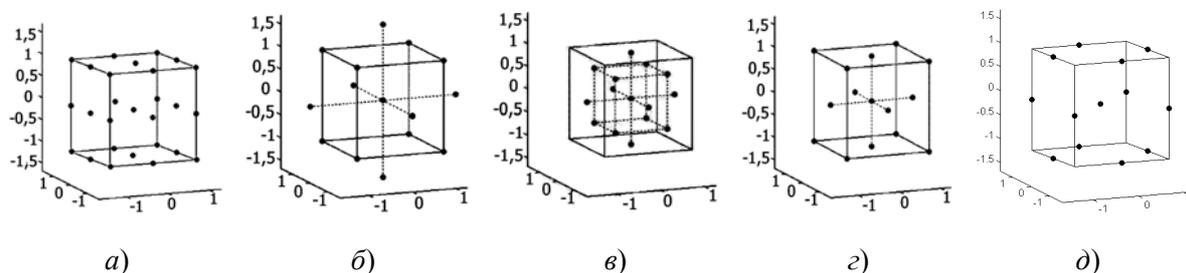


Рис. 3. Планы эксперимента для трех факторов:
a – трехуровневый ПФЭ; *б* – ОЦКП; *в* – вписанный ОЦКП;
г – трехуровневый ГЦКП; *д* – НКП Бокса–Беннета

Результаты применения ПФЭ рассматривались в качестве базовых, поскольку этот план предполагает проведение наибольшего числа экспериментов 3^5 (243 расчета). Для остальных планов, за исключением НКП, необходимо проведение $2^5 + 2 \cdot 5 + 1$ экспериментов (43 расчета), для НКП – 41 расчет.

Как видно из рис. 3, *б*, «звездные» точки ОЦКП выходят за область определения факторов состояния, что недопустимо для выбранного способа задания интервалов варьирования факторов. Поэтому для проведения экспериментов использовался вписанный ОЦКП (рис. 3, *в*), представляющий собой ОЦКП, масштабированный таким образом, чтобы «звездные» точки принадлежали граням гиперкуба. Аналогичной процедуре масштабирования подвергался и РЦКП. Данные для сравнительного анализа выбранных планов эксперимента второго порядка при решении 5-мерной задачи оптимизации сведены в табл. 1.

1. Результаты применения выбранных планов эксперимента

План	Число уровней	Число расчетов	Оптимальное решение: $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$					$f(X)$	Поверочный расчет $y(X)$
			$x_1 = Q$	$x_2 = l$	$x_3 = s$	$x_4 = xc$	$x_5 = yc$		
ПФЭ	3	243	1100	213	170	128	100	7,1	8,87
ВОЦКП	5	43	1194	215	159	128	100	6,1	8,75
РЦКП	5	43	1176	215	143	128	100	8,2	7,63
ГЦКП	3	43	1100	215	165	128	100	4,1	8,59
НКП	3	41	1101	213	160	128	100	7,9	7,90

Как видно, максимальная погрешность прогнозирования критерия оптимальности получена при использовании ГЦКП, максимальная точность прогнозирования – при использовании НКП, лучшее решение найдено при помощи РЦКП. В связи с этим мож-

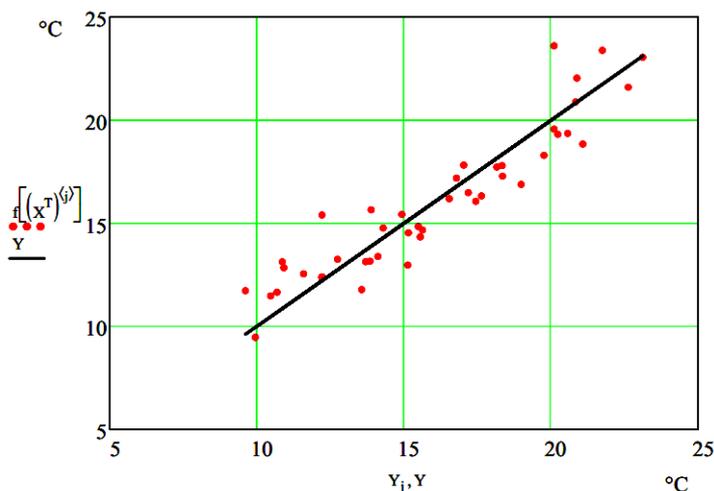


Рис. 4. График достоверности квадратичной аппроксимации (РЦКП)

между переменной состояния и факторами состояния. Среднее рассогласование расчетных данных и данных аппроксимации при использовании РЦКП составило 0,96 °С. График достоверности квадратичной аппроксимации при использовании РЦКП представлен на рис. 4.

Задача поиска минимума поверхности отклика относится к классу задач поиска экстремума функций многих переменных при наличии ограничений, которыми являются области определения факторов. Для ее решения был использован метод прямого поиска с возвратом [8]. Численные эксперименты по исследованию влияния факторов на переменную состояния проводили по методике, рассмотренной в [3]. В качестве метода решения уравнений математической модели нагрева плит использовали расчетный модуль HeatTransfer системы конечно-элементного анализа COMSOL. Отметим, что выбранная методика оптимизации позволяет избежать реализации сложного и трудоемкого электромагнитного анализа. Предварительно в САПР SolidWorks была создана параметризованная трехмерная твердотельная модель четверти исследуемой плиты, так как ее конструкция плиты является симметричной. Данное обстоятельство позволило сократить продолжительность одного численного эксперимента. Найденные оптимальные значения выбранных факторов эксперимента представлены в табл. 2.

2. Оптимальные значения факторов

Наименование фактора	Начальное значение	Оптимальное значение
$x_1 = Q$, Вт	1250	1176
$x_2 = l$, мм	172	215
$x_3 = s$, мм	127	143
$x_4 = x_c$, мм	123	128
$x_5 = y_c$, мм	101	100

но сделать вывод, что для решения задачи оптимизации конструктивных и режимных параметров системы обогрева прессового оборудования могут быть рекомендованы к использованию РЦКП и НКП.

Проверка адекватности аппроксимации показала, что аппроксимирующие функции адекватно описывают результаты вычислительного эксперимента. Кроме того, наблюдается высокая сила связи

Значение перепада температур по поверхности плиты до оптимизации составило 15,7 °С, после оптимизации – 7,6 °С. Таким образом, применение выбранной методики оптимизации позволило уменьшить перепад температур в 2 раза.

Список использованных источников

1. **Конечно-элементная** модель электрической машины с переключением потока для исследования динамических режимов работы / В. А. Дмитриевский, В. Е. Прахт, Ф. Н. Сарапулов, В. А. Климарев // *Электротехника*. – 2012. – № 3. – С. 7 – 13.
2. **Карпушкин, С. В.** Моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 2/2(286). – С. 35 – 41.
3. **Карпушкин, С. В.** Моделирование устройств индукционного нагрева на примере индукционных нагревательных плит вулканизационных прессов (на английском языке) / С. В. Карпушкин, С. В. Карпов, А. О. Глебов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 110 – 120.
4. **Спиридонов, А. А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
5. **Глебов, А. О.** Методика оптимизации режимных и конструктивных характеристик нагревательной плиты вулканизационного пресса / А. О. Глебов, С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 137 – 151.
6. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
7. **Вох, Г. Е. Р.** Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables / G. E. P. Vox, D. W. Behnken // *Technometrics*. – 1960. – V. 2, Is. 4. – P. 455 – 475.
8. **Бояринов, А. И.** Методы оптимизации в химической технологии / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1975. – 576 с.

УДК 631.313.6

Рыжков А. В., Мачкарин А. В.

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, Россия,
Белгородский район, п. Майский
(Тел. (4722)381948, e-mail: Ryzhkovbgsha@yandex.ru)

ДИСКОВЫЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ РАСТВОРОВ КОНЦЕНТРАТОВ МИКРООРГАНИЗМОВ

Ryzhkov A. V., Machkarin A. V.

Belgorod state agricultural university named V. Ya. Gorin, Russia,
Belgorod region, p. Mayskiy
(Tel. (4722)381948, e-mail: Ryzhkovbgsha@yandex.ru)

DISK TILLAGE UNIT FOR INTRODUCTION OF SOLUTIONS OF CONCENTRATES OF MICROORGANISMS

Аннотация. Повышение эффективности работы комбинированных почвообрабатывающих машин является важной задачей, направленной на снижение эксплуатационных затрат и повышение качества технологического процесса обработки почвы. Представлен агрегат для внутрпочвенного внесения растворов концентратов микроорганизмов и результаты их внесения. Приводится пример разработки 3D модели вырезного дискового рабочего органа при помощи комплекса Компас-3D.

Ключевые слова: биологизация, агрегат, диск, 3D-визуализация, раствор, микроорганизмы.

Abstract. Improving the efficiency of combined tillage machines is an important task aimed at reducing operating costs and improving the quality of the technological process of tillage. An aggregate for the intra-soil application of microbial concentrate solutions and the results of their application are presented. An example of developing a 3D model of a cut-out disk working body using the Compass-3D complex is given.

Keywords: biologization, unit, disk, 3D-visualization, solution, microorganisms.

Разработка любой научно аргументированной системы земледелия должна начинаться с обоснованной структуры посевов различных культур с учетом их биоклиматического потенциала, т.е. с проектирования правильного севооборота.

С точки зрения биологии нельзя не отметить исключительно благотворное влияние на почву бобовых, особенно многолетних растений. Они улучшают азотное питание и азотный баланс почвы, способствуют более рациональному расходованию гумусов, повышают биологическую активность почвы.

Использование экологически безопасных биологических препаратов позволяет оказывать стимулирующее влияние на рост, развитие, продуктивность и качество урожая сельскохозяйственных культур. Так, при внесении в почву Активатора почвенной микрофлоры (АПМ) (1г/га) и Азотовита (0,2 л/га) прибавка урожая озимой пшеницы соста-

вила 3,5 ц/га. Несколько меньшую прибавку – 3,1 ц/га – обеспечила обработка почвы Бактофосфином (0,2 л/га).

Учитывая, что стоимость биопрепаратов значительно ниже стоимости химических препаратов, а нормы их внесения на порядок ниже, применение их экономически выгодно [1].

Исследования показали, что сидеральные пары не только повышают плодородие почвы и урожайность сельскохозяйственных культур, но и надежно защищают почву от эрозии, улучшают экологическую обстановку и позволяют получать биологически чистую продукцию. Применение свежей растительной массы увеличило численность всех групп микроорганизмов, стимулировало их жизнедеятельность. Использование промежуточных культур в качестве сидерата позволило получить в первый год их действия существенные прибавки зерна по отношению к контролю. На ячмене выход зерна в среднем за два года увеличился на 0,38...0,67 т/га, на пшенице – на 0,28...0,56 т/га [2]. Таким образом, применение биотехнологии экономически выгодно.

Анализ литературных источников показывает, что измельчение сидеральных культур и внесение микроорганизмов в почву наиболее перспективно осуществлять дисковыми почвообрабатывающими орудиями. Важной составной частью конструкции дисковых борон являются их рабочие органы. Они должны обеспечивать надлежащее качество обработки почвы, высокую проходимость агрегата на объектах и минимальную энергоемкость выполняемого процесса.

Для осуществления биотехнологической обработки почвы на кафедре «Машины и оборудование в агробизнесе» совместно с ОАО «Белагромаш-Сервис им. В. М. Рязанова» разработан агрегат для внесения раствора концентратов микроорганизмов (рис. 1). Он включает трактор 35, емкость для раствора микроорганизмов 36 и дисковую борону 38. Подача биораствора 41 к штангам со сливными трубками 33 должна осуществляться при постоянном давлении воздуха в емкости машины для внесения биораствора, с которой агрегатируется данная борона. Воздух в емкость нагнетается компрессором трактора 39 по воздушному трубопроводу 37 [3].

Постоянство давления обеспечивается регулятором давления 40, установленным на верхней крышке емкости. Дисковая борона состоит из центральной рамы 5 и двух боковых рам: левой 3 и правой 8, шарнирно соединенных с центральной. Рамы выполнены из продольных брусьев 2, 4, 11 и поперечных брусьев 12. На центральной раме 5 имеются два гидроцилиндра 22 для подъема и опускания бороны. На раме 5 закреплен лонжерон 15, на котором смонтированы кронштейны 14 крепления колес. На боковых рамах 3 и 8 присоединены две дисковые батареи 28 переднего ряда и две дисковые батареи 17 заднего ряда. Дисковые батареи 28 и 17 располагаются на рамах несимметрично относительно продольной оси бороны и закреплены к ним посредством устройств 1 для изменения угла атаки [4].

Опорные колеса 13 используют при транспортировке бороны. Дисковая батарея 28 переднего ряда включает в себя основной брус 27, к которому при помощи трех опор крепления 26 с подшипниковыми узлами прикреплена ось 24 квадратного сечения. На оси 24 насажены рабочие органы (вырезные сферические диски) 9 и втулки. Рабочие

органы 9 выполнены в виде сферических дисков с пятью зубьями, кромки которых сделаны по логарифмической спирали. Каждый последующий диск 9 повернут на угол 10° относительно предыдущего. Это сделано для того, чтобы исключить воздействие периодических сил на подшипниковые узлы и снизить затраты мощности трактора на передвижение бороны.

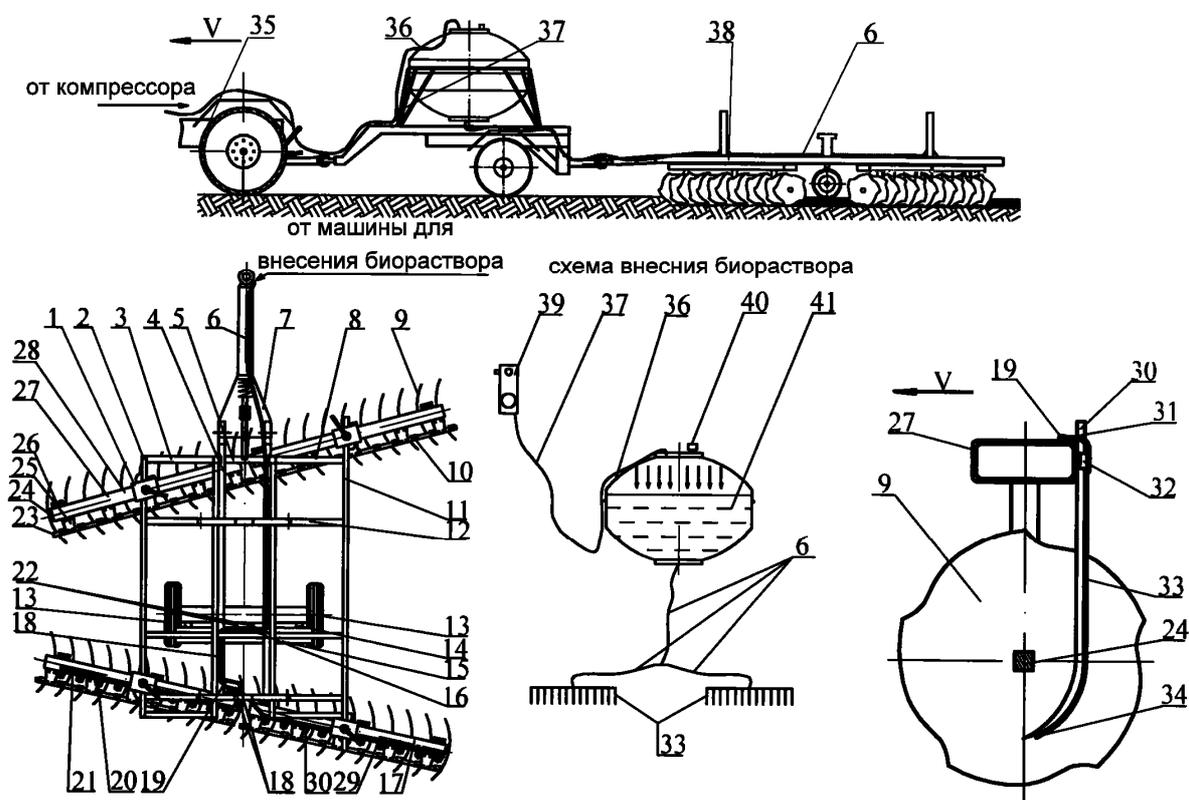


Рис. 1. Агрегат для внесения биологических растворов в почву:

- 1 – устройство для изменения угла атаки; 2, 4, 11 – продольные брусья; 3 – левая рама; 5 – центральная рама; 6, 16, 18, 21 – трубопроводы концентратов микроорганизмов; 7 – прицепное устройство; 8 – правая рама; 9 – диски; 10 – чистики дисков; 12 – поперечный брус рамы; 13 – колеса; 14, 25, 29 – кронштейны; 15 – лонжерон; 17, 28 – дисковые батареи; 18 – рукава концентратов микроорганизмов; 19 – тройник; 20 – рукав; 22 – гидроцилиндр; 23 – рейка крепления чистиков; 24 – ось; 26 – опора крепления дисковой батареи; 27 – основной брус дисковой батареи; 30 – подкармливающее долото; 31 – дозатор; 32 – крепление; 33 – сливная трубка концентратов микроорганизмов; 34 – крепление трубки; 35 – трактор; 36 – машина для концентрата микроорганизмов; 37 – воздушный трубопровод; 38 – дисковая борона; 39 – компрессор; 40 – регулятор давления; 41 – раствор концентратов микроорганизмов

К основному брусу 27 с помощью кронштейнов 25 присоединена рейка 23 крепления чистиков с чистиками 10 для дисков. Конструкция дисковой батареи 17 заднего ряда отличается от конструкции батареи 28 переднего ряда тем, что к брусу батареи 17 прикреплены кронштейны 29 с подкармливающими долотами 30. К подкармливающим долотам 30 подводятся трубопроводы концентратов микроорганизмов 21 и 22. К ним

от машины для внесения биораствора с помощью трубопровода 6 подается раствор через тройник 19 и далее в левый и правый рукава 20. На центральной раме 5 шарнирно закреплено прицепное устройство 7. Подкармливающее долото 30 прикреплено к основному брусу дисковой батареи 28 при помощи крепления 32. По сливной трубке 33, закрепленной на долоте при помощи крепления 34, биораствор поступает в почву. Глубину заделки концентратов микроорганизмов регулируют перемещением по высоте долот 30 в креплении 32.

Сферический диск 1 (рис. 2) содержит выступы (зубья) 2. Передняя режущая кромка 3 и задняя режущая кромка 4 зубьев 2 выполнены по логарифмической спирали, заданной формулой

$$\rho = \rho_0 \times q^{\varphi/2\pi},$$

где ρ – радиус кривизны логарифмической спирали; φ – угол поворота радиус-вектора при построении спирали; ρ_0 – начальный радиус спирали; q – коэффициент роста логарифмической спирали; а $\rho_0 = 106$, $q = 4$ [5].

Причем, начальный радиус ρ_0 и коэффициент роста логарифмической спирали q передней режущей кромки 3 и задней режущей кромки 4 одинаковы.

Концентраты микроорганизмов вносятся между дисков задних батарей на глубину 5...7 см [6]. Очень важно, чтобы рабочие органы дисковых борон имели такие параметры, которые обеспечивали бы не только надлежащее качество обработки почвы, но и имели минимальную энергоемкость. Одним из главных компонентов реактивных сил является сила резания, расходуемая на отделение пласта от верхнего почвенного горизонта. Она зависит от характера резания почвы дисковыми рабочими органами и от величины угла резания ω .

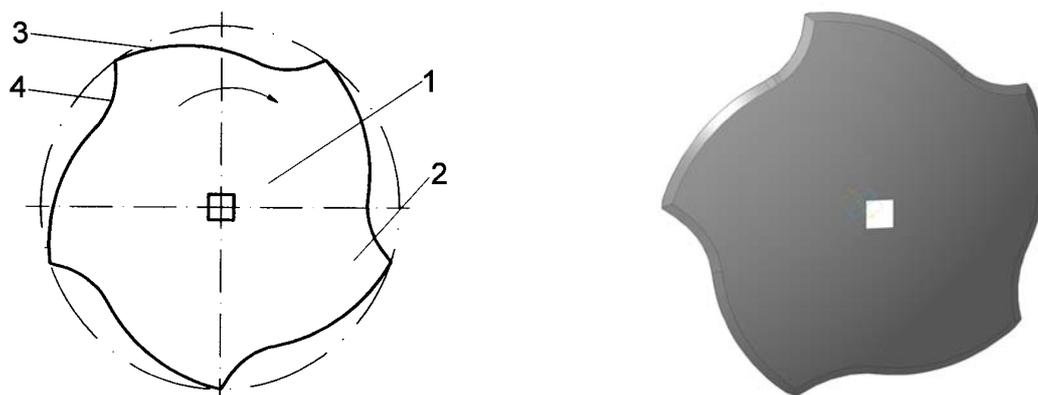


Рис. 2. Дисковый рабочий орган:

1 – сферический диск; 2 – зубья; 3, 4 – соответственно передняя и задняя режущая кромки

Логарифмическую спираль называют равноугольной, так как радиус-вектор логарифмической спирали пересекает касательную к спирали под одним и тем же углом μ . Аналогичным свойством обладает и окружность. Радиус-вектор окружности пересекает дугу окружности под углом 90° . У логарифмической спирали угол $\mu < 90^\circ$, и он зависит от коэффициента роста логарифмической спирали q . Угол резания ω у дуги логариф-

мической спирали будет меньше, чем у дуги окружности, что позволит снизить силы резания по сравнению с другими формами дисков [7, 8].

В результате опыта по определению влияния раствора концентратов микроорганизмов КМ-104-1 на урожайность и качество озимой пшеницы были выбраны следующие условия: было выбрано поле в 200 га; раствор концентратов микроорганизмов вносили на 100 га, а другие 100 га являлись фоновым; раствор микроорганизмов концентрацией 2% вносили в расчете 200 л/га. Влияние раствора концентратов микроорганизмов на урожайность и качество озимой пшеницы приведено в табл. 1.

1. Влияние раствора концентратов микроорганизмов на урожайность и качество зерна озимой пшеницы

Показатели	Озимая пшеница без внесения раствора концентратов микроорганизмов	Озимая пшеница при внесении раствора концентратов микроорганизмов	Разница
Урожайность озимой пшеницы, ц/га	26	29,7	3,7
Содержание сырой клейковины, %	18,9	24,3	5,4

В Белгородской области разработан, изготовлен и испытан агрегат для внесения раствора концентратов микроорганизмов в почву. Рабочий орган агрегата выполнен в виде диска с вырезами по форме логарифмической спирали. Было установлено, что применение раствора концентратов микроорганизмов КМ 104-1 с концентрацией 2% при внутрпочвенном внесении дисковой бороной при подготовке почвы под посев озимой пшеницы оказывает стимулирующее влияние на продуктивность и качество урожая. Прибавка урожая озимой пшеницы составила 3,7 ц/га. Содержание сырой клейковины увеличилось на 2,7...8,1%.

Список использованных источников

1. **Стифеев, А. И.** Биологизация земледелия в Курской области [Текст] / А. И. Стифеев // Земледелие. – 2002. – № 1. – С. 9.
2. **Постников, В. А.** Промежуточные культуры – сидеральное удобрение [Текст] / В. А. Постников // Аграрная наука. – 2002. – № 10. – С. 18–19.
3. **Ресурсосберегающая** технология и система машин для производства культур с элементами биологизации / В. М. Рязанов, С. А. Булавин, А. В. Рыжков и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2008. – № 2(3). – С. 19 – 21.
4. **Пат.** 2240662 РФ, МПК7 А 01 В 49/04,21/08, А 01 С 23/02. Дисковая борона с устройством для внесения биораствора в почву [Текст] / Булавин С. А., Любин В. Н.,

Рыжков А. В. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Белгородская ГСХА. – № 2003112785/12 ; заявл. 29.04.2003 ; опубл. 27.11.2004, Бюл. № 33.

5. **Пат.** 2220520 РФ, МКИ7 А 01 В 7/00, 21/08. Рабочий орган дисковой бороны [Текст] / Булавин С. А., Любин В. Н., Рыжков А. В.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Белгородская ГСХА. – № 2002128155/13 ; заявл. 21.10.2002 ; опубл. 10.01.2004, Бюл. № 1.

6. **Сельскохозяйственная** техника Белогорья / С. А. Булавин, В. Н. Любин, А. В. Мачкарин и др. //Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – № 1. – С. 39 – 42.

7. **Зарубежная** сельскохозяйственная техника : монография / А. Н. Макаренко, А. В. Мачкарин, Ю. В. Саенко и др. – Москва ; Белгород : ООО «Центральный коллектор библиотек «БИБКОМ», 2016. – 200 с.

8. **Зарубежная** сельскохозяйственная техника : учебное пособие / А. Н. Макаренко, А. В. Мачкарин, Ю. В. Саенко и др. – Белгород : Изд-во ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2015. – 200 с.

УДК 519.6

Балашов А. А., Левин В. Н.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)63-04-48, e-mail: balashovalexey@yandex.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЛАВЛЕНИЯ

Balashov A. A., Levin V. N.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)63-04-48, e-mail: balashovalexey@yandex.ru)

STEPHAN PROBLEM RESEARCH FOR POLYMERIC MATERIALS MELTING CONDITIONS

Аннотация. Задача Стефана, является нелинейной, и исследовалась как физиками, так и математиками. В частности, утверждалось, что условие в классической постановке задачи Стефана слишком грубое, так как в реальной среде температура в разных точках свободной границы может быть различной. Кроме того, было установлено, что значения температуры зависят от геометрии поверхности свободной границы. Тем не менее, квазилинейные обратные задачи Стефана еще мало изучены, хотя потребности математического моделирования и управления сложными нестационарными процессами, в особенности высокотемпературными процессами с фазовыми переходами, делают актуальным это направление исследований.

Ключевые слова: задача Стефана, плавление, полимерные материалы, постановка задачи, численное исследование.

Abstract. Stefan's problem is exclusively nonlinear and intensively studied by both physicists and mathematicians. In particular, it was argued that the condition for the classical formulation of the Stefan problem is too crude, since air temperature at different points. In addition, it was found that, nevertheless, Stefan's quasilinear inverse problems are still little studied, although mathematical models and control of complex non-stationary processes, in particular high-temperature processes with phase transitions, which make this research area relevant, are needed.

Keywords: Stefan problem, melting, polymeric materials, problem statement, numerical study.

Обычно под задачей со свободной границей понимают задачу, в которой требуется дать динамическое описание некоторой среды, которая может находиться либо в одной, либо в двух различных фазах (например, лед и вода). Свободной границей, как правило, называют поверхность раздела фаз между областями, занимаемыми различными фазами. В случае же однофазной задачи, понятно, что свободной границей является граница области, занимаемой рассматриваемой средой. Свободная граница перемещается со временем и ее позиция априори неизвестна. Такого рода задачи имеют глубокое прикладное значение во многих областях науки, не только в физике, но также и в мате-

матике. Первая математическая модель процессов, связанных со свободной границей была предложена Стефаном. В этой задаче требуется решить уравнение теплопроводности для температуры в каждой из областей с различными фазами, которое дополнено специальными условиями на свободной границе, а также начальными и граничными условиями.

Проведение численного эксперимента по изучению тепловых эффектов при плавлении различных полимерных материалов.

Постановка задачи Стефана имеет следующий вид (рис. 1) в виде следующих уравнений (1) – (6).

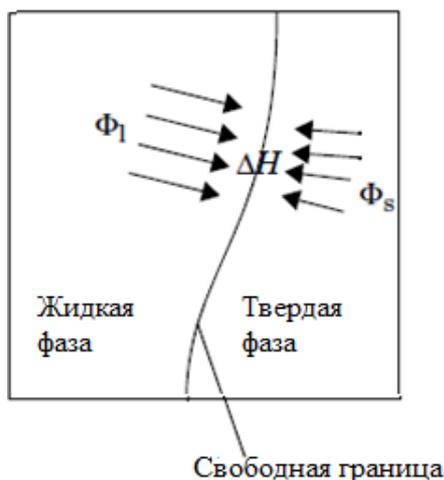


Рис. 1. Тепловая схема

$$d_z \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \bar{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted}, \quad (1)$$

$$d_z \rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} + d_z \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \bar{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_\rho + d_z Q_{vd}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \nabla \cdot \left[-\rho l + \mu (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) \right] + \bar{F}, \quad (3)$$

$$\rho_0 \Delta H \bar{v} \cdot \bar{n} = (\Phi_l - \Phi_s) \bar{n}, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 \beta (T - T_z),$$

$$T = T_0, \quad (5)$$

$$-n \cdot q = 0, \quad (6)$$

где $\bar{q} = -d_z k \nabla T$; $\rho \nabla \cdot (\bar{u}) = 0$; $u = 0$; ρ – плотность; C_p – теплоемкость; T – температура; \bar{q} – вектор теплового потока; \bar{u} – вектор скорости; P – давление; F – сила; ΔH – скрытая теплота плавления; \bar{v} – скорость фронта; \bar{n} – нормальный вектор; Φ_l и Φ_s – тепловые потоки жидкой и твердой фаз.

Результаты численного исследования для материала полиэтилена высокого давления (ПЭВД) представлены ниже [1, 2]. Используем программу COMSOL Multiphysics Модуль CFD для решения поставленной задачи (1) – (6).

В таблице 1 представлены физические свойства ПЭВД.

1. Физические свойства ПЭВД

Параметры	Название	Значение
λ	Теплопроводность	0,32 Вт/(м·К)
C_p	Удельная теплоемкость	1800 Дж/(кг·К)
β	Коэффициент теплового расширения	$3,5 \cdot 10^{-4}$ 1/К
ν	Кинематическая вязкость	0,0044 м ² /с
ρ	Плотность	900 кг/м ³
ΔH	Скрытая теплота плавления	75850 Дж/кг
T_f	Температура плавления	373 К
T_c	Температура горячей стенки	376 К
T_k	Температура холодной стенки	371 К
p	Избыточное давление	100 Па

Предполагается что начальное распределение температуры линейно.

Результаты моделирования по математической модели представлены ниже. Диапазон изменения времени от 0 до 10 000 секунд. Профиль температуры представлен на рис. 2 совместно с графиком теплового потока. Изотермические контуры в конце моделирования представлены на рис. 3.

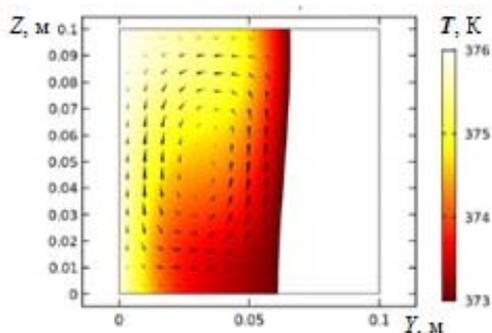


Рис. 2. Температурный профиль в конце моделирования ($\tau = 10\ 000$ с)

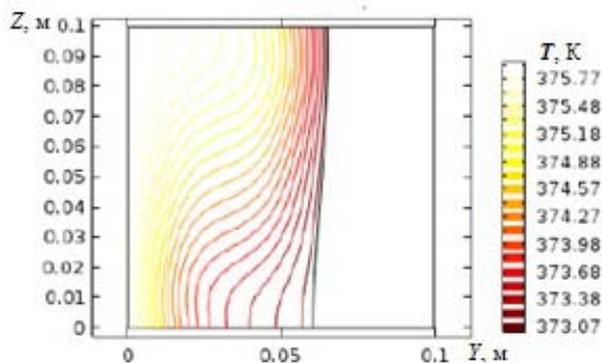


Рис. 3. Изотермический профиль ($\tau = 10\ 000$ с)

Профиль скоростей в области жидкой фазы представлен на рис. 4. Деформация сетки в конце моделирования представлена на рис. 5.

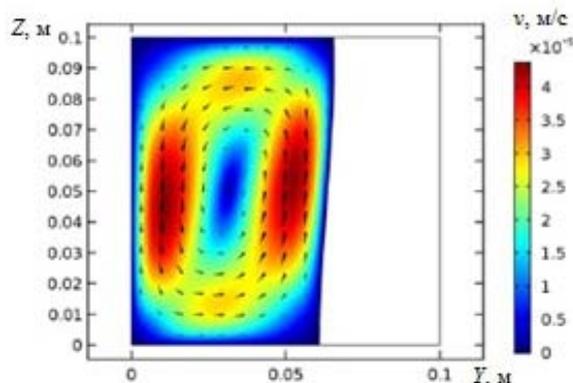


Рис. 4. Профиль скоростей в жидкой фазе ($\tau = 10\,000$ с)

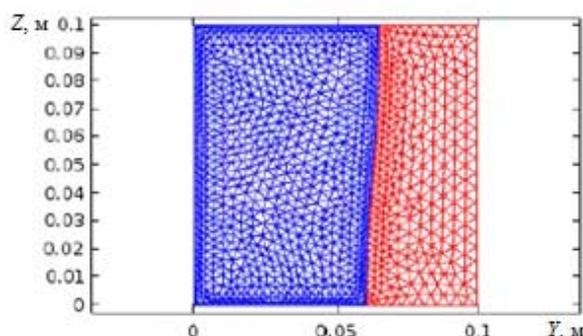


Рис. 5. Деформация сетки в конце моделирования ($\tau = 10\,000$ с)

Таким образом, данные параметры при численном исследовании давали в результате решение численной задачи Стефана различным профилем свободной границы при плавлении:

- время исследования изменялось от 0 до 10 000 секунд с шагом 100 секунд;
- избыточное давление во всех материалах составляло 100 Па;
- температура горячей стенки изменялась в пределах от $T_{пл}$ до $T_{пл}$ плюс 3К;
- температура холодной стенки изменялась в пределах от $T_{пл}$ минус 5К до $T_{пл}$.

Список использованных источников

1. **Балашов, А. А.** Поиск структурного перехода в полимере на термограмме путем дискретной фильтрации / А. А. Балашов, Н. П. Жуков, И. В. Жигулина // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 687 – 693.

2. **Балашов, А. А.** Эффект предплавления в кристаллах / А. А. Балашов, В. Н. Левин / Энергетика. Проблемы и перспективы развития // Третья Всерос. студенческая науч. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – С. 89 – 91.

УДК 531.65; 532.5

Голубовский В. В.¹, Коновалов В. В.¹, Родионов Ю. В.², Гумаров Г. С.³

¹Пензенский государственный технологический университет, Россия, г. Пенза
(Тел. 8(8412)690320, e-mail: v.golubovsky@yandex.ru),

²Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (8)9204780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru),

³Западно-Казахстанский государственный университет им. М. Утемисова,
Казахстан, г. Уральск
(Тел. +77771831245, e-mail: ggs65@yandex.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТИПА «СОПЛО–ЗАСЛОНКА»

Golubosky V. V.¹, Konovalov V. V.¹, Rodionov Yu. V.², Gumarov G. S.³

¹Penza State Technological University, Russia, Penza
(Tel. (8412)690320, e-mail: v.golubovsky@yandex.ru),

²Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (8)9204780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru),

³Makhambet Utemissov West Kazakhstan State University,
Kazakhstan, Uralsk
(Tel. +77771831245, e-mail: ggs65@yandex.ru)

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF HYDRAULIC RESISTANCE ON THE STATIC CHARACTERISTICS OF THE MEASURING TRANSDUCER TYPE “NOZZLE-DAMPER”

Аннотация. Представлено описание и принцип действия измерительного преобразователя угловой скорости на базе гидравлического усилителя типа «сопло–заслонка». Проведено теоретическое обоснование математической модели расчета статических характеристик преобразователя на основе уравнения движения жидкости Бернулли. Математическая модель реализована в программе MathCAD. Результаты моделирования статических характеристик, с учетом использования предложенных поправочных коэффициентов, позволяют адекватно описывать данные показатели преобразователя. Статические показатели адекватности предложенной модели точнее описывают процессы, чем аналогичные значения линейных моделей по опытным данным. Предложенную модель не рекомендуется использовать при давлении питания измерительного преобразователя менее 0,5 МПа.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, сопло-заслонка, статические характеристики, гидравлические сопротивления преобразователя, моделирование преобразователя.

Abstract. The paper presents the description and principle of operation of the angular velocity transducer on the basis of a hydraulic amplifier type «nozzle-damper». The theoretical substantiation of the mathematical model for calculating the static characteristics of the transducer on the basis of the Bernoulli fluid motion equation is carried out. The mathematical model is implemented in the MathCAD program. The results of modeling of static characteristics, taking into account the use of the proposed correction coefficients, allow to adequately describe these parameters of the Converter. Statistical indicators of the adequacy of the proposed model more accurately describe the processes than similar values of linear models according to experimental data. The proposed model is not recommended for use when the supply pressure of the transducer is less than 0.5 MPa.

Keywords: measuring transducer, nozzle-damper, static characteristics, hydraulic resistance of the transducer, modeling of the transducer.

Гидравлические усилители мощности получили широкое применение в различных исполнительных приводах машин и механизмов [1, 2], а также в системах управления [3, 4]. Это обусловлено рядом их достоинств: высокое быстродействие; высокая чувствительность; возможность передачи больших усилий; бесступенчатое регулирование скоростей [5]. Анализ показывает, что для машин имеющих гидравлические приводы рабочих органов целесообразно применять гидравлические системы автоматического управления, т.е. использовать принцип единой рабочей среды (жидкости), так как тогда отпадает необходимость многократных преобразований информации о контролируемом параметре из одного вида энергии в другой, что упрощает схему системы автоматического управления.

Для подобных систем наиболее приемлемыми могут явиться измерительные преобразователи, созданные на базе известных типов гидравлических усилителей, в частности, с элементами сопло-заслонка [6, 7]. В таких измерительных преобразователях переменный дроссель сопло-заслонка обычно используются совместно с последовательно включенным на входе постоянным дросселем [8 – 10].

На рисунке 1 представлена принципиальная схема измерительного преобразователя угловой скорости на базе гидравлического усилителя сопло-заслонка в первом каскаде и золотниковым дросселирующим распределителем во втором каскаде.

Для регулирования угловой скорости [10] используется преобразователь. В исходном положении, когда силы инерции в направлении хода заслонки (рис. 1) отсутствуют, рабочая жидкость из линии 1 поступает через постоянные дроссели 3 и 8 в рабочие камеры сопл 5 и 10, а затем, пройдя сопротивления в виде зазоров между торцами сопл и заслонки 6, по линии 7 сливается в бак. Инерционная заслонка находится в равновесии, занимая при этом симметричное положение в центре корпуса преобразователя, под действием упругих сил создаваемых центрирующими пружинами (на рис. 1 не показаны). Это приводит к созданию одинаковых сопротивлений истечению рабочей жидкости из сопл 5 и 10, что обеспечивает равенство давлений в рабочих камерах ($P_1 = P_2$).

При вращении ротора с преобразователем, в последнем возникает центробежная сила инерции, направленная вдоль оси чувствительности – хода заслонки (например, вправо), под действием силы инерции заслонка 6 перемещается вправо и изменяет гид-

равлические сопротивления сопел 5 и 10. Сопротивление истечению масла из сопла 5 увеличивается, а из сопла 10 уменьшается, что приводит к соответствующему изменению давлений ($P_1 > P_2$) в рабочих камерах сопел 5 и 10. Возникающая разность давлений (перепад) $\Delta P = P_1 - P_2$ передается по линиям, и используется как управляющий сигнал на входах исполнительного элемента 12, например, дросселирующего золотникового распределителя.

При изменении направления ускорения ротора на противоположное, происходит перемещение заслонки 6 влево. Сопротивление истечению масла из сопла 10 увеличивается, а из сопла 5 уменьшается, что приводит к возникновению соответствующего перепада давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ в рабочих камерах сопел 5 и 10.

При отсутствии ускорения инерционная заслонка 6 под действием упругих сил пружин, расположенных по бокам заслонки, возвращается в начальное положение, что приводит к выравниванию давлений в рабочих камерах сопел 5 и 10. Преобразователь возвращается в исходное положение.

Равенство давлений P_1 и P_2 означает отсутствие выходного сигнала и обеспечивается предварительной настройкой преобразователя.

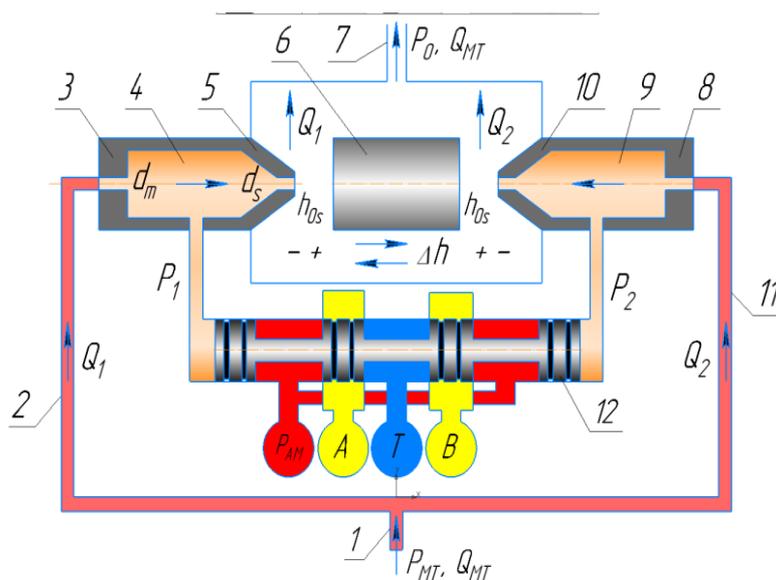


Рис. 1. Принципиальная схема устройства:

- 1 – подводящий трубопровод; 2, 11 – ветви трубопровода; 3, 8 – постоянные дроссели;
 4, 9 – рабочие камеры; 5, 10 – сопла; 6 – заслонка; 7 – отводящий трубопровод;
 12 – исполнительный механизм; P_{MT} – давление питания измерительного преобразователя, МПа; P_0 – давление на выходе, МПа; P_1, P_2 – давление в рабочих камерах, МПа;
 P_{AM} – давление питания исполнительного механизма, МПа; A, B – линии управления приводом промышленного оборудования; T – линия для слива рабочей жидкости;
 Q_{MT} – расход жидкости через измерительный преобразователь, м³/с; Q_1, Q_2 – расход жидкости, через сопла 5 и 10, м³/с; d_m – диаметр отверстия постоянного дросселя, м;
 d_s – диаметр отверстия сопла, м; h_{0s} – средний зазор между соплом и заслонкой, м;
 Δh – смещение заслонки от среднего положения, м

Разность давлений $\Delta P = P_1 - P_2 = f(\Delta h)$ в рабочих камерах, возникающая при смещении заслонки из нейтрального положения, используется для приведения в действие исполнительного механизма автоматического регулятора системы управления, включенного в диагональ моста. В качестве автоматического регулятора используется золотниковый дросселирующий распределитель, регулирующий расход жидкости на входе и выходе (в линиях *A* и *B*) гидравлического двигателя привода машины, при этом линии *T* соединены со сливом. Под действием разности давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ в линиях под торцами золотника, он смещается, изменяя проходные сечения соответствующих щелей и, тем самым, формируя сигнал, который используется для автоматического управления приводом промышленного оборудования.

Целью исследований являлось установление выражений, описывающих работу предложенной конструкции распределителя сопло-задвижка с учетом имеющихся особенностей его конструкции.

Методика исследования. Методика исследования предусматривает теоретическое обоснование предлагаемых выражений, описывающих работу преобразователя, анализ численных результатов, полученных численным моделированием в программе MathCAD, и их проверка путем сравнения с экспериментальными данными.

Разработка методик расчета статических характеристик измерительных преобразователей вызвана необходимостью получения аналитических зависимостей, позволяющих на стадии проектирования определять параметры и характеристики элементов преобразователя.

Расчеты позволяют определить рабочие диапазоны изменения параметров и характеристик или установить их оптимальные значения при использовании преобразователей в системах автоматического управления. К таким характеристикам можно отнести: характеристики элементов входящих в состав преобразователей (расходная характеристика, потери давления на регулируемых и постоянных дросселях) и характеристики самих преобразователей (расходная, перепадная).

Результаты исследования. На входе в измерительный преобразователь подается давление P_{MT} (МПа), а на выходе из устройства отработанная жидкость сливается в емкость с давлением P_0 . В результате наблюдается падение давления ΔP , которое будет снижаться на нескольких участках: на дросселе ΔP_1 , на сопле ΔP_2 и в зазоре между соплом и заслонкой ΔP_3 . Падение давления, МПа, определится:

$$\Delta P = P - P_0 = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3. \quad (1)$$

Учитывая равную геодезическую высоту расположения элементов устройства и высоту столба жидкости (давление), миниатюрность длины трубопровода, из закона движения жидкости Бернулли учитываем лишь воздействие скоростного напора жидкости. Падение давления на участках ветки трубопровода, МПа [11]:

$$\Delta P_i = \frac{\xi_i \cdot \rho_i \cdot g_i^2}{2}, \quad (2)$$

где ϑ_i – скорость движения жидкости на i -м элементе конструкции, м/с; ρ_i – плотность жидкости на i -м элементе конструкции, кг/м³. Для несжимаемой жидкости плотность ρ постоянна.

Коэффициент расхода на i -м элементе ветви трубопровода [11]:

$$\xi_i = \frac{\lambda_i \cdot l_i}{d_i}, \quad (3)$$

где l_i – длина i -го участка; λ_i – коэффициент трения на участке; d_i – диаметр отверстия i -го элемента конструкции (d_m – дросселя, d_s – сопла), м.

Расход жидкости (м³/с) на всех i -х участках ветви трубопровода постоянный для несжимаемой жидкости в силу закона сохранения материи, и определяется, м³/с:

$$Q = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = \pi \cdot d_i \cdot h_0 \cdot \vartheta_i, \quad (4)$$

где d_i – диаметр i -го отверстия, м; h_0 – зазор между соплом и заслонкой, м:

$$h_0 = h_{0s} + \Delta h,$$

при этом h_{0s} – средний зазор между соплом и заслонкой, м; Δh – смещение золотника от среднего положения, м

Скорость движения жидкости определится, м/с:

$$\vartheta_i = \frac{4Q}{\pi \cdot d_i^2} = \frac{4Q}{\pi \cdot d_s \cdot h_0}. \quad (5)$$

Соответственно, суммарное падение давления в ветви ΔP определится с учетом падения на дросселе ΔP_1 , на сопле ΔP_2 и в зазоре между соплом и заслонкой ΔP_3 :

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot Q^2}{2\pi^2} \left[\frac{16\lambda_m \cdot l_m}{d_m^5} + \frac{16\lambda_s \cdot l_s}{d_s^5} + \frac{\lambda_0 \cdot d_{st}}{2d_m \cdot d_s^2 \cdot h_0^2} \right], \quad (6)$$

где d_{st} – диаметр торца сопла, м.

Давление перед соплом определится:

$$P_1 = P - \Delta P_1 = P - \frac{\rho \cdot Q^2}{2\pi^2} \left[\frac{16\lambda_m \cdot l_m}{d_m^5} \right]. \quad (7)$$

Расход жидкости по ветви определится, м³/с:

$$Q = \pi \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho} \cdot \frac{1}{\left[\frac{16\lambda_m \cdot l_m}{d_m^5} + \frac{16\lambda_s \cdot l_s}{d_s^5} + \frac{\lambda_0 \cdot d_{st}}{2d_m \cdot d_s^2 \cdot h_0^2} \right]}}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент расхода.

На основании результатов экспериментальных исследований устройства получены числовые значения расхода и давления. Они позволяют уточнить числовое значение коэффициента трения на участке длины дросселя:

$$\lambda_m = \frac{(P - P_1) \cdot 2\pi^2}{\rho \cdot Q^2} \cdot \left[\frac{d_m^5}{16l_m} \right]. \quad (9)$$

Произведем численное моделирование программой MathCAD влияния соотношения диаметров сопла и дросселя и величины соотношения зазора между соплом и заслонкой к диаметру сопла на величину расхода и давления перед соплом. Адекватность сходимости расчетных значений расхода жидкости по предложенной математической модели для тарировки (пролива) расхода (м³/с) дросселя под избыточным давлением P (МПа) обусловлена числовыми значениями критериев (χ^2 – test = 0,999676; F – test = 0,99664017; коэффициент корреляции Пирсона R – corr = 0,99983486).

С увеличением зазора h_0 между соплом и заслонкой (рис. 2) расход увеличивается.

При этом величина прироста постепенно снижается вследствие уменьшения перепада давления на входе и выходе из указанного зазора. С увеличением давления на входе расход пропорционально увеличивается. Расчетные значения расхода хорошо сходятся с опытными величинами.

Сопоставляя расчетные значения давления (рис. 2) в рабочей камере расчетные по модели с опытными результатами видно их хорошее соответствие. Несколько ухудшаются результаты при давлении на входе 0,5 МПа на начальном этапе увеличения зазора (синяя линия и синие точки до величины $h_{0j} = 0,3 \times 10^{-4}$).

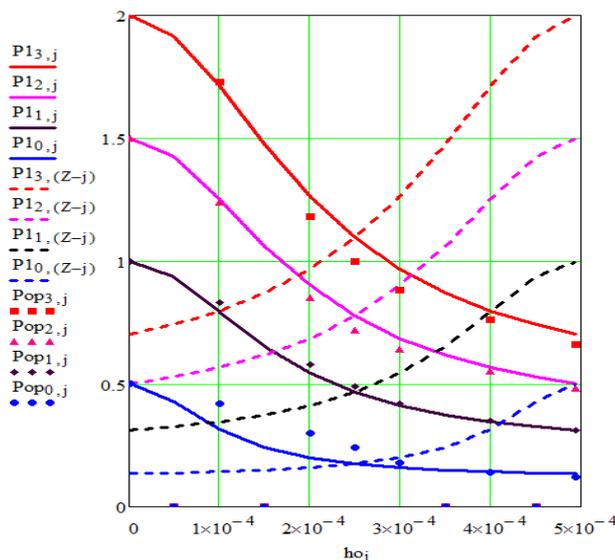


Рис. 2. Изменение давления жидкости (МПа) в рабочих камерах обеих (правой и левой) ветвей при изменении зазора между соплом и заслонкой (h_0 , м)

при давлении на входе в измерительный преобразователь:

расчетные значения $P_{13,j}$ – для 2,0 МПа; $P_{12,j}$ – для 1,5 МПа; $P_{11,j}$ – для 1,0 МПа; $P_{10,j}$ – для 0,5 МПа; опытные значения $Pop_{3,j}$ – для 2,0 МПа; $Pop_{2,j}$ – для 1,5 МПа; $Pop_{1,j}$ – для 1,0 МПа; $Pop_{0,j}$ – для 0,5 МПа

Выводы. Разработанная математическая модель на основе уравнения движения жидкости Бернулли с учетом использования предложенных выражений поправочных коэффициентов позволяет адекватно описывать статические характеристики измерительного преобразователя угловой скорости типа «сопло–заслонка».

Статистические показатели адекватности предложенной модели точнее описывают процессы, чем аналогичные значения линейных моделей по опытным данным.

Предложенную модель не рекомендуется использовать при давлении питания измерительного преобразователя менее 0,5 МПа.

Список использованных источников

1. **Sokolov, V.** Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment / V. Sokolov, O. Krol, O. Stepanova // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1278(1). – 012003.
2. **Li, Y.** Mathematical modeling and linearized analysis of the jet-pipe hydraulic amplifier applied to a servovalve // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2019. – № 233(2). С. 657 – 666.
3. **Bartnicki, A.** The Research of Hydraulic Pressure Intensifier for Use in Electric Drive System / A. Bartnicki, A. Klimek // IEEE Access. – 2019. – С. 20172 – 20177.
4. **Sokolov, V.** Determination of transfer functions for electrohydraulic servo drive of technological equipment. / V. Sokolov, O. Krol // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – С. 364 – 373.
5. **Du, Y.** An Electrohydraulic Actuation Scheme Using Novel Piezoelectrically-Actuated Nozzle Flapper Valve / Y. Du, B. Wang // Proceedings – 2018 IEEE 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control. – 2018. – С. 499 – 505.
6. **Медведев, Ю.** Новые управляющие и исполнительные устройства для электрогидравлических многодвигательных приводов / Ю. Медведев, В. Кузнецов // Российские инженерные исследования. – 2011. – № 31(9). С. 828 – 833.
7. **Медведев, Ю.** Динамика многодвигательного электрогидравлического привода в системе автоматического управления / Ю. Медведев, В. Кузнецов // Российские инженерные исследования. – 2011. – № 31(6). – С. 527 – 538
8. **Баженов, А.** Динамика гидрораспределителя шумоглушащего и струйно-трубного типа / А. Баженов, Е. Левичев // Вестник машиностроения. – 1988. – № 1 – С. 17–18.
9. **Пат.** 188919 РФ, МПК G05D 13/10 (2006.01) Измерительный преобразователь угловой скорости [Текст] / Симанин Н. А., Голубовский В. В.; заявитель и патентообладатель ПензГТУ ; заявл. 27.12.2018 ; опубл. 29.04.2019, Бюл. № 13. – 5 с.
10. **Симанин, Н. А.** Определение регулировочных характеристик гидравлического измерительного преобразователя линейных ускорений / Н. А. Симанин, В. В. Голубовский, А. М. Прохоров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 06(10) – С. 171 – 178
11. **Çenge, A. Y.** Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications / A. Y. Çengel, M. John. Ed. 3. – Cimbala. – New-York : Published by McGraw-Hill, 2014. – 1031 p.

УДК 621.941

Калинин Д. И.¹, Соколов М. В.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (8961) 6286525, e-mail: danil.kalinin.1996@mail.ru),

²(Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Kalinin D. I.¹, Sokolov M. V.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (8961) 6286525, e-mail: danil.kalinin.1996@mail.ru),

²(Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

RESEARCH METHODOLOGY FOR FORMING OPERATIONS FOR THE PROCESSING BODY PARTS

Аннотация. Проведено исследование формообразующих операций обработки корпусных деталей. Выделены преимущества и недостатки различных способов обработки деталей.

Ключевые слова: корпусные детали, механическая обработка, обрабатывающий центр, электроэрозионная обработка.

Abstract. The analysis was carried out formative operations of hull parts. Obtained advantages and disadvantages of various methods of processing parts

Keywords: body parts, machining, machining center, electroerosive processing.

Корпусные детали предназначены для размещения в них сборочных единиц и деталей. Примеры компактных корпусных деталей показаны на рис 1. Они должны обеспечивать постоянство точности относительного положения деталей и механизмов, как в статическом состоянии, так и при эксплуатации машины, поэтому обладают достаточной жесткостью. Корпусные детали имеют основные базирующие поверхности, как правило, в виде плоскостей, которыми они присоединяются к станинам и другим корпусам.

Общий вид типичных корпусных деталей

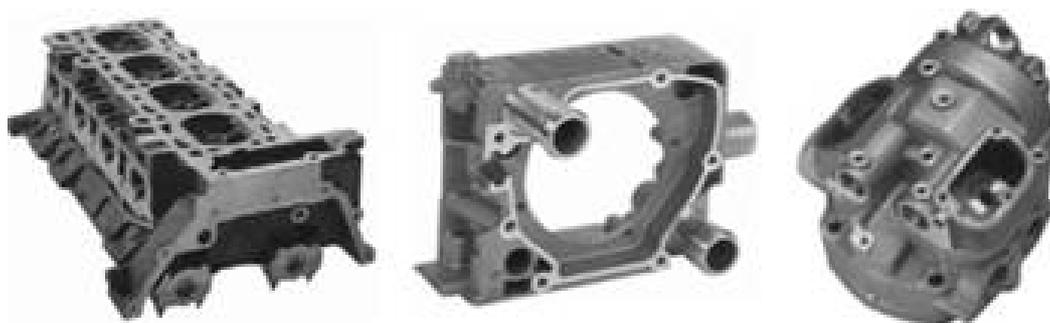


Рис. 1. Общий вид типичных корпусных деталей

Имеются вспомогательные базирующие поверхности отверстий и плоскостей. Отверстия корпусных деталей разделяют на основные (точные) и вспомогательные. Первые служат опорами валов и подшипников. Вторые предназначены для монтажа болтов, масленок и др.

Дополнительно к корпусным деталям предъявляют требования по износостойкости, минимальным деформациям при переменной температуре, герметичности, удобству монтажа и демонтажа деталей. Основные требования по точности: диаметры основных отверстий под подшипники выполняют с полем допуска H7 и $Ra = 1,6 \dots 0,4$ мкм (иногда с полем допуска H6 и $Ra = 0,4 \dots 0,2$ мкм). Допуск соосности отверстий задают в пределах половины поля допуска на диаметр наименьшего отверстия, конусообразности и овальности не более 0,3–0,5 поля допуска на соответствующий диаметр. Часто соответствующие стандарты регламентируют допустимые отклонения, межосевые расстояния и параллельность осей зубчатых колес в передачах.

Построение и содержание процесса обработки заготовки корпусной детали определяются выбором баз и размерными связями между различными поверхностями. Корпусные детали базируют, выдерживая принципы постоянства и совмещения баз. При их изготовлении наиболее часто используют два способа базирования: по трем плоскостям, образующим координатный угол; по плоскости и двум отверстиям, обработанным по качеству H7 с посадкой на два установочных пальца приспособления.

К особо ответственным корпусам предъявляются строгие требования к допускам формы и расположения, допуск параллельности, допуск, допуск перпендикулярности, допуск симметрически, допуск соосности поверхностей и отверстий. Такие детали рекомендуется обрабатывать на 5-осевых многоцелевых обрабатывающих центрах. Их использование дает возможность обработки деталей за 1 установку, что позволяет выдерживать необходимые допуски формы и расположения.

При 5-сторонней обработке, которая также носит название обработка 3+2, оси наклона и вращения используются исключительно для расположения обрабатываемой детали под определенным углом и обеспечения доступности определенной «стороны» для шпинделя. После этого деталь режется с использованием осей X, Y и Z. Программирование при таком виде 5-осевой обработки носит довольно простой характер, поскольку после установки обрабатываемой детали она, по существу, становится 3-осевой деталью.

При 5-осевой одновременной обработке все пять осей двигаются синхронно во время резания инструментом. Этот метод хорошо подходит для деталей со сложными поверхностями, например, для лопастей и турбин; для пресс-форм и штампов с глубокими полостями; а также для деталей с надрезами и сложными углублениями. При программировании такого вида 5-осевой обработки, как правило, требуется использование систем автоматизированного проектирования/автоматизированного управления производством (CAD/CAM).

Оба вида 5-осевой обработки находят практическое применение при изготовлении широкого диапазона деталей, однако, эффективность каждого метода зависит от выбора подходящего способа закрепления заготовки. При выборе подходящего вида закреп-

ления заготовки необходимо учитывать следующие ключевые аспекты: зазор, доступность и жесткость.

Обработку пазов, в которых не допускаются радиусы от фрезы в углах, производят на долбежных станках.

Притирка позволяет обеспечить допуск плоскостности поверхности. Ее производят на плитах с применением притирочных паст. Такая поверхность применяется как база для дальнейшей механической обработки.

Для базирования и автоматического позиционирования детали относительно не обрабатываемых (литьевых) поверхностей используют 5-осевые системы с контактными датчиками (Renishaw). Применение таких систем позволяет значительно повысить точность, а также уменьшить время наладки.

Ответственные поверхности и отверстия в корпусных деталях имеют высокий класс чистоты, для его обеспечения используют высококачественный инструмент и оптимальные режимы резания. При чистовой обработке поверхностей используют чистовые фрезы со съемными пластинами, также производится полировка. Для расточки отверстий применяются расточные вставки. Также для финишной обработки отверстий применяют хонингование. Хонингование – вид абразивной обработки конических и цилиндрических поверхностей, который позволяет устранять шероховатости на поверхности заготовок, корректировать их геометрическую форму и повышать точность их габаритных размеров. Проводится с применением хонинговальных головок (хонов). В основном применяется для обработки внутренних цилиндрических поверхностей путем совмещения вращательного и возвратно-поступательного движения хона с закрепленными на нем раздвижными абразивными брусками с обильным орошением обрабатываемой поверхности смазочно-охлаждающей жидкостью. Один из видов чистовых и отделочных обработок резанием. Позволяет получить отверстие с отклонением от цилиндричности до 5 мкм и шероховатостью поверхности $Ra = 0,63 \dots 0,04$.

Труднодоступные поверхности, пазы и обнижения обрабатывают методом электроэрозионной обработки. Электроэрозионная обработка заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии. Под электрической эрозией понимают разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла при прохождении между электродами электрических разрядов. При этом различают электрод-инструмент и электрод-заготовку. Для осуществления процесса между электродами всегда должен быть зазор, который определяется как межэлектродный промежуток.

Съем металла при электроэрозионной обработке осуществляется рабочими импульсами тока. Рабочий импульс – импульсный разряд, производящий съем металла вследствие электрической эрозии и характеризующийся прохождением через межэлектродный зазор импульса электрического тока под напряжением, изменяющимся во время импульса.

Обработка материала может осуществляться в газовой среде или жидкости. Выделяют следующие основные процессы, протекающие при электроэрозионной обработке: электрические, тепловые, газодинамические, термомеханические.

Обработка материала в газовой среде происходит под действием микроразрядов, возникающих при сближении электрода-инструмента с заготовкой.

Точные детали обрабатывают в термостатических помещениях, для устранения температурных деформаций. После механической обработки производят термическую обработку (отпуск) для снятия напряжений.

Список использованных источников

1. **Решетов, Д. Н.** Детали машин : учебник / Д. Н. Решетов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1989. – С. 462 – 466.
2. **Хватов, Б. Н.** Проектирование машиностроительного производства. Технологические решения : учебное пособие / Б. Н. Хватов, А. А. Родина. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – С. 4 – 12.
3. **Алтунин, К. А.** Разработка системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2016. – 132 с.
4. **Алтунин, К. А.** Структура и адаптация модели представления знаний процесса токарной обработки : монография / К. А. Алтунин, М. В. Соколов, Р. В. Дякин. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2017. – 104 с.
5. **Алтунин, К. А.** Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 122 – 133.
6. **Development** of information support for intelligent cad of cutting processes / К. А. Altunin, М. V. Sokolov // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – № 2. – P. 67 – 77.

УДК 531.65; 532.5

**Зайцев В. В.¹, Кравцов А. В.¹, Коновалов В. В.¹, Родионов Ю. В.²,
Петров А. М.³, Петрова С. С.³**

¹Пензенский государственный технологический университет, Россия, г. Пенза
(Тел. (+7927)2868593, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru),

²Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (8)9204780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru),

³Самарский государственный аграрный университет, Россия, г. Самара

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНФУЗОРЕ

**Zaitsev V. V.¹, Kravtsov A. V.¹, Konovalov V. V.¹, Rodionov Yu. V.²,
Petrov A. M.³, Petrova S. S.³**

¹Penza State Technological University, Russia, Penza
Tel. (+7927)2868593, e-mail: konovalov-penza@rambler.ru),

²Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (8)9204780491, e-mail: rodionow.u.w@rambler.ru),

³Samara State Agrarian University, Russia, Samara

ANALYTICAL JUSTIFICATION OF MOTION OF PARTICLES IN VERTICAL CONFUSOR

Аннотация. Рассматриваются способы обеспечения центрирования частиц материала в потоке воздуха движущегося в пневмопроводе сеялки. Предложено использовать вертикальный конический направитель. На основе силового анализа обоснована система уравнений. Она описывает движение частиц в вертикальной сужающейся трубе. Разработанная математическая модель движения частиц в коническом воздушном потоке реализована в математическом пакете MathCAD. Она позволяет рассчитать как траекторию движения частиц, так и скоростные параметры воздушного потока и высеваемых частиц.

Ключевые слова: математическая модель, поток воздуха, конический трубопровод, пневмопривод, движение частиц.

Abstract. The paper discusses ways to center the particles of material in the air flow moving in the pneumatic line of the seeder. It is proposed to use a vertical conical distributor. Based on force analysis a system of equations is substantiated. It describes the movement of particles in a vertical convergent tube. The developed mathematical model of particle motion in a conical air flow is implemented in the MathCAD mathematical package. It allows to calculate both the trajectory of the particles and the speed parameters of the air flow and the particles to be sown.

Keywords: mathematical model, air flow, particle motion, conical pipe-line, pneumatic drive.

Введение. Пневмотранспорт широко используется в различных отраслях народного хозяйства [1].

Исходя из теоретических [2, 4] и экспериментальных [3] результатов исследования пневмосистем сеялок установлено наличие смещения потока относительно оси вертикального трубопровода и распределителя из-за наличия установленного подводящего колена.

Для повышения равномерности распределения частиц по сечению трубопровода применяются различные конструктивные элементы, в том числе турбулизаторы [5]. Данные элементы в определенной степени показывают свою эффективность. Однако они имеют достаточно низкую технологичность изготовления. Более того, центрация потока относительно оси трубопровода достигается за счет рассредоточения движущегося материала во внутреннем объеме трубы. Это накладывает определенные требования, связанные с геометрическими параметрами трубы, скоростью движения воздушного потока и углом склона (уклон) поля.

Актуальной задачей является рассмотрения возможности замены турбулизатора на более технологичный в плане изготовления конфузор или связки конфузор-диффузор. Их применение позволит сократить длину вертикального участка пневмопровода. Это дополнительно может повысить эффективность работы пневмосистемы за счет фокусировки полета частиц на потребное место пневмопровода для снижения неравномерности распределения частиц по отводам.

Целью исследования являлось получение функциональных зависимостей движения частиц в коническом направителе воздушного потока (конфузоре) для условий транспортирования высеваемых частиц на основе силового анализа и выявления характера движения высеваемых частиц в суживающемся воздушном потоке.

Методика исследований. Методика исследований предусматривала теоретическое обоснование параметров движения частицы в коническом сужающемся (коническом) воздушном потоке пневмопровода, а также проверку полученных выражений на основе реализации математической модели в программе MathCAD за счет сравнения численных результатов с моделированием аналогичного процесса методом конечных объемов.

Для определения скорости и закона движения частицы по наклонной вертикальной стенке пневмопровода рассмотрено движение воздушного потока по вертикальному коническому участку – конфузоре пневмопровода в направлении вверх (рис. 1).

Для определения параметров воздушного потока и параметров движения частицы введены допущения:

1) с целью упрощения расчета примем скорость воздушного потока равномерно распределенной по основанию конуса;

2) угол наклона линий тока воздушного потока у наклонной стенки конуса равен углу наклона конуса α и уменьшается пропорционально соотношению расстояний от положения частицы к наклонной стенке в сечении относительно оси симметрии конуса.

На оси симметрии конуса линия тока вертикальна (рис. 1). Параметры движения воздушного потока: скорость воздушного потока на входе конического участка W_b , м/с; полное давление воздуха на входе конического участка пневмопровода P_b , Па; плотность воздуха на входе конического участка ρ_{ab} , кг/м³; скорость воздушного потока на выходе конического участка W_t , м/с; полное давление воздуха на выходе кониче-

ского участка пневмопровода P_t , Па; плотность воздуха на выходе конического участка ρ_{at} , кг/м³; скорость воздушного потока в текущем сечении конического участка W_i , м/с; полное давление воздуха в текущем сечении конического участка пневмопровода P_i , Па; плотность воздуха в текущем сечении конического участка ρ_{ai} , кг/м³.

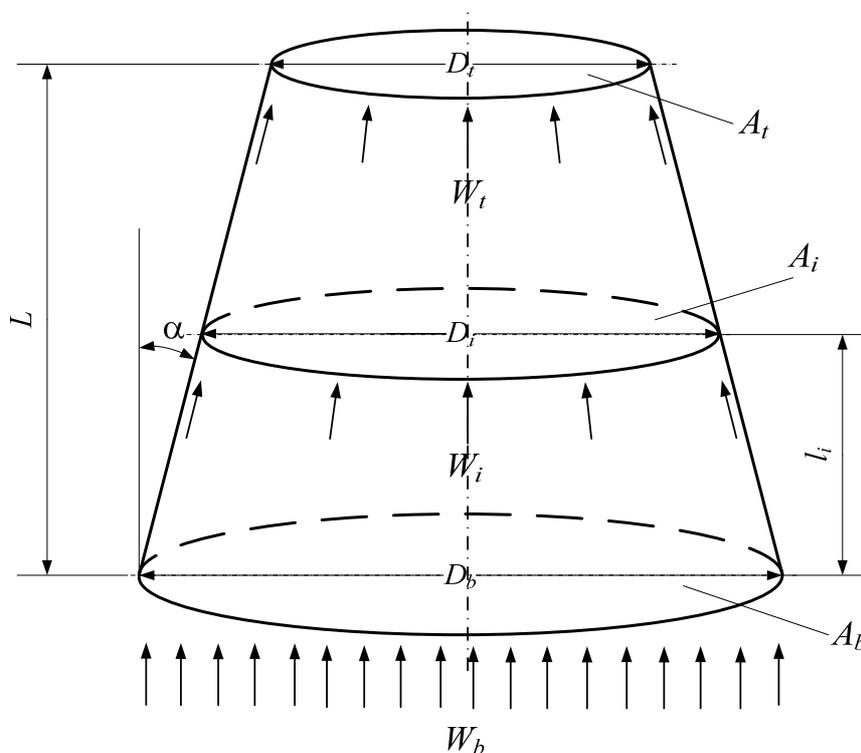


Рис. 1. Вертикальный конический участок трубопровода

Вертикальный конический участок пневмопровода (рис. 1) представляет из себя усеченный конус с параметрами: D_b – диаметр основания конуса (диаметр входного отверстия конического участка), м; A_b – площадь поперечного сечения основания конуса, м²; D_t – диаметр вершины конуса (диаметр выходного отверстия конического участка), м; A_t – площадь поперечного сечения вершины конуса, м²; D_i – диаметр вершины конуса (диаметр выходного отверстия конического участка), м; A_i – площадь поперечного сечения вершины конуса, м²; D_i – диаметр текущего поперечного сечения конуса, м; A_i – площадь текущего поперечного сечения конуса, м²; L – полная высота усеченного конуса (длина конического вертикального участка пневмопровода), м; l_i – высота текущего поперечного сечения усеченного конуса (текущая длина конического вертикального участка пневмопровода), м; α – угол наклона образующей конуса с вертикалью, град.

Из закона сохранения массы скорость движения воздушного потока в текущем сечении пневмопровода при незначительном изменении плотности воздушного потока имеет вид

$$W_i = W_b \cdot \frac{A_b}{A_i}, \quad (1)$$

где $A_b = \frac{\pi \cdot D_b^2}{4}$ – площадь поперечного сечения основания конуса, м²; $A_i = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4}$ – площадь текущего поперечного сечения конуса, м².

Из рисунка 1 диаметр текущего поперечного сечения определяется выражением

$$D_i = D_b - 2 \cdot l_i \cdot \tan(\alpha). \quad (2)$$

Таким образом, уравнение (1) с учетом выражения (2) примет вид

$$W_i = W_b \cdot \frac{D_b^2}{(D_b - 2 \cdot l_i \cdot \tan(\alpha))^2}. \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (3) видно, что с уменьшением площади поперечного сечения пневмопровода (с уменьшением диаметра) скорость воздушного потока возрастает, при этом с увеличением скорости воздушного потока полное давление в сечениях пневмопровода падает.

Параметры частицы: диаметр d , м (второе допущение – частица сферическая); масса частицы m , кг.

Рассмотрим движение частицы по наклонной вертикальной стенке пневмопровода (рис. 2).

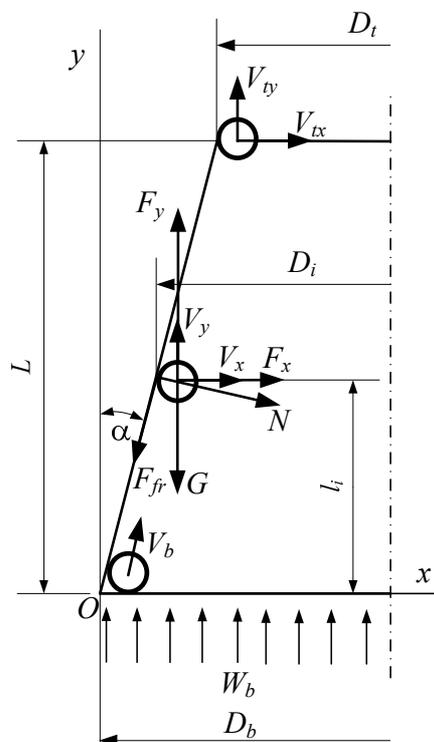


Рис. 2. Расчетная схема движения частицы по наклонной стенке вертикального участка пневмопровода

Частица на стенку конического вертикального участка пневмопровода попадает из вертикального цилиндрического участка пневмопровода с начальной скоростью $V_b = k_l \cdot W_b$, где $k_l = 0.75 - 0.93$ – коэффициент отставания частицы от воздушного потока. Далее частица движется в воздушном потоке вдоль стенки конического участка пневмопровода вверх (частично отражаясь), разгоняясь после торможения в результате касательного удара о стенку.

При движении частицы по стенке трубопровода в воздушном потоке на нее действуют сила тяжести $G = m \cdot g$, сила аэродинамического сопротивления F , сила нормальной реакции опоры N и сила трения F_{fr} . Другими силами (силой Магнуса и силой Архимеда, электростатическими силами, силой молекулярного взаимодействия, силой термофореза и силой фотофореза, силой турбулентного массопереноса, силой Бассе) ввиду малости частицы и протяженности конического участка пренебрегаем.

Движение частицы в воздушном потоке можно описать с помощью второго закона Ньютона в векторной форме

$$m \cdot \vec{a} = \vec{G} + \vec{F} + \vec{F}_{fr} + \vec{N}, \quad (4)$$

где $\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}$ – вектор абсолютного ускорения частицы, м/с²; $m = \frac{\rho_T \cdot \pi \cdot d^3}{6}$ – масса частицы, кг; \vec{V} – вектор абсолютной скорости частицы в текущем сечении трубопровода, м/с; t – время движения частицы, с; ρ_T – плотность частицы, кг/м³.

Вектор силы тяжести:

$$\vec{G} = m \cdot \vec{g} = \frac{\rho_T \cdot \pi \cdot d^3}{6} \cdot \vec{g}. \quad (5)$$

Сила аэродинамического сопротивления воздуха [11]

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot k' \cdot \rho_B \cdot A \cdot |\vec{W}_i - \vec{V}| \cdot (\vec{W}_i - \vec{V}), \quad (6)$$

где $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения частицы, м²; k – коэффициент аэродинамического сопротивления; k' – коэффициент формы частицы.

Коэффициент аэродинамического сопротивления определяется по формуле

$$k = \frac{24}{\text{Re}} \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \text{Re}^{\frac{2}{3}} \right). \quad (7)$$

Число Рейнольдса при движении частицы в воздушном потоке определяется

$$\text{Re} = \frac{d \cdot W_r}{\mu}, \quad (8)$$

где μ – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Результаты исследований. Для расчета начало декартовой системы координат O_{xy} совместим с точкой пересечения основания конуса с образующей, ось O_y направим вертикально вверх, ось O_x направим по горизонтали вправо, к продольной оси трубопровода (рис. 2). Таким образом, положение частицы на коническом вертикальном участке трубопровода будет определяться координатами x и y . Проекция вектора скорости потока \vec{O}_i на координатные оси x, y обозначим через W_x, W_y соответственно, проекции вектора абсолютной скорости \vec{V} частицы на координатные оси x, y , обозначим через V_x, V_y соответственно.

Проекция абсолютной скорости на координатные оси x и y определяются системой уравнений

$$\begin{cases} V_x = \frac{dx}{dt}, \\ V_y = \frac{dy}{dt}. \end{cases} \quad (9)$$

Проекция абсолютного ускорения частицы на оси O_{xy} запишутся

$$\begin{cases} a_x = \frac{dV_x}{dt}, \\ a_y = \frac{dV_y}{dt}. \end{cases} \quad (10)$$

Модуль разности векторов \vec{V}_i и \vec{V} в выражении (6) с учетом принятых обозначений определяется

$$|\vec{W}_i - \vec{V}| = W_r = \sqrt{(W_y - V_y)^2 + (W_x - V_x)^2}. \quad (11)$$

С учетом площади поперечного сечения частицы и уравнения (7), (8) и (11) уравнение (6) примет вид

$$\vec{F} = 3 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (\vec{W}_i - \vec{V}). \quad (12)$$

Спроецировав уравнение (12) на координатные оси x и y , получим

$$\begin{cases} F_x = 3 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_x - V_x), \\ F_y = 3 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_y - V_y). \end{cases} \quad (13)$$

Спроецировав уравнение (4) на оси координат O_{xy} получим

$$\begin{cases} m \cdot \frac{dV_x}{dt} = N \cdot \cos(\alpha) + F_x - F_{fr} \cdot \sin(\alpha), \\ m \cdot \frac{dV_y}{dt} = F_y - G - N \cdot \sin(\alpha) - F_{fr} \cdot \cos(\alpha), \end{cases} \quad (14)$$

где $N = F_y \cdot \sin(\alpha) - F_x \cdot \cos(\alpha) - G \cdot \sin(\alpha)$, $F_{fr} = N \cdot \nu$, ν – коэффициент трения.

Тогда, в результате преобразований, уравнение движения частицы (из ф.14) примет вид:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{dV_x}{dt} = F_x \cdot (1 - \cos^2(\alpha) + \nu \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)) + \\ \quad + F_y \cdot (\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \nu \cdot \sin^2(\alpha)) - \\ \quad - m \cdot g \cdot (\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \nu \cdot \sin^2(\alpha)), \\ m \cdot \frac{dV_y}{dt} = F_y \cdot (1 - \sin^2(\alpha) - \nu \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)) - \\ \quad - F_x \cdot (\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + \nu \cdot \cos^2(\alpha)) - \\ \quad - m \cdot g \cdot (1 - \sin^2(\alpha) - \nu \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)). \end{cases} \quad (15)$$

Подставив в систему уравнений (15) выражения (13) и разделив, левые и правые части уравнений на массу частицы, учитывая выражение для массы частицы, получим

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = \frac{18 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \mu}{\rho_T \cdot d^2} \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_x - V_x) \times \\ \quad \times (1 - \cos^2(\alpha) + \nu \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)) + \frac{18 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \mu}{\rho_T \cdot d^2} \times \\ \quad \times \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_y - V_y) \cdot (\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \nu \cdot \sin^2(\alpha)) - \\ \quad - g \cdot (\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) - \nu \cdot \sin^2(\alpha)), \\ \frac{dV_y}{dt} = \frac{18 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \mu}{\rho_T \cdot d^2} \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_y - V_y) \times \\ \quad \times (1 - \sin^2(\alpha) - \nu \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)) + \frac{18 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \mu}{\rho_T \cdot d^2} \times \\ \quad \times \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_x - V_x) \cdot (\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) + \nu \cdot \cos^2(\alpha)) - \\ \quad - g \cdot (1 - \sin^2(\alpha) - \nu \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)). \end{cases} \quad (16)$$

Система уравнений (16) (9) и (11) описывают движение частицы в воздушном потоке по наклонной вертикальной стенке пневмопровода.

Движение частицы на вертикальном коническом участке пневмопровода в случае отсутствия прямого контакта (касания) со стенкой описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_x}{dt} = \frac{18 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \mu}{\rho_T \cdot d^2} \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_x - V_x), \\ \frac{dV_y}{dt} = \frac{18 \cdot k' \cdot \rho_B \cdot \mu}{\rho_T \cdot d^2} \cdot \left(1 + 0.17 \cdot \left(\frac{d \cdot W_r}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot (W_y - V_y) - g. \end{array} \right. \quad (17)$$

Численное моделирование на построенных математических выражениях проводилось в математическом пакете MathCAD для следующих параметров: скорость воздушного потока у основания конуса $W_b = 15$ м/с; плотность воздуха $\rho_B = 1.29$ кг/м³; динамическая вязкость воздуха $\mu = 1.25 \cdot 10^{-5}$ Па·с; угол наклона стенки усеченного конуса $\alpha = 10$ градусов; диаметр основания усеченного конуса $D_b = 0.104$ м; высота усеченного конуса $L = 0.0865$ м; коэффициент отставания частицы от воздушного потока $k_l = 0.8$; коэффициент формы частицы $k' = 1$; коэффициент трения частицы о стенку трубопровода $\nu = 0.1$.

Анализ результатов моделирования показывает, что в случае попадания частиц в зону, прилегающую к оси симметрии конуса трубопровода их траектории стремятся к прямым вертикальным линиям, а частицы движутся вертикально вверх. Частицы попадающие в вертикальный конический участок трубопровода при движении по коническому трубопроводу постепенно начинают смещаться от наклонной стенки к оси трубопровода под воздействием наклона воздушного потока. При этом частицы долетают до наклонной конической стенки и в результате касательного столкновения со стенкой произойдет снижение скорости по оси y . Ударный эффект в данной работе не рассматривается.

Заключение. Разработанная математическая модель движения частиц в коническом воздушном потоке, реализованная в математическом пакете MathCAD позволяет рассчитать как траекторию движения частиц, так и скоростные параметры воздушного потока и высеваемых частиц.

Установка конического направителя способствует фокусировке потока частиц в центральной части зауженного пневмопровода. При этом часть частиц сохранит начальную продольную траекторию. Угол при вершине конуса влияет на скорость и угол касательного контакта частицы с направителем.

Список использованных источников

1. Çengel, Yu. A. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications / Yu. A. Çengel, J M Cimbala. Ed. 3. – Published by McGraw-Hill; New-York, 2014. – 1031 с.

2. **Bourges, G.** Air-seeds flow analysis in a distributor head of an» air drill» seeder / G. Bourges, M. Medina // In Ist International Symposium on CFD Applications in Agriculture. – 2013. – № 1008. – 2594.

3. **Lemière, Ya. A.** Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seeds distribution accuracy of the air-seeder / Ya. A. Lemière, F. Cointault // Biosystems Engineering. – 2017. – № 161. – 12034.

4. **Моделирование** скоростного режима движения агропродуктового потока с параллельно-последовательными участками / А. В. Кравцов, В. В. Коновалов, В. Ю. Зайцев, М. В. Донцова // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2. – С. 7 – 83.

5. **Волк, А. М.** Движение твердых частиц в закрученном потоке / А. М. Волк // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2009. – № 3. – С. 77 – 81.

УДК 621.6

Немтинов В. А., Матрохин М. А., Крылов А. В., Храмцов В. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

ПРОЦЕСС ЦИНКОВАНИЯ В УСТАНОВКЕ ПОКРЫТИЯ НАСЫПЬЮ

Nemtinov V. A., Matrokhin M. A., Krylov A. V., Khramtsov V. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

PROCESS OF GALVANIZING IN THE INSTALLATION OF THE COATING IN BULK

Аннотация. Рассмотрены преимущества процесса цинкования. Предложена установка покрытия насыпью для мелких деталей в процессе цинкования. Произведен расчет на прочность стенок корпуса установки, определены: размеры, количество, высоты укрепляющих поясов установки.

Ключевые слова: установка покрытия насыпью, установка, УПН, процесс цинкования, барабан, корпус.

Abstract. The advantages of the galvanizing process are Considered. The installation of bulk coating for small parts in the process of galvanizing is proposed. A calculation for the strength of the walls of the unit are defined: the size, number, height of reinforcing belts installation.

Keywords: bulk coating installation, installation, UPN, galvanizing process, drum, housing.

В настоящее время оцинковка является самым массовым покрытием, используемым для антикоррозионной защиты черных металлов. Это связано с тем, что по совокупности экономических, экологических, технологических и физико-химических факторов у горячего и гальванического цинкования попросту нет конкурентов.

Цинкованием гальваническим называется процесс нанесения тонкого слоя цинка на поверхность металлических изделий в растворе электролита. В процессе электролиза цинк растворяется, и его ионы с положительным потенциалом оседают на поверхность основного металла с формированием слоя толщиной от 4 до 20 мкм, с высокой точностью повторяющего контуры изделия. Покрытие при гальваническом цинковании особенно точное и гладкое.

Гальваническое цинкование выполняется методом электролиза с расходуемым анодом. В роли катода, как и во всей гальванике металлов, выступает обрабатываемое изделие, а в качестве анода используют пластины чистого цинка, размещаемые по установке так, чтобы обеспечить равномерность потока анионов к покрываемой поверхности. Основными реагентами в составе электролита в общем случае являются сернокислый и хлористый цинк, а также фторборат цинка. Для улучшения параметров гальванического цинкования в раствор также вводят соли натрия, калия и алюминия.

Скорость осаждения и максимальная толщина слоя цинка регулируется плотностью тока, которая зависит от состава гальванического раствора и его температуры. По способу нанесения покрытия цинкование делится на горячее, холодное, газотермическое, термодиффузионное. На рисунке 1 приведено схематическое изображение простейшей гальванической ванны цинкования.

Обрабатываемыми деталями могут быть болты, винты, гайки, шайбы, резьбовые вставки, втулки, гвозди, пружины и многое другое. Оцинковка таких мелких изделий в насыпном виде значительно удобнее и быстрее, чем с использованием технологических подвесок.



Рис. 1. Схематическое изображение простейшей гальванической ванны цинкования

В данной работе при конструировании установки использован вращающийся барабан, так как при постоянном перемешивании деталей происходит более равномерное покрытие.

Установка покрытия насыпью совмещает в себе гальваническую ванну со встроенным вращающимся барабаном, вентиляцией, выдвижным лотком, блоком электрических нагревателей, датчиками температуры и уровня, электромонтажным коробом и механизмом поднятия барабана для выгрузки.

Основной и несущей конструкцией является корпус установки. Материал корпуса выбирается из агрессивности основной среды в установке. При использовании металлической конструкции необходимо ее обезопасить в плане коррозионной стойкости. Для этого используют полимерное покрытие с внутренней стороны корпуса в частности ПХ-2. Что в свою очередь удорожает и усложняет изготовление корпуса.

Полипропилен имеет ряд преимуществ перед металлом. Такие как обработка деталей корпуса, метод сваривания (экструзионный, газовый метод сварки). Стойкость полипропилена к агрессивным средам внутри установки по сравнению с металлом. Полипропилен легко очищается, на нем не скапливается пыль и грязь, за счет этого уменьшается периодичность технических осмотров.

На основании вышеизложенного произведены расчеты на прочность стенок корпуса установки из полипропилена и усиленного поясами жесткости. Корпус установки с внутренними размерами 1300*780*700, объемом раствора 0,71 куб. м.

На рисунках 2 – 4 приведены разновидности конструкции установки покрытия насыпью УПН с:

- металлическим футерованным корпусом и ручным подъемом барабана;
- полипропиленовым корпусом и механическим подъемом барабана.



Рис. 2. Установка покрытия насыпью УПН с металлическим футерованным корпусом и ручным подъемом барабана

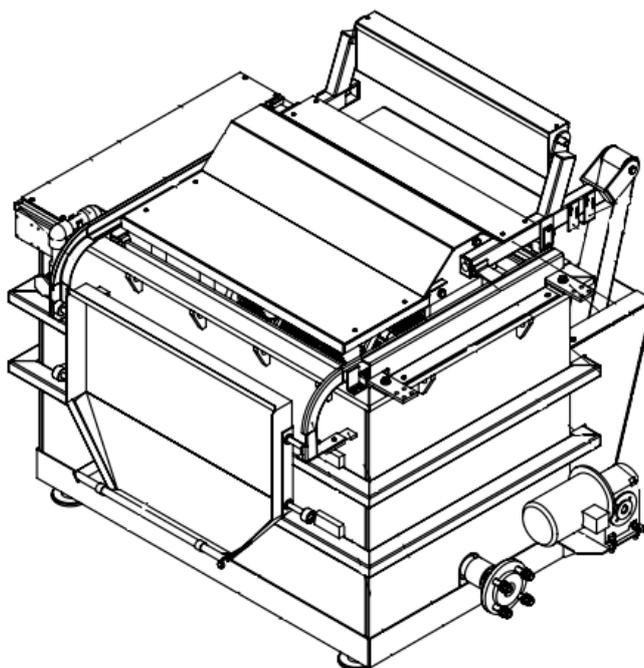


Рис. 3. Установка покрытия насыпью УПН с полипропиленовым корпусом и механическим подъемом барабана

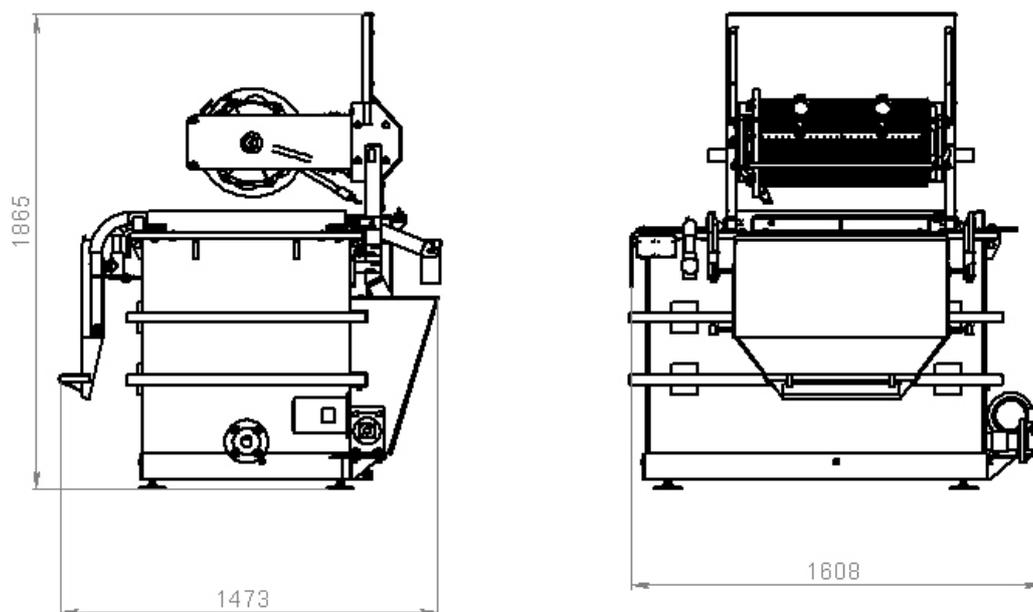


Рис. 4. Установка покрытия насыпью с габаритными размерами и поднятым барабаном

Исходные данные. Внутренние размеры установки (длина×ширина×высота) – 1300×780×700 мм. Материал – полипропилен. Среда – цинк хлористый технический с концентрацией 20...80 г/л, алюминий хлористый с концентрацией 180...240 г/л, плотность раствора $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3 = 1,2 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Высота жидкости – $H_{\text{ж}} = 0,85 \text{ м}$. $b_{\text{ид}}$ – номинальное допускаемое напряжение, $b_{\text{ид}} = b_{\text{T}} / n_{\text{T}}$. Предел текучести для стали 12X18Н10Т (пояс) $b_{\text{T}} = 240 \text{ МН/м}^2$. Запас прочности $n_{\text{T}} = 1,65$; $b_{\text{ид}} = 240 : 1,65 = 145 \text{ МН/м}^2$.

Расчет толщины стенки корпуса установки. P – гидростатическое давление $P = P_{\text{с}} + g \rho H_{\text{ж}} \cdot 10^{-6} \text{ МН/м}^2$, где избыточное давление $P_{\text{с}} = 0$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; высота жидкости $H_{\text{ж}} = 0,85 \text{ м}$.

$$P = 9,81 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6} = 0,007 \text{ МН/м}^2.$$

Положение по вертикали горизонтальных ребер определяем по формулам:

$$H_1 = 0,23 H_{\text{ж}} = 0,1265 \text{ м, принимаем } 0,125 \text{ м,}$$

$$H_2 = 0,6 H_{\text{ж}} = 0,33 \text{ м, принимаем } 0,35 \text{ м.}$$

Расчет давления на стенку корпуса установки осуществляется по формуле:

$$P_1 = P_{\text{ж}} = P_{\text{с}} + g \rho_{\text{ж}} H_{\text{ж}} \cdot 10^{-6} = 0,007.$$

Толщина стенки без укрепления определяется по формуле:

$$s^1 = S = K A \sqrt{(P_1 / \square)} = 0,0077 \text{ м.}$$

С учетом округления принимаем толщину стенки $s = 15 \text{ мм}$.

Определение необходимого момента сопротивления укрепляющего ребра. $W_{\text{р}} = 0,033 \cdot 10^{-6} \cdot g \rho H_{\text{ж}} (H_{\text{ж}} - h_3) b^2 / b_{\text{ид}} = 0,0000018 \text{ м}^3$. Выбрана труба 60×40×3 ГОСТ 8645–68 с $W_{\text{р}} = 0,00000686$.

На рисунке 5 приведено изображение корпуса установки с поясами жесткости.

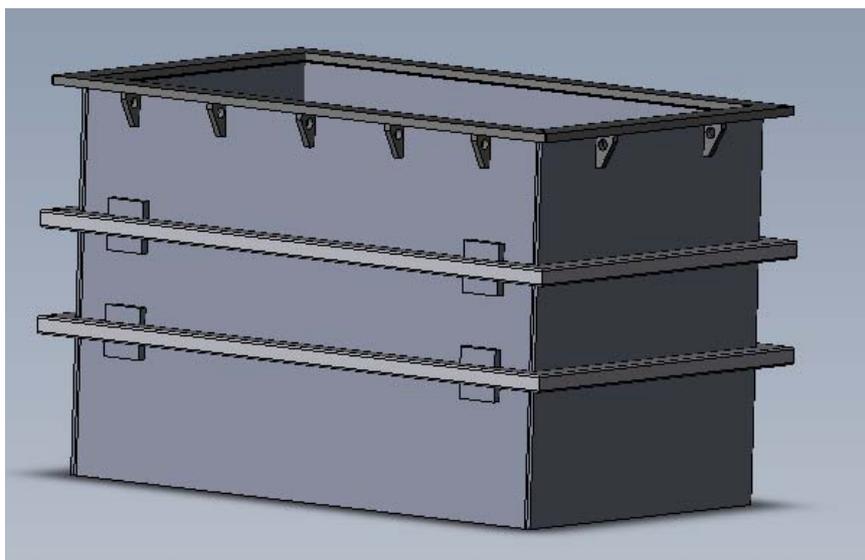


Рис. 5. Изображение корпуса установки с поясами жесткости

Заключение. В данной работе авторами был выполнен анализ проектного решения установки покрытия насыпью УПН. Предложен технологический процесс с использованием барабанной подвески. Рациональное использование материала корпуса установки. Произведен прочностной расчет толщины стенок корпуса установки, а также поясов укрепления.

Список использованных источников

1. **Лашинский, А. А.** Основы конструирования и расчета химической аппаратуры : справочник / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Ленинград : Машиностроение, 1970. – 433 с.
2. **Ильин, В. А.** Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание / В. А. Ильин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1983. – 87 с.
3. **Окулов, В. В.** Цинкование. Техника и технология / В. В. Окулов. – М. : Глобус, 2008. – 252 с.
4. **ГОСТ 12.3.002–2014 ССБТ.** Процессы производственные. Общие требования безопасности». – URL : https://allgosts.ru/13/100/gost_12.3.002-2014 (дата обращения: 03.11.2019).

УДК 681.5.017; 536.2.083

Мордасов С. А., Негуляева А. П., Чернышов В. Н.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +7(999)7707808, e-mail: a.negulyaeva@bk.ru)

**АДАПТИВНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Mordasov S. A., Negulyaeva A. P., Chernyshov V. N.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. +7(999)7707808, e-mail: a.negulyaeva@bk.ru)

**ADAPTIVE MICROWAVE METHOD AND NON-DESTRUCTIVE CONTROL
SYSTEM OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS
OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS**

Аннотация. Предложена адаптивная микропроцессорная информационно-измерительная система, реализующая новый метод определения теплофизических характеристик (температуропроводности и теплопроводности) строительных материалов по результатам измерений температуры двух точек поверхности образца, подвергающейся импульсному тепловому воздействию от сфокусированного в линию микроволнового излучения заданной мощности. При равенстве установившейся избыточной температуры в точке контроля заданному значению частота следования и количество импульсов адаптивно устанавливаются системой. Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность системы, реализующей предложенный метод, и корректность положенных в основу метода теоретических выводов.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, микропроцессорная система, неразрушающий контроль, температуропроводность, теплопроводность, микроволновый нагрев, строительная теплотехника.

Abstract. An adaptive microprocessor information-measuring system is proposed that implements a new method for determining the thermophysical characteristics (thermal diffusivity and thermal conductivity) of building materials by measuring the temperature of two points on the surface of a sample subjected to pulsed thermal action from a given power focused into the line of microwave radiation. If the steady-state excess temperature at the control point is equal to the set value, the repetition rate and the number of pulses are adaptively set by the system. Experimental verification confirmed the operability of the system that implements the proposed method, and the correctness of the theoretical conclusions underlying the method.

Keywords: information-measuring system, microprocessor system, non-destructive testing, thermal diffusivity, thermal conductivity, microwave heating, construction heat engineering.

Современная отрасль нанотехнологий позволяет совершенствовать существующие строительные материалы использованием нанодобавок. Это позволяет существенно улучшить свойства материалов и изменить их теплофизические характеристики (ТФХ).

К сожалению, информации о таких материалах бывает недостаточно для того, чтобы оценить их теплофизические свойства, что делает актуальной разработку новых систем контроля теплофизических характеристик материалов.

Существующие методы и системы контроля ТФХ [1 – 4] имеют ряд недостатков, среди них недостаточная точность определения ТФХ, необходимость разрушения готовой конструкции, невысокая оперативность измерений. Наиболее актуальной является разработка систем, использующих в качестве источника теплового воздействия энергию СВЧ-излучения [1 – 4]. Создание подобных информационно-измерительных систем упрощено благодаря тому, что промышленность выпускает достаточное количество микроволновой техники. Кроме того, теория распространения электромагнитных волн в диэлектриках, которыми является большинство строительных материалов, хорошо разработана, что позволяет использовать в основе метода определения ТФХ материалов адекватные модели процессов распространения тепла в исследуемых объектах.

В статье предложена адаптивная информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий, основанная на методе, который заключается в следующем.

На поверхность исследуемого объекта воздействуют импульсом электромагнитного поля СВЧ-диапазона частотой не менее 20 ГГц. При данной частоте практически вся тепловая мощность выделяется в приповерхностном слое у строительного материала [5, 6], глубина проникновения 1...2 мм. Для осуществления теплового воздействия СВЧ-излучение фокусируют в линию длиной не менее 8...10 см, а шириной около 0,2 см при помощи линзы из радиопрозрачного материала. Для исключения влияния концевых эффектов, величина длины линии микроволнового воздействия задается на порядок больше, чем расстояние от этой линии до точки контроля температуры.

Вначале осуществляют нагрев исследуемого объекта одиночным импульсом заданной мощности Q и определяют интервал времени $t_{имп}$ от начала теплового воздействия до момента, когда температура в точке контроля станет равной первоначальной температуре T_0 , после чего определяют частоту следования импульсов

$$F_{\min} = \min\left(\frac{1}{\tau_{имп}}\right), \quad (1)$$

при которой не происходит роста температуры в исследуемом объекте.

Затем увеличивают частоту подачи тепловых импульсов по закону

$$\Delta F = F_{\min} + K_1 \Delta T_i + \frac{1}{K_2} \int_{t_{i-1}}^{\tau_i} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \frac{d[\Delta T(\tau)]}{d\tau}, \quad (2)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{зад} - T(x_1, \tau)$, – разность между наперед заданным значением $T_{зад}$, установившемся в точке x_1 , и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = T_{зад} - T(\tau_i)$ – разность между заданной и текущей температурой в моменты времени, определяемые соотношением; $K_1 - K_4$ – коэффициенты пропорциональности, значения которых задаются в диапазонах $K_1 = 1...10$; $K_2 = 1...100$; $K_3 = 1...50$;

$K_4 = 0, 1 \dots 1$. Увеличение частоты осуществляют до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля станет равным наперед заданному значению $T_{зад1}$, определяя при этом частоту следования тепловых импульсов F_{x1} . После увеличивают частоту подачи тепловых импульсов до тех пор, пока значение избыточной температуры в точке контроля станет равным второму наперед заданному значению $T_{зад2}$. При этом определяют частоту подачи тепловых импульсов F_{x2} .

Искомые теплофизические характеристики рассчитывают по формулам, полученным следующим образом.

Процесс распространения тепла на теплоизолированной от внешней среды поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением задачи теплопроводности, которое имеет вид [7]:

$$T(x, \tau - \tau_i) = \sum_{i=1}^n \frac{q_u}{2\pi\lambda(\tau - \tau_i)} \exp\left[-\frac{x^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right], \quad (3)$$

где x – расстояние от линейного источника тепла до точки контроля, м; τ – время, с; τ_i – момент нанесения i -го теплового импульса на поверхность тела, с; λ – коэффициент теплопроводности изделия, Вт/(м×К); q_u – количество тепла, выделяемое с единицы длины линейного источника, Дж/м; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Воспользовавшись разложением в ряд $e^x = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$, ограничимся двумя слагаемыми,

так как значение x близко к нулю, и из (3) получим систему уравнений для определения установившихся температур в точке контроля [4]

$$T_{зад1} = \frac{QF_{x1}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right); \quad (4)$$

$$T_{зад2} = \frac{QF_{x2}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_2^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (5)$$

Осуществив математические преобразования формул (4) и (5), получим выражения для определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности

$$a = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{зад1} F_{x2}^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - T_{зад2} F_{x1}^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{T_{зад1} F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - T_{зад2} F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i}}; \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{QF_{x1}}{2\pi T_{зад1}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (7)$$

Для практической реализации предложенного микроволнового метода разработана микропроцессорная информационно-измерительная система (ИИС), схема которой представлена на рис. 1.

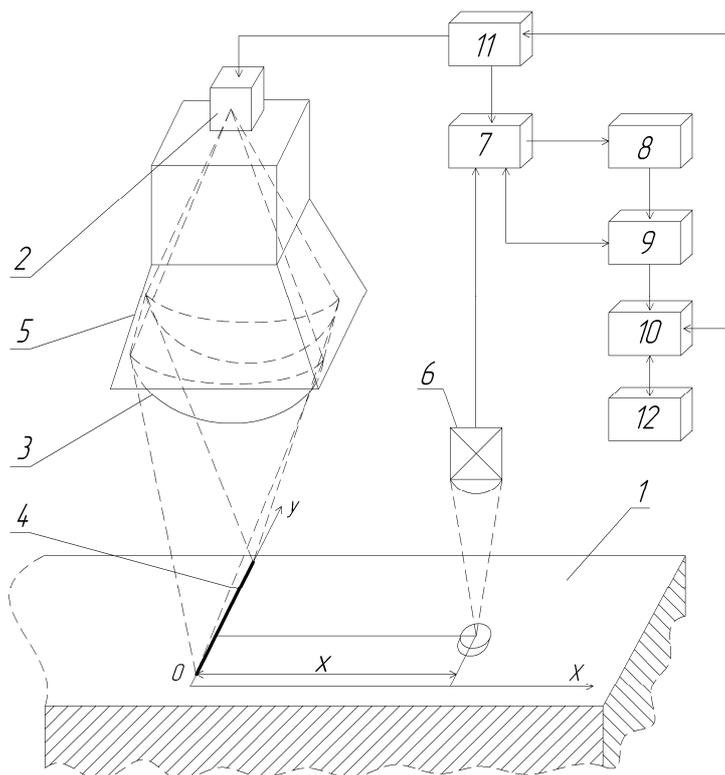


Рис. 1. Схема адаптивной информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий

Для проведения микроволнового воздействия на исследуемый образец 1 электромагнитное излучение СВЧ-генератора 2 линзой из радиопрозрачного материала 3 фокусируют в линию 4 заданных размеров. Нагрев исследуемого объекта 1 осуществляют импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля по линии 4 от излучающей рупорной антенны 5 с вмонтированной в нее линзой 3 и соединенной с СВЧ-генератором 2. После микроволнового воздействия осуществляют контроль избыточной температуры на теплоизолированной от окружающей среды поверхности исследуемого объекта в точке контроля, находящейся на расстоянии x от линии электромагнитного воздействия, бесконтактным первичным измерительным преобразователем 6 (ПИП) температуры инфракрасного диапазона, сфокусированным на поверхность исследуемого объекта, который через коммутатор 7, нормирующий прецизионный усилитель 8 и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 9 подключают к микропроцессору 10. В эксперименте расстояние x берется обычно равным 15 мм.

Микропроцессор 10 соединен через порт ввода-вывода 11 с СВЧ-генератором 5 и коммутатором 7, который осуществляет подключение ПИП в соответствии с алгоритмом, построенным на основе процедур предложенного метода. Данные эксперимента выводятся на индикатор 12. Используя полученную в ходе теплофизического эксперимента измерительную информацию, в микропроцессоре 10 искомые теплофизические характеристики рассчитываются по алгоритмам, построенным на основании аналитических соотношений (6) и (7), описывающих тепловые процессы в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении объекте.

На рисунке 2 представлена блок-схема функционирования адаптивной информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий. Экспериментальная проверка на строительных материалах (пенобетон, керамзитобетон, силикатный кирпич) показала, что предложенная система является достаточно точной для определения теплофизических характеристик.

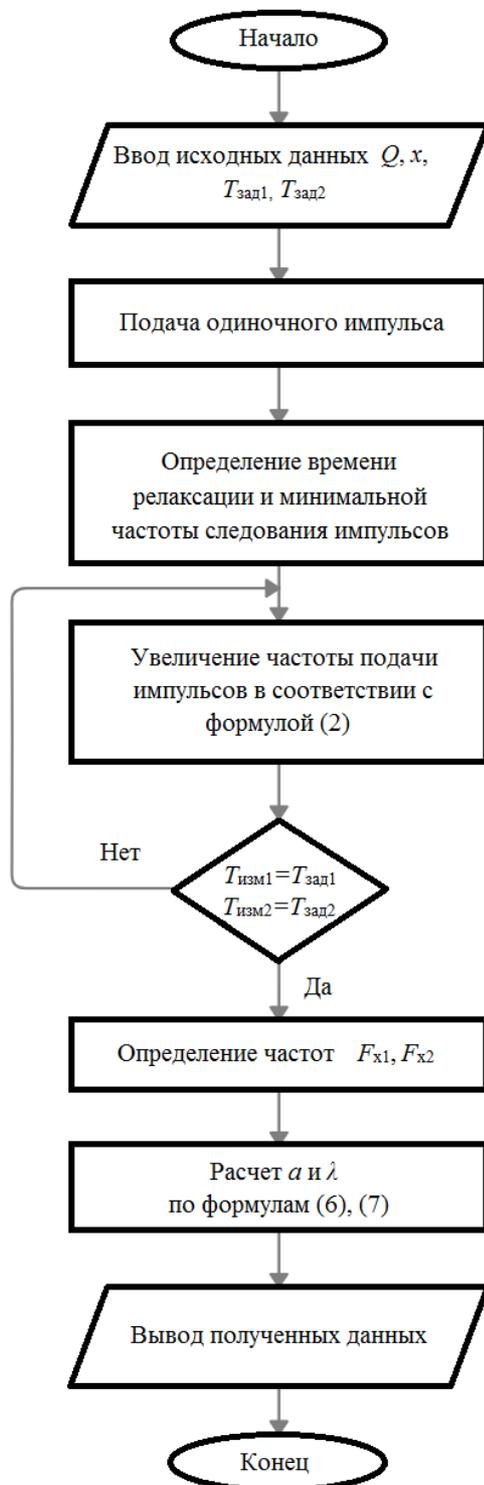


Рис. 2. Блок-схема адаптивной информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий

Преимуществами представленной системы являются: точность измерений, обусловленная прогревом большого объема исследуемого материала, уменьшением доли случайной составляющей общей погрешности измерений за счет контроля информации в частотно-импульсной форме; возможность неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий за счет исключения перегрева исследуемого материала, так как нагрев исследуемых объектов осуществляется до заранее заданной температуры, которая берется на 20...30% ниже температуры термодеструкции этого материала. Все это позволяет использовать предложенную адаптивную информационно-измерительную систему неразрушающего контроля теплофизических характеристик в практике теплофизических измерений, в строительной теплотехнике и различных отраслях промышленности.

Список использованных источников

1. **Чернышов, А. В.** Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий / А. В. Чернышов // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 6. – С. 40 – 44.
2. **Микроволновый** метод и система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Д. О. Голиков, В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, В. И. Полухин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2011. – № 1. – С. 8 – 12.
3. **Чернышов, В. Н.** Микроволновый метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / В. Н. Чернышов, М. В. Жарикова, А. В. Чернышов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 10. – С. 29 – 34.
4. **Чернышов, В. Н.** Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий : монография / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова. – СПб. : Экспертные решения, 2016. – 384 с.
5. **Пюшнер, Г.** Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер. – М. : Энергия, 1968. – 312 с.
6. **Клюев, В. В.** Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1976. – Т. 2. – 182 с.
7. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

УДК 681.5.08

Селиванова З. М., Куренков Д. С., Хоан Т. А.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630030, e-mail: selivanova@mail.jesby.tstu.ru)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВЕННЫХ
СВОЙСТВ ОБЪЕКТА**

Selivanova Z. M., Kurenkov D. S., Hoang T. A.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630030, e-mail: selivanova@mail.jesby.tstu.ru)

**MODELING OF THE THERMOPHYSICAL EXPERIMENT
WITH REMOTE CONTROL OF QUALITATIVE PROPERTIES
OF THE OBJECT**

Аннотация. Моделирование теплофизического эксперимента для определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с использованием импульсного метода при воздействии линейного источника тепла на исследуемый материал и математической модели процесса теплофизического измерения выполнено в программной среде MatCad. В результате моделирования определены оптимальные режимные параметры для проведения теплофизических измерений: мощность теплового воздействия на объект исследования и временной интервал следования тепловых импульсов при минимальной погрешности измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности материалов. Предложена структура интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля, которая реализует процедуру выбора оптимальных режимных параметров с применением методов искусственного интеллекта, что позволяет повысить оперативность и точность определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: теплофизический эксперимент, дистанционный контроль, теплофизические свойства, моделирование, интеллектуальная информационно-измерительная система.

Abstract. Modeling of a thermophysical experiment to determine the thermophysical properties of heat-insulating materials using the pulsed method when a linear heat source acts on the material under study and a mathematical model of the thermophysical measurement process was performed in the MatCad software environment. As a result of the simulation, the optimal operational parameters for conducting thermophysical measurements were determined: the power of the thermal effect on the object of study and the time interval for following the thermal pulses with a minimum measurement error of the coefficients of thermal and thermal diffusivity of materials. The structure of an intelligent information-measuring system of remote control is proposed, which implements the procedure for choosing the optimal operating parameters using artificial intelligence methods, which improves the efficiency and accuracy of determining the thermophysical properties of heat-insulating materials.

Keywords: thermophysical experiment, remote control, thermophysical properties, modeling, intelligent information-measuring system.

Введение. Применение энергоэффективной тепловой изоляции зданий и сооружений с использованием теплоизоляционных материалов снижает затраты на отопление до 50% и в 5 – 7 раз сокращает энергопотери. Энергосбережение обеспечивается при теплоизоляции внешних и внутренних конструкций объектов и теплоподводящих магистралей теплоизоляционными материалами, которые могут сохранять свои теплоизоляционные свойства более 6–7 десятков лет.

Задачи дистанционного контроля отражают концепцию комплексного применения методов дистанционного контроля, аппаратных и программных средств, методов искусственного интеллекта для телеметрического сбора измерительной информации от датчиков, контролируемых качественные параметры теплоизоляционных материалов в дистанционном режиме. Применение распределенной объектно-ориентированной интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС) неразрушающего контроля теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных материалов, реализующей интеллектуальную процедуру выбора оптимальных режимных параметров с использованием методов искусственного интеллекта, создание телекоммуникационной среды позволит выполнять непрерывный или периодический мониторинг и анализ качественных свойств энергоэффективных материалов [1, 2].

ИИИС с использованием методов искусственного интеллекта рассмотрены в работах известных зарубежных ученых, основоположников интеллектуальных измерений, систем интеллектуального окружения и интеллектуальных сред (Ambient Intelligence & Smart Environments) – Д. Хофмана, Л. Финкельштейна [3]. В работах российских ученых В. Н. Романова, В. С. Соболева, В. И. Цветкова, Г. Г. Раннева изложены вопросы создания интеллектуальных средств измерений [4]. В статье Laghi, L., Pennechi, F. и Raiteri, G. приводится описание информационно-измерительной системы Unitherm™ 2022 [5]. Анализ работ показывает, что представленные ИИИС имеют недостаточно высокое быстродействие и значительную погрешность измерений исследуемых параметров, обусловленную воздействием дестабилизирующих факторов. Известные импульсные тепловые методы неразрушающего контроля ТФС теплоизоляционных материалов [6, 7] также характеризуются невысокой оперативностью. Поэтому целью данного исследования является повышение оперативности и точности применяемого импульсного метода линейного источника тепла и ИИИС для определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в результате определения оптимальных режимных параметров теплофизических измерений на основе проведения моделирования в программной среде MatCad.

Дистанционный мониторинг качества теплоизоляционных материалов зданий, сооружений и других объектов в различных условиях эксплуатации, при воздействии дестабилизирующих факторов актуален и необходим для своевременного обнаружения нарушений надлежащей теплоизоляции объектов.

Результаты и обсуждение. Разработана математическая модель теплофизических измерений с использованием ИИИС для определения ТФС теплоизоляционных материалов.

Постановка задачи. С использованием экспериментальных и опытных данных, информации на входе и выходе составляющих компонентов ИИИС рассчитывается ряд ограничений, который накладывается на показатели точности и параметры ТФС исследуемых объектов при условии соответствия погрешности измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ , α) допустимым значениям $\Delta\lambda_{\text{доп}}$, $\Delta\alpha_{\text{доп}}$:

$$\begin{aligned} \Delta y_{\lambda}(S / x_{kX}, P_{kP}, b_{kB}) &\leq \Delta y_{\lambda_{\text{доп}}}; \\ \Delta y_{\alpha}(S / x_{kX}, P_{kP}, b_{kB}) &\leq \Delta y_{\alpha_{\text{доп}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $\Delta y_{\lambda}(S / x_{kX}, P_{kP}, b_{kB})$, $\Delta y_{\alpha}(S / x_{kX}, P_{kP}, b_{kB})$ – соответственно, погрешность измерения λ , α ; S – множество, которое включает компоненты ИИИС; x_1, x_2, \dots, x_{kX} – входные сигналы, P_1, P_2, \dots, P_{kP} – дестабилизирующие факторы, b_1, b_2, \dots, b_{kB} – параметры, которые соответствуют компонентам множества S .

Применение математической модели измерений в ИИИС позволяет установить состояния системы в заданные моменты времени, зависимости выходных сигналов подсистем ИИИС от воздействия входных и закономерности влияющих факторов.

Система зависимостей представляет математическую модель измерения на основе ограничений (1)

$$\begin{cases} y_1(T) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_{kX}; P_1, P_2, \dots, P_{kP}; b_1, b_2, \dots, b_{kB}, t), \\ y_2(T) = f_2(x_1, x_2, \dots, x_{kX}; P_1, P_2, \dots, P_{kP}; b_1, b_2, \dots, b_{kB}, t), \\ \dots \\ y_{\text{пу}}(T) = f_{\text{пу}}(x_1, x_2, \dots, x_{kX}; P_1, P_2, \dots, P_{kP}; b_1, b_2, \dots, b_{kB}, t), \end{cases} \quad (2)$$

здесь $y_1(T), y_2(T), \dots, y_{\text{пу}}(T)$ – множество формируемых сигналов на выходах каждой подсистемы (2); t – время контроля сигналов.

Определение параметров теплофизических свойств теплоизоляционных осуществляется в результате применения в ИИИС метода линейного мгновенного источника теплового воздействия на исследуемый объект. Задача теплопроводности в этом случае имеет следующее решение [1]:

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha\tau}\right), \quad (3)$$

где $T(x, \tau)$ – значение температуры; Q – значение мощности нагрева объекта исследования; τ – время измерений; x – расстояние от контролируемой точки до линейного источника теплового воздействия.

При подаче n -го импульса в заданные моменты времени определяются значения температур T_n и T_m . Расчет температуры (3) при частотно – импульсном тепловом воздействии на теплоизоляционный материал осуществляется по зависимости:

$$T(x, n) = \frac{QF}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha\Delta\tau i}\right), \quad (4)$$

где F – заданная частота тепловых импульсов.

Получены формулы для определения λ и α на основе (4) по данным температур $T(x, n)$ и $T(x, m)$ [1] в результате проведенных теплофизических измерений:

$$\alpha = B_1 \exp\left(B_2 \frac{T_n}{T_m}\right); \quad \lambda = \frac{1}{T_m} B_3 \ln(B_4 \alpha). \quad (5)$$

На основе математической модели измерений (2) и зависимостей (5) проведено моделирование процесса теплофизических измерений параметров в программной среде MatCad. По результатам моделирования построены графики зависимостей погрешностей измерения коэффициентов теплопроводности (рис. 1, а) и температуропроводности (рис. 1, б) от мощности теплового воздействия Q , а также установлены зависимости погрешностей измерения коэффициентов λ (рис. 2, а) и α (рис. 2, б) от временного интервала $\tau_{\text{инт}}$.

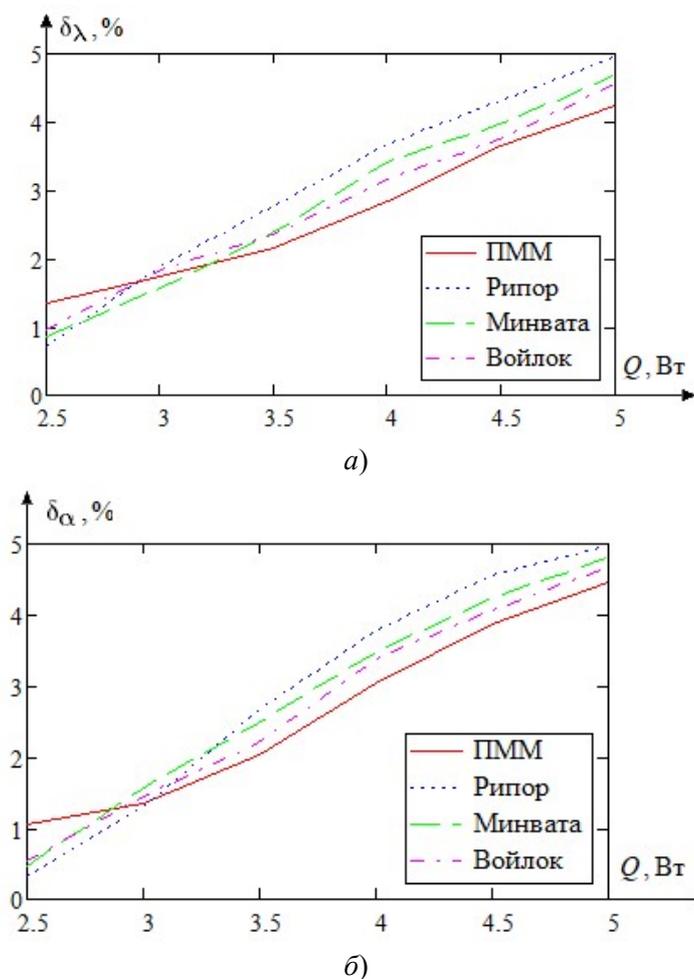


Рис. 1. Графики зависимостей погрешностей измерения коэффициентов теплопроводности (а) и температуропроводности (б) от мощности теплового воздействия Q

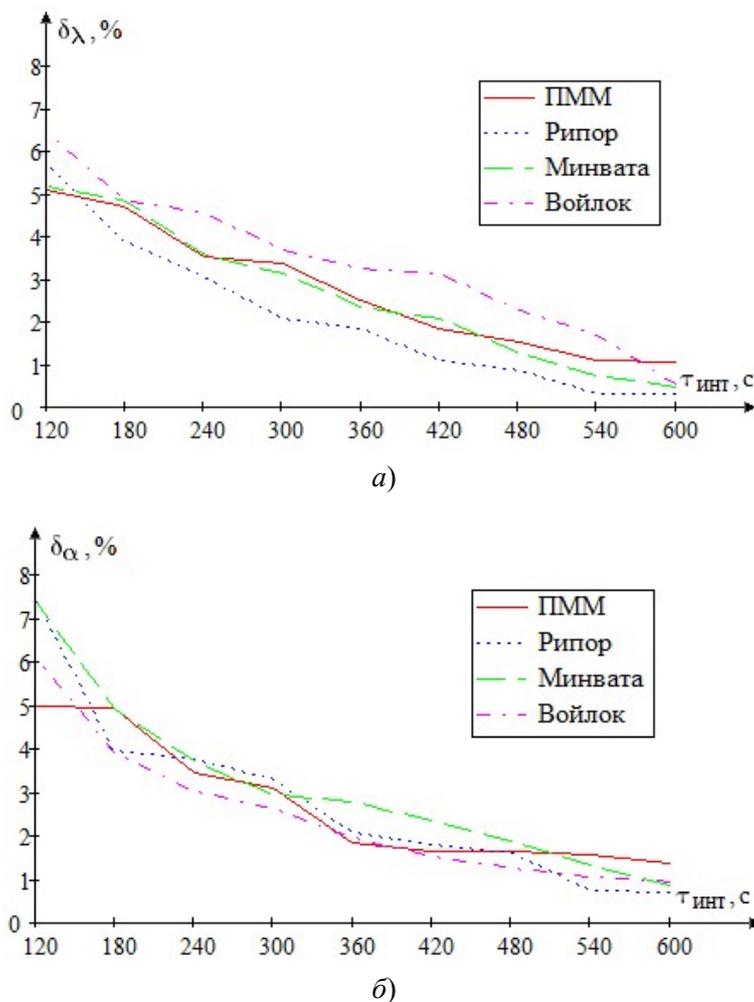


Рис. 2. Графики зависимостей погрешностей измерения коэффициентов теплопроводности (а) и температуропроводности (б) от временного интервала $\tau_{\text{инт}}$

По результатам анализа приведенных зависимостей на рис. 1 и 2 в ИИИС и на основе созданных продукционных правил, записанных в базу знаний системы, выбираются оптимальные мощность теплового воздействия на исследуемый объект и временной интервал между проведением теплофизических измерений при минимальной погрешности измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности.

Выводы. Разработана математическая модель процесса теплофизических измерений, позволяющая установить зависимости выходных сигналов структурных компонентов системы от входных при влиянии дестабилизирующих факторов с учетом ограничений на погрешности определения коэффициентов тепло- и температуропроводности.

Результаты моделирования в программной среде MatCad использованы в интеллектуальной информационно-измерительной системе для выбора оптимальных режимных параметров проведения теплофизических измерений, что в 3 – 5 раз повысило оперативность определения параметров ТФС теплоизоляционных материалов при допустимой погрешности не более 5%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ) государственное задание. Проект «Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система оперативного контроля теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов, применяемых в условиях Арктики. Разработка теоретических основ, методологии построения интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих систем»).

Список использованных источников

1. **Стасенко, К. С.** Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минеральных ват / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 52 – 60.
2. **Selivanova, Z. M.** Modelling of intelligent information measuring system to control thermophysical properties of materials and products / Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov, T. A. Hoang // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1278.
3. **Hofman, D.** Proceedings of the 10th World Congress of IMEKO Intellectual measurements for obtaining objective information in science and technology / D. Hofman, K. Karaya. – Prague, 1985. – P. 19 – 34.
4. **Раннев, Г. Г.** Интеллектуальные средства измерений / Г. Г. Раннев. – М. : Издательский центр «Академия», 2011. – 272 с.
5. **Laghi, L.** Uncertainty analysis of thermal conductivity measurements in materials for energy-efficient buildings / L. Laghi, F. Pennechi, G. Raiteri // International Journal of Metrology and Quality Engineering (IJMQE). – 2011. – V. 2, № 2. – P. 141 – 151.
6. **Belyaev, V. P.** Determination of the Diffusion Coefficient in Nondestructive Testing of Thin Articles of Anisotropic Porous Materials / V. P. Belyaev, S. V. Mischenko, P. S. Belyaev // Measurement Techniques. – 2017. – V. 60, Is. 4. – P. 392 – 398.
7. **The development** of the data transfer protocol in the intelligent control systems of the energy carrier parameters / I. S. Karavaev, V. I. Selivantsev, Y. I. Shtern, M. Y. Shtern // Proceedings of the, January, 29 – 31, 2018, IEEE // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus. – 2018. – P. 781 – 786.

УДК 544.344.016.5

Маматказин Т. Р., Мордасов Д. М.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +7(953)7089829, e-mail: mtrt@mail.ru)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА СТРУКТУРУ СПЛАВА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Mamatkazin T. R., Mordasov D. M.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. +7(953)7089829, e-mail: mtrt@mail.ru)

INFLUENCE OF ANNEALING TEMPERATURE ON THE STRUCTURE OF ALLOY WITH THE FORM MEMORY EFFECT

Аннотация. Проведено металлографическое исследование сплава на основе никеля и титана после отжига в печи при разных температурах.

Ключевые слова: никелид титана, память формы, структура.

Abstract. A metallographic study of an alloy based on nickel and titanium after annealing in an oven at different temperatures was carried out.

Keywords: titanium nickelide, shape memory, structure.

Современный мир невозможно представить без строительной, промышленной, военной, авиационной, подводной, космической и атомной отраслей. И во все эти сферы внедряются роботизированные технологии, позволяющие улучшить производственный процесс и сократить затраты.

В создании интеллектуальных робототехнических систем используют специальные конструкционные и функциональные материалы. Одним из таких материалов является сплав никеля и титана со способностью восстанавливаться после деформации. Несмотря на большое количество литературы, про сплавы на основе никелида титана, его поведение при различного вида температурных воздействиях требует дополнительного изучения.

В данной работе исследована структура составляющих сплава Ni-Ti проволоки с эффектом памяти формы после отжига в печи при разных температурах.

Для проведения исследований подготовлено 5 образцов проволоки. Образец № 1 был помещен в печь и нагрет до температуры 300 °С, после чего охлаждался в выключенной печи до комнатной температуры. Таким же способом был проведен отжиг других образцов с температурами 400, 500, 600, 700 °С соответственно.

По разработанной ранее методике [1] осуществлено металлографическое исследование специально подготовленных образцов.

Для выявления структуры составляющих сплава исследуемых образцов применена методика химического травления с использованием следующих реактивов:

№ 1 – соляная кислота плотностью 1,19 г/см³;

№ 2 – 10 мл плавиковой кислоты + 30 мл азотной кислоты.

На рисунке 1 представлены микроstructures образцов полученные при травлении реактивом № 1. На рисунке 2 представлены микроstructures образцов полученные при последовательном травлении реактивами № 1 и № 2.

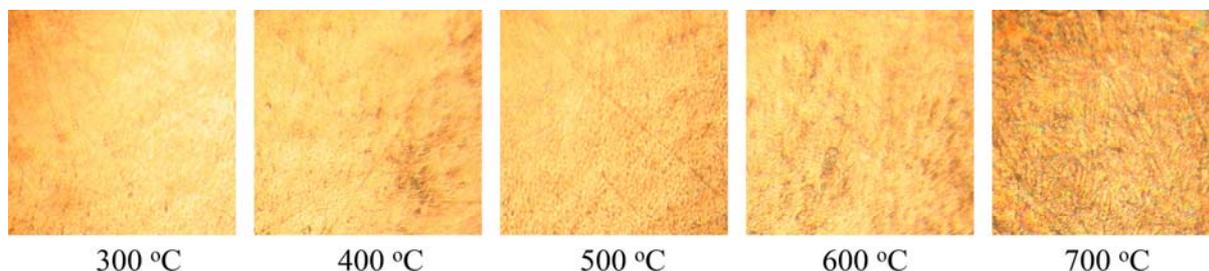


Рис. 1. Микроstructures поверхности исследуемых образцов полученные при травлении реактивом № 1 (650´)

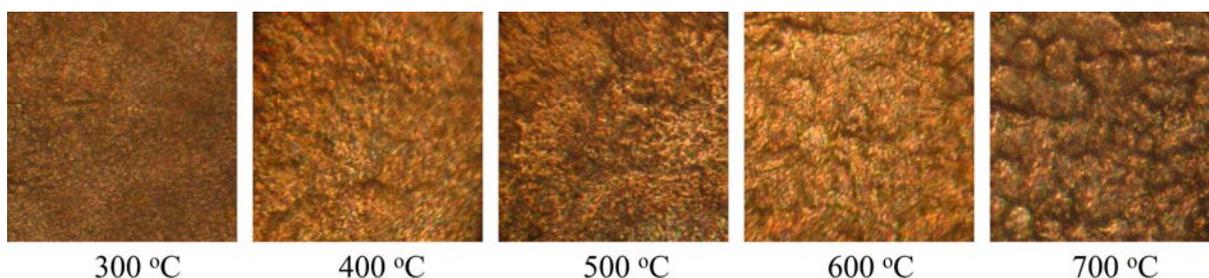


Рис. 2. Микроstructures поверхности исследуемых образцов полученные при травлении реактивом № 1 и № 2 (650´)

Анализ микрофотографий, представленных на рис. 1 и рис. 2 показывает, что с увеличением температуры отжига в структуре сплава Ni-Ti происходят изменения связанные с релаксацией внутренних напряжений и нормальным ростом зерен. При температурах выше 500 °C происходит рост аустенитного зерна, что приводит к вырождению эффекта памяти формы. Внутри зерен и на их границах наблюдаются частицы нерастворимой фазы Ti₂Ni, не испытывающей мартенситного превращения и ухудшающей свойства памяти формы. Диапазон 300...400 °C является оптимальным для разработки технологий отжига сплава, например с целью изменения его геометрических параметров.

Список использованных источников

1. **Металлографические** исследования алюминия А5N после технологических операций / А. П. Королев, А. М. Минаев, Д. М. Мордасов, Л. Н. Тялина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – Т. 1, № 1(21). – С. 64 – 67.

УДК 532.57:621.64

Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Черикова К. В., Меренцов Н. А.
 Волгоградский государственный технический университет, Россия, г. Волгоград
 (Тел. 89275095952, e-mail: tchyorickowa.xenia@yandex.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДЕ ПО ПРОФИЛЮ СКОРОСТИ

Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Chyorikova K. V., Merentsov N. A.
 Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd
 (Tel. 89275095952, e-mail: tchyorickowa.xenia@yandex.ru)

SIMULATION OF FLOW STRUCTURE IN PIPELINE BY VELOCITY PROFILE

Аннотация. Разработан численный метод расчета параметров структуры потоков в трубопроводе по зависимости скорости от радиуса, вместо индикаторного метода определения кривых отклика с помощью стандартного входного сигнала: импульсного, ступенчатого, гармонического и др.

Получены формулы для расчета дисперсии (центрального момента II порядка) по заданному профилю скорости. Приведен пример расчета и графики дифференциальных кривых отклика для заданного профиля скорости в сравнении с ячеечной, диффузионной и комбинированной модели с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения.

Ключевые слова: профиль скорости, структура потока, кривые отклика, дисперсия, среднее время пребывания, число ячеек, число Пекле, продольная диффузия, функция распределения времени пребывания.

Abstract. A numerical method of calculating the parameters of the flow structure in the pipeline by the dependence of speed on radius has been developed, instead of an indicator method of determining response curves using a standard input signal: pulse, step, harmonic, etc.

Formulas are given for calculation of dispersion (central order of II order) by preset velocity profile. An example of calculation and graph of differential response curves for a given velocity profile is given in comparison with a cellular, diffusion and combination model with successive connection of zones of ideal displacement and mixing.

Keywords: velocity profile, flow pattern, response curves, dispersion mean residence time, number of cells, Peclet number, longitudinal diffusion, residence time distribution function.

В настоящее время основной метод определения структуры потока основан на снятии так называемых кривых отклика не стандартный входной сигнал: импульсный, ступенчатый, пилообразный и гармонический [1, 2]. Часто бывает его сложно реализовать особенно на промышленных аппаратах и трубопроводах.

В частности это касается применения радиоактивных изотопов в качестве индикатора и их регистрации на выходе. Применение дыма для индикации газов и красок

для неэлектропроводных жидкостей, да и сам метод входных возмущений не является особо точным. Так, наиболее часто употребляемый в лабораториях метод измерения электропроводности кондуктометрическими ячейками, установленными на выходе из аппаратов и трубопроводов, дает значительные расхождения в параллельных опытах из-за сложностей подачи одинакового по времени входного сигнала. А вот метод определения профиля скорости в аппаратах и трубопроводах с помощью трубки Пито–Прандтля прост в конструктивном и техническом исполнении и не требует специальных индикаторов и их регистрации на выходе.

Целью работы является разработка метода определения параметров структуры потока в объектах, в том числе в трубопроводе по профилю скорости жидкости или газа, т.е. зависимости скорости по сечению $v = v(r)$.

Для вывода формулы зависимости дисперсии (центрального момента II порядка) от профиля скорости воспользуемся геометрическим смыслом дифференциальной или C – функции отклика: элементарная площадь под графиком этой функции от нормированного безразмерного времени равна доли расхода, выходящего из объекта в данный момент этого времени θ за промежутки времени $d\theta$ [1 – 3]:

$$Cd\theta = \frac{2\pi r v dr}{\pi R^2 v_s}, \quad (1)$$

где r и v – локальные радиусы и скорости в сечении объекта; R – радиус объекта (аппарата или трубопровода); v_s – средняя скорость.

Дисперсия C -кривой отклика описывается формулой:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} C\theta^2 d\theta - 1. \quad (2)$$

Так как безразмерное нормированное время:

$$\theta = t/\tau,$$

где t и τ – соответственно текущее и среднее время пребывания, и с учетом того, что:

$$t = h/v, \text{ а } \tau = h/v_s,$$

где h – высота (длина), на которой проводится регистрации профиля скорости, то

$$\theta = v_s/v. \quad (3)$$

Подставляя значение $Cd\theta$ и θ из уравнений (1) и (3) в уравнение (2) получаем:

$$\sigma^2 = 2 \int_0^R \frac{r}{R^2} \left(\frac{v_s}{v} \right) dr - 1. \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет рассчитать дисперсию структуры потока без снятия кривых отклика индикаторным методом. Саму функцию отклика можно также рассчитывать по профилю скорости.

Из уравнения (1) с учетом (3) из которого $d\theta = -\frac{v_s}{v^2} dv$ получаем формулу для расчета дифференциальной C-кривой отклика как функцию профиля скорости:

$$C = - \frac{2rv^3}{R^2v_s^2} \cdot \frac{dv}{dr} .$$

Заменяя дифференциалы dv и dr на конечную разность Δv и Δr получаем расчетное выражение:

$$C = - \frac{2\pi v^3 \Delta r}{R^2 v_s^2 \Delta v} . \tag{5}$$

Знак минус учитывает, что с ростом радиуса траектории r , $\Delta r \geq 0$, а скорость от центра к периферии падает и $(dv/dr) \leq 0$.

Совместное использование в расчетах уравнений (3) и (5) позволяет численно рассчитывать по профилю скорости дифференциальную C-функцию отклика.

В монографии (4) приведен профиль скорости турбулентного потока ньютоновской жидкости (табл. 1).

1. Заданный профиль скорости v для турбулентного течения ньютоновской жидкости в трубе радиусом $R = 0,05$ м и переход к средним значениям радиусов r_c и скоростей v_c

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$r \cdot 10^3, \text{ м}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$v, \text{ м/с}$	10,7	10,5	10,25	9,9	9,4	8,85	8,2	7,5	6,5	5,1	0
$r_c \cdot 10^3, \text{ м}$	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	–
$v_c, \text{ м/с}$	10,6	10,37	10,07	9,65	9,12	8,52	7,85	7,0	5,8	2,55	–

Все последующие расчеты проводились по разработанной авторами программе для ЭВМ [5].

В таблице 2 представлены исходные данные и расчетные параметры структуры потока по заданному профилю скорости и моделированию полученной структуры потока по известным моделям: ячеечной, диффузионной, комбинированной с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения.

2. Расчет параметров структуры потоков по известному профилю скорости в трубе

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
<i>Исходные данные</i>				
1.	Радиус трубы	м	R	0,05
2.	Профиль скорости	м/с	v	см. табл. 1
3.	Число параметров в массиве зависимости скорости от радиуса	–	n	11
<i>Расчетные параметры</i>				
1.	Расход жидкости	м ³ /с	q_v	0,0541
2.	Средняя скорость	м/с	v_s	6,896
3.	Безразмерное нормированное время пребывания на оси потока (время запаздывания входного сигнала)	–	θ_0	0,645
4.	Дисперсия, рассчитанная по формуле (4)	–	σ^2	0,246
5.	Число ячеек при моделировании структуры потока по ячейочной модели	–	m	4
6.	Доля застойной зоны при моделировании по ячейочной модели	%	z_1	7,38
7.	Число Пекле продольной диффузии для «полуоткрытого сосуда» определенного по формуле [1] $\sigma^2 = 2/Pe_l + (3/Pe_l)^2$	–	Pe_l	9,48
8.	Доля застойной зоны для потока, моделируемого по диффузионной модели	%	Z_2	2,23
9.	Доля застойной зоны для потока, моделируемого комбинированной моделью с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения	%	Z_3	3,82
10.	Доля застойной зоны для рассчитанной по профилю скорости C -функции отклика	%	z	1,72

В отличие от типовых кривых отклика, получаемых для так называемых «закрытых сосудов» [1] когда размеры патрубков входа и выхода значительно меньше размеров основного аппарата или трубопровода, кривая отклика, получаемая по формуле (5)

с использованием профиля скорости в самом объекте, соответствует «полуоткрытому сосуду».

На рисунке 1 показаны C -кривые отклика, рассчитанные по предлагаемой формуле (5) с использованием зависимости скорости от радиуса, и модельные кривые отклика для ячеечной диффузионной и комбинированной моделей с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения.

Формулы вышеназванных ячеечной, диффузионной и комбинированной моделей $C = C(\theta)$ не приводятся, так как они известны по источникам [1 – 3].

Как видно из графиков кривых отклика график кривой отклика 1 (рис. 1), рассчитанный по формуле (5), лучше всего по форме согласуется с графиком C -функции отклика комбинированной модели с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения (2).

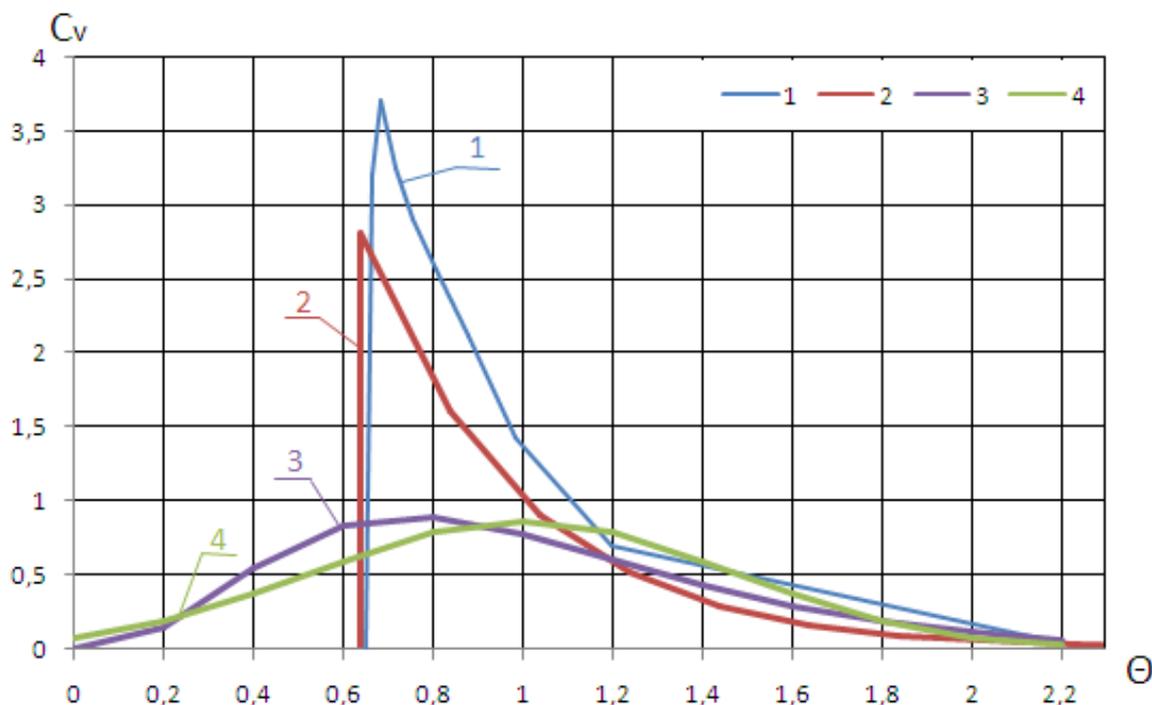


Рис. 1. Дифференциальные кривые отклика рассчитанные по профилю скорости (1) структуры потоков при последовательном соединении зон идеального вытеснения и смешения (2), ячеечной модели (3) с числом ячеек $m = 4$ и однопараметрической диффузионной модели (дисперсия всех кривых $\sigma^2 = 0,246$)

Графики ячеечной и диффузионной модели по форме резко отличаются от расчетной кривой (1), хотя дисперсия всех четырех кривых отклика одинаковая $\sigma^2 = 0,246$. Это хорошо известное положение, что одной и той же дисперсии может соответствовать бесчисленное множество кривых и функций отклика [3].

Предлагаемый метод определения дисперсии распределения частиц по времени пребывания в объекте по профилю скорости позволяет определять параметры структу-

ры потока без снятия кривых отклика индикаторным методом, рассчитывать дифференциальную кривую отклика и оценивать точность описания структуры потока различными типовыми моделями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90002)The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90002).

Список использованных источников

1. **Левеншпиль, О.** Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1969
2. **Кафаров, В. В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии : учебник / В. В. Кафаров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1985.
3. **Тябин, Н. В.** Методы кибернетики в реологии и химической технологии : учебное пособие / Н. В. Тябин, А. Б. Голованчиков. – Волгоград : Волгоградский политехнический институт, 1983. – 103 с.
4. **Романков, П. Г.** Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина – Л. : Химия, 1974. – 288 с.
5. **Св.** о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019611186 от 23 января 2019 г. Российская Федерация. Программа для расчета параметров структуры потока в колонне по профилю скорости / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов ; ВолгГТУ. – 2019.

УДК 004.94:66.023

Мартьянов Е. И., Малыгин Е. Н.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: martyanovei@gmail.com)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ МЕШАЛКИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Martyanov E. I., Malygin E. N.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630706, e-mail: martyanovei@gmail.com)

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE IMPELLER DESIGN ON THE MIXING INTENSITY

Аннотация. Представлены результаты исследований, проводимых с целью определения угла наклона лопасти двухлопастной мешалки при котором вектор скорости движения массы в объеме аппарата будет принимать максимальное значение, а мощность, затрачиваемая на перемешивание, будет минимальна при фиксированных режимных параметрах таких как скорость вращения мешалки, температура среды и давление в аппарате, а также ряда конструктивных параметров: ширины, толщины и длины лопасти мешалки.

Для расчетов векторов скорости в аппарате применялся метод конечно элементного анализа, а также k-epsilon модель течения жидкости.

Для анализа полученных результатов был применен системный подход, который позволил найти искомое значение угла наклона лопасти мешалки, при котором достигается максимальная энергоэффективность привода аппарата.

Ключевые слова: лопастная мешалка, вертикальный емкостной аппарат, расчет полей скоростей, расчет крутящего момента на валу мешалки, ANSYS Fluent, параметрическая модель.

Abstract. This article presents the results of studies conducted to determine the angle of inclination of a blade of a two-bladed mixer at which the mass velocity vector in the apparatus volume will take a maximum value, and the power spent on mixing will be minimal for fixed operating parameters such as speed mixer rotation, medium temperature and pressure in the apparatus, as well as a number of design parameters: width, thickness and length of the mixer blade.

To calculate the velocity vectors in the apparatus, the finite element analysis method was used, as well as the k-epsilon model of the fluid flow.

To analyze the results, a systematic approach was applied, which made it possible to find the desired value of the angle of inclination of the mixer blade, at which the maximum energy efficiency of the apparatus drive is achieved.

Keywords: paddle mixer, vertical capacitive apparatus, calculation of velocity fields, calculation of torque on the mixer shaft, ANSYS Fluent, parametric model.

В нашем быстроразвивающемся мире такое понятие, как время является самым важным ресурсом. Если предприятия или производства не могут угнаться за столь быстрой изменчивостью рынка, они неизбежно обречены на провал. Поэтому все чаще можно встретить применение тех или иных информационных систем, которые позволяют ускорить рутинные процессы или повысить их эффективность в экономической сфере. Однако применение программных комплексов для теоретических исследований фундаментальных процессов в науке имеют более приоритетное значение, чем их экономические аналоги. Применение данных программных комплексов позволяет получать достоверные результаты с заданной точностью, а также значительно ускоряют проведение научных исследований и вывод готового продукта на рынок.

В химической промышленности одним из основных процессов является смешение гомогенных (жидкость–жидкость) или гетерогенных (жидкость–газ, жидкость–твердое) систем в реакторах периодического или непрерывного действия. Для описания данного процесса применяют уравнение Навье–Стокса. Уравнение Навье–Стокса – система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая движение вязкой ньютоновской жидкости. Решая данное уравнение, применяя метод конечных элементов (МКЭ), можно получать результаты с заданной точностью. МКЭ – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными. Данный метод позволяет решать дифференциальные уравнения посредством разбивки его области решения на конечное количество элементов. В каждом из этих элементов для вычисления использую полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю, а решением задачи являются значения функций на границах элементов. Коэффициенты аппроксимирующих функций определяются из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами. Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных уравнений, в которой количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ.

В ходе исследования была поставлена задача по определению угла наклона лопасти двухлопастной мешалки, при котором вектор скорости движения массы в объеме аппарата будет принимать максимальное значение при фиксированных режимных параметрах таких как скорость вращения мешалки, температура среды и давление в аппарате, а также ряда конструктивных параметров: ширины, толщины и длины лопасти мешалки. Так же для оценки процесса с точки зрения эффективности рассчитывается крутящий момент на валу мешалки, который позволяет оценить энергетические затраты на перемешивание.

Для решения поставленной задачи использовался программный комплекс ANSYS 19. При помощи модуля ANSYS Fluent была создана параметрическая модель двух лопастной мешалки с изменяемым углом наклона лопасти на 180° вокруг оси ее симметрии в вертикальном емкостном аппарате с эллиптическим днищем объемом 50 литров (рис. 1).

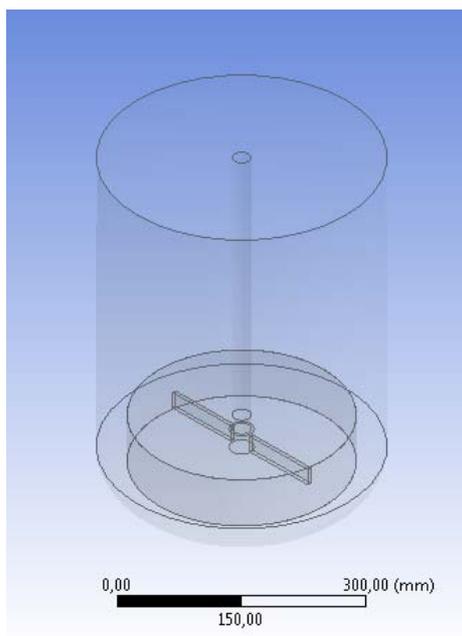


Рис. 1. Модель аппарата с двухлопастной мешалкой

Средой в аппарате была принята вода при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $P = 760 \text{ мм рт. ст.}$ с характеристиками: плотность – $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость – $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, кинетическая вязкость – $\nu = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Мешалка вращается с постоянной скоростью в 150 об/мин. После разбиения полученной модели на 140 304 элемента в форме тетраэдра (рис. 2) был произведен расчет с применением k-epsilon модели течения жидкости в результате, которого были получены суммарный вектор скорости движения массы в объеме аппарата и крутящий момент на валу мешалки для разных углов наклона лопасти мешалки (табл. 1).

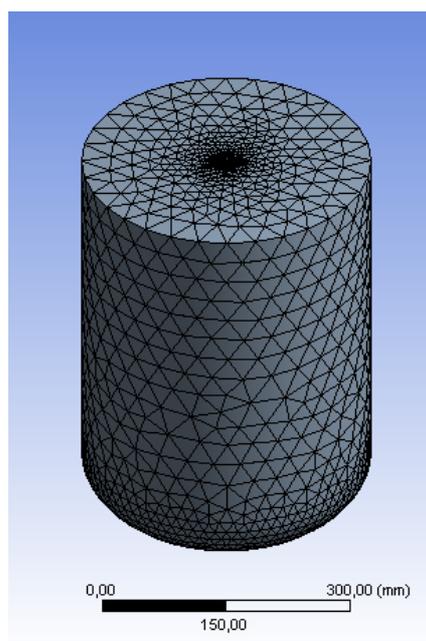


Рис. 2. Модель аппарата, разбитая на тетраэдры

1. Результаты расчетов

Наклон лопасти, град	Суммарный вектор скорости, м/с	Крутящий момент, Н·м
0	3990,84	1,51
10	4008,11	1,45
20	3955,37	1,37
30	3779,46	1,19
40	3505,71	1,03
50	2977,19	0,78
60	2516,46	0,57
70	1789,57	0,37
80	1203,66	0,19
90	974,31	0,13
100	1284,31	0,20
110	1845,71	0,34
120	2435,22	0,58
130	2891,62	0,81
140	3055,89	1,01
150	3324,79	1,22
160	3659,25	1,34
170	3865,82	1,45
180	3946,36	1,48

Изменение угла наклона производилось в интервале от 0 до 180° с шагом в 10°. Данные по суммарному вектору скорости и крутящему моменту представлены для установившегося режима перемешивания, т.е. без учета пусковых нагрузок.

Для большей наглядности полученные данные были представлены в виде графиков вектора скорости движения массы в объеме аппарата (рис. 3) и крутящего момента на валу мешалки (рис. 4).

Как можно заметить на графике вектора скорости (см. рис. 3) максимальное значение 4008,11 м/с достигается при наклоне лопасти в 10°, а минимальное значение 974,31 м/с при 90°. График крутящего момента на валу мешалки (см. рис. 4) имеет явно выраженную параболу, минимум (0,13 Н·м) которой соответствует 90°, а максимум

(1,51 Н·м) – 0°. Несмотря на то, что максимальное значение вектора скорости достигается при угле наклона лопасти в 10° и равняется 4008,11 м/с, более эффективным с точки зрения энергетики будет угол в 30° (3779,46 м/с). В виду того, что разница в суммарном векторе скорости при 10 и 30° составляет всего лишь 5%, при этом угол наклона лопасти в 30° (1,19 Н·м) требует на 20% меньше энергии по сравнению с углом в 10° (1,45 Н·м).



Рис. 3. График суммарного вектора скорости



Рис. 4. График крутящего момента

Для аппаратов малого объема до 1 м^3 этот эффект будет не сильно заметен. Однако для аппаратов, объемом свыше 10 м^3 на которых в основном устанавливаются приводы мощностью от 20 кВт, экономический эффект от сокращения затрат на электроэнергетику в 20% позволит снизить себестоимость продукции на 3...5% и, следовательно, позволит не только увеличить прибыль, но и позволит повысить качество выпускаемой продукции.

Список использованных источников

1. **Брагинский, Л. Н.** Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
2. **Малыгин, Е. Н.** Математические методы в технических расчетах : учебное пособие / Е. Н. Малыгин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО «ТГТУ», 2010. – 80 с.
3. **Карпушкин, С. В.** Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 168 с.

УДК 004.94

Страшнов Е. В., Торгашев М. А.

ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (8499)1247951, e-mail: strashnov_evg@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ РОБОТОВ ПО РОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Strashnov E. V., Torgashev M. A.

Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (8499)1247951, e-mail: strashnov_evg@mail.ru)

SIMULATION OF WHEELED ROBOTS MOTION ON FLAT TERRAIN IN VIRTUAL ENVIRONMENT SYSTEMS

Аннотация. Рассматривается задача моделирования динамики виртуальной модели колесного робота для реализации его движения по ровному рельефу местности. Предлагаемое решение этой задачи основано на математической модели, согласно которой движение робота подчиняется уравнениям относительно сил и моментов, действующих на колесо при его контакте с поверхностью. Для вычисления силы реакции опоры колеса с поверхностью в данной работе была применена вязкоупругая модель Кельвина–Фойгта, позволяющая описать деформацию шины под действием веса робота. Кроме того, предлагаемое решение включает в себя расчет силы тяги в зависимости от величины проскальзывания колеса. Предложенные методы и подходы для моделирования движения колесного робота по ровной поверхности были реализованы в имитационно-тренажерном комплексе, предназначенном для моделирования виртуальных роботов.

Ключевые слова: мобильный робот, ровный рельеф местности, ведущее колесо, модель Кельвина–Фойгта, трение, продольная сила тяги, проскальзывание, система виртуального окружения.

Abstract. The paper considers the task of dynamics simulation of a virtual wheeled robot model for realizing its motion along a flat terrain. The proposed solution of this task is based on a mathematical model in which the robot motion obeys the equations for the forces and moments acting on the wheel in the contact surface. To calculate the normal tire force in this work we used the Kelvin-Voigt viscoelastic model, which allows us to describe the tire deformation under the influence of the robot weight. In addition, the proposed solution includes the calculation of longitudinal driving force depending on the wheel slip. The proposed methods and approaches for simulation of wheeled robot motion on a flat surface were implemented in training complex designed for the virtual robot simulation.

Keywords: mobile robot, flat terrain, driving wheel, Kelvin-Voigt model, friction, longitudinal driving force, slippage, virtual environment system.

Введение. В тренажерных системах и комплексах виртуального окружения часто необходимо моделировать движение колесных транспортных средств. Примером служит мобильный колесный робот, управление которым осуществляется с помощью

электроприводов, установленных на его ведущих колесах. Для моделирования движения такого робота требуется реализовать динамику его компонентов, включая шасси, подвески колес, рессоры, шины и т.д. Как правило, в системах инженерного расчета для этого используются сложные математические модели, которые требуют проведения большого количества вычислений, что делает их не пригодными для моделирования в реальном времени. Альтернативным решением является подход, в котором задействованы более простые математические модели, но при этом обеспечивающие адекватное моделирование динамики роботов в системах виртуального окружения. В настоящей работе такой подход применяется в рамках решения задачи моделирования движения колесного робота по ровной поверхности. Для этого рассматривается математическая модель, которая описывает динамику робота и ведущего колеса при движении в продольном направлении. На основе этой математической модели моделирование движения колесного робота осуществляется путем вычисления всех сил и моментов, которые действуют на колесо робота. Предлагаемое решение включает в себя вычисление силы реакции опоры с помощью модели Кельвина–Фойгта [1], позволяющей описать деформацию шины при контактном взаимодействии колеса с поверхностью, и расчет силы тяги в зависимости от величины проскальзывания, возникающего при разгоне (буксовании) и торможении (юз) колес робота.

Математическая модель движения колесного робота. В силу того, что основное движение колесного робота определяется продольными силами, которые возникают при контакте колеса с поверхностью, мы в данной работе ограничимся описанием динамики робота только в продольном направлении. Для этого рассмотрим колесный робот (см. рис. 1), который имеет массу m и движется по ровной поверхности в продольном направлении вдоль оси y . При этом будем предполагать, что движение робота осуществляется с малыми скоростями, поэтому влиянием аэродинамического сопротивления можно пренебречь.

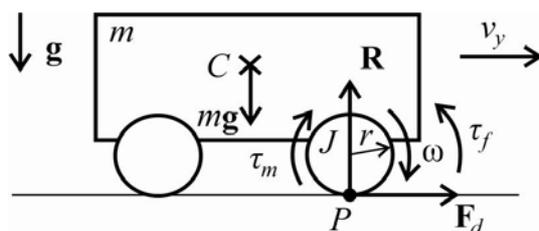


Рис. 1. Схематичное изображение колесного робота

Динамика продольного движения колесного робота и вращения ведущего колеса робота подчиняется следующим дифференциальным уравнениям:

$$m\dot{v}_y = F_d ; \tag{1}$$

$$J\dot{\omega} = \tau_m - rF_d - \tau_f , \tag{2}$$

где v_y – скорость движения робота вдоль оси y ; F_d – продольная сила тяги; J – инерция колеса; ω – угловая скорость вращения колеса; τ_m – крутящий момент электродвигателя колеса; r – радиус колеса; τ_f – момент трения колеса.

Опишем все силы и моменты, которые действуют на колесо. Согласно (1), движение робота осуществляется за счет продольной силы тяги F_d , которая возникает вследствие наличия трения скольжения между колесом и поверхностью. Эта сила зависит от коэффициента трения скольжения μ , вертикальной силы реакции опоры R и величины проскальзывания s_y вдоль оси y .

Коэффициент трения скольжения μ определяется в зависимости от материала протектора колеса и типа поверхности. Для вычисления силы R мы рассматриваем случай, при котором под действием веса робота его шина деформируется, что образует пятно контакта между колесом и поверхностью.

Чтобы описать влияние этих деформаций в настоящей работе предлагается использовать модель Кельвина–Фойгта [1] следующего вида

$$R = m_{ном}g + k\Delta z + c\Delta \dot{z}, \quad (3)$$

где $m_{ном}$ – масса робота, приходящаяся на колесо робота (рассчитывается как отношение массы робота на число его колес); Δz – деформация шины в вертикальном направлении; k – жесткость; c – коэффициент демпфирования.

Величина проскальзывания s_y определяется [2] относительной разницей между скоростью вращения колеса и скоростью движения робота, т.е.

$$s_y = \frac{r\omega - v_y}{\max(r\omega, v_y)}.$$

В работах [3] и [4] показано, что зависимость силы F_d от s_y является линейной при малых значениях s_y , а при больших – ограничена некоторой постоянной величиной F_d^* (кривая 1 на рис. 2). Поэтому в данной работе предлагается использовать аппроксимацию силы тяги F_d в виде кусочно-линейной функции (зависимость 2 на рис. 2):

$$F_d = \begin{cases} \mu R s_y, & |s_y| \leq s_y^* \\ F_d^*, & s_y > s_y^* \\ -F_d^*, & s_y < -s_y^* \end{cases}. \quad (4)$$

Уравнение (2) описывает динамику вращения колеса. Если колесо является ведущим, то электропривод создает крутящий момент τ_m , который вычисляется следующим образом [5]:

$$\tau_m = M_s \left(U - \frac{\omega}{\omega_{idle}} \right), \quad (5)$$

где M_s – пусковой момент электродвигателя; U – напряжение, подаваемое на электродвигатель; ω_{idle} – скорость холостого хода электродвигателя.

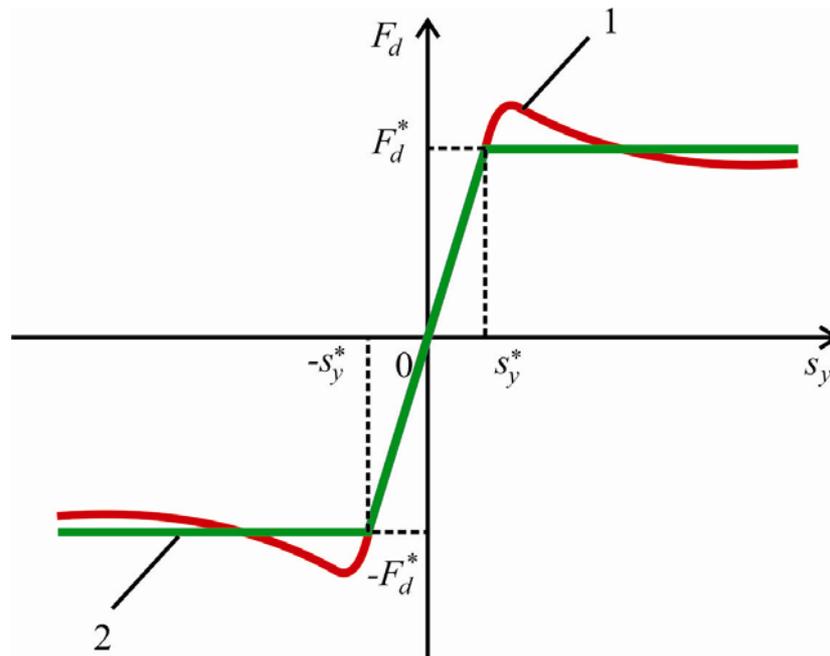


Рис. 2. График зависимости силы тяги F_d от s_y

Противоположно вращению на колесо действует суммарный момент трения τ_f , куда входит момент трения на валу колеса и момент сил трения качения. При контакте колеса с поверхностью максимальный момент трения качения будет равен

$$\tau_i^{\max} = f \cdot R, \quad (6)$$

где f – коэффициент трения качения.

Математические модели (3) – (6) для вычисления сил и моментов далее применяются для моделирования движения колесного робота, которое осуществляется согласно уравнениям (1) и (2).

Результаты моделирования. Математические модели для моделирования движения колесного робота были реализованы в виде программных модулей комплекса виртуального окружения, созданного в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. В этом программном комплексе для интегрирования уравнений движения (1) и (2) применяется численная схема Эйлера с шагом моделирования Δt :

$$m \frac{v_y(t + \Delta t) - v_y(t)}{\Delta t} = F_d(t), \quad J \frac{\omega(t + \Delta t) - \omega(t)}{\Delta t} = \tau_m(t) - rF_d(t) - \tau_f(t). \quad (7)$$

Вычисление сил и моментов, действующих на колесо робота, осуществляется в следующем порядке. Сначала решается задача определения коллизий колеса с поверхностью путем определения пересечений цилиндра и плоскости [6].

На выходе определяется глубина проникновения колеса, которая используется в качестве текущего значения деформации $\Delta z(t)$ для вычисления силы реакции опоры $R(t)$ в модели (3). Полученная сила $R(t)$ далее используется для вычисления силы тяги $F_d(t)$ и максимального момента трения качения $\tau_i^{\max}(t)$ по формулам (4) и (6). Затем

по напряжению $U(t)$, подаваемому на электродвигатель, согласно формуле (5) вычисляется крутящий момент $\tau_m(t)$. И, наконец, для расчета момента трения колеса $\tau_f(t)$ предлагается следующий подход. Для этого из второго уравнения (7) сначала вычисляется скорость вращения колеса $\omega'(t + \Delta t)$ без учета момента трения. Тогда момент трения $\tau_f(t)$ определяются следующим образом

$$\tau_f(t) = \begin{cases} J\omega'(t + \Delta t) / \Delta t, & J|\omega'(t + \Delta t)| / \Delta t \leq \tau_f^{\max}(t) \\ -\tau_f^{\max}(t), & J\omega'(t + \Delta t) / \Delta t < -\tau_f^{\max}(t) \\ \tau_f^{\max}(t), & J\omega'(t + \Delta t) / \Delta t > \tau_f^{\max}(t) \end{cases}$$

Рассчитанные силы и моменты далее используются для вычисления новых скоростей $v_y(t + \Delta t)$ и $\omega(t + \Delta t)$ из уравнений (7). По полученным скоростям затем определяются новые координаты робота и углы поворота его колес.

Апробация предложенных в статье методов и подходов была проведена на примере моделирования движения колесного робота КРТ-200 в виртуальной сцене, содержащей ровный участок асфальта (см. рис. 3). Результаты моделирования показывают, что предложенные в статье решения позволяют эффективно реализовать динамику робота, включая эффекты проскальзывания колес, возникающие при резком разгоне и торможении.

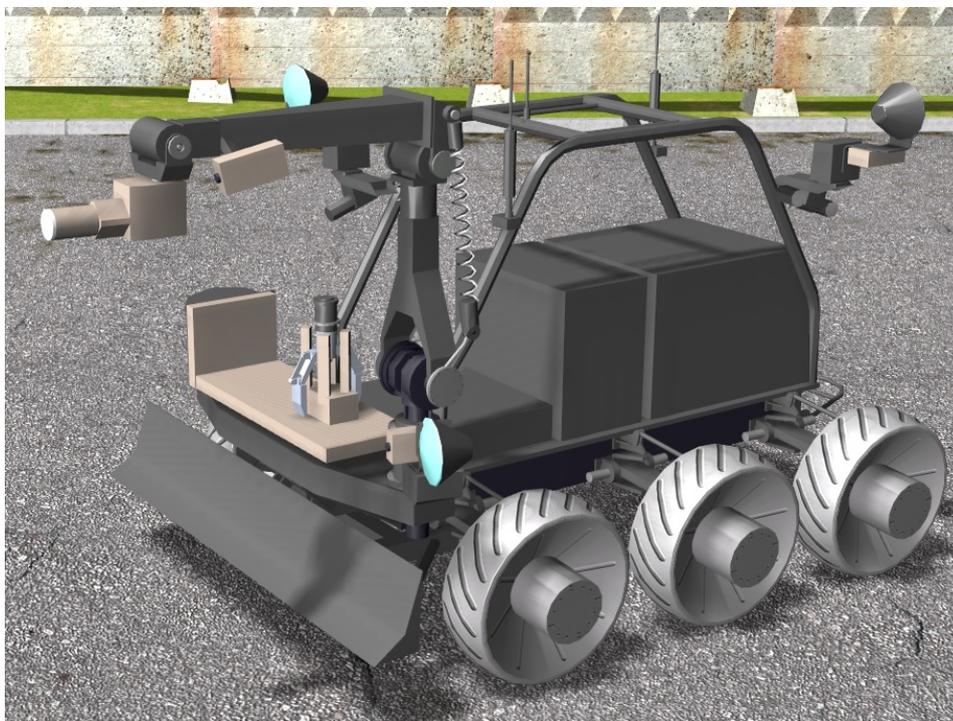


Рис. 3. Виртуальная модель робота КРТ-200

Заключение. В данной работе была рассмотрена задача моделирования продольного движения колесного робота по ровной поверхности в системах виртуального окружения. Для решения этой задачи была предложена математическая модель с расче-

том сил и моментов, возникающих при контакте колеса с поверхностью. Такой подход показал свою адекватность для реализации движения колеса с учетом проскальзывания, возникающего при разгоне (буксовании) и торможении (юз) робота. В дальнейшем планируется расширить предложенные методы и подходы для моделирования движения колесного робота по произвольному рельефу местности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00387.

Список использованных источников

1. **Poulakis P., Joudrier L., and Stramigioli S.** Port-based modelling and simulation of planetary rover locomotion on rough terrain, 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. – 2006.
2. **Rajamani R.** Vehicle dynamics and control, Springer-Verlag: New York, NY, USA, 2005.
3. **Nam K., Hori Y., and Lee C.** Wheel slip control for improving traction-ability and energy efficiency of a personal electric vehicle, Energies. – 2015. – V. 8, № 7. – P. 6820 – 6840.
4. **Rill G.** Road vehicle dynamics: fundamentals and modeling. CRC Press, 2011. – 331 p.
5. **Страшнов, Е. В.** Моделирование динамики электроприводов виртуальных роботов в имитационно-тренажерных комплексах / Е. В. Страшнов, М. А. Торгашев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 11. – С. 762 – 768.
6. **Страшнов, Е. В.** Определение коллизий аппроксимирующих цилиндров со сферами и плоскостью / Е. В. Страшнов, Д. В. Омельченко // Труды НИИСИ РАН. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 92 – 97.

УДК 004.942

Страшнов Е. В., Мироненко И. Н.

ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (8499)1247951, e-mail: strashnov_evg@mail.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ И ВЕРЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ЗАХВАТА ВИРТУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Strashnov E. V., Mironenko I. N.

Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (8499)1247951, e-mail: strashnov_evg@mail.ru)

SLIDING AND PIVOT FRICTION SIMULATION FOR GRASPING VIRTUAL OBJECTS

Аннотация. Рассматривается задача моделирования в виртуальном окружении трения скольжения и верчения, возникающих при взаимодействии деформируемого рабочего органа манипуляционного робота с захватываемым объектом. Предлагаемое решение этой задачи основано на применении аналитической модели трения, в которой сила трения скольжения и момент трения верчения связаны с силой реакции опоры. Согласно этой модели, моделирование трения между объектами осуществляется методом последовательных импульсов посредством формирования и обеспечения ограничений специального типа относительно скоростей тел и импульсов. Предложенные в работе методы и подходы были реализованы в программном комплексе виртуального окружения и были апробированы на примере решения задачи захвата объекта антропоморфным роботом.

Ключевые слова: трение скольжения и верчения, упругий захват, метод последовательных импульсов, антропоморфный робот, система виртуального окружения.

Abstract. This paper considers the task for simulation in virtual environment of sliding friction and pivot friction that occur during the interaction of a deformable end effector of manipulation robot with a grasping object. The proposed solution of this task is based on the application of an analytical friction model, in which the sliding friction force and the pivot friction moment is coupling with the normal force. According to this model, friction simulation between objects is performed by the sequential impulses method by means of derivation and solving of special type constraints on the body velocities and impulses. Methods and approaches proposed in the work were implemented in the software complex of the virtual environment and were tested on the example of object grasping with an anthropomorphic robot.

Keywords: sliding friction and pivot friction, soft grasping, sequential impulses method, anthropomorphic robot, virtual environment system.

Введение. В настоящее время компьютерное моделирование в виртуальной среде активно применяется для решения различных задач в области робототехники. Одной из таких задач является захват объекта с помощью виртуальной модели манипуляционного робота. Для того, чтобы повысить качество удержания и манипуляций с захватываемым объектом, необходимо разработать эффективные алгоритмы моделирования трения скольжения и верчения.

ваемым объектом при моделировании необходимо использовать точные математические модели трения. Закон Амонтона–Кулона пригоден только для моделирования сухого трения между твердыми телами, в то время как захватное устройство робота подвержено деформациям при взаимодействии с объектом. Для описания влияния этих деформаций в данной статье предлагается решение, согласно которому рассматривается математическая модель, в которой сила трения скольжения и момент трения верчения связаны с силой реакции опоры [1]. Реализация этой модели для моделирования динамики твердых тел осуществляется с помощью разработанного метода последовательных импульсов [2, 3].

Математическая модель трения. Рассмотрим контакт двух тел (рис. 1) в точке P , одно из которых является деформируемым (элементы захватного устройства), а другое – твердым (объект). Плоскость контакта имеет нормаль \mathbf{n} и определяется двумя векторами \mathbf{t}_1 и \mathbf{t}_2 . Опишем все силы и моменты, которые действуют на первое тело со стороны второго. При контакте двух тел возникает сила реакции опоры \mathbf{f}_n , направленная вдоль нормали \mathbf{n} . Трение рассматривается двух видов: скольжения и верчения. При наличии относительного поступательного движения между телами возникает сила трения скольжения \mathbf{f}_t , которая лежит в плоскости контакта тел. В свою очередь при наличии относительного вращения тел вокруг нормали \mathbf{n} возникает момент трения верчения τ_n .

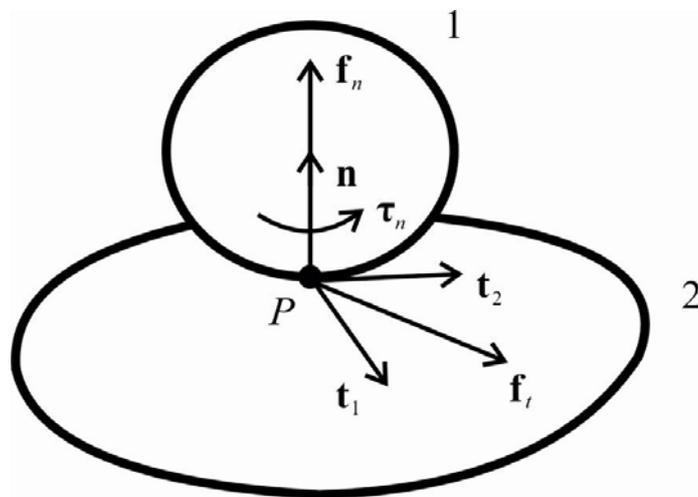


Рис. 1. Контакт двух тел

Известно [4], что моделирование трения между твердыми телами осуществляется согласно закону Амонтона–Кулона, устанавливающего связь между силой трения скольжения и силой реакции опоры в виде $f_t \leq \mu f_n$, где μ – коэффициент трения скольжения. Из-за деформаций контакт двух тел происходит через некоторую площадку, которая увеличивается при возрастании силы \mathbf{f}_n . Это приводит к тому, что рассматриваемая модель трения дополняется моментом трения верчения. В этом случае используется следующая аппроксимация [1]:

$$f_t^2 + \frac{\tau_n^2}{e_n^2} \leq \mu^2 f_n^2, \quad (1)$$

где e_n – эксцентриситет эллипсоида трения, зависящий от свойств материалов контактирующих объектов.

В настоящей работе моделирование трения между телами осуществляется с применением импульсного подхода. Поэтому, преобразуем неравенство (1), умножив его на Δt^2 . Тогда получим неравенство относительно импульсов:

$$p_t^2 + \frac{L_n^2}{e_n^2} \leq \mu^2 p_n^2, \quad (2)$$

где $p_n = f_n \Delta t$ – импульс реакции опоры; $p_t = f_t \Delta t$ – импульс трения скольжения; $L_n = \tau_n \Delta t$ – момент импульса трения верчения; Δt – шаг моделирования.

Математическая модель (2) описывает трение при деформируемом контакте двух тел. Далее покажем, как эта модель используется в методе последовательных импульсов, предназначенном для моделирования динамики системы твердых тел.

Моделирование трения методом последовательных импульсов. В методе последовательных импульсов [2, 3] взаимодействие между телами описывается в виде ограничений, накладываемых на координаты и скорости тел. Для моделирования трения скольжения и трения верчения между двумя телами формулируются ограничения относительно скоростей тел в следующем виде

$$(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)\mathbf{t}_1 = 0; (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)\mathbf{t}_2 = 0; (\boldsymbol{\omega}_2 - \boldsymbol{\omega}_1)\mathbf{n} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{v}_1 и \mathbf{v}_2 – линейные скорости; $\boldsymbol{\omega}_1$ и $\boldsymbol{\omega}_2$ – угловые скорости.

Ограничения (3) соответствуют случаю бесконечного трения и для их выполнения в рассматриваемом методе вычисляются проекции p_{t1} и p_{t2} импульса трения скольжения \mathbf{p}_t на оси \mathbf{t}_1 и \mathbf{t}_2 , а также импульс трения верчения L_n . Вычисление этих импульсов осуществляется согласно соотношениям, полученным из уравнений Ньютона-Эйлера движения твердого тела [5] и полуневяной схемы Эйлера [6] для их интегрирования.

Для моделирования реального трения между телами требуется, чтобы неравенство (2) было выполнено. Поэтому, в случае нарушения неравенства (2) полученные импульсы p_{t1} , p_{t2} и L_n необходимо скорректировать. Для этого рассмотрим вектор импульсов $\mathbf{p} = p_{t1}\mathbf{t}_1 + p_{t2}\mathbf{t}_2 + \frac{L_n}{e_n}\mathbf{n}$, для которого нарушение неравенства (2) означает, что будет выполнено $\|\mathbf{p}\| > \mu p_n$. Если выбрать импульсы следующим образом

$$p'_{t1} = \frac{\mu p_n}{\|\mathbf{p}\|} p_{t1}; p'_{t2} = \frac{\mu p_n}{\|\mathbf{p}\|} p_{t2}; L'_n = \frac{\mu p_n e_n}{\|\mathbf{p}\|} p_n, \quad (4)$$

то для новых импульсов p'_{i1} , p'_{i2} и L'_n неравенство (2) будет выполнено так, что $\|\mathbf{p}'\| = \mu p_n$, где $\mathbf{p}' = p'_{i1}\mathbf{t}_1 + p'_{i2}\mathbf{t}_2 + \frac{L'_n}{e_n}\mathbf{n}$. Вычисленные импульсы далее используются для определения новых скоростей тел.

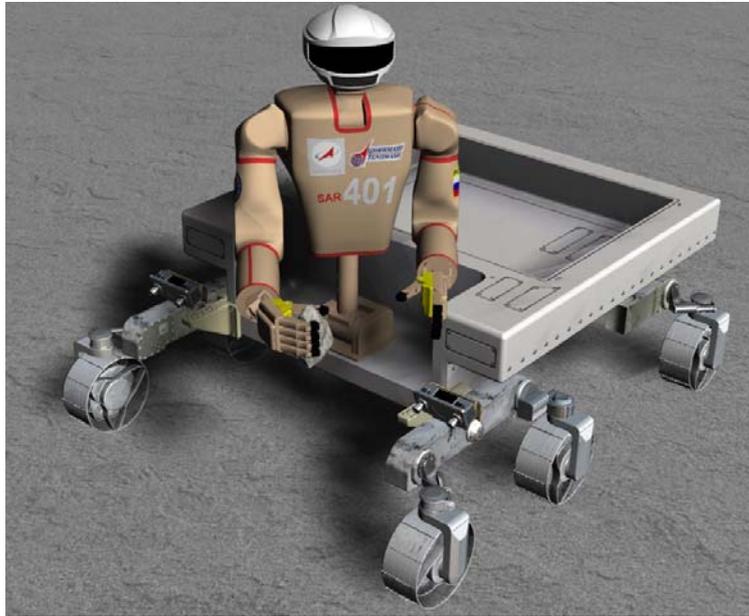


Рис. 2. Перенос камня в тележку роботом-кентавром

Алгоритм метода последовательных импульсов для моделирования трения скольжения и вращения между двумя телами будет следующим:

- 1) вычисляем импульсы p_{i1} , p_{i2} и L_n , которые обеспечивают выполнение ограничений (3), что соответствует бесконечному трению между телами;
- 2) определяем вектор $\mathbf{p} = p_{i1}\mathbf{t}_1 + p_{i2}\mathbf{t}_2 + \frac{L_n}{e_n}\mathbf{n}$ и его норму $\|\mathbf{p}\|$;
- 3) если $\|\mathbf{p}\| > \mu p_n$, то
 - вычисляем импульсы p'_{i1} , p'_{i2} и L'_n по формулам (4),
 - в противном случае $p'_{i1} = p_{i1}$, $p'_{i2} = p_{i2}$ и $L'_n = L_n$;
- 4) по импульсам p'_{i1} , p'_{i2} и L'_n вычисляем новые скорости тел.

Метод последовательных импульсов работает итерационно для всех пар тел, пока для изменения импульса $\Delta\mathbf{p} = \mathbf{p}^{k+1} - \mathbf{p}^k$ между двумя соседними итерациями не будет выполнено $\|\Delta\mathbf{p}\| \leq \varepsilon$, где ε – задаваемая точность, k – номер итерации.

Заключение. Предложенные методы и алгоритмы моделирования трения скольжения и вращения были реализованы в комплексе виртуального окружения, разработанном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Этот программный комплекс в масштабе реального времени осуществляет имитационное моделирование и управление виртуальными роботами. Аprobация предложенных методов и алгоритмов была проведена на примере

моделирования виртуального робота-кентавра, который представляет собой торсовый антропоморфный робот, установленный на колесную платформу. Задача заключалась в том, чтобы на виртуальной модели поверхности Луны захватить рукой робота камень, соизмеримый с размерами ее ладони, и переложить его в тележку. На рисунке 2 показано положение робота-кентавра при переносе поднятого с поверхности камня в тележку. Результаты моделирования показывают, что предлагаемые в работе решения позволяют повысить качество захвата, удержания и манипуляций с объектом, выполняемых с помощью антропоморфного робота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00137.

Список использованных источников

1. **Soft finger model with adaptive contact geometry for grasping and manipulation tasks.** In *World Haptics* / M. Ciocarlie, C. Lackner and P. Allen, 2007.
2. **Михайлюк, М. В.** Моделирование системы связанных тел методом последовательных импульсов / М. В. Михайлюк, Е. В. Страшнов // *Труды НИИСИ РАН.* – 2014. – Т. 4, № 2. – С. 53 – 60.
3. **Трушин, А. М.** Обработка коллизий виртуальных объектов с помощью метода последовательных импульсов / А. М. Трушин // *Труды НИИСИ РАН.* – 2014. – Т. 4, № 2. – С. 95 – 105.
4. **Berger, E. J.** Friction modelling for dynamic system simulation, *Appl. Mech. Rev.*, vol. 55, no. 6, pp. 535-577, Nov. 2002.
5. **Gastnauer, H.** A unified framework for rigid body dynamics, Johannes Kepler University Linz, Tech. Rep., Mar. 2006.
6. **Catto, E.** Iterative dynamics with temporal coherence. In *Game Developer Conference*, pp. 1 – 24, 2005.

УДК 621.9.06-114:531.3

Кроль О. С.¹, Соколов В. И.¹, Цанков П. Г.²

¹Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,
Украина, г. Северодонецк

(Тел. +(38)0957131879, e-mail: krolos.snu.edu@gmail.com),

²Тракийский университет – ФГТ, Болгария, г. Ямбол
(Тел. (+359)896681898, e-mail: ptsankov@abv.bg)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ШПИНДЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Krol O. S.¹, Sokolov V. I.¹, Tsankov P. G.²

¹Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Ukraine, Severodonetsk
(Tel. (+38)0957131879, e-mail: krolos.snu.edu@gmail.com),

²Trakia University – FTT, Bulgaria, Yambol
(Tel. (+359)896681898, e-mail: ptsankov@abv.bg)

MODELING OF VERTICAL SPINDLE HEAD FOR MACHINING CENTER

Аннотация. Рассмотрена конструкция вертикальной шпиндельной головки, входящей в состав модульной технологической оснастки горизонтальных сверлильно-фрезерно-расточных обрабатывающих центров. Выполнено трехмерное моделирование деталей и сборочных единиц шпиндельной головки в среде интегрированной САПР КОМПАС-3D. Отмечено эффективность полнофункциональных специализированных приложений в процессе проектирования основных компонентов конструкции в среде КОМПАС. Дана оценка динамического качества функционирования формообразующего шпиндельного узла, на который действует внешнее нагружение, имеющее вероятностную природу. Использован аппарат спектрального анализа для оценивания динамической характеристик рассматриваемой конструкции.

Ключевые слова: вертикальная шпиндельная головка, обрабатывающий центр, 3D-модель, преобразование Фурье, спектральная плотность.

Abstract. The design of the vertical spindle head, which is part of the modular technological equipment of horizontal drilling-milling and boring machining centers, is considered. Three-dimensional modeling of parts and assembly units of the spindle head was performed in the environment of integrated CAD system KOMPAS-3D. The effectiveness of full-featured specialized applications in the design process of the structures main components in the COMPAS environment is noted. An assessment of the forming spindle assembly dynamic functioning quality on which external loading acts, with probabilistic nature is made. The spectral analysis method is used to evaluate the dynamic characteristics of the structure under consideration.

Keywords: vertical spindle head, machining center, 3D-model, Fourier transform, spectral density.

Введение. В гамме металлорежущего оборудования постоянно увеличивается доля высокоскоростных станков и обрабатывающих центров с расширенными технологическими возможностями. В отличие от специализированных станков конструкция обрабатывающих центров (ОЦ) формируются как набором специфических агрегатов, так и принципом их построения – без «жестких» кинематических связей между их агрегатами [1, 2]. Многие обрабатывающие центры оснащаются дополнительной модульной оснасткой, что связано с принципом концентрации технологических операций на одном рабочем месте. Так, ОЦ сверлильно-фрезерно-расточного типа с горизонтальным шпинделем модели СФ68ВФ4 оснащается дополнительной оснасткой в виде пакета дисковых фрез, долбежной, угловой и вертикальной шпиндельными головками [3, 4]. Сменная вертикальная шпиндельная головка обеспечивает выполнение различных технологических операций обработки пространственных поверхностей сложной формы, фрезерования плоских поверхностей, сверления и рассверливания отверстий с точным координатным расположением и др.

Исследование эффективности функционирования формообразующих узлов металлорежущего оборудования по критериям жесткости и виброустойчивости осуществляется в различных интегрированных САПР, в которых необходимо связать системы 3D-моделирования формообразующих узлов с расчетными модулями оценки конструкций на жесткость и виброустойчивость, оказывающих наибольшее влияние на точность и качество выпускающей продукции. Это особенно важно для современных станочных комплексов, предназначенных для чистовой и прецизионной обработки высокоточных деталей. Доля таких станков в парке машиностроительных предприятий увеличивается, что указывает на актуальность методов оценки виброустойчивости. Такая ситуация с методологических позиций приводит к необходимости параллельного использования средств трехмерного моделирования с параметризацией [5, 6] и методов исследований в области динамического качества формообразующих узлов станка и его инструментального оснащения.

Аналитический обзор работ. В работах [7] анализ динамического качества функционирования осуществлен на базе матричного метода начальных параметров посредством построения частотных формуляров формообразующих узлов (ФУ) – зависимостей выходных характеристик упругих звеньев ФУ от перемещений инструмента и заготовки при переменной входной нагрузке. На базе полученных формуляров становится возможным экспресс-процедура определения пределов устойчивости для упругих звеньев станка и процесса резания. Вместе с тем такое моделирование во временной области процесса формообразования детали не позволяют определить пределы устойчивости конструкций ФУ.

Жесткость основных узлов станка влияет на точность обработки деталей в широком диапазоне размеров. Новый подход, основанный на динамических характеристиках (включая динамическое соответствие), используется в [8]. Авторы предлагают процедуру построения графиков устойчивости лепестков (метод Stability Lobe Diagram, SLD), чтобы оценить стабильность процесса резания на тяжелых токарных станках. Метод SLD [9] используется для анализа виброустойчивости шпинделя обрабатывающего

центра как вращающейся системы с двумя степенями свободы. Результаты моделирования определяют критическую массу дисбаланса значения вращающегося диска в зависимости от скорости шпинделя. Результаты исследований дают возможность оценить, зависимость величины дисбаланса массы свободных колебаний от скорости шпинделя и управлять стабильностью формообразования на обрабатывающих центрах.

Исследованию динамики фрезерного станка посвящена работа [10]. Основное внимание авторы уделили влиянию компоновки с учетом конфигурацией осей, в особенности осей вращения высокоскоростного шпинделя и быстрых подач заготовки. Преимуществом этой работы является создания системы баз данных (БД), включающих разнообразные компоновки и конфигурации осей. В составе таких структурированных БД имеются отдельные разделы, в которых представлены основные свойства формообразующих узлов: шпиндели с фрезами и столы с заготовками. В такой структуре представления информации нашли место, как 3D-модели основных формообразующих узлов станка, аналитические модели, так и массивы экспериментальных данных. Авторы [10] выдвигают идею модульной системы моделирования на базе трехмерных моделей, на основе которой осуществляется прогнозирование стабильности процесса обработки в рамках рабочей зоны фрезерного станка. Вместе с тем, из текста статьи неясно как представлена информация о случайных составляющих входных сигналов (сил резания) в базах данных и каким образом осуществляется аналитическая обработка случайных составляющих воздействий на узлы станка.

Анализ вышеприведенных работ показывает важность задач определения динамических характеристик в пределах всей рабочей зоны станка, представленной в виде твердотельных моделей с учетом экспериментальных данных. В этой связи повышается роль построения таких форм колебаний несущей системы, которые характерны для диапазона критических частот. В свою очередь эффективность аналитического аппарата напрямую связано с выбором представления случайной составляющей в процессе изменения сил резания, как входного сигнала упругой системы станка с использованием методов спектрального анализа и быстрого преобразования Фурье. Для оперативной реализации этих процедур перспективным является использование модуля Signal Processing, входящего в математическую среду MatLab.

Постановка задачи. Разработать комплексную процедуру оценивания динамических характеристик вертикальной шпиндельной головки обрабатывающего центра фрезерно-сверлильно-расточного типа в среде интегрированной САПР КОМПАС и программной среды MatLab.

3D-моделирование вертикальной шпиндельной головки. Основной формообразующий узел – вертикальный шпиндель (перемещается в корпусе с наибольшим ходом равным 90 мм) смонтирован в пиноле, которая получает вращение через коническую пару и кулачковую муфту (рис. 1, 2). Вертикальная шпиндельная головка монтируется с возможностью поворота на 90° в обе стороны (благодаря наличию T-образного паза в переходной плите). Превалирующие операции чистовой обработки, выполняемые на ОЦ СФ68ВФ4 при высоких скоростях резания, предопределяют необходимость проведения расчетных процедур определения виброустойчивости формообразующих узлов в различных средах автоматизированного проектирования.

Для того чтобы провести комплексную процедуру исследования динамики шпиндельного устройства и получить численные оценки необходимо построить расчетные твердотельные модели, используя САПР КОМПАС-3D. Воспользуемся принципом «снизу вверх», т.е. вначале построим 3D-модели (рис. 1) составляющих деталей (корпус, плита и др.) с последующим их объединением в сборочную конструкцию агрегата вертикальной головки (рис. 2). Трехмерное моделирование рассматриваемого агрегата осуществлено в среде интегрированной САПР КОМПАС-3D с использованием специализированных приложений системы, в частности приложение «Валы и механические передачи 3D».

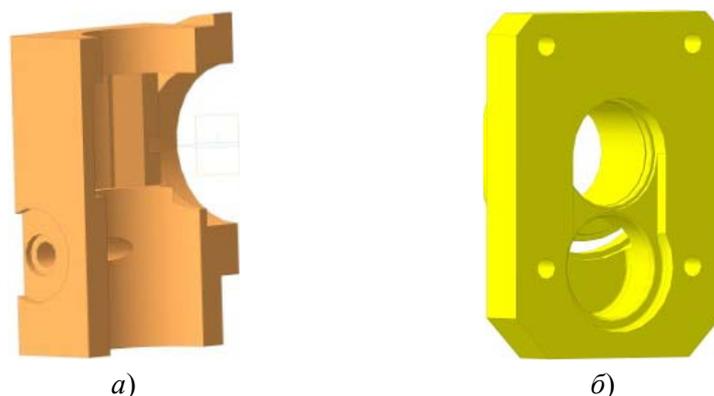


Рис. 1. 3D-модели деталей вертикальной шпиндельной головки:
a – корпус; *б* – плита

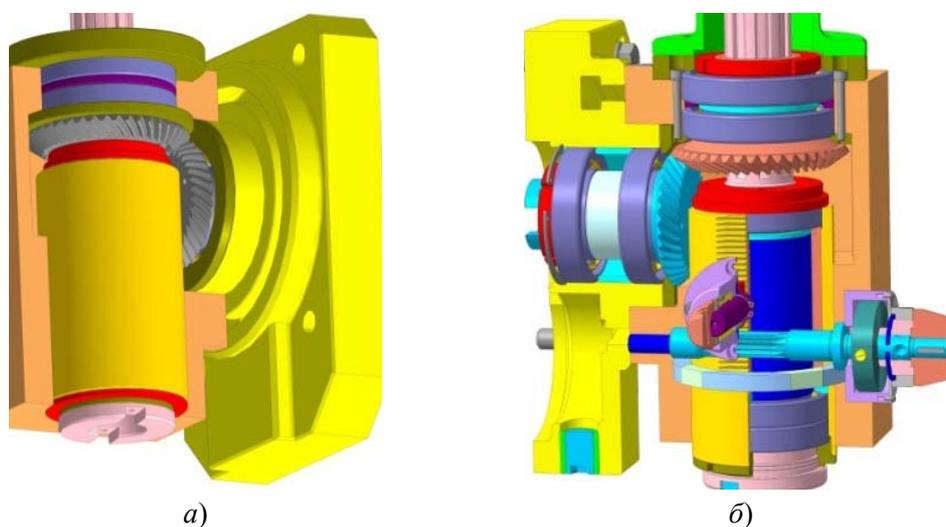


Рис. 2. 3D-модель вертикальной шпиндельной головки:
a – общий вид; *б* – разрез

Для достижения фотореалистического изображения конструкции выполнен рендеринг вертикальной шпиндельной головки в модуле Artisan Rendering, который встроен в САПР КОМПАС. Возможности модуля позволяют получать высококачественное изображение вертикальной головки (рис. 3) за счет комбинирования материала и освещения, фона и сцены на основе трехмерной модели.



Рис. 3. Рендеринг вертикальной шпиндельной головки:
a – общий вид; *б* – разрез

Анализ динамики упругой системы шпинделя ОЦ. Повышение эффективности процессов обработки резанием связано с достижением динамической устойчивости металлорежущих станков. Анализ баланса податливости и форм колебаний основных узлов обрабатывающих центров сверлильно-фрезерно-расточной группы показал, что наиболее интенсивные колебания свойственны основным формообразующим узлам: шпиндель–оправка–инструмент и стол–заготовка. Фрезерование как операция с прерывистым резанием характеризуются большим диапазоном силовых и возмущающих воздействий, возникающим в процессе обработки, включая вероятностную составляющую.

Практически, анализ случайных процессов при механической обработке осуществляется численными методами, в частности с использованием аппарата спектрального анализа и метода быстрого преобразования Фурье [11].

Шпиндельный узел (ШУ) вертикальной шпиндельной головки, оснащенный расточной оправкой, представляется как балка на упругих опорах с вязким демпфированием и разбивается на участки, разграниченные скачкообразным изменением моментов инерции сечений. Конструктивная схема ШУ представлена на рис. 4

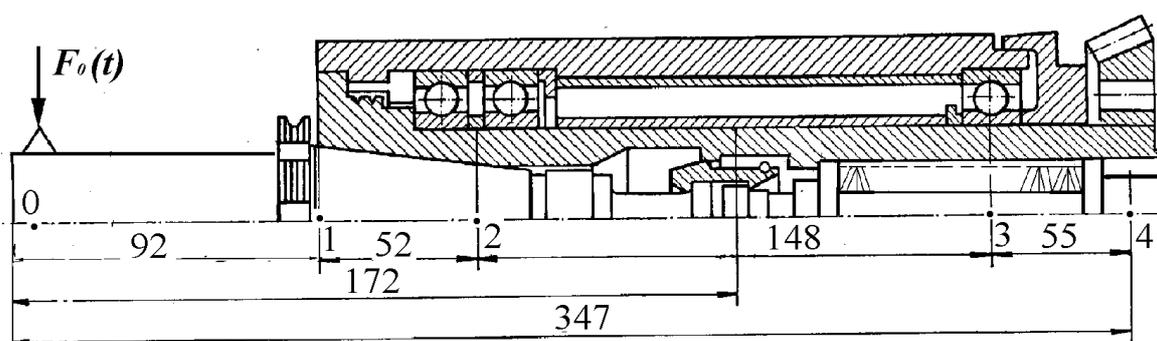


Рис. 4. Конструктивная схема шпиндельного узла

На передний конец шпинделя (в нулевом сечении) действуют возмущения со стороны процесса резания – сила $F_0(t)$. При решении задач динамики технологических систем наиболее распространенным законом изменения силы $F(t)$ как входной характеристики является гармонический закон: $F(t) = F_0 \cdot \sin 2\pi f t$.

Как известно [11], частотная характеристика системы определяется как преобразование Фурье $Y(f)$ реакции системы (в данном случае это перемещение $y(t)$ на импульсное воздействие силы $F(t)$). В терминах амплитудной $|H(f)|$ и фазовой $\varphi(f)$ характеристик с учетом того, что преобразование Фурье импульсного воздействия силы $F(t) = \delta(t)$ равно единице, представляет собой следующее выражение: $H(f) = |H(f)|e^{-j\theta(f)}$. При этом, выходной сигнал – перемещение шпиндельного узла $y(t)$, получается путем умножения амплитуды входного сигнала F_0 (силы резания) на амплитудную характеристику системы и сдвига по фазе $\varphi(f)$ на величину, равную фазовой характеристике

$$|H(f)| = \frac{1/k}{\sqrt{(1 - (f/f_n))^2 + (2lf/f_n)^2}}; \quad \varphi(f) = \text{arctg} \frac{2lf/f_n}{1 - (f/f_n)}. \quad (1)$$

В выражении (1) введены обозначения

$$l = \frac{h}{2\sqrt{km}}; \quad f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где l – безразмерная величина, характеризующая затухание колебаний; f_n – собственная частота незатухающих колебаний (в Гц).

Отметим, что размерность $|H(f)|$ совпадает с размерностью податливости, мм/Н.

Рассматриваемый шпиндельный узел вертикальной головки [12] (рис. 2, табл. 1) имеет следующие параметры основного уравнения динамики упругого звена: {приведенная масса $m = 25$ Н; коэффициент демпфирования $h = 13,96$ Н·с/мм; жесткость $K = 38\,900$ Н/мм}. Такой конструктивный вариант характеризуется такими численными значениями коэффициента l и первой собственной частоты f_n : $\{l = 0,02; f_n = 19,86$ Гц}. Важно отметить, что амплитудная характеристика $|H(f)|$ при $l \leq 1/\sqrt{2}$ имеет максимум на частоте несколько меньшей собственной частоты f_n . Резонансная частота f_r полученная в результате минимизации знаменателя выражения $|H(f)|$ (1) принимает значение: $f_r = 19,84$ Гц.

Для случая гармонического входного воздействия $x^*(t)$ выраженного в единицах смещения $x^*(t) = F(t)/k$, односторонняя спектральная плотность G_{xx} и односторонняя спектральная плотность выходного сигнала G_{yy} , как действительная четная функция от f определяется из следующих зависимостей:

$$G_{xx} = \frac{F_0^2}{k^2 \cdot 2} \delta(f - f_0);$$

$$G_{yy} = |H(f)|^2 \cdot G_{xx} = \frac{F_0^2 \delta(f - f_0)}{2[1 - (f/f_n)^2]^2 + \left(2l \frac{f}{f_n}\right)^2} = \frac{F_0^2}{2[1 - (f/f_n)^2]^2 + \left(2l \frac{f}{f_n}\right)^2} \Bigg|_{f=f_0} \times$$

$$\times \delta(f - f_0) = 8.12 \cdot 10^4 \cdot \delta(f - f_0),$$

где $\delta(f - f_0)$ – дельта функция, локализованная в $f = f_0$; $|H(f)|$ – амплитудная характеристика упругого звена шпинделя, мм/Н; f_0 – циклическая частота, Гц; f_n – собственная частота незатухающих колебаний, Гц; l – коэффициент затухания.

Соответствующие ковариационные функции $R_{xx}(\tau)$ и $R_{yy}(\tau)$ – четные функции от τ (временного сдвига) представляют собой:

$$R_{xx}(\tau) = \frac{F_0^2}{k^2 \cdot 2} \delta(f - f_0);$$

$$R_{yy}(\tau) = \frac{F_0^2 \pi f_n e^{-2\pi f_n l |\tau|}}{2 \cdot 4l} \cdot \cos\left(2\pi f_n \sqrt{1-l^2} |\tau|\right) + \frac{l}{\sqrt{1-l^2}} \cdot \sin\left(2\pi f_n \sqrt{1-l^2} |\tau|\right) \Bigg|_{f_n=f_0}.$$

Графики функций $x^*(t)$ и $R_{yy}(\tau)$, плотности вероятности входного сигнала $p(x)$ и функции распределения $P(x)$ представлены на рис. 5.

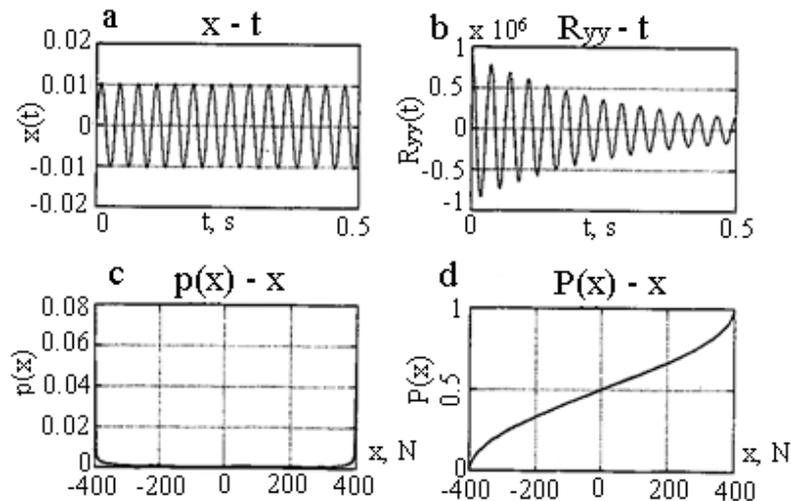


Рис. 5. Частотные характеристики упругой системы «шпиндель–консоль»:
 а – входное воздействие; б – ковариационная функция; в – плотность вероятности;
 г – функция распределения

Заключение. Предложена комплексная процедура исследования динамики функционирования вертикальной шпиндельной головки с использованием специализированного приложения «Валы и механические передачи 3D» и аппарата спектрального анализа. Разработаны твердотельные модели конструкции шпиндельной головки в системе КОМПАС-3D и осуществлен рендеринг в модуле Artisan Rendering. Дана оценка

частотных характеристик упругой системы шпиндель-оправка-инструмент, включая односторонние спектральные плотности, ковариационные функции входного и выходного сигналов упругой системы, найдена резонансная частота колебаний в диапазоне низких частот, которая не совпадает с первой собственной частотой. Это дает возможность при назначении режимов резания исключить такие скорости резания шпинделя и близлежащий диапазон скоростей, попадающий в зону резонансных колебаний.

Список использованных источников

1. **Металлорежущие** станки : в 2 т. / Т. М. Абрамова, В. В. Бушуев, Л. Я. Гиловой и др. ; под ред. В. В. Бушуева. – М. : Машиностроение, 2012. – Т. 1. – 608 с.
2. **Krol, O.** 3D-Modeling of Machine Tools for Designers : monograph / O. Krol, V. Sokolov. – Sofia : Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 140 p. doi: https://doi.org/10.7546/3d_momtfd.2018
3. **Nemtinov, V.** Automation of the early stages of plating lines design MATEC Web of Conferences. – 2017. – 129. – 01009 / V. Nemtinov, N. Bolshakov, Yu. Nemtinova. – doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712901012>
4. **Krol, O.** Modelling of spindle nodes for machining centers / O. Krol, V. Sokolov // J. Phys. : Conf. Ser. 1084012007. – 2018. – doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1084/1/012007>
5. **Krol, O.** Parametric Modeling of Gear Cutting Tools / O. Krol, V. Sokolov / In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – V. 4. – P. 3 – 11. – doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_1
6. **Krol, O.** 3D-modelling of angular spindle's head for machining centre / O. Krol, V. Sokolov // J. Phys. : Conf. Series 1278012002. – VSPID-2018. – 2019. – doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
7. **Попов, В. И.** Динамика станков / В. И. Попов, Локтев В. И. – К., 1975. – 136 с.
8. **Urbikain, G.** Preventing chatter vibration in heavy-duty turning operations in large horizontal lathes / G. Urbikain, F. Campa, J. Zulaika // J. Sound Vib. 340. –2015. – 317 p. – <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.12.002>
9. **Turkes, E.** Chatter stability analysis approach for stability analysis of rotation machinery vibrations / E. Turkes. – 2017. – V. 3. – P. 1 – 17.
10. **Brecher, C.** Modeling of Position-, Tool- and Workpiece-Dependent Milling Machine Dynamics / C. Brecher, M. Fey, M. Daniels // High Sped Mach. – 2016. – V. 2. – P. 15 – 25. DOI <https://doi.org/10.1515/hsm-2016-0003>
11. **Бендат, Дж.** Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М., 1989. – 540 с.
12. **Кроль, О. С.** Моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра / О. С. Кроль, Е. И. Бурлаков // Вісник національного технічного університету ХПІ. Сер. Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків, 2013. – № 11(985). – С. 33 – 39.

УДК 681.5

Дмитриевский Б. С.¹, Башкатова А. В.², Терехова А. А.³

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752) 63-91-87, e-mail: ipu@ahp.tstu.ru),

²(Тел. (4752) 63-91-87, e-mail: ipu@ahp.tstu.ru),

³(Тел. (4752) 63-91-87, e-mail: ipu@ahp.tstu.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Dmitrievsky B. S.¹, Bashkatova A. V.², Terekhova A. A.³

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752) 63-91-87, e-mail: ipu@ahp.tstu.ru),

²(Tel. (4752) 63-91-87, e-mail: ipu@ahp.tstu.ru),

³(Tel. (4752) 63-91-87, e-mail: ipu@ahp.tstu.ru)

MODELING OF AN ELECTRIC ARC OF THE STEEL-MELTING FURNACE

Аннотация. Рассмотрен один из возможных вариантов формирования математической модели электрического контура сталеплавильной печи и электрической дуги переменного тока, как физической основы технологических процессов происходящих в установке. Для составления модели использована схема замещения электрической цепи установки и нелинейное дифференциальное уравнение Касси для проводимости.

Ключевые слова: математическая модель, объект управления, сталеплавильная печь, процесс плавления, электрическая дуга.

Abstract. The article describes one of the possible formation of a mathematical model of the electric circuit and an electric steelmaking furnace arc AC as physical basis processes occurring in the installation. To compile the model used the equivalent circuit of the electrical circuit of the installation and the nonlinear differential equation Cassi for conduction.

Keywords: mathematical model, object of management, the steel-melting furnace, процесс плавления, electric arc.

Введение. Мировое производство стали по данным всемирной ассоциации World Steel Association постоянно растет. Выплавка стали является сложным и трудоемким процессом с использованием различных по принципу действия металлургических агрегатов. В последнее время большой интерес представляют дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Однако эффективное управление электродуговым агрегатом переменного тока в процессе плавки исходного металлургического сырья является довольно сложной задачей.

Для результативного управления процессом выплавки, необходимо использование адекватной математической модели, описывающей процессы, происходящие в ДСП. Модель должна предоставить всю необходимую информацию для анализа входных и выходных величин, возмущающих и управляющих воздействий, исследовать поведение объекта при различных стратегиях управления.

Анализ публикаций по этой проблеме [1 – 6] показал, что за основу можно взять схемы замещения электрической цепи установки соответствующими активными и индуктивными сопротивлениями, а для учета нелинейных свойств дуги дифференциальное уравнение Касси [7 – 11].

Формирование модели. Сопротивление всей системы, исходя из схемы замещения, состоит из сопротивления трансформатора на стороне низкого напряжения (реактивная и активная составляющие), сопротивления короткой сети (состоит из нескольких участков цепи), динамического сопротивления дуги (условно единственный непостоянный параметр цепи). Модель на основе уравнения Касси позволяет учесть нелинейные свойства электрической дуги и исследовать разные периоды ее горения.

В качестве системы моделирования выбираем полнофункциональный профессиональный пакет MATLAB Simulink. Имея общую схему замещения, необходимо получить все необходимые численные значения параметров электрического контура объекта, а именно активное и реактивное сопротивления участков цепи. Не имея возможности произвести необходимые замеры на рабочем оборудовании, прибегнем к проектному расчету согласно заранее известным параметрам системы (рабочие паспортные данных выбранного объекта).

Результатом проведенной работы по подбору решений по формированию базовой структуры модели и расчету актуальных значений является схема ДСП в пакете MATLAB Simulink (рис. 1).

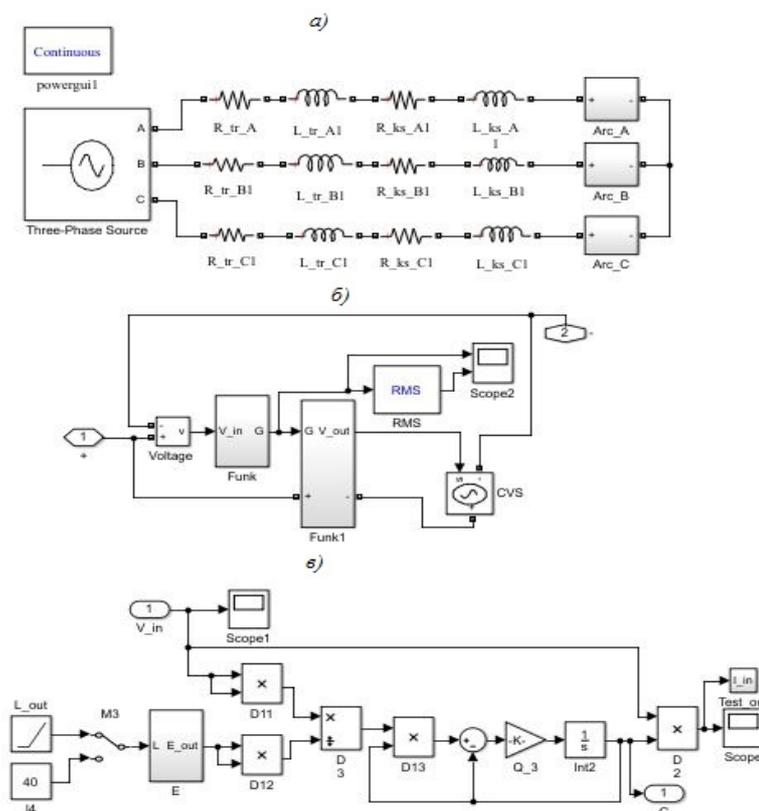


Рис. 1. Структурная схема дуговой печи в пакете MATLAB Simulink
 а – общая схема модели ДСП; б – схема блока «Arc_x»; в – схема блока «Funk»

Модель, представленная на рис. 1, а), включает в себя источник переменного напряжения, активные сопротивления и индуктивности трансформатора на вторичной стороне и короткой сети, модель электрической дуги переменного тока. Схемы на рис. 1, б, в) отражают внутреннее содержание блоков общей схемы печи.

Результаты моделирования. На рисунке 2 представлены осциллограммы тока и напряжения, используемые для построения динамических вольтамперных характеристик (ВАХ) для разных значений постоянной времени проводимости дуги и длин дуг.

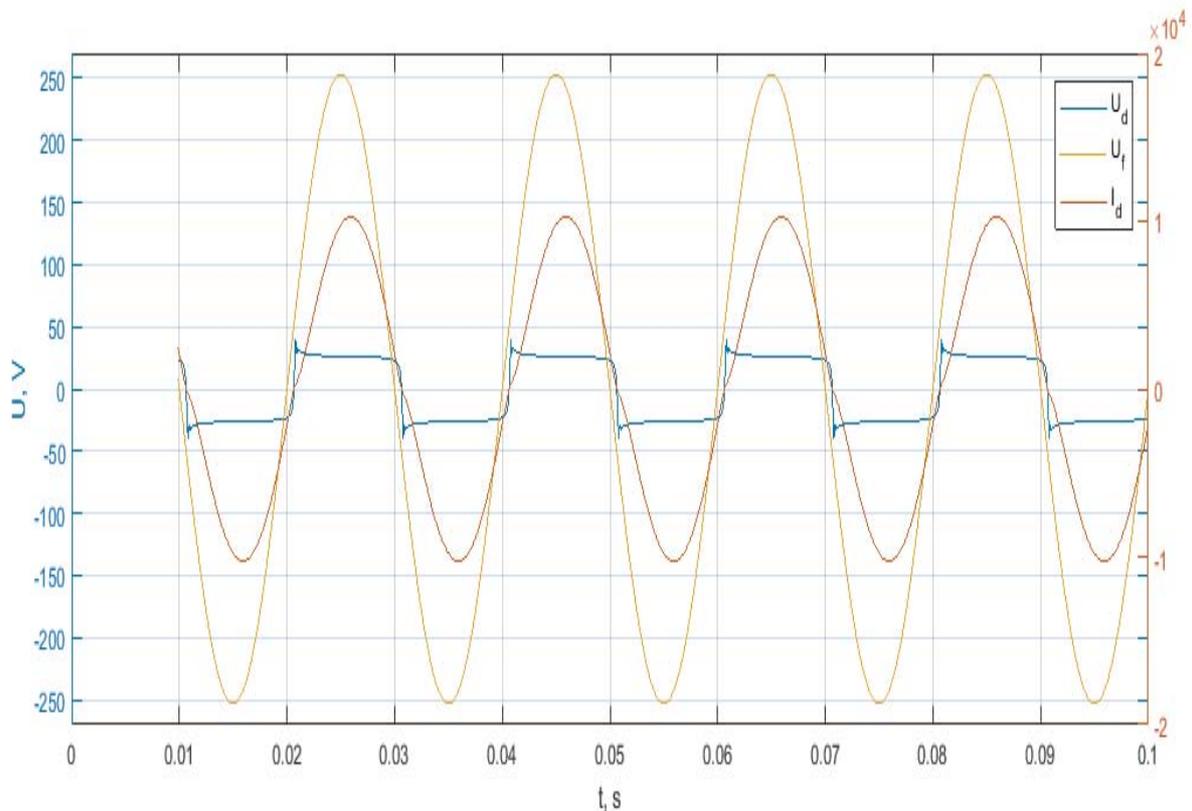


Рис. 2. Осциллограммы напряжения дуги, тока дуги, напряжения

Для получения аналитических зависимостей статических характеристик воспользуемся следующей формулой, мм:

$$I_{д} = \frac{1}{\beta} \left(\sqrt{U_{\phi}^2 - (Ix)^2} - Ir - \alpha \right),$$

где U_{ϕ} – напряжение фазы, В; I – сила тока (среднеквадратичная величина), А; x, r – суммарные реактивное и активное сопротивления системы, Ом; β, α – коэффициенты.

Блок расчета в пакете MATLAB Simulink представлен на рис. 3, а графики зависимостей на рис. 4.

Выводы. Полученные результаты позволили произвести анализ объекта управления и получить электрические характеристики необходимые для дальнейшего построения и моделирования системы управления дуговой сталеплавильной печью.

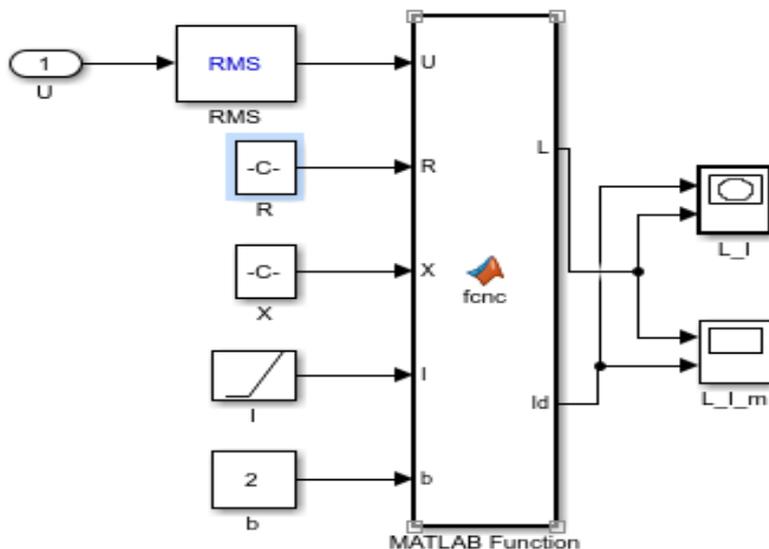


Рис. 3. Блок расчета статических характеристик дуговой печи в пакете MATLAB Simulink

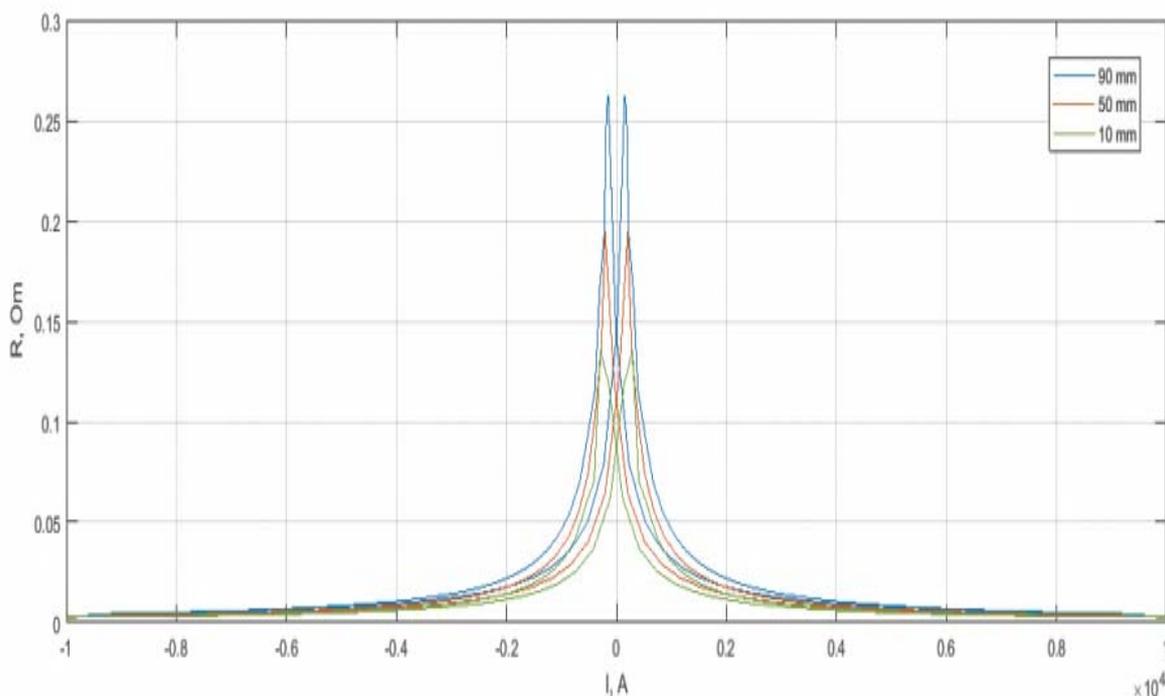


Рис. 4. Зависимость динамического сопротивления дуги от тока для разных значений длины дуги

Список использованных источников

1. **Короткие** сети и электрические параметры дуговых электропечей : справочник / под ред. Я. Б. Данцаса. – М. : Металлургия, 1987. – 320 с.
2. **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – 12 изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2014. – 701 с.

3. **Кацевич, Л. С.** Расчет и конструирование электрических печей / Л. С. Кацевич. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 440 с.
4. **Дуговые** электропечи : учебное пособие для вузов по направлению «Электроэнергетика и электротехника» / А. И. Алиферов и др. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 204 с.
5. **Колчеганов, Р. В.** Модель дуговой сталеплавильной печи в MatLab / Р. В. Колчеганов, А. В. Купова, Н. Е. Дерюжкова // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 50–51.
6. **Пентегов, И. В.** Математическая модель столба динамической электрической дуги / И. В. Пентегов // Автоматическая сварка. – 1976. – № 6. – С. 8 – 12.
7. **Gelada, J.** Electrical analysis of the steel melting arc furnace / J. Gelada // Iron and Steel Engineer. – 1993. – V. 70. – № 5. – P. 35 – 39.
8. **Электрические** промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева : учебник для вузов / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин и др. ; под ред. А. Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с.
9. **Чередниченко, В. С.** Плазменные электротехнологические установки : учебник для вузов / В. С. Чередниченко, А. С. Аньшаков, М. Г. Кузьмин ; под ред. В. С. Чередниченко. – 3 изд., испр. и доп. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
10. **Егоров, А. В.** Электроплавильные печи черной металлургии : учебник для вузов / А. В. Егоров. – М. : Металлургия, 1985. – 280 с.
11. **Cassie, A. M.** A new Theory of Arc Rupture and Circuit Severity / A. M. Cassie // CIGRE. – 1939. – № 102. – P. 1 – 14.

УДК 66.081.2

**Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Прохоренко Н. А.,
Шибитова Н. В., Меренцов Н. А.**

Волгоградский технический университет, Россия, г. Волгоград
(Тел. 89177234615, e-mail: natasha292009@yandex.ru)

**АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОЧИХ ЛИНИЙ ДЛЯ ГАЗОВОЙ
И ЖИДКОЙ ФАЗ С УЧЕТОМ ОДНОВРЕМЕННОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ
В НАСАДОЧНОМ АБСОРБЕРЕ И РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЕ**

**Golovanchikov A. B., Zalipaev O. A., Prokhorenko N. A.,
Sabitova N. V., Merentsov N. A.**

VolgogradState Technical University, Russia, Volgograd
(Tel. 8917723461, e-mail: natasha29200@yandex.ru)

**ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF WORKING LINES FOR GAS AND
LIQUID PHASES TAKING INTO ACCOUNT SIMULTANEOUS LONGITUDINAL
DIFFUSION IN THE PACKED ABSORBER AND DISTILLATION COLUMN**

Аннотация. Проводится анализ дифференциальных уравнений материального баланса с массопередачей с учетом продольной диффузии по обеим фазам в насадочном абсорбере и ректификационной колонне. Предлагается по известным алгоритмам расчета абсорбционных процессов рассчитать рабочие линии отдельно для двух случаев: 1) сплошная фаза движется в режиме с продольной диффузией, а дисперсная в режиме идеального вытеснения; 2) сплошная фаза движется в режиме идеального вытеснения, а дисперсная в режиме с продольной диффузией, и затем, суммируя ординаты получаемых рабочих линий, получать ее общие значения и по ним и равновесной линии по типовой методике рассчитывать высоту и диаметр колонны.

Ключевые слова: продольная диффузия, идеальное вытеснение, насадочный абсорбер, ректификационная колонна, рабочая линия, материальный баланс, массопередача.

Abstract. The analysis of differential equations of material balance with mass transfer taking into account longitudinal diffusion on both phases in a packed absorber and a distillation column is carried out. It is proposed according to the known algorithms for the calculation of absorption processes to calculate the working lines separately for two cases: 1) solid phase moves in the mode with longitudinal diffusion and dispersion in the ideal displacement mode; 2) continuous phase moves in the ideal displacement mode and dispersion mode with longitudinal diffusion, and then by summing the ordinates of the resulting working lines, to its overall significance to him and the equilibrium line on a standard methodology to calculate the height and diameter of the column.

Keywords: longitudinal diffusion, perfect displacement, packing absorber, distillation column, working line, material balance, mass transfer.

Методы расчета массообменных процессов (абсорбции, ректификации, экстракции) в насадочных колоннах с учетом продольной диффузии, когда одна из фаз, сплошная или дисперсная, движется в режиме идеального вытеснения, а вторая – с продольной диффузией, известны и используются при проектировании массообменных насадочных колонн [1 – 3].

Сложность возникает в случае, когда движение обеих фаз (сплошной и дисперсной) описывают однопараметрической диффузионной моделью с различными режимами, числами Пекле: для сплошной Pe_c и дисперсной фаз Pe_d . При этом структура потока дисперсной фазы обычно ближе к идеальному вытеснению, поэтому:

$$Pe_d > Pe_c.$$

Графическая интерполяция материальных потоков представлена на рис. 1.

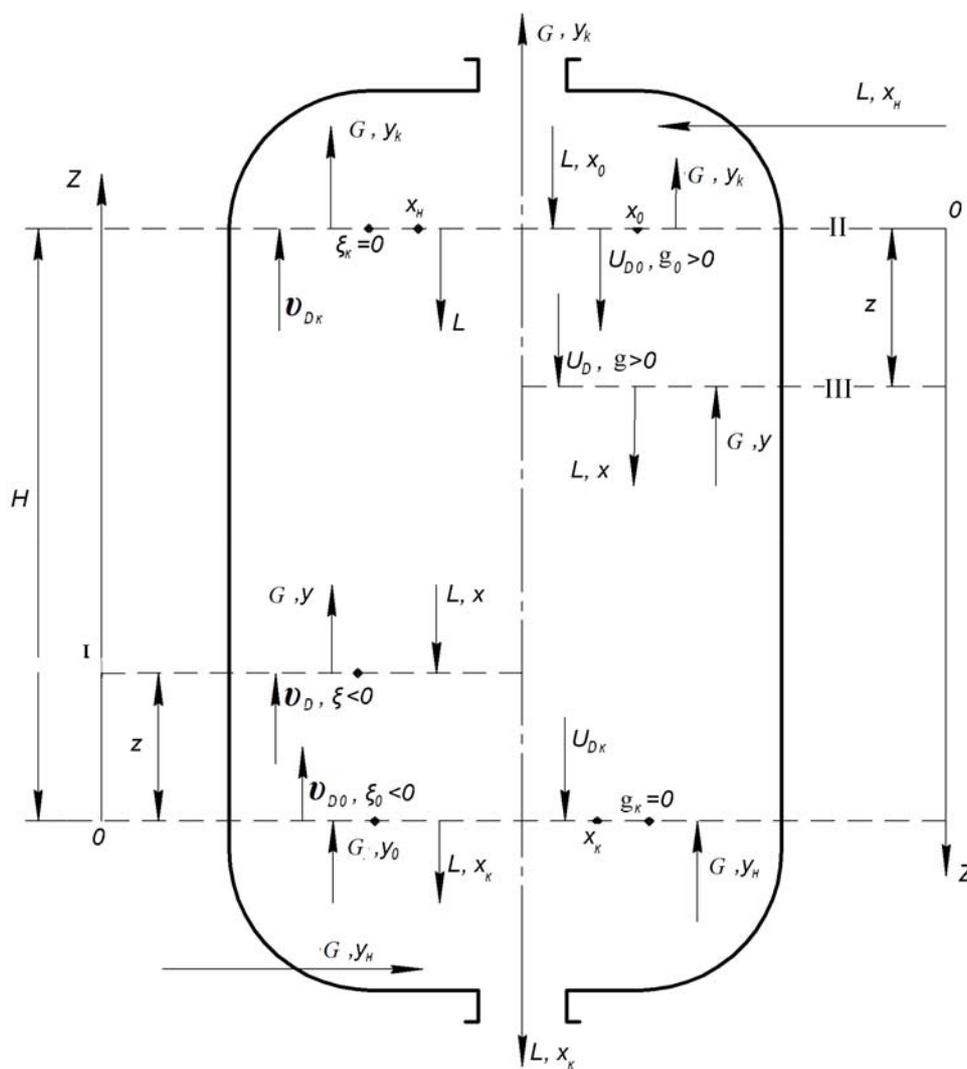


Рис. 1. Схема абсорбционного процесса:
 слева – с диффузионной структурой потока по газовой фазе
 и идеальным вытеснением по жидкой фазе;
 справа – с идеальным вытеснением по газовой фазе
 и диффузионной структурой потока по жидкой фазе

Уравнение рабочей линии по газовой фазе для процесса абсорбции с учетом продольной диффузии записывается в виде [3 – 6] (левая часть рис. 1):

$$y = y_H + \frac{L}{G}(x - x_K) + \frac{1}{Pe_y} \frac{dy}{dh}, \quad (1)$$

с граничными условиями Данквертса [7]

$$\begin{cases} h = 0, & y_H = y_0 - \frac{1}{Pe_y} \xi_0; \\ h = 1, & \xi = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где y , y_H , y_0 , y_K – текущая, начальная, входная и конечные концентрации извлекаемого компонента в газе (с учетом скачка концентрации на входе абсорбента в аппарат); x , x_H , x_K – текущая, начальная и конечная концентрации извлекаемого компонента в абсорбенте; G , L – расходы инертной части газа и абсорбента; ξ , ξ_0 , ξ_K – градиенты

концентраций извлекаемого компонента в газе по безразмерной высоте: $h = \frac{Z}{H}$ в про-

извольном сечении (текущее значение: $\xi = \frac{dy}{dh}$, и на входе и выходе из аппарата соот-

ветственно); g , g_0 , g_K – градиенты концентраций извлекаемого компонента в жидкости; u_D , u_{D0} , u_{DK} – скорости массопереноса по модифицированному первому закону Фика с учетом продольной диффузии по газу; U_D , U_{D0} , U_{DK} – скорости массопереноса по модифицированному первому закону Фика с учетом продольной диффузии по жидкости; D_y и Pe_y – коэффициент продольной диффузии и число Пекле продольной диффузии по газу; D_x и Pe_x – коэффициент продольной диффузии и число Пекле продольной диффузии по жидкости.

Уравнение рабочей линии, когда газ движется в режиме идеального вытеснения, а абсорбент с учетом продольно диффузии имеет вид [3 – 5] (правая часть рис. 1):

$$y = y_K + \frac{L}{G}(x - x_H) + \frac{L}{GPe_x} g, \quad (3)$$

с граничными условиями Данквертса:

$$\begin{cases} h = 0, & g_K = 0; \\ h = 1, & x_H = x_0 - \frac{1}{Pe_x} g_0. \end{cases} \quad (4)$$

На рисунке 2 представлены графики равновесной линии 1, рабочей линии 2 для типового алгоритма расчета, когда жидкая фаза (абсорбент) и газовая фаза по структуре потока соответствуют режиму идеального вытеснения; графики рабочей линии 3 для режима продольной диффузии по газовой фазе и идеального вытеснения по жидкой фазе, рабочей линии 4 для режима идеального вытеснения по газовой фазе и продольной диффузии по жидкой фазе; рабочей линии 5 для режима продольной диффузии по обеим фазам.

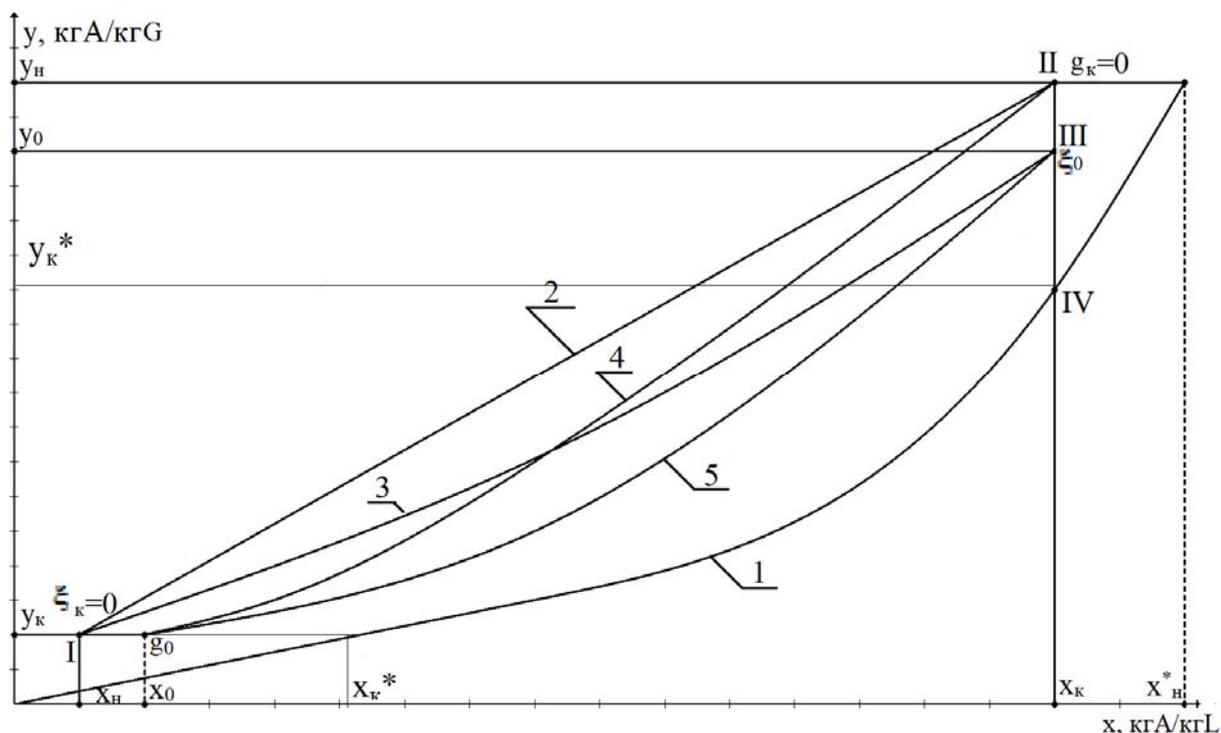


Рис. 2. Равновесная (1) и рабочие линии процесса абсорбции

Уравнение рабочей линии 5 имеет вид:

$$y = y_n + \frac{L}{G}(x - x_k) + \frac{1}{Pe_y} \xi - \frac{L}{G} \frac{1}{Pe_x} g, \quad (5)$$

с граничными условиями Данквертса:

$$\begin{cases} h = 0, & y_n = y_0 - \frac{1}{Pe_y} \xi_0, & g_k = 0; \\ h = 1, & \xi_k = 0, & x_n = x_0 - \frac{1}{Pe_x} g_0. \end{cases} \quad (6)$$

Из графиков (рис. 2) видно, что продольная диффузия по обеим фазам: во-первых, уменьшает концентрации извлекаемого вещества в газе на входе с y_0 до y_n и увеличивает эту концентрацию на входе в жидкость с x_0 до x_n , что уменьшает движущую силу на входе. Во-вторых, вогнутость обеих рабочих линий 3 и 4 по высоте абсорбента еще больше уменьшает движущую силу. Приближая рабочую линию к равновесной.

Наглядно видно, что число теоретических тарелок при этом увеличивается с 2,7 до 4,6, т.е. в 1,7 раза, что можно объяснить снижением КПД тарелки из-за продольной диффузии:

$$\eta = 2,7/4,6 = 0,587. \quad (7)$$

Это приводит к необходимости увеличения высоты насадки в колонне на 70% по сравнению с типовым расчетом, когда обе фазы движутся в режиме идеального вытеснения.

Аналогичные результаты можно получить расчетами через число единиц переноса по формуле:

$$\text{ЧЕП} = \frac{\Delta y}{y - y^*}.$$

Сейчас необходимость увеличения высоты насадки объясняется в основном малым временем контакта фаз в объеме насадки, эквивалентным теоретической тарелке, когда переход не достигается и строится так называемая кинетическая кривая левее и выше равновесной линии, а рабочая линия остается прежней. Одновременный учет продольной диффузии по газовой и жидкой фазам, приводит к еще большему уменьшению локальных движущих сил в процессе абсорбции, по сравнению с учетом продольной диффузии только по одной фазе (жидкой – абсорбенту или газовой). При расчетах это приводит к увеличению высоты насадочной колонны. Кроме того, скачок концентрации на входе газовой фазы может привести к ее значению y_0 , меньшему равновесной концентрации (точка III на графике становится ниже точки IV), что потребует увеличения расхода абсорбента и диаметра колонны, чтобы точку III сдвинуть влево.

Увеличение концентрации на входе абсорбента с x_n до x_0 может привести к ее значению большему x_k , т.е. пересечению рабочей линией 5 равновесной линии I. Это потребует либо уменьшения концентрации x_n , т.е. более глубокой очистки абсорбента при десорбции в колонне, либо повышения давления, чтобы приблизить равновесную линию к оси абсцисс.

Аналогичные результаты получены для ректификационной колонны [6 – 9].

Все вышеназванное показывает, что уход от идеального вытеснения, как по жидкой, так и по газовой фазам, приводит:

- к увеличению расхода абсорбента, флегмы;
- к увеличению высоты и диаметра абсорбера и ректификационной колонны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90002.

Список использованных источников

1. **Касаткин, А. Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 12-е изд., стер.– М. : Химия, 2013. – 754 с.
2. **Рамм, В. М.** Абсорбция газов / В. М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1976. – 656 с.
3. **Адсорбция** в колонне непрерывного действия с диффузионной структурой потока по газовой фазе / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2016. – № 2. – С. 23 – 31.
4. **Влияние** диффузионной структуры потока по жидкой фазе на ионообмен в противоточном аппарате непрерывного действия / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, Н. А. Меренцов, А. А. Коберник // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 3. – С. 57 – 63.

5. **Моделирование** ионообмена в аппарате непрерывного действия с диффузионной структурой потока по жидкости / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, А. А. Коберник, Н. А. Меренцов // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 10. – С. 15 – 23.

6. **Левеншпиль, О.** Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1969.

7. **Голованчиков, А. Б.** Modeling of the Process in a Packed Fractionating Column with Diffusive Liquid Phase Flow Pattern / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – V. 55, Is. 3–4. – P. 186 – 196.

8. **Голованчиков, А. Б.** Расчет насадочной ректификационной колонны с учетом продольного перемешивания по жидкой фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, В. Н. Карев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2017. – № 1(18). – С. 35 – 41.

9. **Голованчиков, А. Б.** Алгоритм расчета насадочной ректификационной колонны с учетом продольного перемешивания по жидкой фазе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, В. Н. Карев // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – Волгоград, 2016. – № 3(182). – С. 14 – 17.

УДК 004.946

Мальцев А. В., Финагин Л. А.

ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

**РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕАЛИСТИЧНОГО РЕНДЕРИНГА
НА GPU ВИРТУАЛЬНЫХ СЦЕН С ИМИТАЦИЕЙ
НЕПРЯМОГО ЗАТЕНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

Maltsev A. V., Finagin L. A.

Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

**DISTRIBUTED METHODS FOR REALISTIC RENDERING
OF VIRTUAL SCENES ON GPU WITH SIMULATION
OF INDIRECT OBJECT SHADING**

Аннотация. Важными составляющими иллюминации объектов в окружающей нас среде являются непрямоое освещение и затенение их поверхностей. Данные явления связаны с рассеянием световых лучей при столкновении с объектами. Физически корректное моделирование распространения рассеянных лучей выполняется сложными алгоритмами глобального освещения и фотореалистичного рендеринга, которые не обеспечивают поддержку расчетов в масштабе реального времени. В данной работе предлагаются распределенные методы и подходы для приближенной имитации затенения объектов трехмерной виртуальной среды в условиях рассеянного освещения. В основе созданных решений лежит технология ambient occlusion, а также широкое использование возможностей параллельных вычислений на многоядерных графических процессорах. Последнее обеспечивает рендеринг сложных виртуальных сцен с моделированием таких затенений в реальном времени.

Ключевые слова: виртуальная сцена, рендеринг, реальное время, рассеянный свет, затенение, параллельные вычисления, шейдер.

Abstract. Indirect lighting and shading of surfaces are important components of object illumination in our environment. These phenomena are associated with scattering of light rays in a collision with objects. Physically correct simulation of diffused ray propagation is performed by means of complex algorithms for global lighting and photorealistic rendering, which not provide real-time calculations. The paper presents distributed methods and approaches for approximate imitation of object shading in three-dimensional virtual environment under diffused lighting conditions. Created solutions are based on ambient occlusion technology and widely use opportunities of parallel computing on multicore graphics processors. The last provides real-time rendering of complex scenes with such shading simulation.

Keywords: virtual scene, rendering, real time, diffused light, shading, parallel computing, shader.

Введение. Одной из важнейших задач, стоящих при визуализации трехмерных виртуальных сцен в системах виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексах, является расчет освещенности поверхностей объектов. Ее решение осложнено необходимостью обеспечивать баланс между точностью вычислений и затрачиваемым на них временем. Высокореалистичная визуализация с использованием методов глобального освещения (фотонные карты [1], Radiosity [2] и т.д.) на сегодняшний день не позволяет соблюсти требуемые в тренажерах временные рамки синтеза кадра, которые в случае моновизуализации составляют не более 40 мс, а для стерео – не более 20 мс. Однако использование современных многоядерных графических процессоров (GPU) для реализации распределенных вычислений освещенности объектов виртуальной среды обеспечивает возможность создавать и развивать методы приближенной имитации глобального освещения, соблюдающие баланс точности и времени.

Важным компонентом иллюминации в реальном мире является не прямое освещение – результат рассеяния световых лучей при падении на объекты, имеющие отличную от среды распространения плотность и структуру. Например, в пасмурную погоду прямые лучи от Солнца не проходят через густую облачность, а рассеиваются в ней. При этом объекты, находящиеся на открытых пространствах, выглядят равномерно освещенными, без контрастных теней. Но небольшие затенения на их поверхностях все же присутствуют. Это помогает человеку различать форму и объем предметов. Если не рассматривать упомянутые глобальные модели расчета, рассеянный свет в виртуальной среде, как правило, моделируется с использованием ambient light – фонового освещения. Его интенсивность добавляется к вычисленной интенсивности освещения каждой точки каждого объекта. При этом в процессе такого добавления не учитывается геометрия объектов и сцены. Играет роль лишь материал поверхностей. Поэтому при отсутствии прямого освещения источниками света изображения виртуальных объектов и их частей могут сливаться, а ощущение объема теряться.

В данной работе представлены методы и подходы для распределенной имитации на GPU затенения объектов виртуальной среды в условиях рассеянной освещенности, основанные на технологии screen space ambient occlusion [3]. Оригинальность разработанных решений состоит в учете текстур нормалей и прозрачности при синтезе карты затенения рассеянной освещенности трехмерной виртуальной сцены и в применении этой карты в процессе прямого, а не отложенного расчета освещения. Использование параллельных вычислений на графическом процессоре обеспечивает рендеринг сложных сцен в реальном времени.

Технология реализации затенений при имитации рассеянной освещенности. Предлагаемый подход для моделирования рассеянной освещенности виртуальной среды с затенениями поверхностей объектов включает в себя четыре этапа. На первом этапе для каждого пиксела изображения, видимого виртуальной камерой, выполняется расчет координат соответствующей ему точки P (ближайшей по лучу из места расположения камеры и проходящему через пиксел) некоторого объекта сцены, а также нормали N к поверхности данного объекта в этой точке. Вычисления производятся параллельно: данные для каждого пиксела формируются на графическом процессоре

в отдельном потоке. Полученный набор координат точек и нормалей сохраняется в виде специальной структуры данных.

На втором этапе выполняется распределенное построение карты затенения рассеянной освещенности для полученных точек P . Значение коэффициента затенения в каждой такой точке определяется на основе координат и нормалей группы соседних с ней точек на изображении от виртуальной камеры, что обеспечивает учет геометрии объектов и сцены. Точки, принадлежащие более вогнутым участкам геометрии, будут иметь больший коэффициент затенения. Карта сохраняется в виде текстуры, размер которой совпадает с размером буфера кадра, а пиксели соответствуют тем же точкам P , что и пиксели изображения с камеры.

Третий этап включает фильтрацию карты затенений на GPU с целью минимизации шумов и артефактов, возникших в процессе ее построения. Причина их появления будет описана ниже. Заключительным шагом является применение коэффициентов затенения при расчете рассеянной освещенности в точках P в ходе рендеринга результирующего изображения. Далее рассмотрим каждый из этапов более подробно.

Формирование данных о видимой виртуальной камерой части сцены. Запись и хранение описанного выше набора координат точек P и соответствующих им нормалей N предлагается осуществлять с помощью структуры данных типа G-буфер (геометрический буфер), которая применяется в технологии *deferred shading* [4] – рендеринге с отложенным освещением и затенением. Такая структура представляет собой совокупность нескольких целей рендеринга в виде перезаписываемых текстур, имеющих одинаковый размер, но независимые настройки формата хранения данных и количества цветовых каналов. В нашем случае G-буфер включает две трехканальные текстуры G_{pos} (для точек) и G_{norm} (для нормалей), где каждый канал содержит 16-битное вещественное число, соответствующее одной из координат x , y или z . Обе текстуры ассоциируются с одним и тем же буфером FBO [5], устанавливаемым в качестве текущего внекадрового буфера вывода.

Координаты точек и нормалей рассчитываются в видовой системе координат (СК) VCS путем распределенного рендеринга трехмерной сцены из текущей виртуальной камеры с применением специальных вершинного и фрагментного шейдеров. Вершинный шейдер обеспечивает расчет для всех вершин полигонов каждого объекта, попадающего в кадр, их координат в видовом пространстве и соответствующих нормалей в СК VCS. Далее работает растеризатор графического конвейера, который интерполирует полученные в вершинах данные по фрагментам полигонов, соответствующим пикселям изображения кадра, и отправляет их во фрагментный шейдер. При отсутствии в составе материала объекта карт прозрачности и нормалей, принятые шейдером координаты точек и нормалей для фрагментов передаются на его выход и посредством FBO-буфера записываются в текстуры G_{pos} и G_{norm} соответственно. Координаты перезаписываемых текселов совпадают с координатами фрагментов в области вывода изображения сцены. Благодаря тесту глубины, выполняющемуся для фрагмента после стадии фрагментного шейдера, в текстурах сохраняются данные для точек объектов наиболее близких к наблюдателю, т.е. как раз требуемые точки P и нормали N .

Двумерная текстура прозрачности в оттенках серого определяет степень полупрозрачности участков объекта от абсолютно прозрачного (черный цвет, значение 0.0) до полностью непрозрачного (белый цвет, значение 1.0). Зачастую, такие текстуры используются для формирования вырезов и отсечений на объектах, которые нецелесообразно делать с помощью полигональной геометрии (например, возникает много дополнительных полигонов). При наличии в материале объекта карты прозрачности фрагментный шейдер считывает из нее и анализирует значение прозрачности для обрабатываемого фрагмента. Если оно меньше некоторого малого числа ε (т.е. имеет место полная прозрачность), обработка фрагмента прекращается с помощью вызова команды *discard*.

В случае моделирования микрорельефа поверхности объекта материал также содержит текстуру нормалей, каждый пиксел которой кодирует координаты вектора нормали в некоторой точке этой поверхности, представленные в касательном базисе. Обработывая каждый фрагмент, шейдер считывает из текстуры нормаль N_{ts} в соответствующей ему точке объекта и переводит ее в СК VCS, используя матрицу M_{ts} перехода от локальной СК OCS объекта к касательному базису и модельно-видовую матрицу M_{mv} :

$$N = \left(M_{mv}^{-1} \right)^T \cdot M_{ts}^{-1} \cdot N_{ts} .$$

Рассчитанный вектор N поступает на выход фрагментного шейдера вместо входящей интерполированной нормали и сохраняется в текстуре G_{norm} .

Синтез карты затенения. В идеале, чтобы вычислить коэффициент затенения рассеянной освещенности в любой из найденных на первом этапе точек P , необходимо выделить вокруг P некоторую трехмерную область и посчитать отношение объема той ее части, которая проникает внутрь каких-либо объектов сцены, к общему объему области. Форма и размер таких областей должны быть идентичны для всех рассматриваемых точек. Однако в таком виде решение задачи требует больших вычислительных затрат и не укладывается в рамки реального времени. Поэтому будем использовать приближенный метод, основанный на выборке из m принадлежащих области точек A_t , $t \in [0, m - 1]$. Саму область определим, как полусферу с радиусом R и центром в P , ориентированную вдоль нормали N к поверхности в точке P . Тогда величина коэффициента затенения в P будет равна отношению количества точек A_t , находящихся внутри объектов виртуальной среды, к общему числу m этих точек.

Реализация выборок выполняется с помощью заранее сформированных m случайных векторов смещения S_t , $t \in [0, m - 1]$ каждой точки P из G_{pos} в пределах ее полусферы. Отметим, что изменение положения и ориентации виртуальной камеры, а также видимых ей объектов сцены влечет обновление данных в текстурах G_{pos} и G_{norm} . Поэтому любая из нормалей N , записанных в G_{norm} , и соответствующая ей полусфера могут иметь бесконечное число ориентаций в рассматриваемой видовой СК VCS. Следовательно, задать в этой системе векторы S_t до момента формирования текстуры G_{norm} для конкретного кадра не представляется возможным. Решение проблемы заключается

в синтезе на этапе загрузки программы векторов S_t в касательном базисе TBN, в котором нормаль имеет постоянные координаты $(0, 0, 1)$, и дальнейшем несложном пересчете их в видовую систему при вычислении коэффициентов затенения. Используя функцию f_{rnd} генерации псевдослучайного числа в отрезке $[0.0, 1.0]$, получим координаты векторов смещений в СК TBN:

$$S_t = (2 \cdot f_{rnd} - 1, 2 \cdot f_{rnd} - 1, f_{rnd}).$$

Карта затенения строится с применением распределенных вычислений на GPU посредством фрагментного или вычислительного шейдера. При этом коэффициент затенения k для каждой точки P , сохраненной в некотором пикселе текстуры G_{pos} , рассчитывается отдельным вычислительным потоком и записывается в идентичный по расположению пиксел результирующей текстуры T_{ao} , размер которой совпадает с размером G_{pos} и G_{norm} . Суть подхода состоит в следующем. Вначале выполняется трансформация векторов смещений для P из касательного TBN-базиса в СК VCS с помощью матрицы преобразования, столбцы которой образованы тангенциальным вектором T , бинормалью B и нормалью N (координаты всех векторов представлены в видовом пространстве):

$$S_{t, vcs} = \begin{pmatrix} T_x & B_x & N_x \\ T_y & B_y & N_y \\ T_z & B_z & N_z \end{pmatrix} \cdot S_t.$$

Нормаль N для точки P считывается из текстуры G_{norm} . Тангенциальный вектор T вычисляется с использованием процесса Грама–Шмидта:

$$T' = V_r - N(V_r / N), \quad T = T' / |T'|,$$

где $V_r = (2 \cdot f_{rnd} - 1, 2 \cdot f_{rnd} - 1, 0)$ – вектор, обеспечивающий поворот полусферы ядра выборки с m векторами $S_{t, vcs}$ вокруг нормали N на случайный угол. Выполнение такого поворота позволяет уменьшить общее число m требуемых выборок для достижения приемлемого результата моделирования затенений, а это, в свою очередь, сокращает время расчетов. Бинормаль B равна векторному произведению $N \times T$.

Далее производится вычисление точек выборки с учетом заданного радиуса R полусферы и перевод их координат в экранное пространство:

$$A_t = P + R \cdot S_{t, vcs}, \quad A_{t, ndcs} = M_{pr} \cdot A_t, \quad A_{t, scr} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{A_{t, ndcs}}{A_{t, ndcs, w}},$$

где $t \in [0, m - 1]$, M_{pr} – проекционная матрица текущей виртуальной камеры, $A_{t, ndcs}$ и $A_{t, scr}$ – координаты точки A_t в СК нормализованного объема видимости и в экранном пространстве. По координатам x и y точек $A_{t, scr}$ из текстуры G_{pos} считываются соответствующие им точки P_t поверхностей каких-либо объектов сцены. Так как каждая пара

точек A_t и P_t проецируется в один и тот же пиксел кадра, то обе точки такой пары лежат на одном луче, выходящем из точки O расположения виртуального наблюдателя (камеры). При выполнении неравенства $|OA_t| > |OP_t|$ считается, что точка выборки A_t из рассматриваемой пары находится внутри некоторого объекта, иначе – вне объектов. В видовом пространстве вместо указанных длин можно сравнивать z -координаты точек. Взгляд виртуальной камеры направлен по оси – Z системы VCS, поэтому расстояние от точки O будет больше для той точки, чья z -координата меньше. Тогда коэффициент затенения k в точке P равен

$$k = \frac{1}{m} \sum_{t=0}^{m-1} F(A_{t,z}, P_{t,z}), \quad F(z_1, z_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } z_2 < z_1 + \delta \\ 1, & \text{если } z_2 \geq z_1 + \delta \end{cases}$$

где δ – регулируемый параметр, позволяющий устранять возможный эффект муара на результирующем изображении виртуального пространства.

Устранение шумов и артефактов. К сожалению, поворот полусферы ядра выборки на случайный угол, выполняемый на этапе построения карты затенения и снижающий количество требуемых выборок, вносит в эту карту достаточно много сильных шумов, которые в дальнейшем переходят на результирующее изображение виртуальной среды. Для устранения таких шумов на третьем этапе производится сглаживание текстуры T_{ao} посредством размывающего фильтра. Процесс фильтрации выполняется в отдельном проходе с использованием распределенных вычислений на многоядерном GPU. Каждый вычислительный поток обрабатывает свой пиксел (i, j) текстуры, считывая значение коэффициента затенения $k_{i,j}$ в нем самом, а также в окружающих соседних пикселах, образующих область $M \times M$, где $M \geq 3$. Итоговое значение коэффициента в рассматриваемом пикселе определяется по формуле

$$k_{i,j}^{res} = \frac{1}{M^2} \sum_{m,n=-r}^r k_{i+m,j+n}, \quad r = \left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor,$$

где квадратные скобки обозначают целую часть числа.

Рендеринг сцены с моделированием рассеянной освещенности. Для имитации непрямого затенения объектов при рендеринге трехмерной виртуальной среды во фрагментном шейдере расчета освещенности применяется ранее отфильтрованная карта затенения. Данный шейдер автоматически получает на вход оконные координаты x, y каждого обрабатываемого фрагмента (доступны через стандартную переменную `gl_FragCoord` языка GLSL) и использует их в качестве текстурных координат для выборки коэффициента затенения рассеянной освещенности в соответствующем рассматриваемому фрагменту пикселе из карты затенения. Считанный коэффициент умножается на значение интенсивности фонового освещения. Полученное произведение используется шейдером в формуле расчета освещения фрагмента.

На рисунке 1 показаны результаты визуализации трехмерной виртуальной сцены с моделью гусеничного робота, освещаемой рассеянным светом, до и после применения описанных подходов.

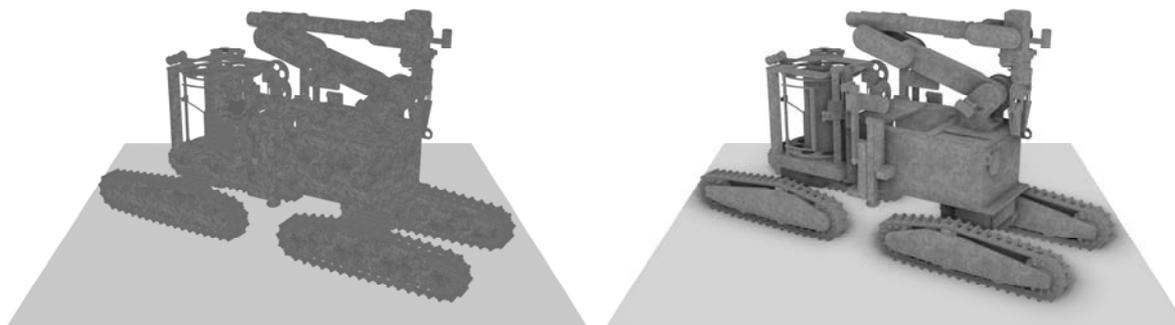


Рис. 1. Виртуальная сцена с рассеянным освещением до (слева) и после (справа) применения затенения

Заключение. В результате проведенных исследований были разработаны методы и алгоритмы для распределенного рендеринга виртуальной среды с имитацией затенения поверхностей ее объектов в условиях рассеянного света. На основе предложенных решений были реализованы программные модули для систем визуализации трехмерных виртуальных сцен в масштабе реального времени. Их разработка проводилась с использованием возможностей распределенных вычислений на многоядерных графических процессорах, библиотеки OpenGL и шейдерного языка GLSL. Созданные программные компоненты прошли успешную апробацию в составе системы визуализации «GLView», разработанной в ФГУ ФНИЦ НИИСИ РАН, и продемонстрировали возможность применения предлагаемых решений при реализации систем виртуального окружения и имитационно-тренажерных комплексов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00950.

Список использованных источников

1. **McGuire, M.** Hardware-accelerated global illumination by image space photon mapping / M. McGuire, D. Luebke // ACM SIGGRAPH/EuroGraphics High Performance Graphics. – 2009. – P. 77 – 89.
2. **Optimizing** Monte Carlo radiosity on graphics hardware / J. R. Sanjurjo, M. Amor, M. Boo, R. Doallo, J. Casares // The Journal of Supercomputing. – 2011. – V. 58(2). – P. 177 – 185.
3. **Mittring, M.** Finding Next Gen – CryEngine 2 / M. Mittring // SIGGRAPH Advanced Real-Time Rendering in 3D Graphics and Games course. – 2007. – URL : http://developer.amd.com/wordpress/media/2012/10/Chapter8-Mittring-Finding_NextGen_Cry_Engine2.pdf (дата обращения: 12.09.2019).
4. **Deferred** shading. – URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Deferred_shading (дата обращения: 12.09.2019).
5. **Framebuffer** object. – URL : https://en.wikipedia.org/wiki/Framebuffer_object (дата обращения: 12.09.2019).

УДК 004.946

Мальцев А. В., Тимохин П. Ю.

ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

**МЕТОДЫ ИМИТАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ВИДЕОСИГНАЛА
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КАМЕР В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА GPU**

Maltsev A. V., Timokhin P. Yu.

Scientific Research Institute for System Analysis, Russia, Moscow
(Tel. (499)1247951, e-mail: avmaltcev@mail.ru)

**METHODS FOR SIMULATION OF VIDEO SIGNAL DISTORTIONS
WHEN MODELING CAMERAS IN VIRTUAL ENVIRONMENT
WITH USING PARALLEL COMPUTING ON GPU**

Аннотация. Модели средств видеонаблюдения являются важными объектами трехмерной виртуальной среды, широко используемой сейчас в имитационно-тренажерах комплексах и системах виртуального окружения. Основу таких моделей составляют виртуальные камеры. В данной работе предлагаются методы и подходы для распределенного рендеринга изображений, получаемых с виртуальных камер, с имитацией ряда помех и искажений, которые могут наблюдаться при использовании реальных аппаратных средств наблюдения. Предлагаемые подходы позволяют моделировать видеопоток в случае нештатных ситуаций, слабого уровня сигнала, а также поломки оборудования или каналов передачи информации. Визуализация виртуальной среды в масштабе реального времени, необходимом для правильной работы имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения, обеспечивается применением возможностей параллельных вычислений на современных графических картах.

Ключевые слова: визуализация, виртуальная камера, искажение сигнала, графический процессор, шейдеры, реальное время.

Abstract. Models of video surveillance devices are important objects of three-dimensional virtual environment which is widely used now in simulation-training complexes and virtual environment systems. A base of such models is virtual cameras. The paper presents methods and approaches for distributed rendering of images received from virtual cameras with imitation a number of noises and distortions that can be observed when real surveillance devices are used. Proposed approaches allow to simulating video stream in the case of emergency situations, low signal, and also breakdown of equipment or communication channels. Rendering of virtual environment in real time mode needed for correct functioning of simulation-training complexes and virtual environment systems is provided by using ability of parallel computing on modern graphics cards.

Keywords: visualization, virtual camera, signal distortion, graphics processor, shaders, real time.

Введение. В настоящее время технологии виртуальной реальности внедрены во многие сферы деятельности человека, начиная от компьютерных игр и киноиндустрии до крупных промышленных производств. В том числе широкое распространение они получили в имитационно-тренажерных комплексах и системах виртуального окружения, где позволяют обучать операторов управлению сложными техническими средствами. При этом реальные объекты заменяются трехмерными виртуальными моделями, а окружающее их пространство – виртуальной сценой. Одним из ключевых элементов в таких сценах является виртуальная камера, которая лежит в основе моделей различных средств наблюдения. Получаемый с помощью нее видеопоток позволяет оператору обозревать виртуальную среду, принимать решения по управлению теми или иными объектами, а также видеть результат своих действий. Для привития обучаемому оператору правильных навыков необходимо обеспечить наибольшее сходство визуализируемых изображений виртуального пространства с теми изображениями, которые он мог бы видеть с помощью аналогичного средства наблюдения в реальной жизни.

Как известно, изображения с настоящих камер могут быть подвержены искажениям, шумам, засветкам и т.д., вероятность возникновения которых увеличивается в нестандартных ситуациях, при поломках оборудования, плохом качестве каналов связи и по множеству других причин. Чтобы повысить эффективность обучения с помощью тренажерных комплексов, построенных на базе технологий виртуальной реальности, и расширить спектр обрабатываемых навыков, необходимо разрабатывать методы и алгоритмы моделирования тех искажений изображений с виртуальных камер, какие являются характерными для реальных видеосистем. Исследования в этом направлении ведутся различными научными коллективами. Например, в публикациях [1, 2] описываются методы имитации искажений, вносимых оптическими свойствами линз в устройствах наблюдения. Авторы статьи [3] предлагают решения для моделирования эффектов виньетирования и хроматической аберрации. В данной работе предлагаются новые распределенные методы и алгоритмы рендеринга в реальном времени изображений от виртуальных средств наблюдения с имитацией таких явлений, как срыв синхронизации, белый шум, засветка и пересветка изображения. Далее рассмотрим их подробнее.

Моделирование срыва синхронизации. Проблема срыва синхронизации может быть вызвана неисправностью электронных систем монитора, несовпадением частоты устройства вывода с частотой смены кадров в поступающем потоке, неправильным разрешением, поломками в кабелях передачи сигнала и т.п. При этом на устройстве отображения наблюдаются горизонтальные искажения и вертикальные скачки изображения. Распределенное моделирование срыва синхронизации на изображениях, получаемых с виртуальных камер, в данной работе выполняется в масштабе реального времени на многоядерном графическом процессоре (GPU) с помощью дополнительной обработки этих изображений сразу после их рендеринга. Суть подхода состоит в следующем. В памяти графической карты выделяется новая текстура T , в которую копируется текущий буфер кадра. Далее создается сетка кадра путем его равномерного разбиения на m горизонтальных полос (рис. 1, слева). Длины сторон кадра по каждой

из осей системы координат (СК), размещенной в его левом нижнем углу и совпадающей с СК текстуры T , принимаются за 1. Тогда длина и высота каждой полосы равны соответственно

$$dx = 1, \quad dy = 1/m.$$

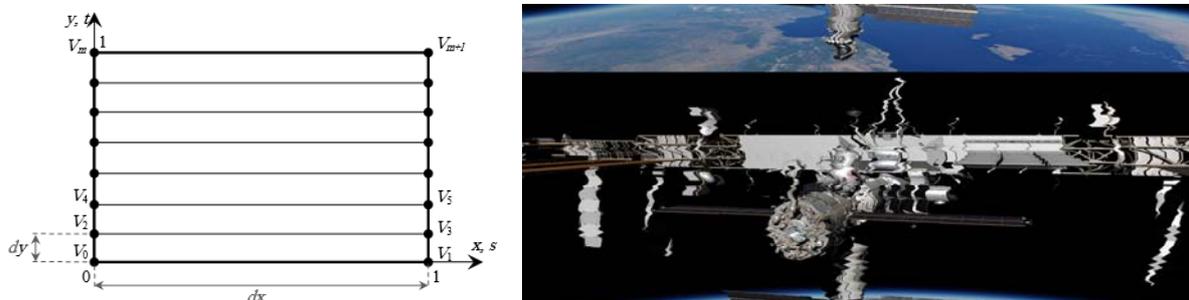


Рис. 1. Применение сетки кадра (слева) при моделировании срыва синхронизации (справа)

В углах полос размещаются вершины $V_i, i \in [0, 2m + 1]$, нумерация которых выполняется слева направо, начиная с левого нижнего угла кадра. При этом координаты i -й вершины определяются, как

$$(x_i, y_i) = (i \bmod 2, [i / 2] \cdot dy),$$

где $a \bmod b$ – остаток от деления числа a на число b , квадратные скобки – целая часть числа. Имитация эффектов горизонтальных искажений и вертикальных скачков изображений виртуальной среды достигается путем пересчета текстурных координат s_i и t_i для вершин сетки по формулам:

$$(s_i, t_i) = (x_i + k_h, y_i + k_v),$$

где k_h, k_v – горизонтальное и вертикальное отклонения точки кадра от ее положения при корректном отображении видеосигнала на устройстве вывода. Так как вертикальная рассинхронизация характеризуется скачками изображения, а его искажения в вертикальном направлении отсутствуют, то значение k_v является одинаковым для всех вершин. Сила эффекта скачков кадра задается параметром $v_{\text{desync}} \in [0.0, 0.5]$. Тогда, используя функцию f_{rnd} генерации псевдослучайного числа в отрезке $[0.0, 1.0]$,

$$k_v = (f_{\text{rnd}} - 0.5) \cdot v_{\text{desync}}.$$

Значение k_h отвечает за искажения изображения в горизонтальном направлении при моделировании горизонтальной рассинхронизации и для каждой пары вершин V_{2k} и $V_{2k+1}, k \in [0, m]$, рассчитываются по формуле:

$$k_h = (f_{\text{rnd}} - 0.5) \cdot h_{\text{desync}},$$

где $h_{\text{desync}} \in [0.0, 0.5]$ – коэффициент, влияющий на степень искажений.

Вычисленные координаты и текстурные координаты вершин V_i передаются в графический конвейер видеокарты. Перед визуализацией устанавливается ортографиче-

ская проекция, отключается смешивание, тесты глубины и прозрачности, а также подключается текстура T , в которой хранится текущий кадр изображения виртуальной среды. Ввиду того, что текстурные координаты находятся в интервале $[-0.25, 1.25]$, режим наложения текстуры T устанавливается в `GL_REPEAT`. На основе переданных в видеокарту данных производится рендеринг четырехугольного стрипа (цепочки связанных четырехугольников) с наложением на него искаженной текстуры T . Результат работы предлагаемого подхода показан на рисунке 1 (справа).

Имитация белого шума. При использовании аналоговой аппаратуры на устройстве отображения видеосигнала может возникать явление, называемое белым шумом. К возможным причинам его появления относятся низкое качество приемной антенны (в случае эфирной трансляции), неточная настройка принимаемой частоты, недостаточное экранирование линий передачи, а также разного рода дефекты контактов и кабелей. Чтобы смоделировать такие помехи в видеопотоке от виртуальных устройств наблюдения, в данном исследовании применяется распределенная постобработка на GPU синтезируемых изображений виртуальной среды с использованием шумовой текстуры T_n (рис. 2, слева).

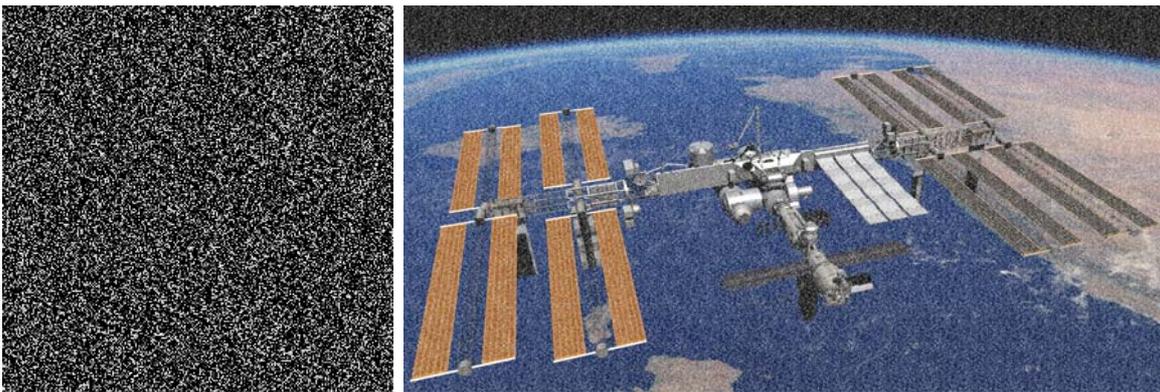


Рис. 2. Использование шумовой текстуры (слева) для имитации белого шума (справа)

После формирования в буфере графической карты очередного кадра с изображением трехмерной сцены поверх него визуализируется белый прямоугольник R с вершинами $V_i, i \in [0, 3]$, на который в качестве карты прозрачности накладывается текстура T_n . При этом размер R совпадает с размером кадра, нумерация вершин выполняется против часовой стрелки от левого нижнего угла. Перед рендерингом прямоугольника устанавливается ортографическая проекция, отключается тест глубины, и активируются собственные шейдеры моделирования белого шума. Текстурные координаты s_i и t_i для вершин V_i вычисляются по формулам:

$$(s_0, t_0) = (ds, dt), (s_1, t_1) = (t_x + ds, dt), (s_2, t_2) = (t_x + ds, t_y + dt), (s_3, t_3) = (ds, t_y + dt),$$

$$t_x = W / T_{n, w}, t_y = H / T_{n, h}, ds = f_{\text{rnd}} - 0.5, dt = f_{\text{rnd}} - 0.5,$$

где W, H – ширина и высота кадра; $T_{n, w}, T_{n, h}$ – ширина и высота шумовой текстуры; f_{rnd} – функция генерации псевдослучайного числа в отрезке $[0.0, 1.0]$. Основной процесс

имитации шума выполняется во фрагментном шейдере, который получает цвет C_n каждого пиксела текстуры T_n и рассчитывает на его основе прозрачность для соответствующего фрагмента прямоугольника R . Регулировка плотности и яркости генерируемого шума выполняется шейдером на основе передаваемого в него коэффициента $k_n \in [0.0, 1.0]$. Корректное наложение прямоугольника с шумом на изображение виртуальной среды, находящееся в буфере кадра, обеспечивается установкой режима смешивания, при котором цвет C каждого пиксела буфера вычисляется в виде комбинации его текущего цвета C_d и цвета C_s фрагмента прямоугольника R , соответствующего данному пикселу. Результирующий цвет

$$C = \alpha \cdot C_s + (1 - \alpha) \cdot C_d,$$

где $C_s = (1,1,1)$, $\alpha = k_n \cdot C_n$ – значение прозрачности фрагмента R . Рисунок 2 (справа) демонстрирует пример применения описанного подхода.

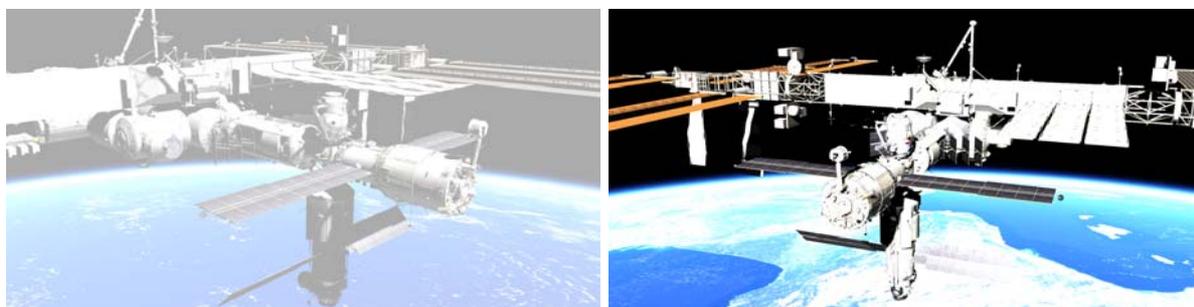


Рис. 3. Моделирование засветки (слева) и пересветки (справа) изображения 3D-сцены

Засветка и пересветка изображения. Засветка и пересветка наблюдаются в том случае, когда электронные системы средства наблюдения не могут компенсировать значительный разброс уровней освещенности визуальной обстановки. Данная ситуация возникает, например, при попадании солнца в кадр объектива. Предлагаемый метод моделирования этих явлений в синтезируемом видеопотоке от виртуальной камеры использует возможности распределенных вычислений на современных графических процессорах посредством механизма шейдеров. Его суть состоит в специальной коррекции изображения, получаемого после рендеринга очередного кадра трехмерной сцены. Для проведения такой коррекции создается текстура T , в которую копируется содержимое текущего буфера кадра. Далее устанавливается ортографическая проекция, отключается смешивание, тесты глубины и прозрачности, а также активируется собственный шейдер обработки изображения. После этого в буфер кадра визуализируется прямоугольник, размер которого совпадает с размером кадра, с наложением на него текстуры T . Чтение данных из текстуры, их корректировка и окрашивание прямоугольника выполняются во фрагменте шейдера. Значение C каждого из цветовых каналов RGB каждого пиксела прямоугольника вычисляется шейдером по формуле:

$$C = (1 + f_1)(f_2 \{a_c\} + 1)C_T + a_o,$$

$$f_1 = (a_c \geq 2), f_2 = (a_c > 1),$$

где C_T – цвет аналогичного канала текстуры T , соответствующего рассматриваемому пикселу, $a_c \in [1.0, 3.0]$ – регулируемый коэффициент пересветки, $a_o \in [0.0, 1.0]$ – регулируемый коэффициент засветки, фигурные скобки обозначают взятие дробной части числа. Коэффициенты a_c и a_o передаются в шейдер в качестве его входных параметров. На рисунке 3 показаны примеры моделирования засветки и пересветки изображений трехмерной виртуальной сцены с использованием описанного метода.

Заключение. В результате проведенных исследований были разработаны методы имитации ряда искажений видеосигнала, синтезируемого для виртуальных моделей средств видеонаблюдения в виртуальной среде, которые могут возникать при применении реальной аппаратуры. На базе предложенных решений были созданы программные модули, использующие возможности распределенных вычислений на современных графических картах и обеспечивающие визуализацию трехмерных виртуальных сцен в масштабе реального времени. Данные модули прошли успешную апробацию в составе системы визуализации, разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, которая подтвердила возможность применения полученных в исследовании научных и практических результатов при разработке имитационно-тренажерных комплексов и систем виртуального окружения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00393.

Список использованных источников

1. **Camera** models and optical systems used in computer graphics: part I, object-based techniques / Brian A. Barsky, Daniel R. Horn, Stanley A. Klein, Jeffrey A. Pang, Meng Yu. // In Proceedings of the 2003 international conference on Computational science and its applications. – 2003. – P. 246 – 255.
2. **Camera** models and optical systems used in computer graphics: part II, object-based techniques / Brian A. Barsky, Daniel R. Horn, Stanley A. Klein, Jeffrey A. Pang, Meng Yu. // In Proceedings of the 2003 international conference on Computational science and its applications. – 2003. – P. 256 – 265.
3. **Kučiš, M.** Simulation of Camera Features / M. Kučiš, P. Zemčík // In Proceedings of the 16th Central European Seminar on Computer Graphics. – 2012. – P. 117-123.

УДК 66.011:681.5

Лабутин А. Н.¹, Загаринская Ю. Н.², Невиницын В. Ю.³, Волкова Г. В.⁴

Ивановский государственный химико-технологический университет,

Россия, г. Иваново

¹(Тел. (4932)327226, e-mail: lan@isuct.ru),

²(Тел. (4932)327226, e-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru),

³(Тел. (4932)327226, e-mail: nevinitsyn@gmail.com),

⁴(Тел. (4932)327226, e-mail: konf_gv@mail.ru)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ НА БАЗЕ РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ

Labutin A. N.¹, Zagarinskaya Yu. N.², Nevinitsyn V. Yu.³, Volkova G. V.⁴

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo

¹(Tel. (4932)327226, e-mail: lan@isuct.ru),

²(Tel. (4932)327226, e-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru),

³(Tel. (4932)327226, e-mail: nevinitsyn@gmail.com),

⁴(Tel. (4932)327226, e-mail: konf_gv@mail.ru)

CONCENTRATION CONTROL SYSTEM OF A CHEMICAL REACTOR ON THE BASIS OF THE STATE CONTROLLER

Аннотация. В работе решена задача синтеза одноканальной системы управления вектором концентраций в жидкофазном химическом реакторе с использованием регулятора состояния. Параметры настройки регулятора состояния определены с использованием метода модального управления. Для устранения статической ошибки регулирования и обеспечения свойства робастности системы управления в структуру регулятора состояния введена интегральная составляющая.

Ключевые слова: химический реактор, регулятор состояния, модальное управление, интегральная составляющая, нелинейный объект управления, компьютерное моделирование.

Abstract. The paper deals with the synthesis of a single-channel control system of concentration vector in a liquid-phase chemical reactor using a state controller. Settings of the state controller are determined using the modal control method. An integral component was introduced into the structure of the state controller to eliminate the static control error and ensure the robustness of the control system.

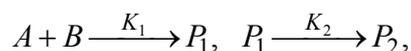
Keywords: CSTR, state controller, modal control, integral part, nonlinear control object, computer simulation.

Введение. Цель функционирования химического реактора – это реализация процесса превращения исходных реагентов в продукты реакции и обеспечение заданного состава реакционной смеси. Показателем ресурсоэффективности является степень пре-

вращения какого-либо исходного реагента или выход целевого продукта. Отсюда главной задачей системы автоматизации и управления объектом является задача стабилизации концентрации целевого компонента на оптимальном уровне в условиях действия возмущений. Трудность и проблема решения задачи структурно-параметрического синтеза системы автоматического управления (САУ) обусловлена многомерностью, многосвязностью и нелинейностью математической модели реактора [1]. До настоящего времени для управления процессом используются линейные САУ. Поскольку при синтезе линейных систем с использованием моделей «вход-выход» не учитывается многомерность и взаимное влияние координат состояния, в таких системах усиливается влияние параметрических и сигнальных возмущений на качество процессов управления. В настоящее время в условиях возрастания требований к качеству и эффективности управления технологическими процессами является целесообразным применение принципа управления по вектору состояния, основанного на использовании безынерционных регуляторов состояния (РС), либо комбинированных РС, включающих гибкие обратные связи по производным координат состояния или интегралам координат состояния [2, 3]. Особое значение для обеспечения робастности системы приобретает метод параметрического синтеза системы. Наиболее часто используется для решения этой задачи метод модального управления [4].

В предлагаемой работе решается задача синтеза одноканальной системы управления вектором концентраций в химическом реакторе с использованием регулятора состояния методом модального управления.

Постановка задачи. Объектом управления является жидкофазный химический реактор емкостного типа, в котором реализуется двухстадийная химическая реакция:



где A, B – исходные реагенты; P_1, P_2 – продукты реакции; K_1, K_2 – константы скоростей стадий.

Принципиальная схема реактора представлена на рис. 1. Исходные реагенты A и B подаются в аппарат отдельными потоками. Режим работы реактора – изотермический. Целевым продуктом является вещество P_1 ; P_2 – побочный продукт.

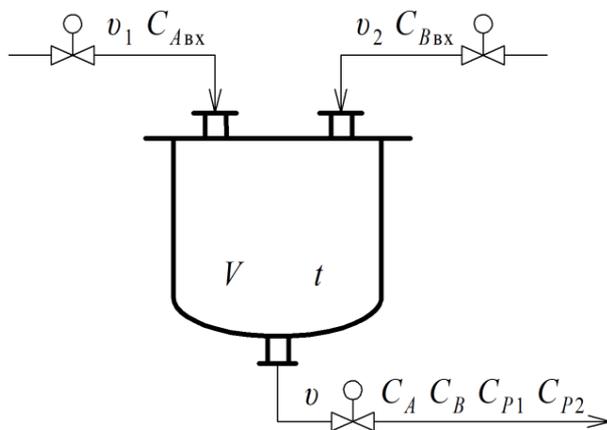


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора

На рисунке 1 обозначено: v_1, v_2 – расходы потоков исходных компонентов; $C_{A_{\text{вх}}}, C_{B_{\text{вх}}}$ – концентрации исходных компонентов; v – расход смеси на выходе из реактора; t – температура смеси в реакторе; C_A, C_B, C_{P1}, C_{P2} – концентрации продуктов реакции; V – объем смеси в реакторе.

Математическая модель динамики объекта при допущении о постоянстве уровня имеет вид:

$$\begin{aligned} V \frac{dC_A}{d\tau} &= v_1 C_{A_{\text{вх}}} - (v_1 + v_2) C_A + V(-K_1 C_A C_B); \\ V \frac{dC_B}{d\tau} &= v_2 C_{B_{\text{вх}}} + V(-K_1 C_A C_B) - (v_1 + v_2) C_B; \\ V \frac{dC_{P1}}{d\tau} &= V(K_1 C_A C_B - K_2 C_{P1}) - (v_1 + v_2) C_{P1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Значения режимно-технологических и конструктивных параметров процесса представлены ниже:

$$V = 500 \text{ л}; t = 68.45 \text{ }^\circ\text{C}; v_1 = 3 \text{ л/мин}; v_2 = 3.5 \text{ л/мин};$$

$$C_{A_{\text{вх}}} = 19.74 \text{ моль/л}; C_{B_{\text{вх}}} = 5 \text{ моль/л}; K_1 = 120\,000 \text{ л/(моль}\cdot\text{мин)};$$

$$K_2 = 12\,000 \text{ л/(моль}\cdot\text{мин)}; C_A = 7.21 \text{ моль/л}; C_B = 0.787 \text{ моль/л}; C_{P1} = 1.843 \text{ моль/л}.$$

Задача управления химическим реактором заключается в стабилизации концентрации целевого продукта на заданном значении $C_{P1} = \overline{C_{P1}}$ в условиях действия возмущений. В качестве управляющего воздействия выступает расход потока реагента $A - v_1$.

Проведено исследование устойчивости положения равновесия (свободного движения) объекта и управляемости в пространстве состояний. С этой целью осуществлена линеаризация математической модели объекта в окрестности положения равновесия. В общем виде линеаризованная в математическая модель запишется следующим образом:

$$\frac{d\bar{x}}{d\tau} = A\bar{x} + Bu; y = F\bar{x}, \quad (2)$$

где $\bar{x} = \Delta\overline{C} = (\Delta C_A \ \Delta C_B \ \Delta C_{P1})^T$ – вектор состояния; $u = \Delta v_1$ – управление; A, B – матрица состояний и управления; y – вектор выходных переменных; F – матрица измерений. Матрицы A, B и F имеют вид:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0.016 & -0.031 & 0 \\ -0.0034 & -0.044 & 0 \\ 0.0034 & 0.031 & -0.013 \end{bmatrix}; \\ B &= \begin{bmatrix} 0.025 \\ -0.00157 \\ -0.0037 \end{bmatrix}; F = [0 \ 0 \ 1]. \end{aligned}$$

Все собственные числа матрицы A (корни характеристического полинома) вещественные и отрицательные, следовательно, объект обладает свойством устойчивости положения равновесия. Для исследования свойства управляемости объекта в пространстве состояний построена и вычислена матрица управляемости:

$$M_u = [B: AB: A^2B] = \begin{bmatrix} 2.5 \cdot 10^{-2} & -3.513 \cdot 10^{-4} & 6.115 \cdot 10^{-6} \\ -1.6 \cdot 10^{-3} & -1.592 \cdot 10^{-5} & 1.895 \cdot 10^{-6} \\ -3.7 \cdot 10^{-3} & 8.443 \cdot 10^{-5} & -2.786 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}.$$

Поскольку ранг матрицы управляемости равен 3, то объект полностью управляем в пространстве состояний [5]. Это позволяет использовать метод модального управления для решения задачи параметрического синтеза РС. Регулятор состояния синтезируется с использованием линеаризованной модели объекта (2), а функционировать будет на реальном нелинейном объекте. Анализ динамических характеристик нелинейного и линеаризованного объекта показывает, что кривые разгона качественно совпадают и расхождение выходных переменных в установившемся состоянии не превышает $\pm 2\%$. Можно ожидать, что РС будет работоспособен на нелинейном объекте.

Структурно-параметрический синтез САУ. Известно, что для объекта, заданного математической моделью вида (2), теория оптимального управления при использовании квадратичного критерия качества дает закон управления в виде безынерционного регулятора состояния, расположенного в цепи обратной связи системы управления [5]:

$$u = -k\bar{x} = -k\Delta\bar{C}, \tag{3}$$

где $k = (k_1 k_2 k_3)$ – вектор-строка настроечных параметров. Численные значения настроек определяются путем решения уравнений Риккати, что является трудоемкой задачей.

Альтернативным подходом к определению настроек регулятора является использование метода модального управления [4]. Так как по структуре алгоритм (3) является пропорциональным регулятором, желательно введение в алгоритм управления интегральной составляющей, снижающей ошибку регулирования в статике. В нашем случае целесообразно ввести интегральную составляющую по концентрации целевого продукта ΔC_{P1} . Управление в этом случае определяется соотношением:

$$u = -(k_1 \Delta C_A + k_2 \Delta C_B + k_3 \Delta C_{P1}) - k' \int_0^{\infty} \Delta C_{P1} d\tau. \tag{4}$$

Структура одноканальной САУ с учетом изложенного представлена на рис. 2.

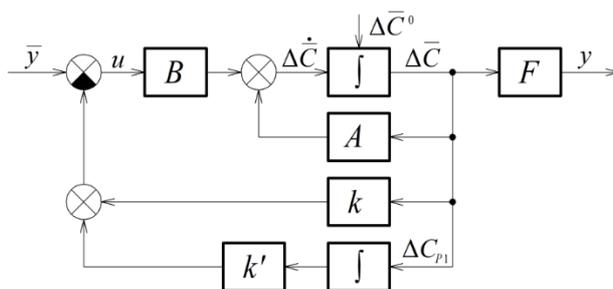


Рис. 2. Структура САУ состоянием химического реактора с учетом интегральной составляющей по концентрации ΔC_{P1}

Параметрический синтез безынерционного регулятора (3) методом модального управления осуществлялся с использованием процедуры перехода от исходного описания объекта (2) к представлению в канонической управляемой форме (КУФ):

$$\frac{d\Delta\hat{C}}{d\tau} = \hat{A}\Delta\hat{C} + \hat{b}u; \quad u = -\hat{k}\Delta\hat{C}, \quad (5)$$

где $\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}$ – сопровождающая матрица характеристического полинома

исходной матрицы A :

$\varphi_A(s) = s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0$, $a_0 = 7.78 \cdot 10^{-6}$, $a_1 = 1.38 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 7.3 \cdot 10^{-2}$; $\hat{b} = (0 \ 0 \ 1)^T$ – вектор управления.

Эталонный характеристический полином с желаемым спектром собственных чисел имеет вид:

$$D(s) = s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0 = s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3.$$

Параметр ω_0 , определяющий время переходного процесса управления (τ_p), определим из соотношения [4]:

$$\omega_0 = \tau_0 / \tau_p,$$

где $\tau_0 = 6$ – безразмерное эталонное время регулирования. При $\tau_p = 325$ мин получим $\omega_0 = 6/325 = 0.0185$.

Элементы вектора \hat{k} определяются соотношениями: $\hat{k}_{i+1} = d_i - a_i$, $i = 0, 1, 2$; $\hat{k}_1 = -2.03 \cdot 10^{-6}$; $\hat{k}_2 = -4.14 \cdot 10^{-4}$; $\hat{k}_3 = 1.9 \cdot 10^{-2}$.

Переход к коэффициентам обратной связи исходной системы (2) осуществляется по уравнению:

$$k = \hat{k}P_u,$$

где $P_u = \hat{M}_u M_u^{-1}$ – матрица преобразования исходной системы (2) к КУФ (5); M_u , \hat{M}_u – матрица управляемости объекта, заданного исходной моделью и моделью в КУФ.

Параметры регулятора состояния исходного объекта согласно примут значения:

$$k_1 = -1.25; \quad k_2 = -15.58; \quad k_3 = 3.29.$$

Таким образом, управляющее воздействие запишется:

$$u = 1.25\Delta C_A + 15.58\Delta C_B - 3.29\Delta C_{P1}$$

Настройки РС с интегральной составляющей определялись по методике, приведенной в [6]. Выражение (4) в явном виде запишется:

$$u = 2.26\Delta C_A + 16.08\Delta C_B + 10.05\Delta C_{P1} + 0.088 \int_0^{\infty} \Delta C_{P1} d\tau$$

Компьютерное моделирование системы управления. Моделирование САУ проводили с использованием исходной нелинейной модели (1). Исследовались свойства САУ подавлять внешние возмущения, отслеживать изменение задания ($\overline{\Delta C_{P1}}$) и способность подавлять параметрические возмущения по константе скорости (ΔK_1). В качестве показателей качества процессов управления использовали время регулирования и величину статической ошибки.

Анализ результатов показывает, что САУ на базе безынерционного РС не является инвариантной к возмущению, так как изменение выходной регулируемой переменной ΔC_{P1} характеризуется наличием недопустимой статической ошибки, в то время как РС с интегральной составляющей успешно компенсирует возмущение $\Delta C_{B_{вх}}$ без статической ошибки. Аналогичная картина наблюдается при исследовании САУ на ковариантность с заданием по $\overline{\Delta C_{P1}}$.

Особое внимание уделено исследованию робастности. На рисунке 3 приведены переходные процессы управления при 30%-ном ступенчатом возмущении по параметру K_1 : $\Delta K_1 = 0.3K_1$.

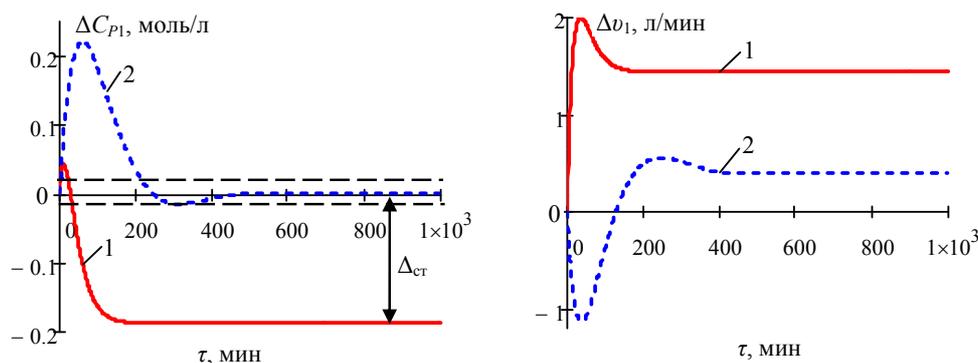


Рис. 3. Процессы управления при параметрическом возмущении $\Delta K_1 = 0.3K_1$:
 1 – безынерционный РС; 2 – РС с интегральной составляющей

Характер кривых на рис. 3 показывает, что оба варианта САУ обладают свойством устойчивости, но по величине статической ошибки регулирования безынерционный РС следует отвергнуть.

Таким образом, сравнительный анализ качества процессов управления показывает, что работоспособной следует признать САУ на базе РС с интегральной составляющей.

В работе была исследована работоспособность САУ при отсутствии текущих изменений концентраций компонентов A и B ($\Delta C_A = 0$; $\Delta C_B = 0$).

Алгоритм управления в этом случае представляет собой одномерный ПИИ-закон:

$$u = 10.05\Delta C_{P1} + 0.088 \int_0^{\infty} \Delta C_{P1} d\tau.$$

Исследования показали, что САУ и в этом случае является работоспособной: компенсирует 10%-ное возмущение по $\Delta C_{B_{вх}}$, отслеживает изменение задания по $\overline{\Delta C_{P1}}$ на 15% и компенсирует 30%-ное параметрическое возмущение по параметру K_1 .

Заключение. В работе предложена САУ концентрацией веществ в химическом реакторе на базе регулятора состояния, синтезированного методом модального управления. Методом компьютерного моделирования комплекса «нелинейный объект – линейная подсистема управления» показана работоспособность САУ на базе РС с интегральной составляющей, как для случая полного измерения вектора состояния, так и случая измерения только выходной переменной.

Список использованных источников

1. **Синергетика** и проблемы теории управления / под ред. А. А. Колесникова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.–504 с.
2. **Анализ** параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния / А. А. Анисимов, Д. Г. Котов, С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 18 – 32.
3. **Котов, Д. Г.** Синтез линейных регуляторов для управления состоянием технических объектов / Д. Г. Котов, С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков. –Иваново : ГОУВПО «ИГЭУ», 2005. –172 с.
4. **Методы** классической и современной теории автоматического управления : учебник : в 5 т. Т. 2. / под ред. Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 736 с.
5. **Ли, Э. Б.** Основы теории оптимального управления / Э. Б. Ли, Л. Маркус. – М. : Наука, 1972. – 576 с.
6. **Кузовков, Н. Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.

УДК 66.011:681.5

Невиницын В. Ю.¹, Загаринская Ю. Н.², Волкова Г. В.³, Лабутин А. Н.⁴Ивановский государственный химико-технологический университет,
Россия, г. Иваново¹(Тел. (4932)327226, e-mail: nevinitsyn@gmail.com),²(Тел. (4932)327226, e-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru),³(Тел. (4932)327226, e-mail: konf_gv@mail.ru),⁴(Тел. (4932)327226, e-mail: lan@isuct.ru)**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ КАСКАДНО-СВЯЗАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА****Nevinitsyn V. Yu.¹, Zagarinskaya Yu. N.², Volkova G. V.³, Labutin A. N.⁴**

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia, Ivanovo

¹(Tel. (4932)327226, e-mail: nevinitsyn@gmail.com),²(Tel. (4932)327226, e-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru),³(Tel. (4932)327226, e-mail: konf_gv@mail.ru),⁴(Tel. (4932)327226, e-mail: lan@isuct.ru)**SYNERGETIC SYNTHESIS OF CASCADE CONTROL SYSTEM
OF CHEMICAL REACTOR THERMAL REGIME**

Аннотация. Используя метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов, решена задача синтеза каскадной системы управления тепловым режимом в жидкофазном химическом реакторе, обеспечивающей инвариантность к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями по температуре и асимптотическую устойчивость замкнутой системы. Алгоритмический синтез закона управления проведен с использованием нелинейной математической модели объекта без применения процедуры линеаризации.

Ключевые слова: аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, синергетическая теория управления, химический реактор, каскадная система управления, компьютерное моделирование.

Abstract. Using the analytical design method of aggregated regulators the problem of synthesis of a cascade control system of a thermal regime in a liquid-phase chemical reactor is solved which provides invariance to disturbances, covariance with the giving actions of temperature and asymptotic stability of the closed system. Algorithmic synthesis of the control law was carried out using nonlinear mathematical model of the object without the linearization procedure.

Keywords: analytical design of aggregated regulators, synergetic control theory, chemical reactor, cascade control system, computer simulation.

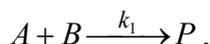
Введение. Реакторная подсистема во многих случаях является центральной в общей схеме превращения исходных реагентов в целевые продукты и в существенной степени определяет ресурсо- и энергосбережение, экономическую эффективность, степень удовлетворения спроса потребителей на те или иные продукты [1]. На стадии про-

ектирования химического производства решается задача оптимального синтеза реакторного узла и задача синтеза алгоритмов управления процессом, на стадии эксплуатации подзадача организации оптимального функционирования объекта в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений [2].

Основной особенностью химических реакторов как объектов управления является их многомерность, нелинейность и многосвязность. Существует ряд различных подходов к синтезу систем управления объектами данного класса, но они неэффективны при синтезе систем управления существенно нелинейными объектами. На наш взгляд, перспективным в этом плане представляется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [3]. Эффективность алгоритмов управления, синтезированных методом АКАР, показана в ряде работ [4 – 9].

В настоящей работе рассмотрен вариант синтеза нелинейной системы каскадно-связанного управления тепловым режимом методом АКАР.

Постановка задачи управления. Жидкофазный химический реактор представляет собой емкостной аппарат непрерывного действия, работающий в политропическом режиме (рис. 1). В аппарате протекает бимолекулярная экзотермическая реакция:



где A, B – исходные вещества; P – продукт реакции; k_1 – константа скорости.

Исходные реагенты A и B подаются в аппарат отдельными потоками. Смесь из реактора забирается насосом. Для отвода тепла и стабилизации температуры в реакторе аппарат снабжен рубашкой, в которую поступает хладагент.

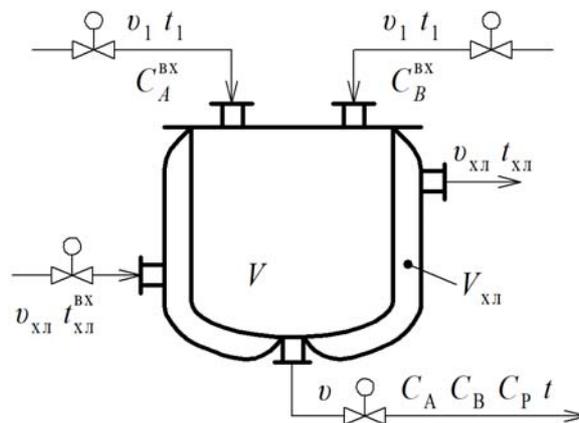


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора

На рисунке 1 введены обозначения:

C_A^{BX}, C_B^{BX} – концентрации исходных реагентов; v_1, v_2 – расход исходных реагентов; t_1, t_2 – температуры потоков исходных реагентов; t_{xl}^{BX}, t_{xl} – температуры хладагента на входе и выходе из аппарата; v_{xl} – расход хладагента на входе и выходе из аппарата; t – температура реакционной смеси в аппарате; v – расход реакционной смеси на выходе из аппарата; C_A, C_B, C_P – концентрации компонентов A, B, P в реакторе; V – объем реакционной смеси в аппарате; V_{xl} – объем хладагента в рубашке.

Математическая модель реактора имеет вид:

$$\begin{aligned}
 V \frac{dC_A}{d\tau} &= v_1 C_A^{\text{BX}} - (v_1 + v_2) C_A - V k_1 C_A C_B, \\
 V \frac{dC_B}{d\tau} &= v_2 C_B^{\text{BX}} - (v_1 + v_2) C_B - V k_1 C_A C_B, \\
 V \frac{dC_P}{d\tau} &= V k_1 C_A C_B - (v_1 + v_2) C_P, \\
 V \frac{dt}{d\tau} &= v_1 t_1 + v_2 t_2 + \frac{V \Delta H k_1 C_A C_B}{\rho C_T} - (v_1 + v_2) t - \frac{K_T F_T (t - t_{\text{хл}})}{\rho C_T}, \\
 V_{\text{хл}} \frac{dt_{\text{хл}}}{d\tau} &= v_{\text{хл}} (t_{\text{хл}}^{\text{BX}} - t_{\text{хл}}) + \frac{K_T F_T (t - t_{\text{хл}})}{\rho_{\text{хл}} C_{\text{хл}}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $k_1 = k_1^0 \cdot \exp(-E_1/R(t+273))$ – константа скорости; k_1^0 – постоянный множитель (предэкспонента) константы скорости; E_1 – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; ΔH – тепловой эффект реакции; ρ , C_T – плотность и теплоемкость реакционной смеси; $\rho_{\text{хл}}$, $C_{\text{хл}}$ – плотность и теплоемкость хладагента; K_T – коэффициент теплопередачи; F_T – поверхность теплообмена.

Общая задача управления химическим реактором заключается в стабилизации температуры смеси в аппарате на заданном уровне \bar{t} в условиях действия возмущений. Управляющим воздействием является расход хладагента, подаваемый в рубашку.

Структурный и алгоритмический синтез каскадной системы управления. Конструктивные и технологические особенности химического реактора, особенности реализации сложного технологического процесса и, соответственно, структурные особенности математической модели (1) позволяют провести декомпозицию системы (1) на две подсистемы. Первая подсистема – это уравнения материального баланса по компонентам и уравнение теплового баланса реакционной смеси. В качестве управления температурным режимом емкости выступает температура хладагента в рубашке. Вторая подсистема – рубашка реактора, функционирование которой описывается уравнением теплового баланса, а состояние характеризуется температурой $t_{\text{хл}}$. Управлением для $t_{\text{хл}}$ является расход хладагента $v_{\text{хл}}$.

Решим задачу синтеза системы каскадно-связанного управления температурой в реакторе методами синергетической теории управления. Математическая модель возмущенного движения первой подсистемы (реакционной емкости) примет вид:

$$\frac{dC_A}{d\tau} = f_1, \quad \frac{dC_B}{d\tau} = f_2, \quad \frac{dt}{d\tau} = f_4 + \frac{\beta_1}{V} u_1, \tag{2}$$

$$\text{где } f_1 = \frac{v_1 C_A^{\text{BX}} - (v_1 + v_2) C_A - V k_1 C_A C_B}{V}, \quad f_2 = \frac{v_2 C_B^{\text{BX}} - (v_1 + v_2) C_B - V k_1 C_A C_B}{V},$$

$$f_4 = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2 + \alpha k_1 C_A C_B - (v_1 + v_2) t - \beta_1 t}{V}, \quad \alpha = \frac{V \Delta H}{\rho C_T}, \quad \beta_1 = \frac{K_T F_T}{\rho C_T}, \quad u_1 = t_{\text{хл}}.$$

Задача формулируется следующим образом: необходимо синтезировать закон управления $u_1(C_A, C_B, t)$, переводящий объект из произвольного начального положения в окрестность заданного инвариантного многообразия $\psi_1(C_A, C_B, t) = 0$ и обеспечивающий устойчивое движение вдоль $\psi_1(C_A, C_B, t) = 0$ в конечное состояние.

Эта задача решается за один шаг, так как управление входит непосредственно в уравнение для температуры реакционной смеси [3].

Введем в рассмотрение макропеременную: $\psi_1 = t - \bar{t}$, где \bar{t} – заданное значение температуры. Управляющее воздействие должно быть таким, чтобы изменение макропеременной ψ_1 подчинялось основному функциональному уравнению: $T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$.

Запишем это уравнение в развернутом виде в силу уравнений модели объекта, получим:

$$u_1 = -\frac{V}{T_1 \beta_1} (t - \bar{t}) - \frac{f_4 V}{\beta_1}. \quad (3)$$

Параметром настройки алгоритма управления является величина T_1 . Условие асимптотической устойчивости замкнутой подсистемы управления реакционной емкостью: $T_1 > 0$.

Следующий этап синтеза системы управления температурным режимом заключается в синтезе алгоритма управления температурой хладагента – $t_{хл}$. Задача подсистемы управления температурой хладагента в рубашке заключается в определении такого внешнего управляющего воздействия – $\Delta v_{хл}$, которое обеспечило бы определенное на первом этапе значение температуры хладагента $\bar{t}_{хл} = u_1$. Модель подсистемы имеет вид:

$$\frac{dt_{хл}}{d\tau} = f_5 + \frac{(t_{хл}^{вх} - t_{хл})}{V_{хл}} u_2, \quad (4)$$

где $f_5 = \frac{v_{хл}(t_{хл}^{вх} - t_{хл}) + \beta_2(t - t_{хл})}{V_{хл}}$, $\beta_2 = \frac{K_T F_T}{\rho_{хл} C_{хл}}$, $u_2 = \Delta v_{хл}$.

Задача синтеза алгоритма управления температурой хладагента формулируется следующим образом: синтезировать закон управления $u_2(t_{хл})$, переводящий объект из произвольного начального положения в окрестность многообразия $\psi_2(t, t_{хл}) = 0$ и устойчивое движение в заданное конечное состояние.

Притягивающее инвариантное многообразие запишется: $\psi_2 = t_{хл} - u_1 = 0$. Используя функциональное уравнение $T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$ и уравнение (4), получим закон управления:

$$u_2 = -\frac{V_{хл}}{T_2(t_{хл}^{вх} - t_{хл})} (t_{хл} - u_1) - \frac{f_5 V_{хл}}{(t_{хл}^{вх} - t_{хл})}. \quad (5)$$

Параметром настройки алгоритма управления является величина T_2 . Условие асимптотической устойчивости замкнутой подсистемы управления рубашкой: $T_2 > 0$. Исходя из вида выражений (3), (5), структура каскадно-связанной системы управления без учета параметрических возмущений может быть представлена следующим образом (рис. 2).

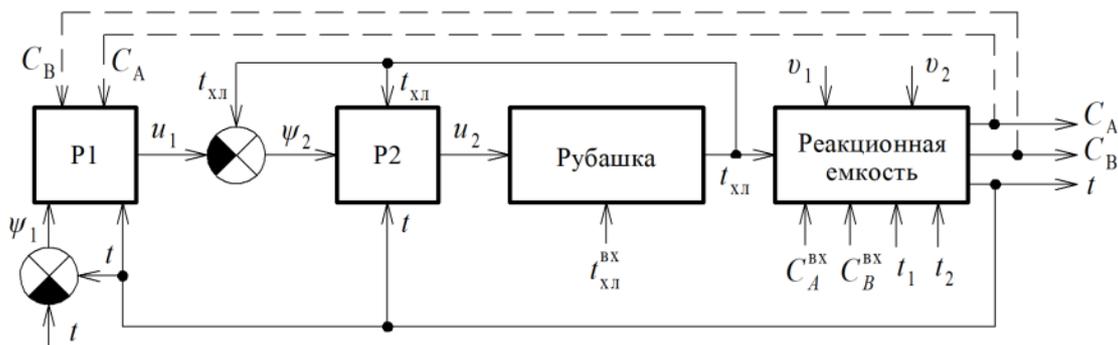


Рис. 2. Структура каскадно-связанной системы управления тепловым режимом реактора:
 P1 – главный регулятор; P2 – вспомогательный

Подставив u_1 из (3) в (5), получим закон управления для вспомогательного регулятора, определяющий величину внешнего управляющего воздействия:

$$u_2 = -\frac{V_{xл}}{T_2(t_{xл}^{вх} - t_{xл})} \left[t_{xл} + \frac{V}{T_1\beta_1}(t - \bar{t}) + \frac{f_4V}{\beta_1} \right] - \frac{f_5V_{xл}}{(t_{xл}^{вх} - t_{xл})}. \tag{6}$$

Компьютерное моделирование системы управления и результаты. Методами компьютерного моделирования проведено исследование работоспособности системы управления. Исследованы свойства инвариантности к возмущениям, ковариантности с задающими воздействиями по температуре и асимптотической устойчивости замкнутой системы.

На рисунке 3 приведены примеры переходных процессов управления в замкнутой системе при начальном отклонении переменной состояния C_A от статики на -20% ($\Delta C_A = -0.2C_A^0$).

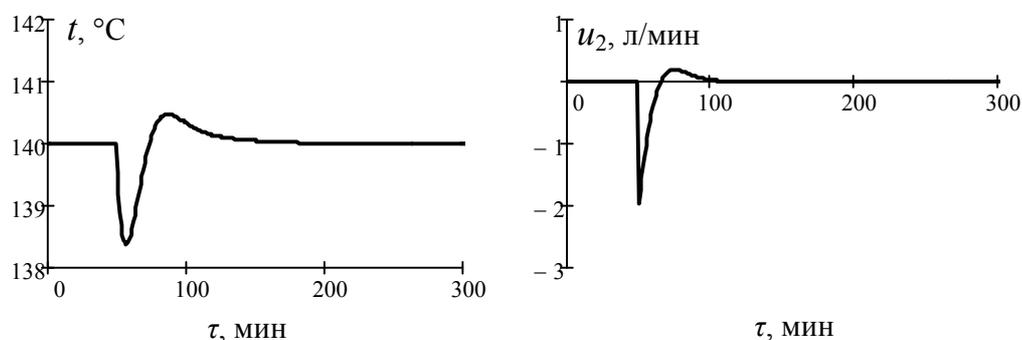


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе при начальном отклонении переменной состояния C_A от статики на -20%

Скачкообразное изменение управления u_2 в момент приложения возмущений объясняется тем, что не учитывалась инерционность исполнительного механизма на линии подачи хладагента.

Заключение. Таким образом, показана эффективность метода АКАР при синтезе нелинейных многоконтурных систем управления, в частности систем управления каскадного типа с двумя соподчиненными регуляторами.

Список использованных источников

1. **Лабутин, А. Н.** Оптимальный синтез гибкой реакторной системы / А. Н. Лабутин, А. Е. Исаенков, Г. В. Волкова // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 12. – С. 125 – 127.
2. **Лабутин, А. Н.** Анализ и оптимальный синтез химического реактора как объекта управления / А. Н. Лабутин, В. Ю. Невиницын, Г. В. Волкова // Химическая промышленность. – 2018. – Т. 95, № 5. – С. 241 – 248.
3. **Колесников, А. А.** Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
4. **Лабутин, А. Н.** Робастное управление температурным режимом химического реактора / А. Н. Лабутин, В. Ю. Невиницын, Г. В. Волкова // Информатика и системы управления. – 2018. – № 3. – С. 115 – 123. – DOI: 10.22250/isu.2018.57.115-123.
5. **Синергетический** синтез эффективного комплекса «реактор – управляющая система» / А. Н. Лабутин, В. Ю. Невиницын, Г. В. Волкова, В. А. Зайцев // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2018. – № 4(56). – С. 36 – 43.
6. **Робастное** управление концентрацией целевого продукта в химическом реакторе / А. Н. Лабутин, В. Ю. Невиницын, В. А. Зайцев, Г. В. Волкова // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61, № 12. – С. 129 – 136. – DOI: 10.6060/ivkkt.20186112.5914.
7. **Алгоритм** управления концентрацией целевого продукта в химическом реакторе / А. Н. Лабутин, В. Ю. Невиницын, Г. В. Волкова, В. М. Сальков // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2018. – № 2. – С. 34 – 40.
8. **Невиницын, В. Ю.** Управление температурным режимом химического реактора / В. Ю. Невиницын, А. Н. Лабутин, Г. В. Волкова // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2018. – № 2. – С. 41 – 48.
9. **Синтез** каскадной системы управления тепловым режимом технологического объекта методами теории синергетического управления / А. Н. Лабутин, В. Ю. Невиницын, Г. В. Волкова, А. В. Панасенкова, В. А. Зайцев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – № 3. – С. 41 – 48.

УДК 004.78

Гриднев В. А.¹, Дидрих В. Е.², Дидрих И. В.³

¹Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752) 631358, e-mail: vikadres@yandex.ru),

²Акционерное общество «Тамбовский завод «Ревтруд», Россия, г. Тамбов
(Тел. (915) 8685818, e-mail: dve54@mail.ru),

³Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752) 639286, e-mail: didr-irina@yandex.ru)

**ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИПТОЗАЩИТЫ
КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МЕЖДУ НАЗЕМНЫМ
ПУНКТОМ УПРАВЛЕНИЯ И БЕСПИЛОТНЫМ ВОЗДУШНЫМ СУДНОМ
БОЛЬШОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЕТА**

Gridnev V. A.¹, Didrich V. E.², Didrich I. V.³

¹Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)631358, e-mail: vikadres@yandex.ru),

²Joint Stock Company «Tambov Plant «Revtrud», Russia, Tambov
(Tel. (915) 8685818, e-mail: dve54@mail.ru)

³Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)639286, e-mail: didr-irina@yandex.ru)

**VIRTUAL MODELING OF CHANNEL CRYPTO-PROTECTION
DATA TRANSFER BETWEEN LAND MANAGEMENT
AND UNMANNED AIRCRAFT LONG DURATION OF FLIGHT**

Аннотация. Представлены рекомендации по криптозащите радиоканала передачи данных диапазона декаметровых волн (ДКМВ) между наземным пунктом управления и беспилотным воздушным судном большой продолжительности полета, структурная схема имитационной модели, результаты моделирования передачи данных по радиоканалу ДКМВ с криптозащитой и выводы из анализа результатов моделирования.

Ключевые слова: передача данных, радиоканал декаметровых волн, криптографическая защита, беспилотное воздушное судно большой продолжительности полета.

Abstract. The paper provides recommendations on the cryptographic protection of a decimeter wavelength band (DKMV) data channel between a ground control station and a long-life pilotless aircraft, a block diagram of a simulation model, simulation results of data transmission over a DKMV radio channel with cryptographic protection, and conclusions from the analysis of simulation results.

Keywords: data transmission, decimeter wave channel, cryptographic protection, long-range unmanned aerial vehicle.

Обмен данными между наземным пунктом управления и беспилотным воздушным судном большой продолжительности полета имеет ряд особенностей. Это, прежде всего, большие расстояния и полностью автоматическая обработка принятой информации на борту, без возможности ее анализа человеком. Эти особенности обуславливают два важных требования к каналу передачи данных: необходимость использования радиоканалов диапазона ДКМВ, характеризующихся узкополосностью и высоким уровнем помех, и обеспечение криптозащиты для аутентификации данных и защиты их содержания от перехвата злоумышленниками.

Проведенный анализ общих принципов и особенностей применения способов защиты и имитозащиты данных при их передаче по радиоканалам диапазона декаметровых волн, а также существующих и перспективных средств криптографической защиты данных позволил сформулировать рекомендации по криптозащите передаваемых данных, представленные ниже.

1. Данные, подлежащие передаче по каналу связи, предварительно должны быть заверены электронной подписью по алгоритму ГОСТ Р 34.10–2012 [1] с использованием хэш-функции по алгоритму ГОСТ Р 34.11–2012 [2] длиной 256 бит для обеспечения аутентичности и невозможности ренегатства. Для формирования и проверки электронной подписи может быть использован сертифицированный программный пакет «Крипто Про CSP 4.0».

2. Массив передаваемых данных с дополнением электронной подписью должен быть зашифрован по алгоритму блочного шифрования ГОСТ Р 34.12–2015 [3] с длиной блока шифруемых данных 128 бит в режиме гаммирования с обратной связью по выходу согласно ГОСТ Р 34.13–2015 [4].

3. Заверенный электронной подписью и зашифрованный массив данных должен быть дополнен имитовставкой ГОСТ Р 34.13–2015 для защиты от умышленной модификации. Выявление модификации данных путем верификации электронной подписи потребует больше времени и средств, чем проверка имитовставки. Поэтому электронная подпись служит только для обеспечения аутентичности и невозможности ренегатства, а для проверки целостности данных, принятых из канала связи, служит имитовставка. Длина имитовставки определяется предъявляемыми требованиями к вероятности навязывания ложных данных:

$$P_{\text{нав}} = 2^{-l},$$

где l – длина имитовставки в битах. Рекомендуемая длина имитовставки 64 бит.

4. Заверенный электронной подписью, зашифрованный и дополненный имитовставкой массив данных должен быть дополнен контрольной суммой CRC-16, усложненный умножением на константу 44111, для оперативного контроля целостности передаваемого массива данных без необходимости их расшифрования. Умножение на константу позволяет снизить вероятность коллизии без увеличения длины контрольной суммы. Константа 44111 выбрана из общих соображений без перебора всего подмножества чисел. Более точно константу имеет смысл подбирать только определившись с предполагаемым типом ошибок в канале передачи данных.

5. На приемной стороне, после верификации контрольной суммы, массив данных расшифровывается, проверяется их целостность путем верификации имитовставки, проверяется аутентичность путем верификации электронной подписи и после этого данные могут быть использованы по назначению.

Применение криптозащиты неизбежно приводит к увеличению объема передаваемых данных из-за необходимости дополнительно передавать контрольную сумму, синхропосылку, имитовставку, электронную подпись с текстовым дополнением. Это влечет за собой увеличение времени передачи заданных массивов данных. Кроме того, отрицательный результат верификации контрольной суммы, имитовставки или электронной подписи требует перезапроса и повторной передачи всего массива данных.

Целью моделирования передачи данных с криптозащитой является исследование влияния применения криптозащиты на время передачи массивов данных фиксированных объемов по каналам связи с различными значениями вероятности канальной битовой ошибки.

Моделирование производилось в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1. Значение показателя группирования ошибок было постоянным ($\alpha = 0,4$), так как ранее было установлено, что его значение не оказывает влияния на время передачи заданного массива данных [5].

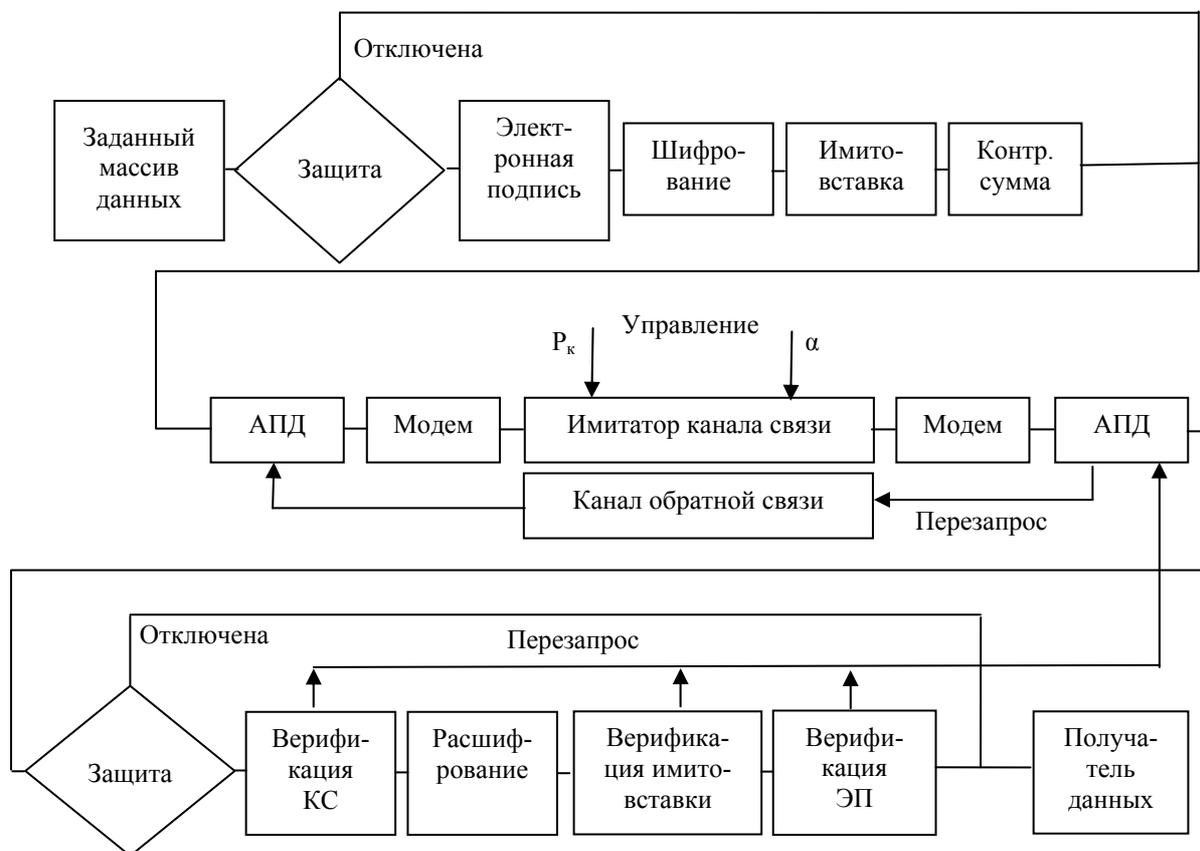


Рис. 1. Структурная схема моделирования передачи

Результаты моделирования передачи данных без криптозащиты и с криптозащитой по радиоканалам диапазона ДКМВ при различных значениях канальной битовой ошибки представлены в табл. 1.

1. Результаты моделирования передачи данных

Вероятность канальной битовой ошибки	Время передачи (без криптозащиты / с криптозащитой), с для файла размером, байт			
	1393	15 111	56 694	205 059
$P_k = 0,001$	10/13	132/140	496/505	1809/1823
$P_k = 0,01$	15/19	188/191	694/710	2528/2543
$P_k = 0,03$	22/25	261/290	1012/1018	3621/3628
$P_k = 0,05$	36/38	367/407	1377/1414	4943/5086

Ниже, на рис. 2 – 5 показаны графики зависимостей времени передачи T от объема передаваемых файлов L . На графиках по оси абсцисс показаны условные точки размеров передаваемых файлов (не по линейной шкале) через одинаковые расстояния. Если использовать реальную линейную шкалу, то кривые зависимостей будут представлять собой сливающиеся друг с другом почти прямые линии, что не очень наглядно.

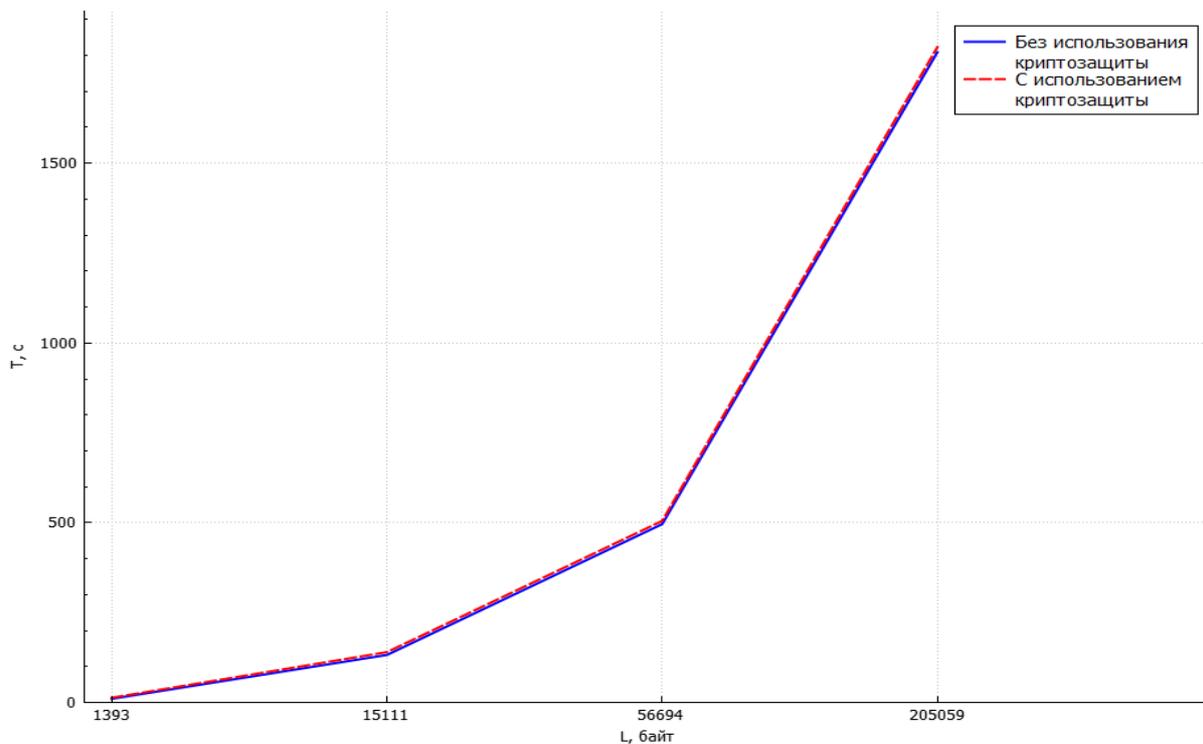


Рис. 2. Зависимость $T = f(L)$ для $P_k = 0,001$

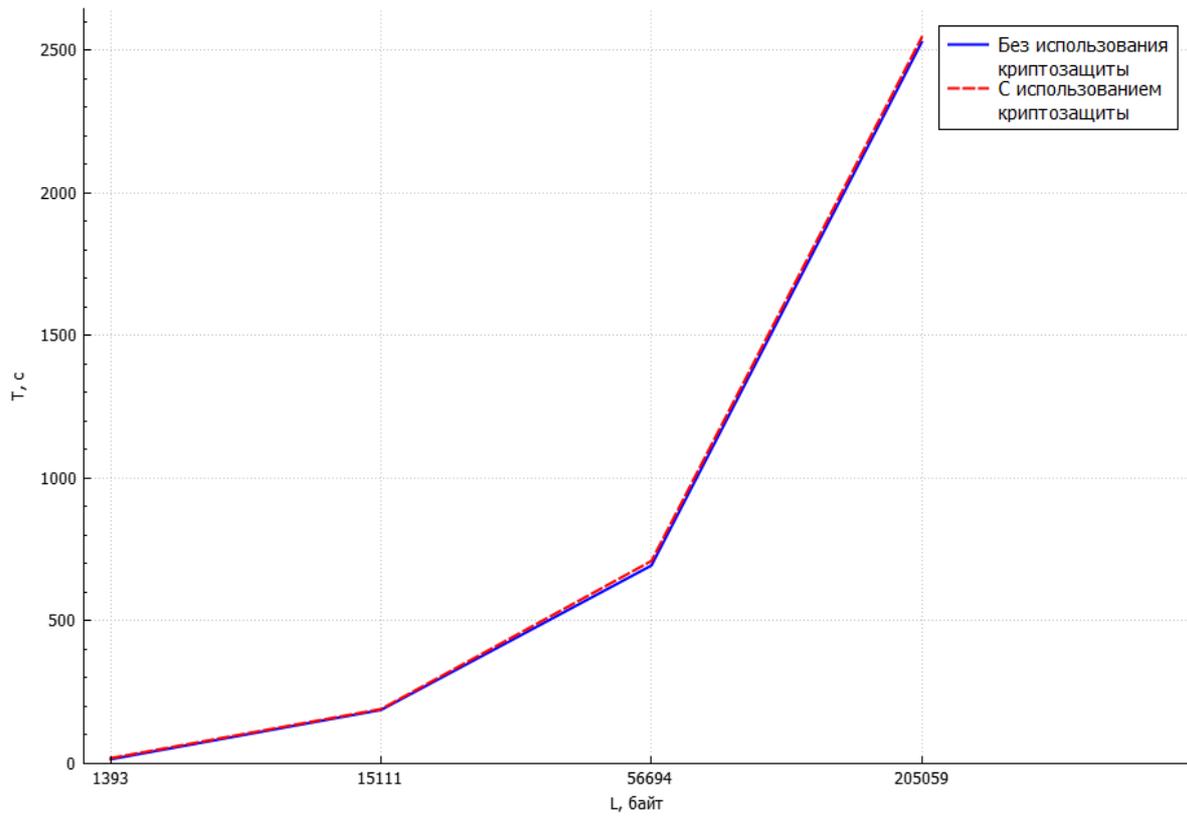


Рис. 3. Зависимость $T = f(L)$ для $P_k = 0,01$

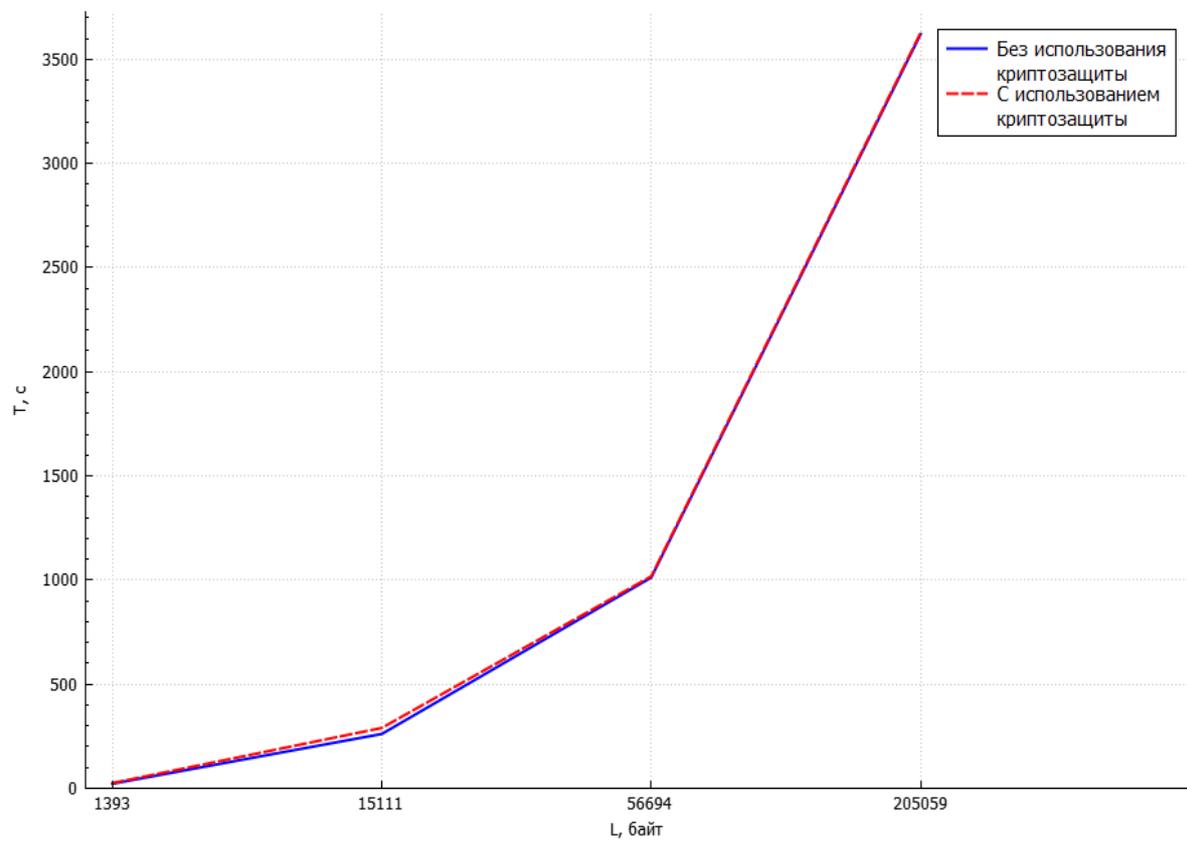


Рис. 4. Зависимость $T = f(L)$ для $P_k = 0,03$

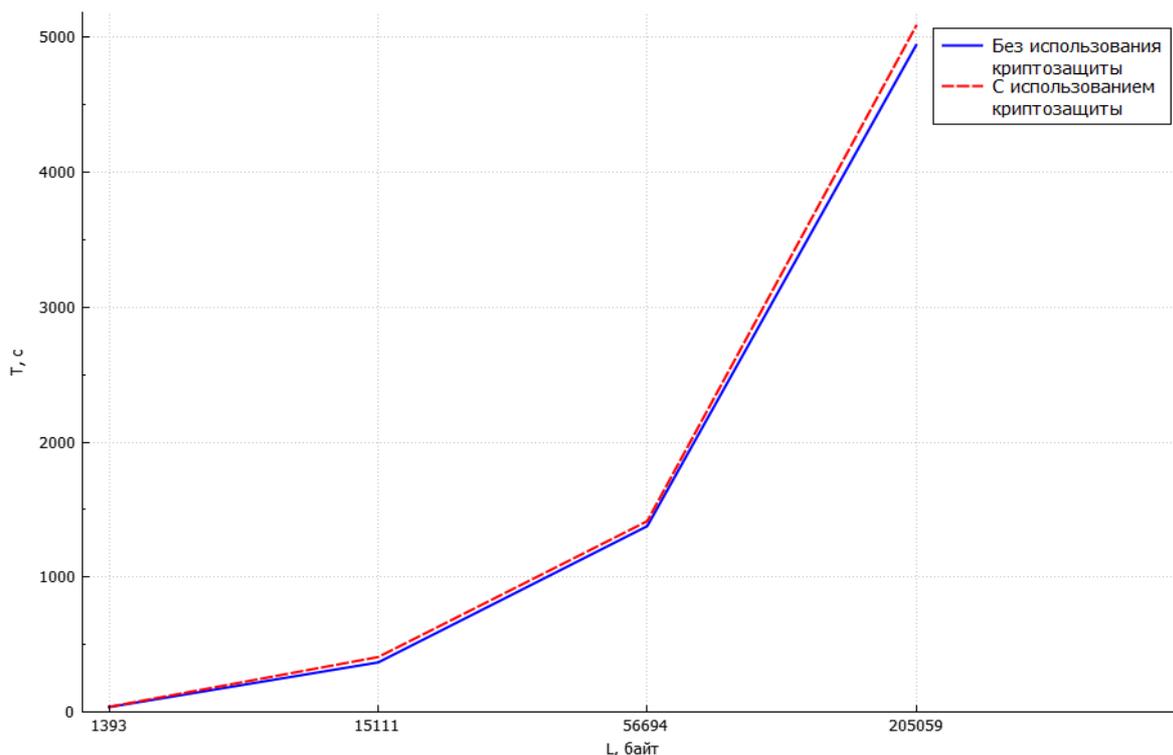


Рис. 5. Зависимость $T = f(L)$ для $P_k = 0,05$

Из представленных результатов моделирования передачи данных по радиоканалам диапазона ДКМВ при различных значениях канальной битовой ошибки без применения криптозащиты и с применением криптозащиты можно сделать следующие выводы:

1. Криптозащита передаваемых данных включает в себя контрольную сумму, шифрование, формирование имитовставки и электронную подпись. Применение криптозащиты при передаче данных позволяет обеспечить:

- оперативный контроль целостности файла после передачи его по каналу связи (контрольная сумма);
- конфиденциальность передаваемой информации (шифрование);
- защиту передаваемых данных от активных атак по навязыванию ложной информации (имитовставка);
- аутентичность передаваемых данных и невозможность ренегатства (электронная подпись).

2. Выбор рациональных длин контрольной суммы и имитовставки, наиболее подходящих режима работы блочного шифра и длины электронной подписи позволяют избежать существенного увеличения времени передачи данных, обусловленного применением криптозащиты.

3. Применение криптозащиты практически не влияет на время передачи заданного массива данных. Влияние криптозащиты на время передачи становится заметным только при сравнительно больших значениях канальной битовой ошибки ($P_k > 0,05$).

Список использованных источников

1. **ГОСТ Р 34.10–2012.** Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи. [Текст]. – Введ. 2013–01–01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 29 с.
2. **ГОСТ Р 34.11–2012.** Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования. [Текст]. – Введ. 2013–01–01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 34 с.
3. **ГОСТ Р 34.12–2015.** Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. [Текст]. – Введ. 2016–01–01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 11 с.
4. **ГОСТ Р 34.13–2015.** Информационная технология. Криптографическая защита информации. Режимы работы блочных шифров. [Текст]. – Введ. 2016–01–01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 29 с.
5. **Исследование** влияния процедуры перемежения на качество информационного обмена с использованием каскадного помехоустойчивого кодирования / И. В. Дидрих, В. Е. Дидрих, В. А. Гриднев, В. А. Свищев // Научный журнал «Информация и безопасность». – 2018. – № 2(4), Т. 21. – С. 171 – 178.

УДК 66.013:001.8

Карпушкин С. В.¹, Афанасьев В. М.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Тел. (4752)630706, e-mail: rjkki0ass@mail.ru)

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Karpushkin S. V.¹, Afanasyev V. M.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Tel. (4752)630706, e-mail: rjkki0ass@mail.ru)

**INFORMATION MODELS APPLICATION FOR THE SOLUTION OF EQUIPMENT
CONFIGURATION PROBLEMS IN MULTI-PRODUCT CHEMICAL PLANTS**

Аннотация. Представлены информационные модели для решения задач расчета определяющих размеров аппаратов химико-технологических систем и разработки отдельных технологических аппаратов многоассортиментных химических производств. Для формального описания структуры разрабатываемой ХТС и технологических аппаратов предложены различные виды графов.

Ключевые слова: многоассортиментные химические производства, аппаратурное оформление, информационная модель.

Abstract. Information models for problems solving of determining sizes calculation for apparatuses of chemical-technological systems and developing a separate technological apparatus of multi-product chemical plants are presented. Different types of graphs are proposed for a formal description of the structure of developed CTS and technological apparatus.

Keywords: multi-product chemical plants, equipment configuration, information model.

Развитие перерабатывающих отраслей промышленности, к числу которых относится химическая, – одна из главных задач экономики России. Создание новых и модернизация существующих многоассортиментных химических производств (МХП) невозможны без разработки эффективного аппаратурного оформления химико-технологических систем (ХТС), состоящих, как правило, из большого количества технологических аппаратов (ТА). Система принятия решений в этом случае представляет собой многоуровневую иерархическую систему взаимосвязанных локальных задач, которая должна быть обеспечена информацией различного характера, средствами хранения и обработки результатов решения локальных задач, формирования проектной документации, необходимой для изготовления ТА, при минимальном участии человека.

Для выполнения таких функций должна быть создана система информационной поддержки принятия решений (ИППР), которая обеспечивает ускорение процессов

принятия решений, исключение ошибок при передаче информации между локальными задачами принятия проектных решений, формализацию знаний предметной области, их обработку и хранение, сокращение численности конструкторских и технологических служб предприятий.

Существующие системы ИППР при проектировании ХТС имеют принципиальные недостатки, главный из которых – отсутствие возможности принятия решений с использованием знаний предметной области, что на практике компенсируется увеличением численности конструкторских отделов предприятий.

Задача аппаратного оформления ХТС декомпозируется на две взаимосвязанные подзадачи [1, 2]:

- расчет числа и определяющих размеров аппаратов ХТС;
- разработка конструкции отдельных аппаратов.

Основой системы ИППР при решении этих задач являются информационные модели (ИМ), представляющие собой формализованный набор фактов, понятий, инструкций, предназначенный для удовлетворения информационных потребностей решаемых задач.

Информационные модели и результаты решения указанных задач должны храниться и обрабатываться в выбранном информационном хранилище, в качестве которого чаще всего используются базы данных реляционного типа.

Формализованное представление структуры разрабатываемых технических объектов позволяет значительно снизить затраты, связанные с хранением и обработкой информации. В качестве формализованного представления предлагается использовать графы.

В работах [1, 2] задача определения числа и размеров аппаратов на каждой стадии технологической системы ставится и решается в следующем виде. Для заданных исходных данных:

- ассортимента продуктов $P = \{p_i\}, i = \overline{1, I}$, i – номер продукта;
- объемов выпуска каждого продукта $Q = \{q_i\}, i = \overline{1, I}$;
- периода выпуска всех продуктов T ;
- перечня стадий (основных аппаратов ХТС) $Y = \{y_j\}, j = \overline{1, J}$, j – номер стадии;
- перечня стадий (аппаратов), используемых для выпуска каждого продукта $YP = \{y_{p_{ik}}\}, i = \overline{1, I}, k \in \overline{1, J}, YP \subseteq Y$;
- времени работы каждого аппарата для выпуска одной партии продукта – $TA = \{t_{a_{ij}}\}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$.

Необходимо найти:

- определяющие геометрические размеры (рабочие объемы, поверхности) $X = \{x_j\}, j = \overline{1, J}$ основных аппаратов каждой стадии. Причем $X \subset X1 = \{x1_j\}, j = \overline{1, J}$, где $X1$ множество допустимых значений основных размеров аппаратов (каталог аппаратов);

- число основных аппаратов каждой стадии $N = \{n_j\}, j = \overline{1, J}$;
- размеры партий готового продукта $W = \{w_i\}, i = \overline{1, I}$;
- время начала и конца обработки каждой партии продукта на каждой стадии $TN_{ij} = \{tn_k\}, TK_{ij} = \{tk_k\}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, r = 1, K_i, k$ – номер партии выпуска i -го продукта.

Задача ставится как оптимизационная, критерием оптимизации являются капитальные и эксплуатационные затраты $S1$, т.е.:

$$I_{11}^* = \arg \min(S1(I_{11})), \quad (1)$$

$$I_{11} = \langle X, N, W, TN, TK \rangle = I_{11} = M_{11}(tz),$$

$$tz = \langle P, Q, T, Y, YP, TA \rangle,$$

где M_{11} – математическая модель, которая позволяют по множеству исходных данных tz найти множество результатов I_{11} .

Таким образом, информационную модель IM_{11} можно представить в виде

$$IM_{11} = \langle M_{11}, X1, S1 \rangle.$$

ХТС состоит из отдельных, связанных между собой аппаратов, в которых проводятся операции согласно технологическому регламенту. При решении задачи выбора числа и размеров аппаратов известны: перечень выпускаемых продуктов; стадии, необходимые для выпуска каждого продукта; тип аппарата на каждой стадии.

Примеры отдельных единиц оборудования: емкостный аппарат, кожухотрубчатый теплообменник, ректификационная колонна и др., причем ИМ технического объекта представляет его в виде совокупности элементов и связей между ними и позволяет генерировать возможные варианты его конструкции, удовлетворяющие исходным данным, перечисленным в техническом задании [3, 4].

В качестве основной формы представления знаний в ИМ выбрано представление знаний в виде продукций (правил). Это объясняется тем, что большинство требований нормативной документации и имеющийся опыт в области проектирования наиболее просто, точно и естественно формализовать в форме продукций. Другими формами представления знаний в ИЛМ являются математические выражения или их системы (расчетные методики).

Формально представим ИМ технического объекта в виде

$$M = \langle E, M^S, M^P, M^R \rangle,$$

где $E = \{e_i\}, i = \overline{1, N}$ – множество элементов технического объекта, которое разделяется на следующие классы элементов:

- функциональные элементы $E^b = \{e_k\}, k \in \overline{1, N}$;
- соединительные элементы $E^s = \{e_j\}, j \in \overline{1, N}$.

Каждый элемент представлен в виде $e = \langle P, Zn \rangle$, где $P = \{p\}$ – множество свойств этого элемента. Примерами свойств элементов являются: тип элемента, геометрические

и технические характеристики, материал изготовления и др. Для сложных элементов важным свойством является его структура;

$Z_n = \{z_n\}$ – множество возможных значений свойств данного элемента. Свойства могут принимать только одно значение (например, материал корпуса или диаметр крышки), или несколько значений одновременно (например, для змеевика свойство «назначение» может принимать значения «нагреть» и «охладить»).

$M^S = \langle E, O, Y^e, Y^t, Y^k, Y^S \rangle$ – ИМ для определения структуры ТА, где O – И-ИЛИ дерево, элементов разрабатываемого аппаратов, Y^e – правила, определяющие наличие и количество функциональных элементов аппарата; Y^t – правила, определяющие тип каждого функционального элемента; Y^k – правила, определяющие предварительное расположение элементов друг относительно друга; Y^S – правила, определяющие типы соединительных элементов технического объекта.

$M^P = \langle E, Y^b, Y^{pp}, Y^{pe} \rangle$ – ИМ для расчета параметров элементов ТА, где Y^b – правила и зависимости, определяющие общие параметры аппарата в целом; Y^{pp} – правила и зависимости, определяющие значения единичных параметров элементов; Y^{pe} – правила и зависимости, определяющие значения унитарных параметров элементов.

$M^R = \langle E^{3D}, T^{SP}, Y^R \rangle$ – ИМ позиционирования $E^{3D} = \langle O_s, L, Gr, S^P \rangle$ – геометрическая 3D-модель ТА, где $O_s = \{os\}$ – множество осей; $L = \{l\}$ – множество ребер; $Gr = \{gr\}$ – множество поверхностей (граней); $S^P = \{s^P\}$ – множество сопряжений (связей позиционирования) между O , L и Gr ; T^{SP} – реестр типов сопряжений между базовыми осями, ребрами и гранями элементов; Y^R – правила, определяющие сопряжения между базовыми геометрическими параметрами элементов.

Отдельные единицы оборудования представляют систему, состоящую из элементов (обечайки, днища, опоры, штуцера и т.д.) и связей между ними.

Основными этапами конструирования технологического оборудования являются:

- структурный синтез. Определение структуры проектируемого объекта на основании ИМ для определения структуры M^S . Результат – перечень элементов, из которых состоит конструируемый объект, и связи между элементами;
- определение характеристик (свойств) элементов, конструируемого объекта на основании ИМ для расчета параметров элементов M^P ;

В основе структурного синтеза содержится И-ИЛИ дерево, обработка которого позволяет получить структуру проектируемого объекта.

Обработка дерева осуществляется с помощью правил вида «Если ... то ...» [5]. Например: «Если расположение емкостного аппарата «между этажами», то опоры – «лапы».

Части «то» правил представляют вершины И-ИЛИ дерева. Части «если» – таксономия (дерево) функций и условий эксплуатации оборудования. Таким образом, множество правил выбора элементов представляет собой неориентированный ультраграф,

ребра которого включают вершины И–ИЛИ дерева (вершины приемники) и вершины дерева функций и условий эксплуатации оборудования (вершины источники).

Представленные результаты используются при разработке системы информационной поддержки принятия решений при проектировании МХП.

Список использованных источников

1. **Борисенко, А. Б.** Иерархия задач аппаратурного оформления технологических систем многоассортиментных химических производств / А. Б. Борисенко, С. В. Карпушкин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 113 – 123.

2. **Technical** equipment configuration and functioning mode optimizing for chemical–engineering systems of multi–product plants / E. N. Malygin, S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Ostroukh // American–Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. – 2015. – V. 15, № 3. – P. 447 – 453.

3. **Мокрозуб, В. Г.** Процедурная модель проектирования многоассортиментных химических производств / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. В. Мокрозуб // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 5. – С. 32 – 35.

4. **Мокрозуб, В. Г.** О подходе к интеллектуализации информационной поддержки принятия решений при конструировании химического оборудования / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 7. – С. 31 – 34.

5. **Интеллектуальная** система прогнозирования и классификации опасностей химической продукции и техногенных отходов для повышения уровня безопасности населения / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, В. А. Колесников, Ю. А. Кузьмина // Цветные металлы. – 2015. – № 4. – С. 78 – 84.

УДК 62-932.4

Карпушкин С. В.¹, Афанасьев В. М.², Тюрин Р. Э.³

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Тел. (4752)630706, e-mail: rjkki0ass@mail.ru),

³(Тел. (4752)630706, e-mail: romandptrtmb@yandex.ru)

ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Karpushkin S. V.¹, Afanasyev V. M.², Tjurin R. E.³

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)630706, e-mail: karp@mail.gaps.tstu.ru),

²(Tel. (4752)630706, e-mail: rjkki0ass@mail.ru),

³(Tel. (4752)630706, e-mail: romandptrtmb@yandex.ru)

PROBLEMS OF AUTOMATED DESIGN THE PRESS EQUIPMENT, USED FOR THE PRODUCTION OF RUBBER PRODUCTS

Аннотация. Сформулированы задачи автоматизированного проектирования прессового оборудования, используемого для изготовления резинотехнических изделий. Определены связи между задачами по исходным данным и результатам решения. Предложены структура и перечень функций системы поддержки принятия решений при проектировании нагревательных плит, пресс-форм, рамы и гидроцилиндра пресса.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, вулканизационный пресс, нагревательная плита, пресс-форма, резинотехническое изделие.

Abstract. The computer-aided design problems of press equipment, used in the manufacture of rubber products, are formulated. The relationship between tasks on the initial data and the results of the decision are determined. Structure and list of functions of decision support system for the design of heating plates, molds, frame and cylinder press are proposed.

Keywords: computer-aided design, vulcanizing press, heating plate, mold, rubber product.

Наиболее часто резинотехнические изделия (РТИ) изготавливаются методом горячего прессования. Для их вулканизации в металлических пресс-формах применяют, в основном, гидравлические вулканизационные прессы, оснащаемые нагревательными плитами с индукционными нагревателями. Процесс проектирования прессового оборудования включает решение следующих основных задач.

1. Выбор материалов и определение геометрии нагревательных плит и пресс-форм исходя из размеров вулканизируемых РТИ и выполнения условий прочности.

2. Формирование температурного поля рабочей поверхности нагревательной плиты пресса: определение количества, размеров, мощности и положения индукторов,

обеспечивающих получение требуемого профиля температур рабочей поверхности плиты за указанное время;

3. Формирование поля температур в объеме вулканизируемого изделия: определение положения пресс-форм на поверхности нагревательных плит, при котором степень неравномерности температурного поля в изделии не превышает предельно допустимой;

4. Определение размеров элементов рамы пресса и силового гидроцилиндра, обеспечивающих выполнение условий прочности.

Задача 1. Длина l и ширина s нагревательных плит вулканизационного пресса определяются ассортиментом РТИ, которые предполагается изготавливать, и размерами пресс-форм для этих изделий, а выбор материала m_n и высоты плиты h – условием ее прочности. Для выполнения прочностного расчета нагревательных плит необходимы: рабочая температура T_p ; усилие сжатия P ; количество зажимаемых пресс-форм и геометрия поверхностей их контакта с рабочей поверхностью плиты. Постановка задачи предусматривает выбор материала и толщины нагревательной плиты, обеспечивающих неизменность ее геометрии при минимальной стоимости материала и выполнении условия прочности [1].

Пресс-формы с вулканизируемыми изделиями также подвергаются температурным, и механическим деформациям: они помещаются между двумя нагревательными плитами, зажимаются с усилием порядка 200 МН и выдерживаются некоторое время при температуре, близкой к T_p , см. рис. 1.

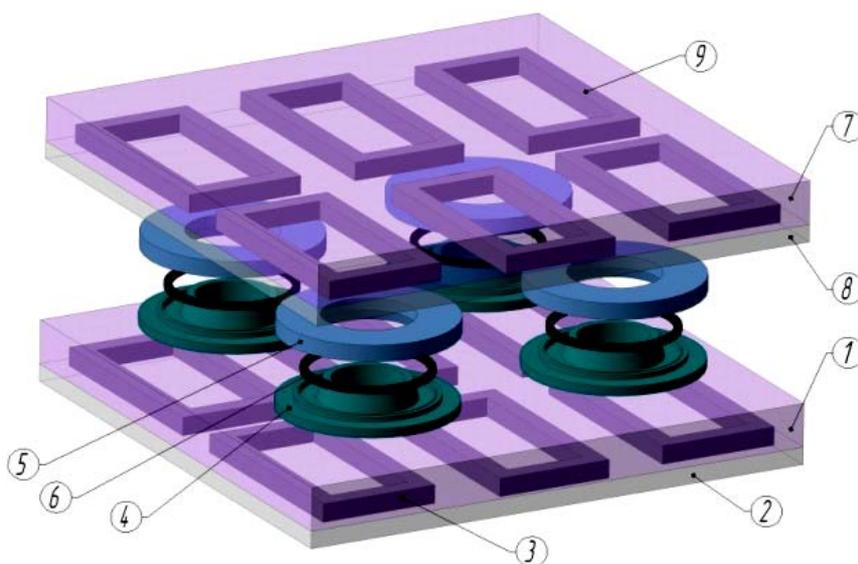


Рис. 1. Модель системы «плиты–пресс-формы–РТИ»:

1, 7 – основания плит; 2, 6 – крышки плит; 3, 9 – индукторы;
4, 5 – матрица и пуансон пресс-формы; 6 – РТИ (прокладка)

Целью прочностного расчета пресс-формы является выбор марки материала и определение геометрических размеров ее элементов, обеспечивающих выполнение условий прочности. Исходными данными для прочностного расчета пресс-формы являются: осевая нагрузка (рабочее давление в гидроцилиндре пресса $P_{ц}$); рабочая температура T_p .

Для случая, когда основными габаритными размерами пресс-формы являются наружный R , внутренний r радиус и высота h_{ϕ} , см. рис. 1, задача сводится к выбору материала пресс-формы и таких значений R и r , при которых обеспечивается выполнение условия прочности пресс-формы и достигается ее минимальная металлоемкость при выполнении условия прочности [1].

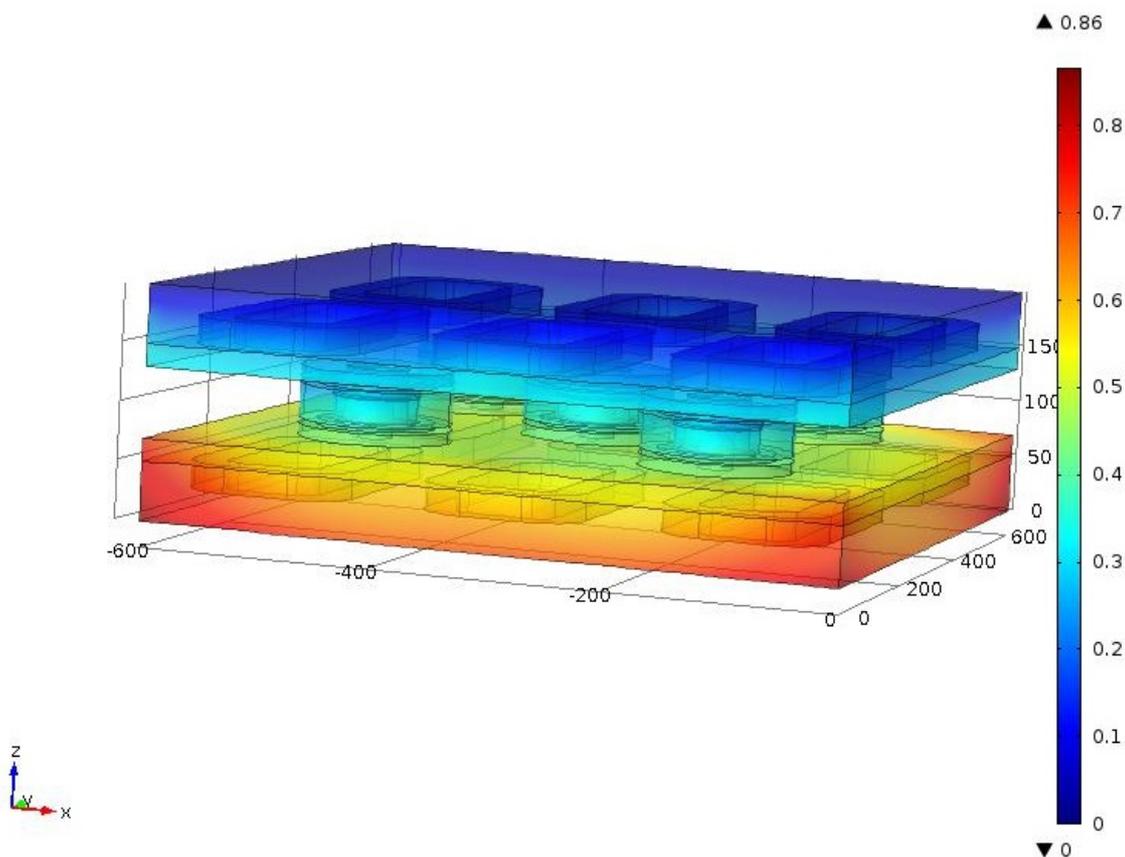


Рис. 2. Поле деформаций плит и пресс-форм одноэтажного пресса

Современные системы конечноэлементного анализа позволяют проводить расчеты полей деформаций в плитах и пресс-формах при одновременном воздействии тепловых и механических нагрузок. Пример такого поля, полученного в системе COMSOL Multiphysics, показан на рис. 2. Продолжительность нагрева плит и пресс-форм одноэтажного пресса – 2700 секунд, нагрузка в 2.5 МН приложена к нижней плите в направлении оси Z . Верхняя плита жестко закреплена и не перемещается. Из рисунка видно, что максимальная деформация возникает на краях нижней нагревательной плиты и составляет 0,86 мм.

Задача 2. Формирование профиля температур рабочей поверхности нагревательной плиты традиционно считается главной задачей проектирования вулканизационных прессов, так как от него прямо зависит конфигурация поля температур в вулканизируемом изделии. Как правило, требуется определить число индукционных нагревателей, геометрические размеры и мощность каждого из них, обеспечивающие равномерное распределение температур по рабочей поверхности плиты. К числу исходных данных

для решения этой задачи относятся: результаты решения задачи выбора материала и геометрии нагревательной плиты – значения m_n, l, s, h ; продолжительность периода нагрева плиты τ_n и допустимый уровень неравномерности температурного поля ее рабочей поверхности ΔT_n по истечении этого времени; тип, внешний диаметр d_n (с учетом изоляции), материал и диаметр d сечения провода, используемого для намотки индукторов, допустимая глубина пазов под индукторы h_n ; напряжение электрической сети U и коэффициент мощности $\cos \varphi$; конфигурация объема материала плиты v_n , в котором происходит тепловыделение индукторов, и зависимость их удельной мощности от времени нагрева $q_n(\tau)$; условия теплоотвода во внешнюю среду – конструкция системы нагрева пресса, условия контакта нагревательных плит с элементами пресса и окружающим воздухом; температура воздуха T_0 . Необходимо определить число индукторов (N_n) заданной формы (круглый, прямоугольный), их размеры (длина l_n и ширина s_n , или диаметр d_n), положение проекций центров индукторов на рабочую поверхность плиты (X_n, Y_n), и число витков провода (n_n) в каждом индукторе, при которых в момент времени τ_n от начала нагрева средняя температура рабочей поверхности плиты минимально отличается от заданной (T_p), а неравномерность поля температур рабочей поверхности $\max\{T_n(x, y, 0, \tau_n)\} - \min\{T_n(x, y, 0, \tau_n)\}$ не превосходит максимально допустимой ΔT_n . Один из возможных подходов к решению этой задачи см. в [2].

Задача 3. Качество РТИ во многом определяется равномерностью температурного поля в объеме изделия. Поэтому необходимо определять положение пресс-форм (координаты центров $X_{\phi j}, Y_{\phi j}$), обеспечивающее заданное распределение температур в РТИ при фиксированном профиле температур рабочей поверхности нагревательной плиты. К исходной информации относятся: состав (марка) исходной резиновой смеси (m_n); температура окружающего воздуха (T_0), начальная температура смеси (T_n) и температура вулканизации изделия (T_b); допустимый уровень неравномерности температурного поля в изделии (ΔT_n); результаты решения задачи выбора материала и геометрии пресс-формы. Задачу предлагается решать для стационарного режима нагрева системы «плиты–пресс-формы–изделия», см. рис. 1, в условиях теплообмена с окружающим воздухом, т.е. находить температурное поле изделия, которое характеризуется максимально возможной степенью равномерности, см. [3].

Методика прочностного расчета рамы вулканизационного гидравлического пресса [1] предусматривает проверку выполнения условий прочности в каждом из опасных сечений. Задача расчета рамы на прочность сводится к выбору материала и определению геометрических размеров элементов рамы, при которых выполняются условия прочности и достигается минимальная металлоемкость. Исходные данные: средняя температура рамы (обычно используется рабочая температура нагревательных плит T_p); основные геометрические размеры рамы; осевое толкающее усилие P .

Задача 4. Силовой гидроцилиндр является наиболее нагруженным и ответственным узлом вулканизационного пресса. Целью его расчета является выбор материала m_n , внутреннего R_b и внешнего R_n радиуса цилиндрической части, толщины днища h_d , фланца h_f и высоты катета сварного шва днища h_k . Исходные данные: геометрия гидроцилиндра (наружный диаметр, высота, форма и размеры толкателя); внутреннее дав-

ление $P_{ц}$; необходимый запас прочности. Задача расчета гидроцилиндра сводится к определению значений $R_{ц}$, $R_{в}$, $h_{д}$, $h_{ф}$ и $h_{к}$, обеспечивающих его минимальную металлоемкость при выполнении условий прочности для его стенок, днища и сварных швов. Расчет гидроцилиндра обычно дополняют прочностным расчетом стола прессы – определением минимальной высоты стола, обеспечивающей выполнение условий прочности [1].

Как видно, для решения задач проектирования прессового оборудования необходимо большое количество разнородной информации: данные технического задания на проектирование (значения T_p , P , $P_{ц}$, $\tau_{ц}$, $\Delta T_{п}$, $\varepsilon_{п}$, U , $\cos \varphi$, $T_{в}$, $\Delta T_{и}$, $\varepsilon_{и}$ и T_0 ; условия теплоотвода от плит и пресс-форм во внешнюю среду и др.); справочные данные – зависимости свойств материалов плит, пресс-форм, проводов индукторов, резиновых смесей от температуры; результаты решения задач, например, размеры нагревательной плиты для задачи формирования температурного поля ее рабочей поверхности, число, размеры и мощности индукторов нагревательных плит для задачи формирования поля температур в РТИ. Кроме того, применение систем конечноэлементного анализа требует формирования объемных геометрических моделей (3D-моделей) плит, индукторов, пресс-форм и РТИ, см. рис. 1, 2, выбора типов и плотности сетки конечных элементов для различных объектов. Заметим, что 3D-модели нагревательных плит и пресс-форм являются как исходными данными, так и результатами решения задач формирования температурных полей в плитах и РТИ, следовательно, они должны быть параметризованы. Таким образом, автоматизация процесса проектирования требует создания системы информационной поддержки принятия решений для подготовки, хранения и представления исходных данных и результатов решения задач проектирования прессового оборудования.

Основными функциями системы информационной поддержки являются:

- 1) автоматизация подготовки и ввода данных для решения конкретной задачи, в том числе и результатов решения предшествующих задач;
- 2) сбор, хранение и предоставление справочной информации;
- 3) формирование и хранение параметризованных 3D-моделей и чертежей плит, индукторов, пресс-форм и РТИ;
- 4) представление результатов решения задач в форме, удобной для анализа;
- 5) формирование конечных документов, пригодных для использования в проектной документации;
- 6) хранение исходных данных и результатов выполненных проектов.

Реализация этих функций осуществляется с помощью следующих компонентов системы: управляющий модуль; модуль ввода данных технического задания; база справочных данных о материалах плит, индукторов, пресс-форм, а также резиновых смесей, используемых в качестве исходного сырья для изготовления РТИ; база характеристик, сборочных чертежей, 3D-моделей нагревательных плит и результатов расчета их температурных полей; база характеристик и сборочных чертежей индукторов; база характеристик, сборочных чертежей, 3D-моделей пресс-форм с РТИ и результатов расчета температурных полей в РТИ; архив выполненных проектов.

Разработка и внедрение системы информационной поддержки принятия решений при проектировании прессового оборудования в комплексе с модулями решения задач проектирования позволит существенно сократить сроки получения проектных решений и повысить их качество.

Список использованных источников

1. **Басов, Н. И.** Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович. – М. : Химия, 1986. – 488 с.
2. **Глебов, А. О.** Методика оптимизации режимных и конструктивных характеристик нагревательной плиты вулканизационного пресса / А. О. Глебов, С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т.19, № 1. – С. 137 – 151.
3. **Карпов, С. В.** Оценка эффективности пресс-форм для изготовления резинотехнических изделий и системы их обогрева на вулканизационном прессе / С. В. Карпов, С. В. Карпушкин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 10 – 16.

УДК 629.7.036, 004.942

Болотов М. А., Печенин В. А., Печенина Е. Ю.

Самарский университет, Россия, г. Самара
(Тел. (8846)2674776, e-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ РОТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Bolotov M. A., Pechenin V. A., Pechenina E. J.

Samara National Research University, Russia, Samara
(Tel. (8846)2674776, e-mail: vadim.pechenin2011@yandex.ru)

FORECASTING VIBRATIONS OF A GAS TURBINE ENGINE ROTOR

Аннотация. В работе решается задача прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины низкого давления газотурбинного двигателя посредством создания его цифрового двойника. Цифровой двойник ротора включает в себя специально созданную в CAD-модуле программы NX параметрическую 3D-модель и расчетный проект в системе ANSYS, в котором имитируются условия работы ротора с использованием модулей Modal и Harmonic Response. Проведена серия экспериментов, позволивших произвести расчет параметров виброускорения и виброперемещения опор ротора на критических частотах вращения в зависимости от геометрических погрешностей, за которые отвечают изменяемые параметры модели. Подобраны архитектуры нейронных сетей для прогнозирования параметров вибрационного состояния в зависимости от геометрических погрешностей роторов.

Ключевые слова: вибрационное состояние, геометрические отклонения, дисбаланс, конечно-элементный анализ, нейронная сеть.

Abstract. The work solves the problem of predicting the vibrational state of the rotor of a low-pressure turbine of a gas turbine engine by creating its digital twin. The digital twin of the rotor includes a parametric 3D model specially created in the NX CAD module and a design project in the ANSYS system, in which the working conditions of the rotor are simulated using Modal and Harmonic Response modules. A series of experiments was carried out that made it possible to calculate the parameters of vibration acceleration and vibration displacement of the rotor bearings at critical rotational speeds, depending on geometric errors, for which the variable parameters of the model are responsible. The architecture of neural networks for predicting the parameters of the vibrational state depending on the geometric errors of the rotors is selected.

Keywords: vibration state, geometric deviations, imbalance, finite element analysis, neural network.

Вибрационное состояние турбины авиационного двигателя определяет надежность и долговечность ее работы. Основным источником гармонических возбуждающих сил действующих на турбоагрегат, являются дисбалансы вращающихся деталей, которые

в сочетании с упругоинерционными характеристиками узлов определяют уровень вибраций двигателя в целом. Значительное влияние величину дисбаланса оказывает точность изготовления отдельных деталей [1, 2].

Основы вибрационной надежности закладываются еще на этапе проектирования турбомашин и обеспечиваются достоверностью расчетов, в частности вибрационных характеристик. В условиях производства возможности существующих методов и средств вибрационной диагностики и мониторинга часто оказываются недостаточными, и возникает необходимость в разработке и внедрении принципиально новых методов исследований. В данной работе ставится задача получить при помощи компьютерного моделирования множество реализаций вибрационных характеристик в зависимости от геометрических погрешностей и провести прогноз этих характеристик, используя нейронные сети.

Методика и модели, используемые для прогнозирования. Процесс прогнозирования можно разбить на этапы, объединенные в методику, приведенную на рис. 1.

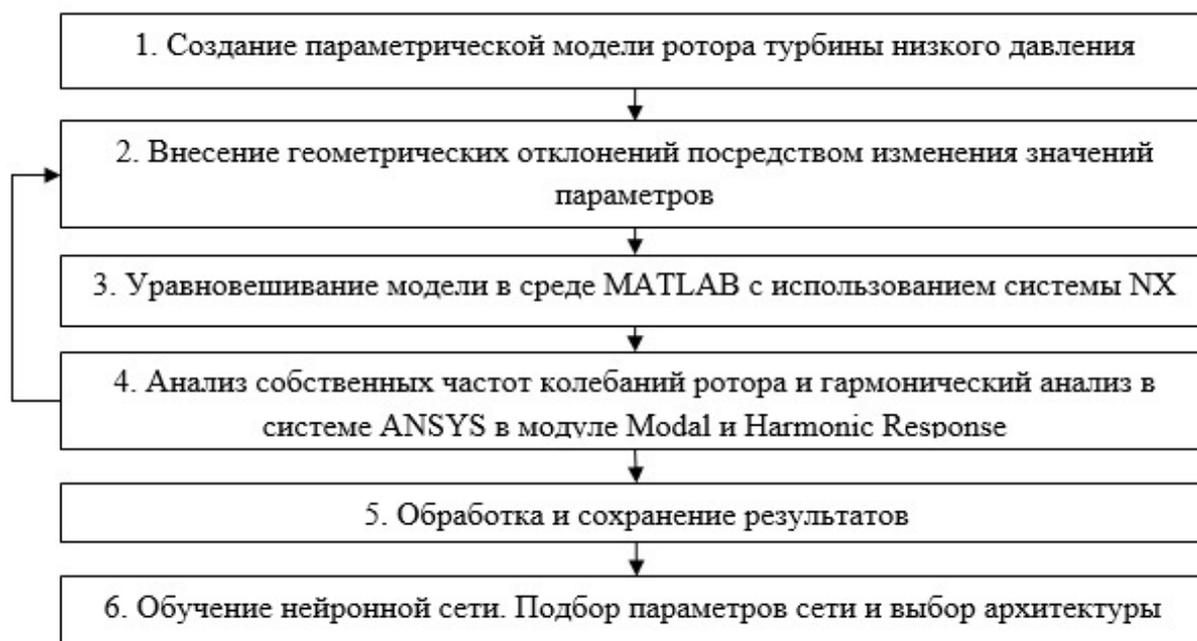


Рис. 1. Методика проводимых исследований по прогнозированию вибрационного состояния

Методика укрупненно включает в себя две части. В первой части выполняется имитационное моделирование и расчет вибрационных характеристик в соответствии с множеством реализаций отклонений в сборке ротора. Во второй части выполняется подбор нейронной сети и ее обучение на множестве полученных данных. Приведем описание этапов методики.

Параметрическая модель ротора. Для проведения анализа в САЕ-пакете ANSYS, была создана упрощенная 3D-модель третьей ступени турбины низкого давления (рис. 2). Данная сборочная единица состоит из трех деталей: вал, проставка и диск.



Рис. 2. Параметрическая 3D-модель, учитывающая геометрические отклонения

Изменяемыми параметрами в модели являются: смещения проставки и диска в плоскости, перпендикулярной оси вращения; геометрические параметры грузов на диске и валу, которые позволяют уравнивать возникающие из-за сдвигов дисбалансы.

Уравнивание модели в среде MATLAB. Разрабатываются планы экспериментов (множество реализаций величин геометрических смещений) и сохранены в файл формата *.xlsx. В программном пакете MATLAB было создано приложение, которое позволяет: открывать файл модели в программе NX; загружать величины параметров из файла *.xlsx и вносить их в модель; производить итерационный расчет геометрических параметров грузов на диске и валу, сводя возникающий дисбаланс к пренебрежительно малой величине (при этом используется математическое ядро NX для расчетов центра масс); сохранять полученные данные параметров грузов в файл *.xlsx. Связь с математическим ядром NX производится за счет использования модуля NX/Open API программы NX. Таким образом, по окончании данного этапа (третий этап методики) сохраняются все параметры модели для дальнейшего анализа в системе ANSYS.

Параметрическая конечно-элементная модель для расчета вибрационного состояния. В САЕ-пакете ANSYS для имитации вращения ротора и получения вибрационных характеристик сборки используются два модуля: Modal и Harmonic Response. Использование модуля Modal необходимо для определения критических частот и изгибных форм. Модуль Harmonic Response предназначен для определения амплитудно-частотных характеристик, деформаций, напряжений, скоростей модулируемого ротора. В исследованиях сохранялась информация по величинам виброускорений и виброперемещений [3] в местах опор ротора. На рисунке 3 приведены снимки конечно-элементной модели и графики получаемой характеристики виброускорения на опоре, ближайшей к диску.

Получаемые характеристики рассчитываются в виде ряда значений, в определенном диапазоне частот. Диапазон берется в районе критической частоты. Данный процесс (подстановка параметров в модель, расчета и сохранения получаемых данных) так же автоматизирован при помощи приложения в программе MATLAB.

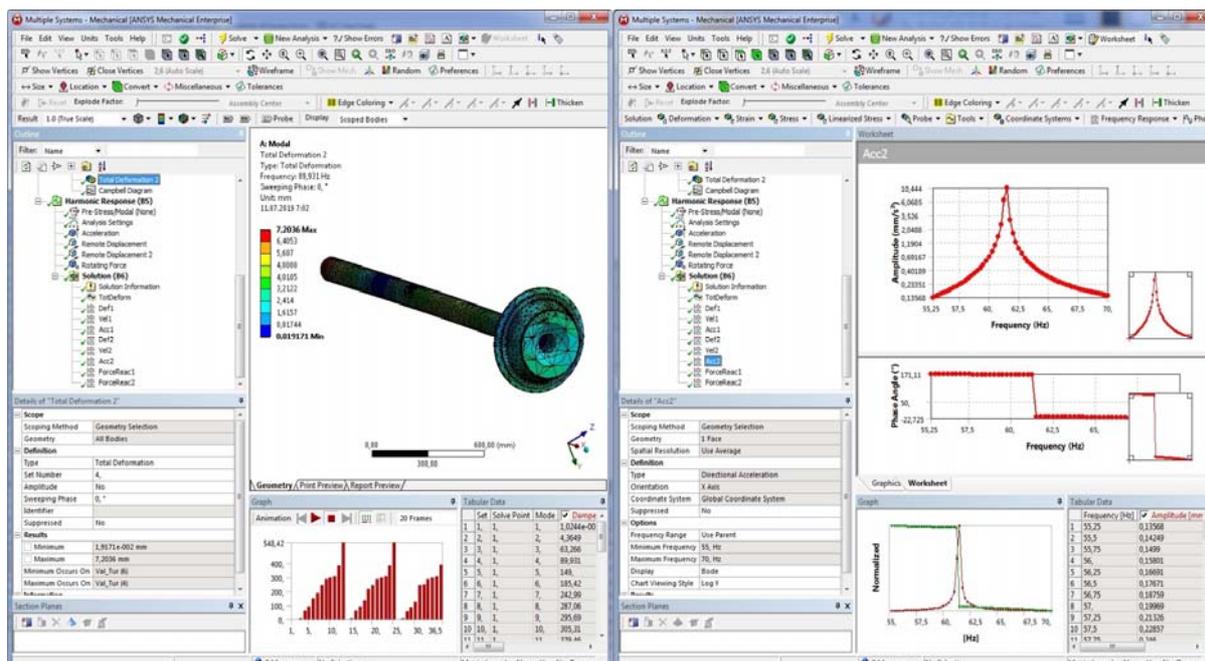


Рис. 3. Расчетный проект балансировки ротора турбины в ANSYS

После проведения расчетов в соответствии с планом экспериментов, в пакете MATLAB, используя метод трапеций, производится расчет каждой характеристики в виде одного числа.

Нейросетевая модель прогноза вибрационного состояния. Используя полученные на предыдущих этапах данные по геометрическим отклонениям, параметрам грузов и вибрационным характеристикам, можно обучить нейронную сеть для прогнозирования вибрационных характеристик в зависимости от геометрических отклонений и параметров балансировочных грузов. Для рассматриваемой задачи было выбрано две архитектуры: полносвязанные нейронные сети включающих два скрытых слоя нейронов: с сигмоидной и(или) линейной функцией активации [49] и радиально-базисные сети [50].

Первая представляет собой обобщенно-регрессионную нейронную сеть (GRNN, Generalized Regression Neural Networks), имеющей два слоя – скрытый радиальный базисный слой и выходной линейный слой. Число нейронов радиального базисного слоя равно числу элементов обучающего множества.

Вторая архитектура представляет собой однонаправленную сеть, обучаемую с применением алгоритма обратного распространения ошибки. Сеть содержит два слоя: скрытый слой состоит из нейронов с сигмоидной функцией в виде гиперболического тангенса; выходной слой состоит из нейронов с линейной функцией активации с насыщением.

Сеть GRNN имеет настраиваемый параметр влияния P_{spread} , влияющий на смещения в нейронах. Количество нейронов скрытого слоя $N_{н_с}$ в сети с сигмоидной функцией активации настраивается пользователем. Кроме того при обучении для сети с сигмоидной функцией настраивается количество эпох обучения $N_э$.

Оценка погрешностей прогноза. Для оценки результатов прогноза вибрационных параметров, уточнения структуры и выбора нейросетевой модели необходимо производить оценку ошибок прогнозирования. Оценка ошибок прогнозирования параметров производилась по двум критериям:

- 1) доля спрогнозированных величин в пределах допустимой погрешности $\delta_{\text{доп}}$;
 - 2) среднеквадратичная ошибка ($RSME$) предсказанных и фактических параметров.
- Приведем описание последовательности вычислений данных величин:

1. Вычисляется погрешность между прогнозируемым и фактическим параметрами:

$$\delta_a = \Pi_{\text{пр}} - \Pi_{\text{ф}}. \quad (1)$$

2. Производится подсчет количества ошибок в пределах допустимой области $N_{\Delta\text{доп}}$. Допустимая область ошибок вычисляется как процент (10%) от величины диапазона изменения прогнозируемого параметра.

3. Точность прогноза рассчитывается как отношение количества $N_{\text{доп}}$ к общему объему выборки:

$$\delta_{\text{доп}} = N_{\Delta\text{доп}} / N_{\text{общ}}. \quad (2)$$

4. Величина среднеквадратической ошибки вычисляется по формуле:

$$RSME = \sqrt{\sum \Delta^2 / N_{\text{общ}}}. \quad (3)$$

Результаты. Была проведена серия экспериментов. Все эксперименты делятся на три группы:

- 1) изменяется только величина смещения проставки вдоль оси OY (1 параметр);
- 2) производится смещение проставки в плоскости YOZ (2 параметра);
- 3) смещаются диск и проставка (4 параметра).

Смещение центров моделировалась по закону нормального распределения и не превышало 0,04 мм. Величины параметров нейронных сетей приведены в табл. 1.

1. Величины параметров нейронных сетей

Параметр	Значения
P_{spread}	0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2; 3
$N_{\text{н_с}}$	5; 10; 15; 20; 25; 30; 50; 70; 100
N_3	10; 15; 20; 25; 30; 50; 100

В каждой группе (1, 2 и 4 параметра) было просчитано по 450 экспериментов. В таблице 2 приведены результаты рассчитанных параметров $\delta_{\text{доп}}$ и $RSME$.

2. Погрешности прогноза для опоры 1 и 2

Тип сети	Параметр	1 группа		2 группа		3 группа	
		$\delta_{\text{доп}}$	<i>RSME</i>	$\delta_{\text{доп}}$	<i>RSME</i>	$\delta_{\text{доп}}$	<i>RSME</i>
Первая архитектура	Виброускорение 1	0,93	0,01	0,55	0,01	0,28	0,01
	Виброперемещение 1	0,89	31,39	0,48	2,19	0,59	2,66
	Виброускорение 2	0,68	0,1	0,80	0,03	0,36	0,05
	Виброперемещение 2	0,57	46,4	0,70	17,03	0,56	19,13
Вторая архитектура	Виброускорение 1	0,66	0,014	0,47	0,01	0,33	0,01
	Виброперемещение 1	0,68	42,14	0,62	2,14	0,63	2,92
	Виброускорение 2	0,7	0,11	0,77	0,03	0,48	0,04
	Виброперемещение 2	0,51	50,9	0,66	16,63	0,59	18,44

Таким образом, при одном входном параметре (первая группа экспериментов) точность прогноза наиболее высокая, наименьшая точность прогноза у третьей группы экспериментов. Для первой группы сеть GRNN дает меньшие погрешности, для второй и третьей группы меньшие погрешности дает вторая архитектура с сигмоидной функцией в скрытом слое.

Заключение. В работе сделана попытка с помощью компьютерного моделирования и нейронных сетей оперативно прогнозировать параметры виброускорения и виброперемещения в опорах ротора турбины. Полученные результаты позволяют говорить о возможности прогнозирования параметров вибрационного состояния, однако пока что они составляют существенную величину. Погрешности прогноза напрямую связаны с величиной обучающей выборки. Обученная нейронная сеть, позволит применять результаты моделирования в производстве, за счет существенно (доли секунды) быстрой работы по сравнению с расчетами в САЕ-пакетах. Дальнейшим развитием работы является изучение других сборочных единиц, поиск и оптимизация иных архитектур нейронных сетей и увеличение количества экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках стипендии Президента Российской Федерации (номер СП-262.2019.5).

Список использованных источников

1. **Гареев, А. М.** Динамическая балансировка роторов : методические указания / А. М. Гареев. – Самара : СГАУ, 2012. – 39 с.
2. **Моделирование** сопряжения деталей по плоско-цилиндрическим поверхностям / М. А. Болотов, В. А. Печенин, Н. В. Рузанов и др. // СТИН. – 2017. – № 3. – С. 22 – 28.
3. **Бондарчук, П. В.** Прочность пневмо- и гидромашин / П.В. Бондарчук. – Самара : СГАУ, 2013. – 44 с.
4. **Медведев, В. С.** Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
5. **Vasserman, P. D.** Advanced methods in neural computing / P. D. Vasserman. – New York : Van Nostrand Reinhold, 1993. – 255 p.

УДК 621.941

Скоков А. А.¹, Соколов М. В.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (89106) 582725, e-mail: tmbsanek@mail.ru),

²(Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ
ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ НА СТАНКЕ С ЧПУ**

Skokov A. A.¹, Sokolov M. V.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (8960) 6653010, e-mail: tmbsanek@mail.ru),

²(Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

**METHODS OF RESEARCH OF TECHNOLOGIES
OF CONSTRUCTION OF THE BODY OF THE PRESSURE REGULATOR
IN STAINLESS STEEL ON CNC MACHINE**

Аннотация. Проведено исследование технологий изготовления корпуса регулятора давления из нержавеющей стали на станке с ЧПУ, были подобраны благоприятные режимы резания и инструмент.

Ключевые слова: обработка нержавеющей стали и изготовление корпуса на токарных станках с ЧПУ.

Abstract. The study of manufacturing technologies of stainless steel pressure regulator body on CNC machine was carried out, favorable cutting conditions and tools were selected, coolant analysis was carried out.

Keywords: processing of stainless steel and manufacture of the body on CNC machine.

Мембранный регулятор давления прямого действия с фиксированной настройкой выполнен по схеме с полной разгрузкой от входного давления, что позволяет эффективно стабилизировать давление на выходе регулятора в узком диапазоне значений.

Регулятор давления РД32М 0,25 (рис. 1) состоит из: корпуса с седлом 1; чувствительного элемента – мембраны 2; разгрузочного поршня 3; тарели 4; демпфера 5; пружины 6; клапана аварийного 7.

Регулятор нормально открыт. При подаче на Вход рабочей среды на Выходе РД начинается рост давления.

Выходное давление действует на мембрану 2, нагруженную с противоположной стороны настроечной пружиной 6, задающей уровень Р-вых., который должен поддерживать регулятор.

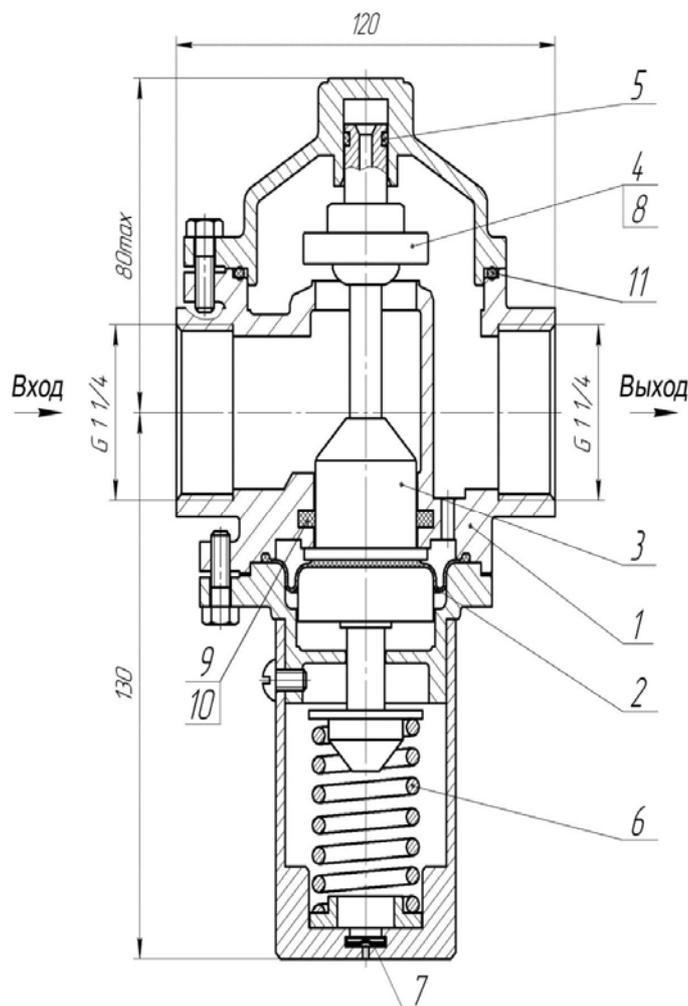


Рис. 1. Регулятор давления РД32М 0,25:

- 1 – корпус с седлом; 2 – чувствительный элемент – мембрана РД 32.0,25.02-114 (резина);
 3 – разгрузочный поршень; 4 – тарель СУИЕ.306577.501 (металло-резина);
 5 – демпфер – кольцо СУИЕ.711141.032 (фторопласт-4); 6 – пружина;
 7 – клапан аварийный СУИЕ.752464.001 (резина); 8 – кольцо 013,5-016,5-19 ИРП 1175
 ГОСТ 9833; 9 – кольцо 1-38-3 ИРП 1175 ОСТ В38.052-80;
 10 – манжета СУИЕ.754173.003 (фторопласт-4);
 11 – Кольцо 090-095-30 ИРП 1175 ГОСТ 9833

При превышении этого уровня мембрана вместе с разгрузочным поршнем 3, тарелью 4 и демпфером 5 перемещается, уменьшая тарелью проходное сечение седла корпуса 1. В результате уменьшается поступление рабочей среды на Выход РД и давление в выходной полости падает до заданного пружиной уровня.

Демпфирование автоколебаний подвижных частей РД осуществляется прокачкой жидкости из замкнутой полости в проточную через каналы демпфера 5.

В случае прорыва мембраны давление в подмембранной полости повышается, и резиновый аварийный клапан 7 перекрывает дыхательное отверстие, предотвращая залив помещения.

Рассмотрим изготовление корпуса регулятора давления. Данная деталь производилась на токарно-винторезном станке, затрачивая 1,88 часа (рис. 2).

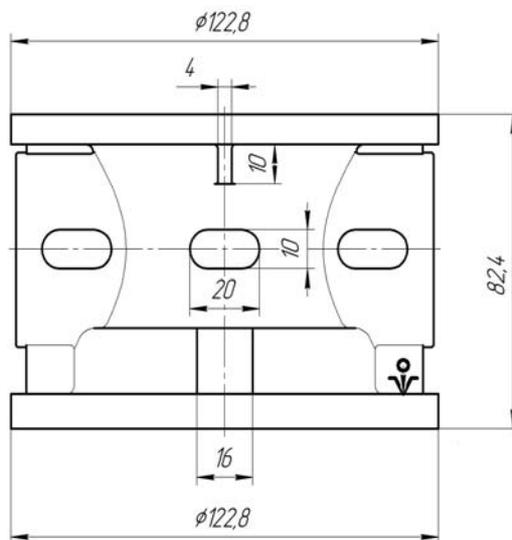


Рис. 2. Эскиз корпуса. Литье

Токарно-винторезный станок 16К20 предназначен для обработки цилиндрических, конических и сложных поверхностей – как внутренних, так и наружных, а так же для нарезания резьбы. Для обработки торцовых поверхностей заготовок применяются разнообразие резцы, развертки, сверла, зенкеры, а так же плашки и метчики.

Корпус отливался из стали 12Х18Н9ТЛ ГОСТ 5632. Изготовление корпуса начинается с подготовки форм для его отливания. Как правило, база получается неровной, в связи с этим начинается черновая обработка детали. На разных плоскостях: фрезеруются литники, не затрагивая основной плоскости; обтачивается поверхность, подрезав торец с равномерным распределением торцевого биения; обтачиваются канавки в соответствии с размерами (рис. 3).

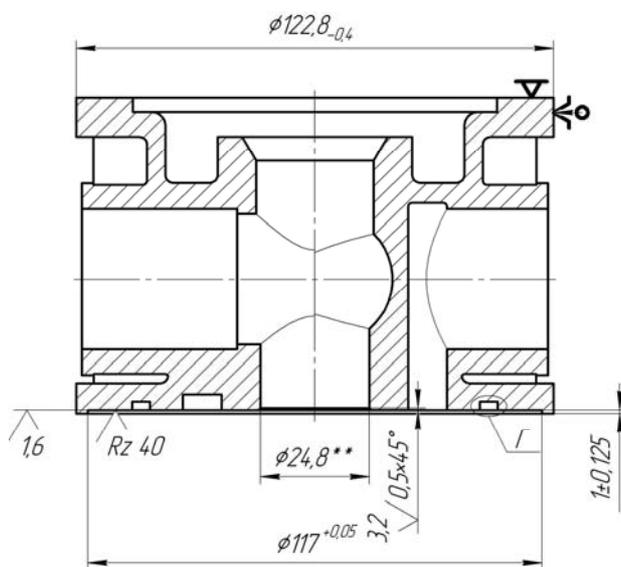


Рис. 3. Эскиз корпуса с канавками

При чистовой обработке все размеры доводятся до минимального допуска.

В итоге изготовление корпуса затрачивало слишком большое количество рабочей силы, времени, материала; из-за этого снижалась себестоимость продукта. При производстве отдельных частей детали, были выявлены недопустимые погрешности. В связи с вышеперечисленным, было принято решение оптимизации производства. Корпус регулятора давления стал изготавливаться на токарном станке с ЧПУ Daewoo Lynx 210A (рис. 4).

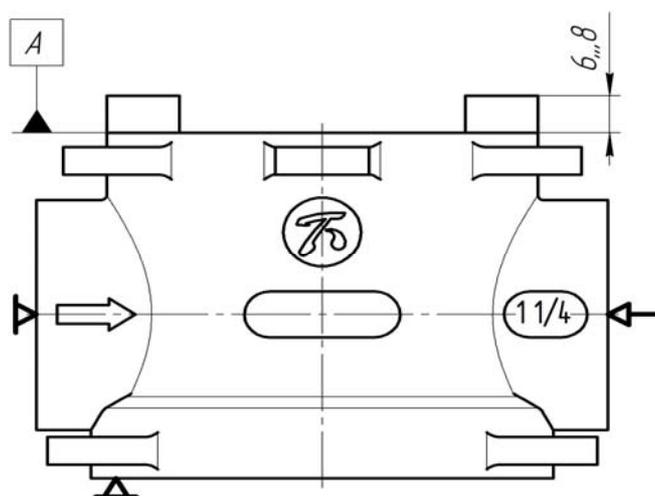


Рис. 4. Эскиз корпуса, изготовленного на станке Daewoo Lynx 210A

Более прогрессивный способ изготовления корпуса регулятора давления РД32М 0.25 можно осуществить на токарном станке с ЧПУ Daewoo Lynx 210A.

Токарный станок Daewoo Lynx 210A – это высокоскоростной аппарат, который высококачественно выполняет различные токарные и фрезерные работы. Модель представляет собой мощный профессиональный и надежный инструмент, часто применяемый в промышленности.

Изготовление детали на данном станке занимает 1,55 часа, что существенно снизило время выполнения работы. Процесс производства также делится на две стадии: черновая и чистовая обработки. Во время черновой: подготавливаются формы, отливается корпус из стали 12Х18Н9ТЛ ГОСТ 5632 (рис. 5), фрезеруются литники, подрезаются торцы, растачиваются резцы и фаски, канавки в соответствии размеру и т.д. Для изготовления корпуса используются: резец подрезной ВК8 16/20, резец проходной отогнутый ВК8 16/20, напильник $L = 250$ № 2, штангенциркуль ШЦ-1-125-0,25, резец расточной для глухих отверстий, резец для сквозных отверстий, резец канавочный $v = 4$, резец канавочный $v = 2,5$ и т.д.

При чистовой обработке все размеры и припуски доводятся до минимального допуска (рис. 6)

Итак, перевод производства корпуса регулятора давления РД32М 0,25, с токарно-винторезного станка 16К 20 на токарный станок с ЧПУ Daewoo Lynx 210A, привело к налаживанию оптимизации производства. Было сокращено достаточное количество времени, затраченное на изготовление детали. В соответствии с этим увеличился объем

производства данной продукции, что ни могло ни сказаться на заметной прибыли. Были исправлены ошибки при производстве отдельных частей детали и их дальнейшее предотвращение.

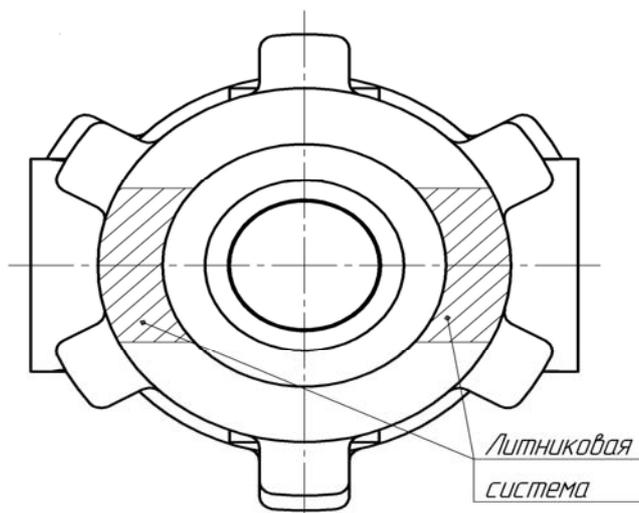


Рис. 5. Литниковая система

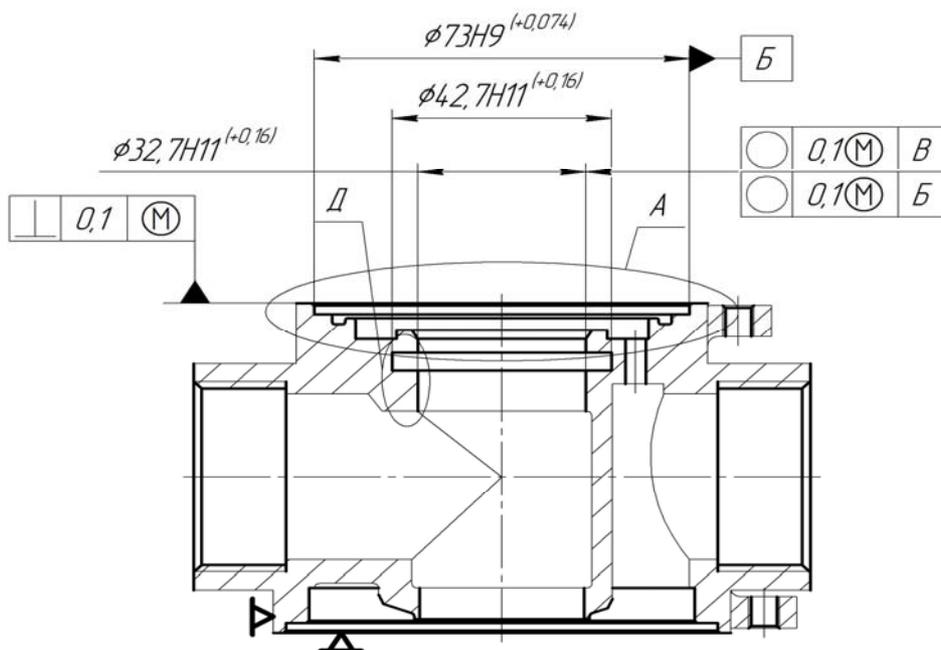


Рис. 6. Эскиз корпуса с канавками, изготовленного на станке Daewoo Lynx 210A

В условиях развития технологического уклада шестого уровня сокращение сроков проектирования и подбор оптимальных параметров процесса резания – это важнейшие требования, предъявляемые к разработке технологического процесса. Разработка и внедрение современных систем автоматизированного проектирования (САПР) [2 – 4] позволяет решить эти проблемы в большинстве случаев, когда технолог самостоятельно применяет решение о выборе тех или иных режимов резания, руководствуясь собственным опытом.

Исследования проводятся в соответствии со следующими направлениями научной деятельности, которые развиваются на кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»: прогрессивные технологии и оборудование машиностроительного производства; выбор, создание новых и адаптация интеллектуальных обучающих систем автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки и сборки; разработка методов и способов повышения качества обработки деталей из металлов [2 – 6].

Список использованных источников

1. **Информационный** портал фирмы АО «ТВЭСТ». – URL : http://twest.tmweb.ru/catalog/regulatory_davleniya/regulator_davleniya_pryamogo_deystviya_rd32m_0_25/.
2. **Алтунин, К. А.** Структура и адаптация модели представления знаний процесса токарной обработки : монография / К. А. Алтунин, М. В. Соколов, Р. В. Дякин. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2017. – 104 с.
3. **Алтунин, К. А.** Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22. № 1. – С. 122 – 133.
4. **Altunin, K. A.** Development of information support for intelligent cad of cutting processes / K. A. Altunin, M. V. Sokolov // Advanced Materials and Technologies. – 2017. № 2. – С. 67 – 77.
5. **Соколов, М. В.** Исследование токарной обработки деталей из коррозионностойких сплавов : монография / М. В. Соколов // LAP LAMBERT Academic Publishing. – Саарбрюккен, Германия, 2018. – 124 с.

УДК 621.941

Дежа А. А.¹, Соколов М. В.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (8900) 4961773, e-mail: dezha.anton@yandex.ru),

²(Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА СТАДИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ

Dezha A. A.¹, Sokolov M. V.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (8900) 4961773, e-mail: dezha.anton@yandex.ru),

²(Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

PROTECTION AGAINST CORROSION OF ALUMINUM ALLOYS AT THE STAGE OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION OF PRODUCTS

Аннотация. Рассмотрены виды коррозии и средства защиты алюминиевых сплавов на стадии технологической подготовки производства изделия.

Ключевые слова: защита от коррозии алюминиевых сплавов.

Abstract. In this paper, the types of corrosion and means of protection of aluminum alloys at the stage of technological preparation of the product production are considered.

Keywords: corrosion protection of aluminum alloys.

Высокая коррозионная стойкость алюминия и его сплавов определяется свойством алюминия легко пассивироваться, образуя на поверхности устойчивую оксидную пленку.

Однако конструкции и изделия из алюминия эксплуатируются в различных условиях и, естественно, подвергаются коррозии.

Наиболее типичным видом коррозии для алюминия и его сплавов в атмосферных условиях и нейтральных водных растворах является точечная коррозия.

Конструкционные сплавы средней и повышенной прочности имеют склонность к межкристаллитной коррозии, проявляющейся в зависимости от технологических и эксплуатационных факторов.

Расслаивающая коррозия алюминиевых (РСК) сплавов представляет собой поверхностную коррозию, развивающуюся в направлении максимальной пластической деформации и приводящей к отслаиванию частиц и пластин металла и полному разрушению детали. РСК подвержены в атмосферных условиях и морской среде прессованные изделия, катанные плиты и нагартованные листы среднепрочных и высокопрочных сплавов.

Коррозионное растрескивание (КР) высокопрочных и среднепрочных сплавов происходит в результате совместного воздействия коррозионной среды и растягивающих напряжений.

Коррозионная усталость (КУ) алюминиевых сплавов происходит при одновременном воздействии циклических напряжений и коррозионной среды.

Коррозионно-усталостные трещины распространяются, как правило, транскристаллитно и зарождаются от коррозионных поражений на поверхности.

Фреттинг-коррозия на деталях из алюминиевых сплавов возникает при контакте этих деталей с деталями из алюминиевых сплавов или других металлов и подвергаемых при эксплуатации незначительным перемещениям или вибрациям, в результате чего возникают поверхностные повреждения в местах контактов.

Алюминиевые сплавы в различных климатических и производственных условиях имеют различную коррозионную стойкость. Наиболее агрессивной коррозионной средой для алюминиевых сплавов является тропическая морская вода и атмосфера химических производств.

Далее, в порядке уменьшения агрессивного воздействия среды на алюминиевые сплавы, идут следующие среды: северная приморская, промышленная, южная приморская, сельская атмосфера.

Полуфабрикаты из алюминия и низколегированных термически неупрочняемых сплавов алюминия систем Al-Mn, Al-Mg, а также термически упрочняемые сплавы системы Al-Mg-Si, обладают высокой коррозионной стойкостью.

Сплавы систем Al-Cu-Mg и Al-Cu-Mn обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью, но при технологических и эксплуатационных нагревах выше допускаемых пределов приобретают склонность к РСК, КР.

Сплавы систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu имеют хорошую стойкость к общей коррозии, но при определенных условиях проявляется чувствительность к КР, РСК.

Защиту от коррозии алюминиевых сплавов можно разделить на две группы:

1 Защита от коррозии алюминиевых сплавов металлургическими и химическими методами.

2 Защита от коррозии алюминиевых сплавов лакокрасочным покрытием.

Для надежной защиты от коррозии алюминиевых сплавов только анодного окисления или химического оксидирования недостаточно. Надежной защитой от коррозии алюминиевых сплавов является сочетание анодного или химического окисления с окраской поверхности алюминиевых сплавов.

Существующая система лакокрасочных покрытий для окраски алюминиевых сплавов включает в себя 1–2 слоя грунтовки и 2–3 слоя эмали. Иногда для защиты внутренних поверхностей изделий используется только покрытие грунтовкой.

Для грунтовки используются только пассивирующие покрытия, обладающие хорошей адгезией к алюминиевым сплавам. Совершенно недопустимо применение грунтовок, содержащим свинцовый сурик, который ускоряет коррозию алюминия.

Лаковые покрытия применяют для конструкций из плакированных алюминиевых сплавов, предварительно подвергнутых анодному окислению с последующим уплотнением в воде анодно-окисной пленки.

Для обеспечения коррозионной стойкости в алюминиевых сплавах в промышленной атмосфере целесообразно применение перхлорвиниловых эмалей, для защиты

изделий в морских условиях и районах с повышенной влажностью целесообразно применять полиуретановые, акрилуретановые, меламино-алкидные и полиакриловые эмали.

Перхлорвиниловые эмали обладают хорошей влаго- и химической стойкостью и широко применяются для окраски судов, самолетов и вертолетов, металлических конструкций, наземного транспорта.

Полиакриловые эмали стойки в атмосферных условиях. Меламино-алкидные эмали обладают высокими декоративными свойствами, водостойкостью, твердостью, эластичностью, атмосферо- и светостойкостью.

Полиуретановые эмали имеют красивый внешний вид, высокую твердость, высокую абразивоизнашиваемость, стойкость к действию пресной и морской воды, минеральных вод и др.

На кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» активно развивается следующее направление научной деятельности: прогрессивные технологии и оборудование машиностроительного производства; выбор, создание новых и адаптация интеллектуальных обучающих систем автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки и сборки; разработка методов и способов повышение качества обработки деталей из металлов [2 – 5].

Список использованных источников

1. **Белецкий, В. М.** Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение) : справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов ; под ред. академика РАН И. Н. Фридляндера. – К. : «КОМИТЕНТЕХ», 2005. – 365 с.
2. **Алтунин, К. А.** Концепция создания информационного обеспечения интеллектуальной системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения : монография / К. А. Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2015. – 112 с.
3. **Алтунин, К. А.** Разработка системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2016. – 132 с.
4. **Соколов, М. В.** Интеллектуальная система автоматизированного проектирования процессов резания при токарной обработке материалов / К. А. Алтунин, М. В. Соколов – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2018 – 256 с.
5. **Соколов, М. В.** Исследование токарной обработки деталей из коррозионностойких сплавов : монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, Саарбрюккен, Германия, 2018. – 124 с.

УДК 621.941

Дежа А. А.¹, Соколов М. В.²

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (8900) 4961773, e-mail: dezha.anton@yandex.ru),

²(Тел. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ ЧПУ**

Dezha A. A.¹, Sokolov M. V.²

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (8900) 4961773, e-mail: dezha.anton@yandex.ru),

²(Tel. (89106) 582725, e-mail: msok68@mail.ru)

**RESEARCH METHODOLOGY METHODS OF IMPROVEMENT
OF QUALITY OF PROCESSING OF DETAILS
FROM ALUMINUM ALLOYS CNC TURNING LATHES**

Аннотация. Проведено исследование обработки детали из алюминия на токарном станке с числовым программным управлением, рассмотрены различные сплавы алюминия и влияние конструкции режущего инструмента на качество поверхности.

Ключевые слова: повышение качества обработки, алюминиевый сплав.

Abstract. A study was made of machining aluminum parts on a lathe with numerical control, various aluminum alloys and the influence of the design of the cutting tool on the surface quality were considered.

Keywords: improving the quality of processing, aluminium alloy.

Важнейшим условием успешного развития предприятия сегодня является производство конкурентоспособной продукции. Основой конкурентоспособности является качество выпускаемой продукции.

Качество продукции – важнейший показатель деятельности предприятия.

Что же такое качество продукции? Данное понятие регламентировано ГОСТ 15 467–79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Качество – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением [1].

На кафедре «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» активно развивается следующее направление научной деятельности: прогрессивные технологии и оборудование машиностроительного производства; выбор, создание новых и адаптация интеллектуальных обучающих систем автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки и сборки; разработка методов и способов повышения качества обработки деталей из металлов [2 – 5].

К механической обработке обычно относят все процессы обработки резанием: токарная обработка, фрезерование, строгание, сверление, пиление. Поскольку различных алюминиевых сплавов довольно много, то они могут иметь различные характеристики механической обрабатываемости. Термин обрабатываемость включает все свойства, которые имеют отношение к процессу механической обработки:

- износ режущего инструмента;
- необходимая сила резания;
- форма стружки;
- качество поверхности после механической обработки.

Механическая обрабатываемость не является таким свойством материала, которое можно было бы определить одним характерным параметром. Она является комплексным технологическим термином. Обрабатываемость зависит как от физических и химических свойств алюминия или алюминиевого сплава, так и от производственного процесса, который применялся при изготовлении алюминиевого полуфабриката или изделия. Кинематическое взаимодействие инструмента и детали является решающим критерием процесса механической обработки. Строго говоря, термин «обрабатываемость» должен определяться отдельно для каждого отдельного процесса механической обработки (токарной обработки, сверления и т.д.). Обычно из-за четко определенного взаимодействия инструментов и деталей термин «обрабатываемость» относят к процессу токарной обработки. Каждая технология, которую применяют при механической обработке, зависит от нескольких независимых параметров:

- параметры резания и геометрия инструмента;
- применяемое оборудование;
- материал режущего инструмента.

Форма стружки является важным критерием механической обработке алюминия. Обычно стараются получить короткую цилиндрически свитую стружку, спирально свитую стружку или просто спиральную стружку. Различных типов алюминиевой стружки довольно много. При большом разнообразии алюминиевых сплавов они могут давать почти все известные формы стружки. Обычно соблюдается следующая закономерность: чем тверже и прочнее алюминиевый сплав, тем короче его стружка. Из нее вытекают следующие общие правила:

- чистый алюминий и мягкие деформируемые алюминиевые дают очень длинную стружку, что вынуждает принимать специальные корректирующие меры, например, специальные приспособления для ломки стружки.
- высокопрочные алюминиевые сплавы (например, AlMg5, AlMgSi1,0) не представляют никаких проблем по форме стружки;
- доэвтектические литейные алюминиевые сплавы (AlSi8Cu3, AlSi10Mg и т.п.) дают короткую стружку кольцевой и спиральной формы, которая легко удаляется.
- эвтектические литейные алюминиевые сплавы (AlSi12) склонны образовывать длинную стружку;
- заэвтектические литейные алюминиевые сплавы всегда образуют короткую, фрагментированную стружку, которую часто трудно удалить.

Алюминиевые сплавы с улучшенной обрабатываемостью резанием содержат низкоплавкие мягкие металлы, которые способствуют образованию короткой стружки. Обычно – это сплавы с добавками свинца или висмута. Одним из технологических параметров, которые влияют на форму стружки, является геометрия зуба режущего инструмента. Так, при пониженном переднем угле образуются более короткая стружка в тех сплавах, для которых обычно характерна длинная стружка. Это происходит за счет сжатия стружки (рис. 1).

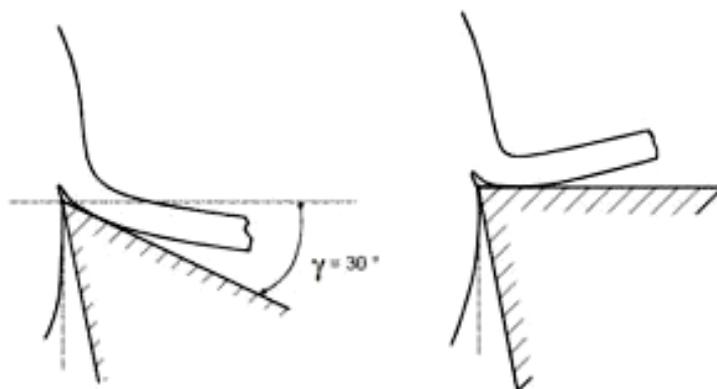


Рис. 1. Сжатие стружки при большом и малом переднем угле зуба

В общем случае качество поверхности, которая образуется при механической обработке алюминия и алюминиевых сплавов, зависит от трех независимых параметров:

1. Кинематическая шероховатость: теоретическая глубина шероховатости (от дна до вершины), которую рассчитывают на основе относительного движения режущего инструмента и детали.

2. Шероховатость механически обработанной поверхности: характерное поведение материала при его механическом разделении, связанное с особенностями его микроструктуры;

3. Внешние воздействия: такие параметры, как устойчивость системы, состояние режущих кромок и т.п.; эти параметры особенно важны при механической обработке алюминия с большой скоростью резания.

В общем случае влияние материала на степень шероховатости поверхности детали после ее механической обработки, т.е. на качество механически обработанной поверхности, зависит от тех же факторов, что и форма стружки. В отношении деформируемых алюминиевых сплавов эта закономерность выглядит так: чем выше прочность и твердость алюминиевого сплава, который подвергают механической обработке, тем более гладкую поверхность можно на нем получить. Что касается литейных алюминиевых сплавов, то на их механически обработанную поверхность определенное влияние оказывает их микроструктура. Твердые частицы, которые внедрены в мягкую матрицу, могут вырываться с образованием грубой поверхности. Тем не менее, в целом, качество поверхности механически обработанной поверхности литейных сплавов также может считаться хорошей и часто очень хорошей. Скорость резания является важным пара-

метром механической обработки, который оказывает влияние на качество поверхности. Обычно величина шероховатости является обратно пропорциональной скорости резания. При низких скоростях резания шероховатость поверхности очень резко возрастает из-за повышенного налипания на режущей кромке. При механической обработке алюминия области низких скоростей резания, как правило, избегают. Налипание на режущую кромку – это явление, которое является типичным для алюминия. Оно состоит в повторяющемся налипании алюминиевых частиц на режущую кромку инструмента с последующим их срывом с кромки (рис. 2).

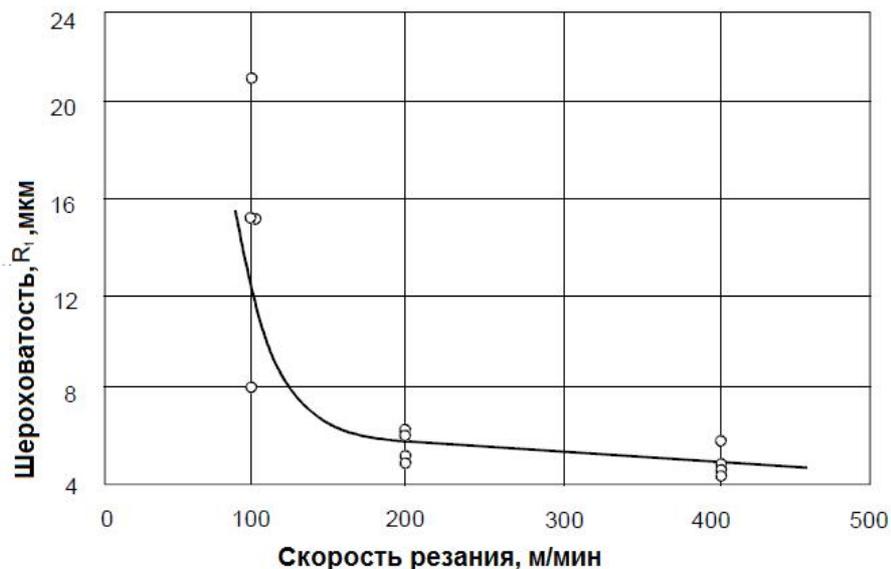


Рис. 2. Налипание алюминия на режущую кромку при низкой скорости резания

С точки зрения механической обрабатываемости алюминиевые сплавы подразделяют на следующие группы (в порядке повышения трудности механической обработки).

- Группа 1. Деформируемые алюминиевые сплавы с низкой прочностью;
- Группа 2.1. Деформируемые алюминиевые сплавы повышенной прочности;
- Группа 2.2. Алюминиевые сплавы для механической обработки;
- Группа 3.1. Алюминиево-кремниевые сплавы с содержанием кремния до 10%;
- Группа 3.2. Эвтектические алюминиево-кремниевые сплавы;
- Группа 3.3. Заэвтектические алюминиево-кремниевые сплавы [5].

Влияние конструкции режущего инструмента на качество поверхности заключается в его способности образовывать «правильную» стружку. Важно, чтобы стружка могла гладко проходить режущую поверхность инструмента. Это значит, что передний угол зуба должен быть достаточно большой, смазка должна быть достаточной, а поверхность режущего инструмента достаточно гладкой. Хорошую гладкую поверхность нельзя получить при работе с изношенным режущим инструментом. Основные факторы, которые влияют на качество поверхности при механической обработке алюминия, задают четыре отдельных области качества механической обработки (рис. 3).

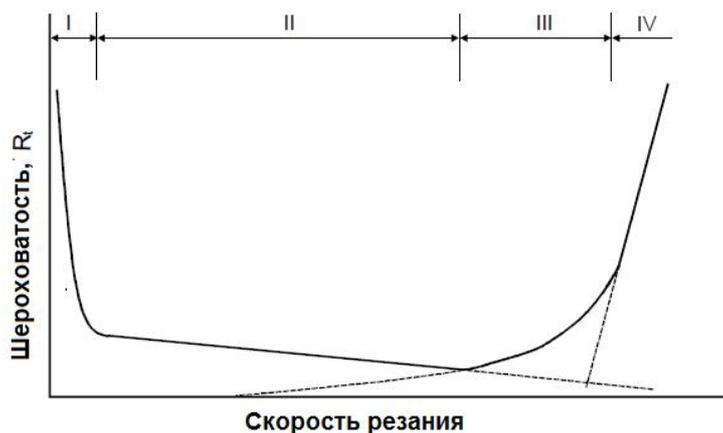


Рис. 3. Зависимость качества поверхности и скорость резания при механической обработке алюминия

Область I. Из-за налипания на режущую кромку качество поверхности является неудовлетворительным; вместо резания материал подвергается разрывам. Этой области параметров нужно избегать.

Область II. Снижение шероховатости с увеличением скорости резания.

Область III. Увеличение влияния инструмента и оборудования, например, вибрации резца, в той области, которая, в принципе, благоприятна для механической обработки алюминия. Поэтому, чтобы добиться лучших результатов при этой скорости резания необходимо применять оборудование, которое разработано специально для алюминия.

Область IV. Плохое качество поверхности. Стружка собирается на обрабатываемом материале и налипает (приваривается) к режущему инструменту, что приводит к повреждению обрабатываемой поверхности. Такое, например, происходит при механической обработке литейных сплавов при применении изношенного режущего инструмента и высоких скоростей резания.

Износа режущего инструмента с образованием царапин, как это характерно при механической обработке стали, не наблюдается при механической обработке алюминия и алюминиевых сплавов. Износ инструмента при механической обработке алюминия происходит за счет истирания режущей поверхности. Поэтому решающим критерием для оценки срока службы режущего инструмента объективно является ширина износа VB, показанная на рис. 4. Износ режущей поверхности зависит от температуры и происходит в основном путем истирания. При использовании инструмента с карбидными насадками максимальная величина 0,3...0,5 мм для величины износа VB считается нормальной.

На износ режущего инструмента оказывают влияние как материал обрабатываемой детали, так параметры резания. Материал детали имеет особенно большое влияние на износ режущего инструмента.

1. Износ увеличивается с увеличением количества крупных твердых частиц, которые внедрены в алюминиевую матрицу. Такими частицами являются, например, первичные выделения частиц кремния в заэвтектическом алюминиевом сплаве. По этой причине алюминиевые отливки вызывают сильный износ режущего инструмента. Этот

износ особенно высокий в случае литейных заэвтектических поршневых алюминиевых сплавов. С другой стороны, деформируемые сплавы с низким содержанием кремния вызывают минимальный износ.

2. Износ возрастает с увеличением прочности алюминиевых сплавов. Твердые частицы, которые находятся в мягкой алюминиевой матрице, довольно легко из нее вырываются, не нанося большого вреда инструменту. Однако, если алюминиевая матрица имеет повышенную твердость, то включения вырываются уже труднее и поэтому причиняют инструменту больший износ. Наконец, износ инструмента зависит от сопротивления износу самого инструмента.

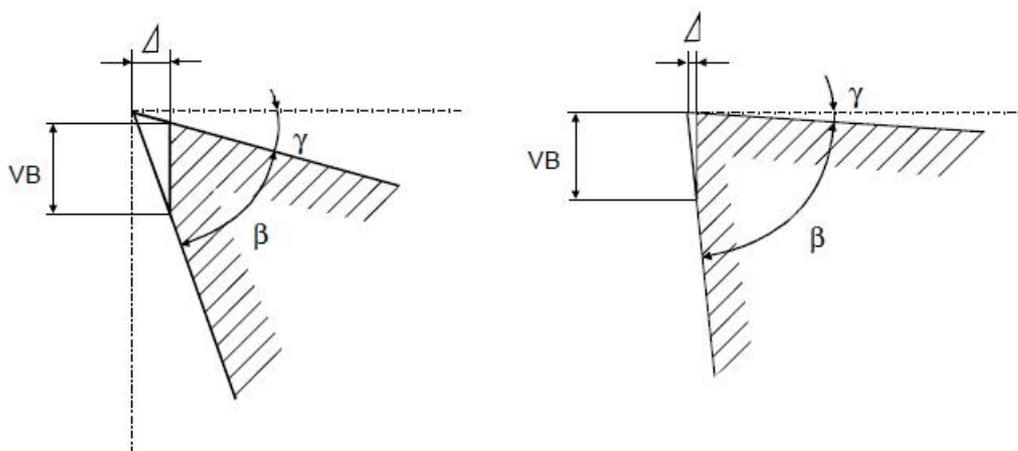


Рис. 4. Износ режущей кромки

Что касается условий резания, то скорость резания имеет самое большое влияние на срок службы режущего инструмента. На рисунке 5 представлен пример зависимости срока службы режущего инструмента при механической обработке алюминиевых сплавов для литья в кокиль. В случае деформируемых алюминиевых сплавов срок службы режущего инструмента измеряется скорее в сменах или днях, чем в минутах, как для литейных сплавов с высоким содержанием кремния. Поскольку износ режущего инструмента зависит также от других параметров механической обработки, то срок службы можно оценивать только для определенного набора параметров. Другими параметрами, которые влияют на износ режущего инструмента являются:

- смазочно-охлаждающие эмульсии – эффективное охлаждение снижает износ инструмента;
- прерывистость резания, например, при наличии в материале пор, повышает износ инструмента;
- скорость подачи и глубина резания. Износ инструмента увеличивается с увеличением толщины поперечного сечения стружки.

Для оценки влияния материала на условия резания применяют так называемое удельное усилие резания. Это удельное усилие резания имеет корреляцию с режущим усилием, материалом и размерами стружки. В общем случае применяются следующие положения.

1. Различные алюминиевые сплавы имеют различия в удельных режущих усилиях, но относительно небольшое.

2. Обычно принимают, что удельное режущее усилие для алюминия и алюминиевых сплавов составляет 30% от такого усилия для стали.

3. Величину удельного режущего усилия алюминиевого сплава нельзя вывести из его химического состава или физических свойств.

4. Удельное режущее усилие нужно определять экспериментально для каждого отдельного случая.

Необходимое режущее усилие зависит не только от размеров стружки, но также от смазочно-охлаждающей эмульсии и конструкции режущего инструмента:

– смазочно-охлаждающая эмульсия оказывает два противоположных действия. С одной стороны, охлаждение снижает температуру в зоне реза и тем самым повышает величину требуемого режущего усилия. С другой стороны, смазка облегчает движение стружки и снижает величину требуемого усилия резания;

– геометрия режущего инструмента влияет на усилие резания через передний угол зуба γ . Чем больше этот угол, тем меньше сжатие стружки и ниже усилие резания;

– степень износа режущей кромки имеет относительно большое влияние. Поэтому в ходе длительной механической обработки величина режущего усилия возрастает.

Список использованных источников

1. **ГОСТ 15 467–79.** Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.

2. **Алтунин, К. А.** Концепция создания информационного обеспечения интеллектуальной системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения : монография / К. А. Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2015. – 112 с.

3. **Алтунин, К. А.** Разработка системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2016. – 132 с.

4. **Соколов, М. В.** Интеллектуальная система автоматизированного проектирования процессов резания при токарной обработке материалов / К. А. Алтунин, М. В. Соколов – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2018 – 256 с.

5. **Соколов, М. В.** Исследование токарной обработки деталей из коррозионностойких сплавов : монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, Саарбрюккен, Германия, 2018. – 124 с.

УДК 574

Соколов М. В.¹, Усман Ф. Д.²

¹Тамбовский государственный технический университет,
Россия, г. Тамбов (Тел. (89106)582725, e-mail: msok68@mail.ru),

²Учащийся по программе DAAD, Германия
(Тел. (89108)533961, e-mail: fidelisjonah@mail.ru)

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Sokolov M. V.¹, Usman F. D.²

¹Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (89106)582725, e-mail: msok68@mail.ru),

²Student in the DAAD program, Germany
(Tel. (89108)533961, e-mail: fidelisjonah@mail.ru)

ACOUSTIC METHOD FOR PREDICTING WEAR TOOLS FOR TURNING PROCESSING

Аннотация. В данной работе на основе анализа влияния условий механической обработки, закономерностей изнашивания и разрушения инструмента на основные характеристики процесса резания разработаны и приведены методики акустического исследования и прогнозирования работоспособности металлорежущего инструмента при токарной обработке.

Ключевые слова: акустический шум, износ, режущий инструмент, прогнозирование износа, затупление инструмента.

Abstract. In this paper, based on the analysis of the influence of machining conditions, wear patterns and tool failure on the main characteristics of the cutting process, methods for the acoustic study and prediction of the performance of the metal-cutting tool for turning.

Keywords: acoustic noise, wear, cutting tools, wear prediction, tool dulling.

В данной работе исследована система прогнозирования акустическим методом износа инструмента при различных режимах токарной обработки детали и сделано предположение о влиянии физических, химических и механических явлений, происходящих на микроуровне, которые приводят к изменению свойств материала, а это изменение в значительной степени непредсказуемо из-за случайного характера движения атомов и ничтожного, на первый взгляд, разброса первичных свойств изделий, предназначенных для одной и той же цели.

Выделение информативных полос. Известно, что различные элементы технологической системы и сам процесс резания по-разному «шумят» на различных частотах. Поэтому необходимо выделить полосу частот, амплитуда колебаний в которой зависит только от элементов режима резания и величины износа инструмента. Для решения этой задачи был построен план эксперимента (табл. 1, 2), в котором подача и частота

изменялась в пределах $0,18...1,5 \text{ мин}^{-1}$, $250...2000 \text{ об/мин}$ соответственно. Это требовалось для нахождения оптимальных условий, при которых резец изнашивался за 1 – 3 прохода по поверхности заготовки. Таковыми режимами стали $n = 2000 \text{ об/мин}$, $Pz = 1,44 \text{ мин}^{-1}$, $t = 0,5 \text{ мм}$ и построены спектры сигнала акустического излучения (АИ) в условиях цехового шума и при установившемся режиме резания для каждого пункта плана эксперимента, при этом расстояние микрофона от инструмента составило 50 мм.

В результате эксперимента были получены спектры акустического излучения процесса точения рис. 1.

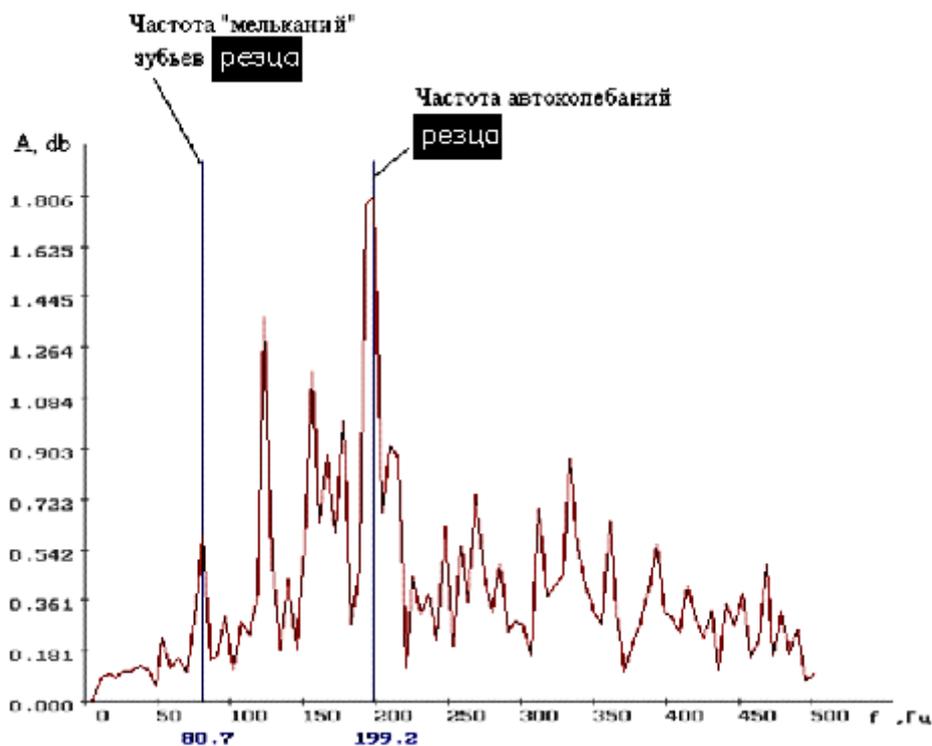


Рис. 1. Спектр акустического излучения процесса точения

Эти спектры были наложены друг на друга, как показано на рис. 2 и выделены участки, характеризующиеся увеличением амплитуды сигнала при изменении износа инструмента.

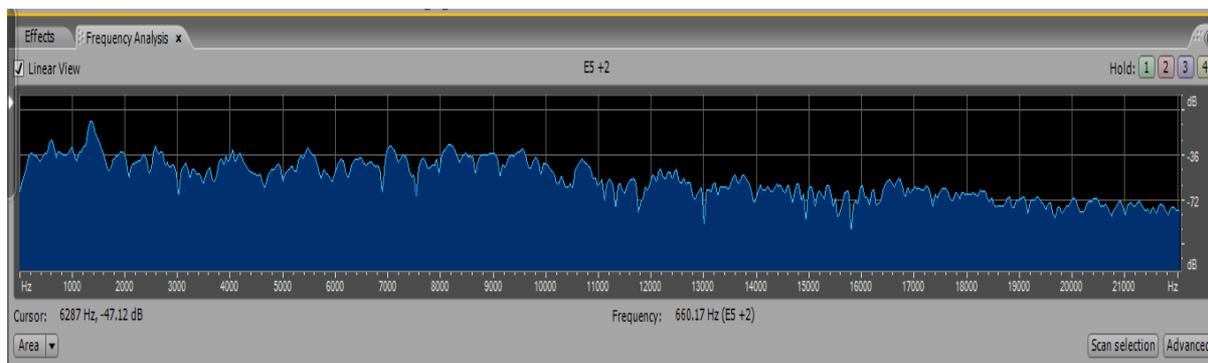


Рис. 2. Определение информационной полосы акустического излучения при точении

1. Режимы резания при заточенном инструменте – опыт № 1

№ опыта	Частота вращения шпинделя n_p , мин ⁻¹	Подача инструмента S , мм/об	Среднее значение децибел, dB
1	250	0,18	54,5
2	315	0,23	55,1
3	400	0,29	56
4	500	0,36	57,5
5	1000	0,72	57,8
6	1600	1,15	60,5
7	2000	1,44	61,5

2. Режимы резания при заточенном инструменте – опыт № 2

№ опыта	Частота вращения шпинделя n_p , мин ⁻¹	Подача инструмента S , мм/об	Среднее значение децибел, dB
1	250	0,18	55,5
2	315	0,23	56,5
3	400	0,29	57,4
4	500	0,36	58
5	1000	0,72	58,5
6	1600	1,15	60,5
7	2000	1,44	62

3. Режимы резания при изношенном инструменте

№ опыта	Частота вращения шпинделя n_p , мин ⁻¹	Подача инструмента S , мм/об	Среднее значение децибел, dB
1	250	0,18	57
2	315	0,23	57,8
3	400	0,29	58,2
4	500	0,36	59
5	1000	0,72	62
6	1600	1,15	65,5
7	2000	1,44	67

Обработка экспериментальных данных. В результате проведенных исследований было установлено, что при точении заготовки, есть только одна широкая информативная полоса частот от 700 до 1200 Гц, чувствительная к изменению износа инструмента. Результаты экспериментов приведены на рис. 3, 4.

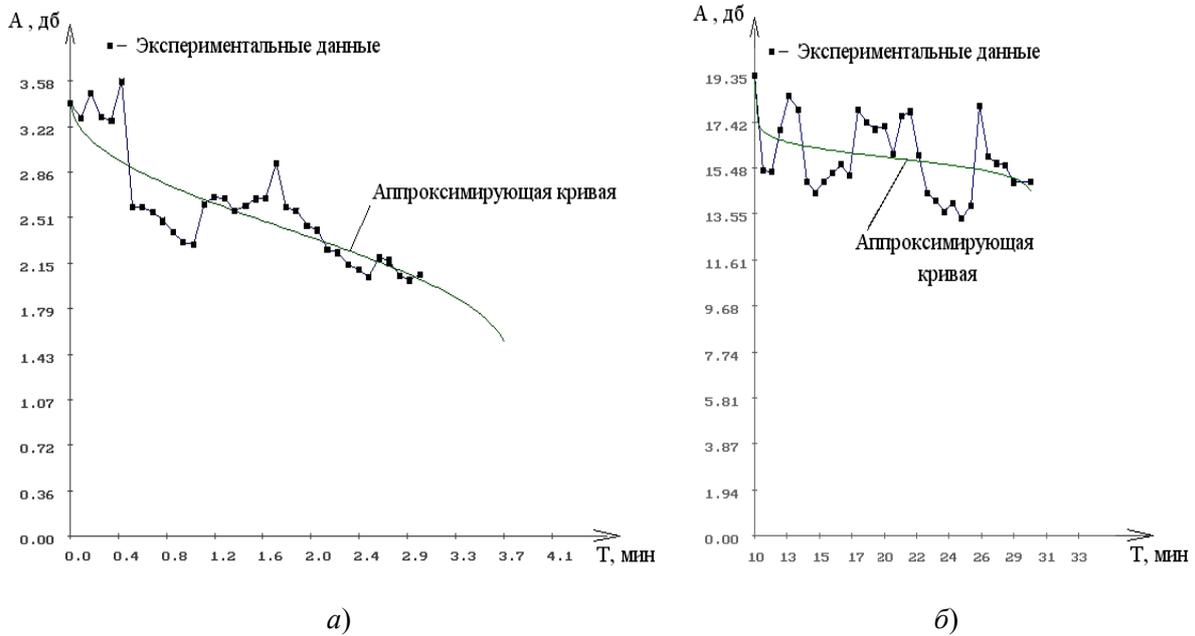


Рис. 3. Изменение с течением времени уровня шума, генерируемого процессом точения:
a – опыт № 1; *б* – опыт № 2

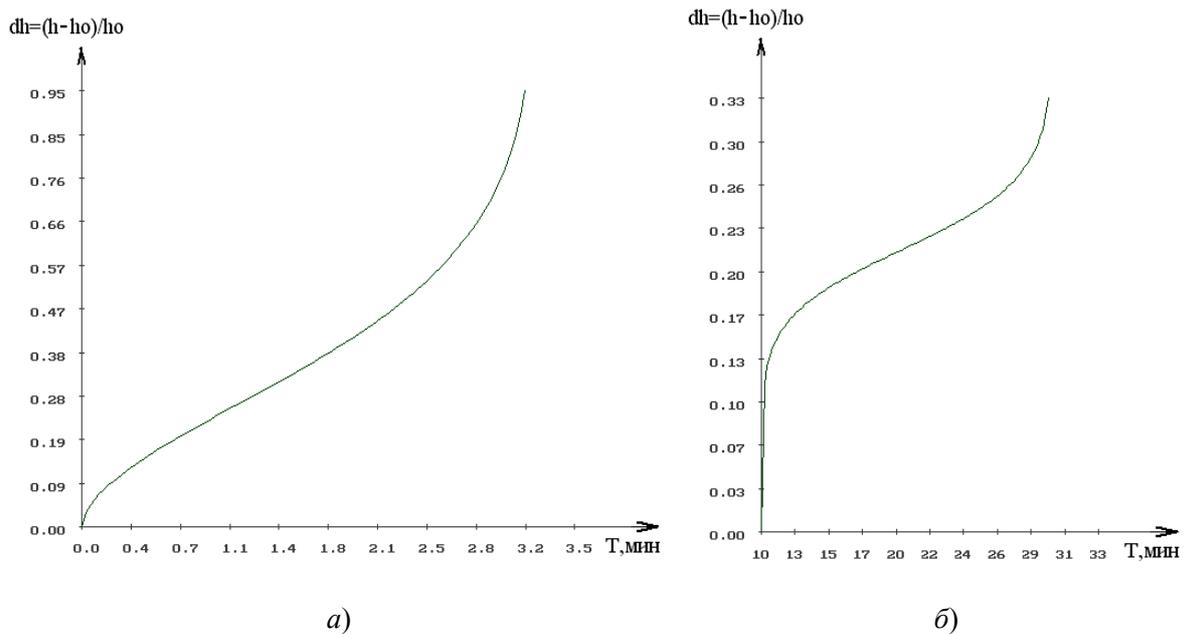


Рис. 4. Изменение с течением времени степени износа резца:
a – опыт № 1; *б* – опыт № 2

Можно сделать промежуточный вывод о том, что, чем тупей инструмент и чем больше подача и частота вращения шпинделя, тем более резнообразнее получается обрабатываемая поверхность, вместо гладкой расточенной поверхности.

В результате проведенных экспериментальных исследований и последующих расчетов были составлены протоколы состояния режущего инструмента (табл. 4, 5).

4. ПРОТОКОЛ контроля состояния режущего инструмента в опыте № 1

При сроке его эксплуатации	2,96 мин
Состояние инструмента	недопустимое
Степень поврежденности Q	0,6005
Надежность инструмента P	0,3995
Скорость изменения технического состояния	недопустимая
Наработка инструмента до недопустимой степени износа (снятия на перезаточку) составляет:	0,1...0,3 мин

5. ПРОТОКОЛ контроля состояния режущего инструмента в опыте № 2

При сроке его эксплуатации	2,38 мин
Состояние инструмента	недопустимое
Степень поврежденности Q	0,6285
Надежность инструмента P	0,3715
Скорость изменения технического состояния	недопустимая
Наработка инструмента до недопустимой степени износа (снятия на перезаточку) составляет:	0,1...0,3 мин

До настоящего времени механическая обработка материалов давлением и резанием остается одной из важнейших операций формообразования в технологических процессах. Наряду с формированием характеристик металлических изделий, механическими средствами обрабатываются большие объемы самых разных материалов, таких как древесина, полиграфические материалы, пластмассы, стекло, композиционные материалы и др. Эффективность процессов механической обработки является основой для выпуска конкурентоспособной продукции. Повышение производительности, гибкости, надежности и экономичности при обеспечении качества и точности получаемых изделий в настоящее время связано с научно обоснованным выбором оптимальных инструментальных материалов, геометрических параметров инструментов и режима резания [1 – 4], внедрению систем контроля за состоянием инструмента и т.д.

Физические, химические и механические явления, происходящие на микроуровне, приводят к изменению свойств материала и на макроуровне, а это изменение в значи-

тельной степени непредсказуемо из-за случайного характера движения атомов и ничтожного, на первый взгляд, разброса первичных свойств изделий, предназначенных для одной и той же цели. Поддержание заданного уровня надежности в данном случае возможно посредством своевременной корректировки технического состояния машины, за счет применения эффективных методов диагностики, в частности, методов вибродиагностики. Причем к этой проблеме необходимо подходить шире и применять диагностику не только для контроля состояния машины, как таковой, но и для контроля состояния режущего инструмента [5], применяемого в процессе ее изготовления, например с помощью систем оповещения на основе акустического метода.

Результаты данной работы можно будет использовать не только для практического технологического приложения, но и в учебном процессе для значительного повышения уровня подготовки специалистов в области механической обработки материалов резанием.

Список использованных источников

1. **Алтунин, К. А.** Концепция создания информационного обеспечения интеллектуальной системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения [Текст] / К. А. Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2015. – 112 с.
2. **Алтунин, К. А.** Разработка системы поддержки принятия решений выбора режимных и конструктивных параметров токарной обработки [Текст] / К. А. Алтунин, М. В. Соколов. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2016. – 132 с.
3. **Алтунин, К. А.** Структура и адаптация модели представления знаний процесса токарной обработки [Текст] : монография / К. А. Алтунин, М. В. Соколов, Р. В. Дякин. – Тамбов : Студия печати Павла Золотова, 2017. – 104 с.
4. **Altunin, K. A.** Development of information support for intelligent CAD cutting processes [Text] / K. A. Altunin, M. V. Sokolov // *Advanced Materials & Technologies*. – 2017. – № 5. – P. 67 – 77.
5. **Калмыков, В. В.** Выбор метода для автоматизации контроля состояния режущего инструмента [Текст] / В. В. Калмыков, Ф. И. Антонюк, Н. В. Зенкин // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2014. – № 3(7). – 100 с.

УДК 004.9

Мокрозуб В. Г., Родина А. А., Соловьева Т. И., Минаев С. Г.
 Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
 (Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНОГО ПРОСТРАНСТВА РЕСУРСОВ
 ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Mokrozub V. G., Rodina A. A., Solov'eva T. I., Minaev S. G.
 Tambov State Technical University, Russia, Tambov
 (Tel. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

**THE USE OF THE COMMON RESOURCE SPACE
 FOR THE FORMATION OF A VIRTUAL ENTERPRISE**

Аннотация. Представлены способы организации виртуальных предприятий машиностроительного профиля. Описана задача формирования виртуального предприятия в едином пространстве ресурсов, которые находятся во множестве центров коллективного пользования.

Ключевые слова: машиностроение, виртуальное предприятие, ресурсы.

Abstract. Methods of organization of virtual enterprises of machine-building profile are presented. The problem of forming a virtual enterprise in a single space of resources that are in a variety of centers of collective use is described.

Keywords: engineering, virtual enterprise, resources.

Производственные предприятия для выполнения заказа, как правило, объединяются, так как сконцентрировать в одном месте все технологические процессы, необходимые для создания современных технических объектов, невозможно. Традиционная схема выполнения заказа машиностроительными предприятиями (рис. 1) заключается в том, что имеется основной исполнитель, который делегирует ряд технологических процессов соисполнителям. При этом всю ответственность за выполнение заказа несет основной исполнитель.

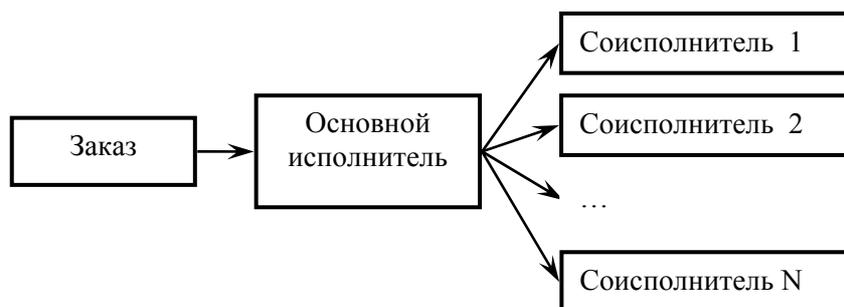


Рис. 1. Традиционная схема исполнения заказа (кооперация)

В настоящее время в рамках национальной программы «Цифровая экономика» выполняются шесть федеральных проектов, одним из которых является проект «Цифровые технологии». В рамках этого проекта развиваются подходы и нормативная база создания виртуальных предприятий, как объединения для выполнения определенного заказа территориально распределенных реальных предприятий [1, 2]. Эти предприятия, используя современные средства коммуникаций, объединяются таким образом, чтобы получить наиболее конкурентно-способную продукцию. При этом каждое предприятие выполняет свои технологические процессы и имеет свой центр управления. Структура подобного виртуального предприятия представлена на рис. 2.

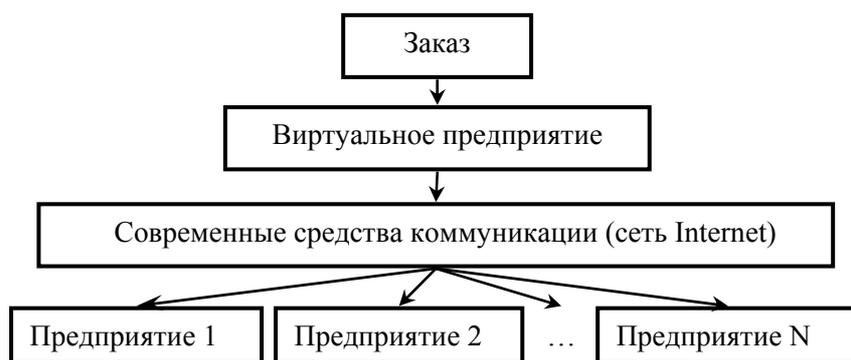


Рис. 2. Виртуальное предприятие

Развитие современных средств производства идет в направлении обеспечения минимального участия человека в технологическом процессе. Современные станки с ЧПУ и 3D-принтеры, имеют интерфейс, с помощью которого они могут управляться из удаленного центра. Можно предположить, что по аналогии с облачными вычислениями, когда пользователям предоставляются удаленные программные и информационные ресурсы, в будущем таким же образом пользователям будут предоставляться производственные ресурсы. В информационных технологиях речь идет о едином информационном пространстве, при этом физически информационные хранилища могут быть территориально распределены и, соответственно, территориально распределены информационные ресурсы.

При удаленном предоставлении производственных ресурсов речь идет о едином пространстве ресурсов. Эти ресурсы географически находятся в разных местах, но управляются из единого центра с использованием стандартных интерфейсов, которые должны быть разработаны в ближайшем будущем. Единый центр управления выбранными ресурсами строит пользователь. Физически производственные ресурсы располагаются в центрах коллективного пользования (ЦКП).

Задача формирования виртуального предприятия (рис. 3) заключается в следующем. Имеется заказ на изготовление технического изделия, которое обладает определенными характеристиками (точность изготовления деталей, твердость определенных поверхностей, размеры элементов и др.) Имеется множество ресурсов, предназначенных для изготовления изделий. Каждый ресурс обладает определенными характери-

ками, от значения которых зависит – может или нет ресурс обеспечить требования к выполнению изделия. Таким образом, задача формирования виртуального предприятия заключается в поиске такого множества ресурсов V_1, V_2, \dots, V_K , которое позволяет выполнить заказ оптимально. В качестве критерия оптимальности может быть себестоимость, время выполнения заказа, качество продукта и др. Ресурсы располагаются в центрах коллективного пользования ЦКП₁, ЦКП₂, ..., ЦКП_М. Каждый ЦКП имеет множество ресурсов $R_{j,1}, R_{j,2}, \dots, R_{j,Nj}$, где j – номер ЦКП.

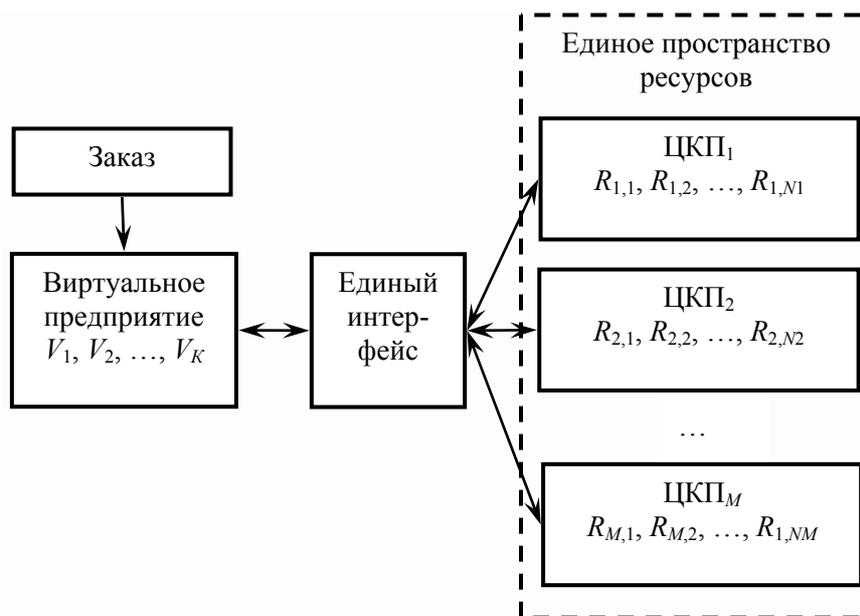


Рис. 3. Единое пространство ресурсов

Список использованных источников

1. Позднеев, Б. М. О создании научно-образовательного полигона «Виртуальное машиностроительное предприятие» / Б. М. Позднеев // Новые информационные технологии в образовании: применение технологий «1С» для развития компетенций цифровой экономики : сб. науч. тр. 18-й Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 255 – 257.
2. Мокрозуб, В. Создание виртуального кабинета «Конструирование технологического оборудования» в Тамбовском государственном техническом университете / В. Мокрозуб // САПР и графика. – 2015. – № 1(219). – С. 38–39.

УДК 004.9

Левашов А. В., Пыкин И. С., Калистратов М. С.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БУНКЕРОВ

Levashov A. V., Pykin I. S., Kalistratov M. S.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

(Tel. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

FUNCTIONAL MODEL THE DESIGN OF THE BUNKERS

Аннотация. Представлена диаграмма IDEF0 проектирования бункеров для металлургических заводов.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, функциональная модель, бункеры.

Abstract. The diagram IDEF0 of designing bunkers for metallurgical plants is presented.

Keywords: computer-aided design, functional model, bins.

Исходные данные для проектирования бункерных устройств представлены в техническом задании (ТЗ), в котором отражены его функции, условия взаимодействия с окружающей и рабочей средой, ограничения на параметры [2]

$$TЗ = \{L, Fa, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\},$$

где L – основной размер бункера (например, объем бункера); $Fa = \{fa\}$ – множество функций проектируемого бункера; Q_1 – условия взаимодействия бункера с рабочей средой (температура, коррозионные свойства, стойкость к абразивному износу и др.); Q_2 – условия взаимодействия бункера с окружающей средой (место установки, ветровые, снеговые нагрузки и т.д.); Q_3 – условия взаимодействия бункера с человеком (требования к обслуживанию и безопасности); Q_4 – дополнительные требования и ограничения (например, ограничение по габаритным размерам).

Функции бункера

$$fa = (D, G, H),$$

где D – указание действия, производимого бункером; G – указание объекта, на который направлено действие; H – указание особых условий и ограничений, при которых выполняется действие.

Результат проектирования – рабочий проект (РП)

$$РП = \{РП_k\}, k = 1, 2, \dots, 9,$$

где PP_1 – сборочный чертеж бункера; PP_2 – сборочные чертежи отдельных частей бункера; PP_3 – чертежи всех деталей бункера; PP_4 – спецификации; PP_5 – паспорт бункера; PP_6 – технологические расчеты истечения материалов находящиеся в бункере; PP_7 – расчет на прочность; PP_8 – руководство по эксплуатации; PP_9 – технологическая документация.

Для представления этапов процесса проектирования бункерных устройств и информационных потоков, присутствующих при проектировании воспользуемся методологией IDEF0.

Контекстная диаграмма верхнего уровня, отображающая связи объекта с окружающей средой представлена на рис. 1.

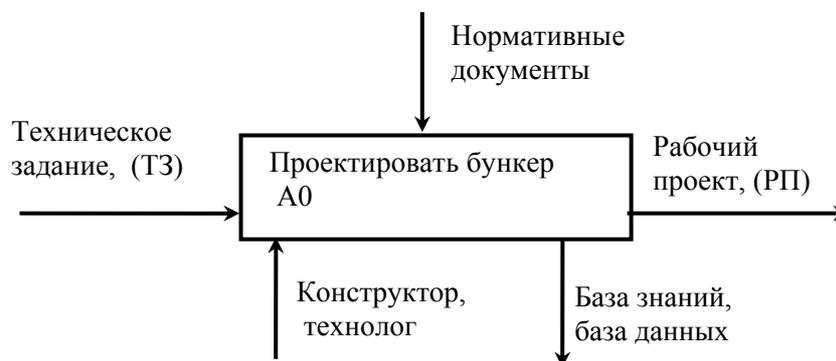


Рис. 1. Контекстная диаграмма верхнего уровня А0

Функцией блока А0 является проектирование бункерного устройства. На входе этого блока – техническое задание, на выходе – рабочий проект. Конструктор и технолог являются механизмами. Они являются «лицом, принимающим решение» в вопросах выбора. Для работы системы необходимы различные базы данных и базы знаний.

На рисунке 2 представлена функциональная диаграмма А0, отображающая процесс проектирования бункерного устройства.

Информационные потоки, присутствующие при проектировании

$$I_1 = \{I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{14}\},$$

где I_{11} – множество данных о наличии функциональных элементов; I_{12} – множество данных о типах функциональных элементов; I_{13} – множество данных о взаимном расположении функциональных элементов; I_{14} – множество данных о наличии и типах соединительных элементов; I_{21} – предварительные основные размеры функциональных элементов бункера; I_2 – основные размеры и характеристики функциональных элементов бункера, удовлетворяющие условиям технологического назначения бункера; I_6 – данные, подтверждающие невозможность удовлетворения условиям технологического назначения бункера при его выбранной структуре; $I_7 = \{PP_k\}$, $k = 6$ – технологические расчеты процесса истечения материала (тепловые, технологический);

$$I_3 = \{PP_k\}, \quad k = 1, 2, 3, 4;$$

I_{31} – предварительные основные размеры функциональных элементов бункера (не определенные ранее в I_{21}); I_{32} – основные размеры функциональных элементов бункера определяющие его прочность (такие как толщины элементов стенок бункера, размеры бункерных балок); I_{33} – уточненные данные о взаимном расположении функциональных элементов, типоразмеры соединительных элементов; I_{34} – все размеры и другие характеристики всех элементов бункера, в том числе не определенные ранее в I_{21} , I_{31} , I_{32} , I_{33} , а также рабочие чертежи и др. документация; I_{35} – данные поверочного прочностного расчета;

$$I_4 = \{PI_k\}, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8; \quad I_5 = \{PI_k\}, \quad k = 9.$$

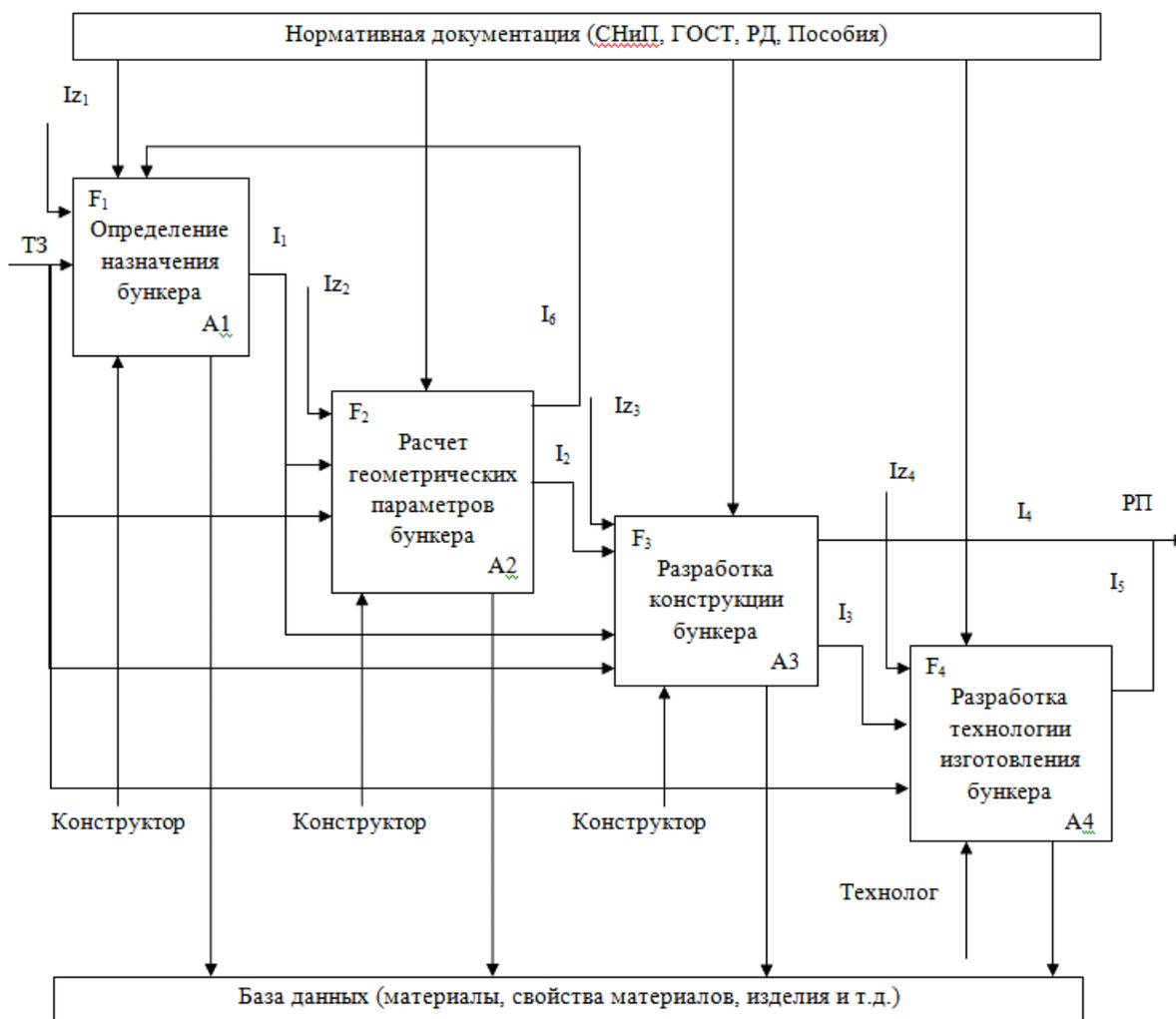


Рис. 2. Функциональная диаграмма А0

Динамические информационные потоки: Iz_1 – изменения структуры аппарата (удаления, добавления, изменения типа или взаимного расположения функциональных элементов); Iz_2 – изменения технологических параметров; Iz_3 – изменения конструкции; Iz_4 – изменения технологии изготовления.

База типовых элементов технологического оборудования должна иметь составляющую (онтологию), которая позволит подбирать типовые элементы в зависимости от условий эксплуатации. Структура такой базы и способы представления знаний достаточно подробно описаны в [5, 7].

Представленная модель используется при разработке виртуального кабинета «Конструирование технологического оборудования» [1, 3, 4, 6].

Работа выполнена под руководством проф. каф. КИСМ ТГТУ В. Г. Мокрозуба.

Список использованных источников

1. **Мокрозуб, В. Г.** Интеллектуализация механических расчетов в виртуальном кабинете «Конструирование технологического оборудования» / В. Г. Мокрозуб // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 2. – С. 34 – 40.
2. **Мокрозуб, В. Г.** Разработка интеллектуальных информационных систем автоматизированного проектирования технологического оборудования : учебное пособие / В. Г. Мокрозуб. – Тамбов : Тамбовский ГТУ, 2008. – 80 с.
3. **Применение** гиперграфов и реляционной базы данных для описания структуры радиотехнических систем / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, С. В. Морозов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 11. – С 37 – 41.
4. **Применение** n-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. С. Мордвин, А. А. Илясов // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 115 – 122.
5. **Мокрозуб, В. Г.** Графовые структуры и реляционные базы данных в автоматизированных интеллектуальных информационных системах / В. Г. Мокрозуб. – М. : Издательский дом Спектр, 2011. – 108 с.
6. **Мокрозуб, В. Г.** Функциональная и процедурная модели проектирования технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб // Программные системы и вычислительные методы. – 2014. – № 4. – С. 418 – 430.
7. **Мокрозуб, В. Г.** Методологические основы построения автоматизированной информационной системы проектирования технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, М. П. Мариковская, В. Е. Красильников // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – Т. 27, № 1.2. – С. 259 – 262.

УДК 631.216

Шемонаев И. А., Кулешов И. В., Романенко И. М., Черешнев В. О.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +79107556941, e-mail: ivanshemonaev.com@mail.ru)

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕПЛИЦЫ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ARDUINO

Shemonaev I. A., Kuleshov I. V., Romanenko I. M., Chereshev V. O.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. +79107556941, e-mail: ivanshemonaev.com@mail.ru)

DEVELOPMENT OF AUTOMATED GREENHOUSE ON THE BASIS OF ARDUINO MICROCONTROLLER

Аннотация. В данной работе описана разработка, в ходе которой была создана автоматизированная теплица на базе микроконтроллера Arduino для повышения эффективности овощепроизводства. Настоящий проект создан для решения проблемы овощеводства защищенного грунта. Выращивание культур в закрытой теплице реализуется посредством искусственного освещения, подпиткой питательного раствора, регуляции влажности и температуры. Контроль необходимой техники происходит посредством запрограммированного микроконтроллера фирмы Arduino.

Ключевые слова: тепличное производство, контроль климата, агроинженерия, умная теплица, овощеводство.

Abstract. This work describes the development during which an automated greenhouse based on the Arduino microcontroller was created to increase the efficiency of vegetable production. This project was created to solve the problem of vegetable production of greenhouses. Cultivation of crops in a closed greenhouse is realized through artificial lighting, replenishment of nutrient solution, regulation of humidity and temperature. The necessary equipment is controlled by a programmed microcontroller from Arduino.

Keywords: greenhouse production, climate control, agricultural engineering, smart greenhouse, vegetable growing.

Автоматизирование технологических процессов является главным направлением развития современного сельского хозяйства. Внедрение данных систем в сельскохозяйственное производство позволит заканчивать трудоемкие процессы гораздо быстрее, повысить производительность труда, сократить численность работников, улучшить качество производимой продукции и снизить затраты на ее изготовления.

Современный этап развития информационных технологий характеризуется массовым применением систем на базе микроконтроллеров [1], в частности для систем регулирования. Для успешного выращивания различных культур в теплице необходимо организовать поддержание оптимальных параметров микроклимата и условий содержа-

ния растений, для чего применимы современные методы регулирования на базе микроконтроллеров Arduino.

Для достижения нужного результата требуются три основных компонента: набор датчиков, которые считывают те или иные параметры; программно-аппаратный комплекс, или ПАК, для сбора и обработки этой информации, а также технологии передачи данных, призванные связать две других составляющих. Перечисленного достаточно для качественного мониторинга состояния воздуха и почвы, регуляции работы автоматики и всех этапов выращивания.

Одним из немаловажных преимуществ внедрения автоматизированной системы управления – повышение эффективности работы осветительных систем и значительное снижение расходов на электроэнергию. Растениям в разные фазы развития требуется свет различного, зачастую довольно узкого спектра, а при использовании стандартных источников освещения, в основном обычных натриевых ламп, большая часть энергии затрачивается впустую. С «умной» системой управления возникновение данной ситуации невозможно в принципе, поскольку в ней используются специализированные источники освещения, которые позволяют дозировать те или иные цвета спектра и добавлять либо убирать разные компоненты. Опция обеспечивает экономию до 70% электроэнергии, причем без учета фактора внешнего естественного освещения, которое дает возможность оптимизировать насыщенность красного и синего цветов. Свет солнца тоже учитывается, причем с поправкой на преломления через прозрачные стены теплицы. Кроме того, современные источники света позволяют поддерживать заданные объемные конфигурации светового потока, т.е. досвечивать определенные области теплицы светом необходимого спектра. Это обеспечивает равномерное формирование кроны растений без физического перемещения самих светильников. Человек не смог бы отследить такие параметры. Как и любую модульную структуру, систему интеллектуального управления можно модернизировать и улучшать. Например, существует возможность ввести в контур мониторинга отслеживание состояния технологического оборудования. Если комплекс даст команду на включение обогрева, а устройство будет неисправно, то действие не будет выполнено, что может привести к потерям урожая. Решение данной проблемы заключается во внедрении контроля аппаратных узлов и заблаговременном устранении повреждений. Для получения наиболее полной картины развития растений можно дополнить систему мониторинга специализированными камерами, способными «видеть» в ближнем инфракрасном спектре и фиксировать форму и размеры листа или плода. Благодаря этой технологии у сельхозпроизводителя есть возможность отслеживать все фазы развития культур. Существуют методики, которые помогают считывать дополнительные параметры биосистемы теплиц, например контролировать уровень азота в почве по окрасу листьев. Возможна установка камер, распознающих болезни различных культур, о которых свидетельствует появление пятен и налета на листовой поверхности. Все эти меры выводят контроль выращивания овощей на новый уровень качества. На стадии формирования плодов важным параметром становится уровень концентрации CO₂. Для его мониторинга в систему можно интегриро-

вать соответствующий датчик и добавить процедуры поддержки требуемого уровня. Для данной опции необходимы внешние источники углекислого газа и оптимизация алгоритмов управления вентиляцией, при этом целесообразно, чтобы количество посещений теплиц сотрудниками было минимальным. Чем меньше людей ходят и открывают двери, тем стабильнее работа системы и качественнее поддержание уровня CO₂. Таким образом, при разработке алгоритмов приходится учитывать еще и человеческий фактор. Внедрение дополнительных опций требует определенных расходов, но чаще всего подобные действия оправданны. В этом случае экономика проста: когда стоит вопрос сохранения урожая, то затраты допустимы, поскольку при несвоевременном открытии вентиляции, включении освещения, отопления и так далее сельхозпроизводитель рискует потерять часть, а иногда и весь урожай. При этом отсутствует необходимость непосредственного выполнения всех действий и их контроля в самой теплице, поскольку система мониторинга и управления позволяет сделать все операции автоматически, оперативно и удаленно. В России климат изменчив, поэтому системы автоматизированного управления могут быть востребованы во всех регионах страны, где располагаются комплексы защищенного грунта, в том числе в южных субъектах. Хотя в большей степени подобная технология актуальна для зоны «неустойчивого земледелия», т.е. для средней полосы и северных территорий. Сегодня на рынке существуют российские компании, уже имеющие реальный опыт внедрения контролирующих систем на крупных агропромышленных предприятиях в рамках правительственной программы автоматизации сельского хозяйства. Как правило, в части программного обеспечения подобные технологические решения являются полностью отечественной разработкой, а в области аппаратного обеспечения частично имеют иностранные комплектующие.

Еще важный параметр для теплиц – влажность почвы. В разные стадии роста и созревания этот параметр меняется. Самая большая потребность растений во влаге в рассадный период – до 90...95%, а также в фазу плодообразования и плодоношения. Автополив в теплице устроен по разному, но в итоге все приходят к дозирующему поливу. Датчики влажности почвы можно использовать но с тщательной доработкой. Датчики влажности из печатных плат могут показывать точные данные не больше месяца, после чего металлическая поверхность контактов разрушается и окисляется. Если использовать этот датчик, то в конце концов придет момент, когда вы зайдете в теплицу а у вас там бассейн, все залито а ваши растения вероятно всего погибнут. Поэтому датчики влажности можно использовать совместно с датчиком потока воды (счетчиком воды). Надо замерить количество потребляемой воды в сутки и задать этот параметр. Датчик влажности почвы можно использовать но с доработкой, контакты должны быть из такого материала, который проводит электрический ток и как можно меньше окисляется. Это может быть медь, но и она окисляется ос временем, но это уже хорошо, так как можно раз в год чистить контакты и опять использовать. Но лучше попробовать графитовые стержни, графит проводит электрический ток и не окисляется. В общем за основу надо взять показатели счетчика воды, а датчиком влажности можно отключать полив, если он покажет максимальные значения. Например в дождливую погоду, расход

воды уменьшается в разы, и установленного количества воды для датчика потока может быть крайне много. Так что контроль для полива лучше сделать комбинированным. Полив включается с помощью реле по сигналу от датчика или по времени. Емкость для полива должна находиться на высоте и полив лучше делать «самотеком» просто открывая или закрывая электроклапан. Таким образом можно сделать более автономную систему, так как для питания контроллера и клапанов хватит обычного аккумулятора и солнечной батареи. Такой принцип работы полива будет уместен в местах, где часто отключают электричество на длительное время.

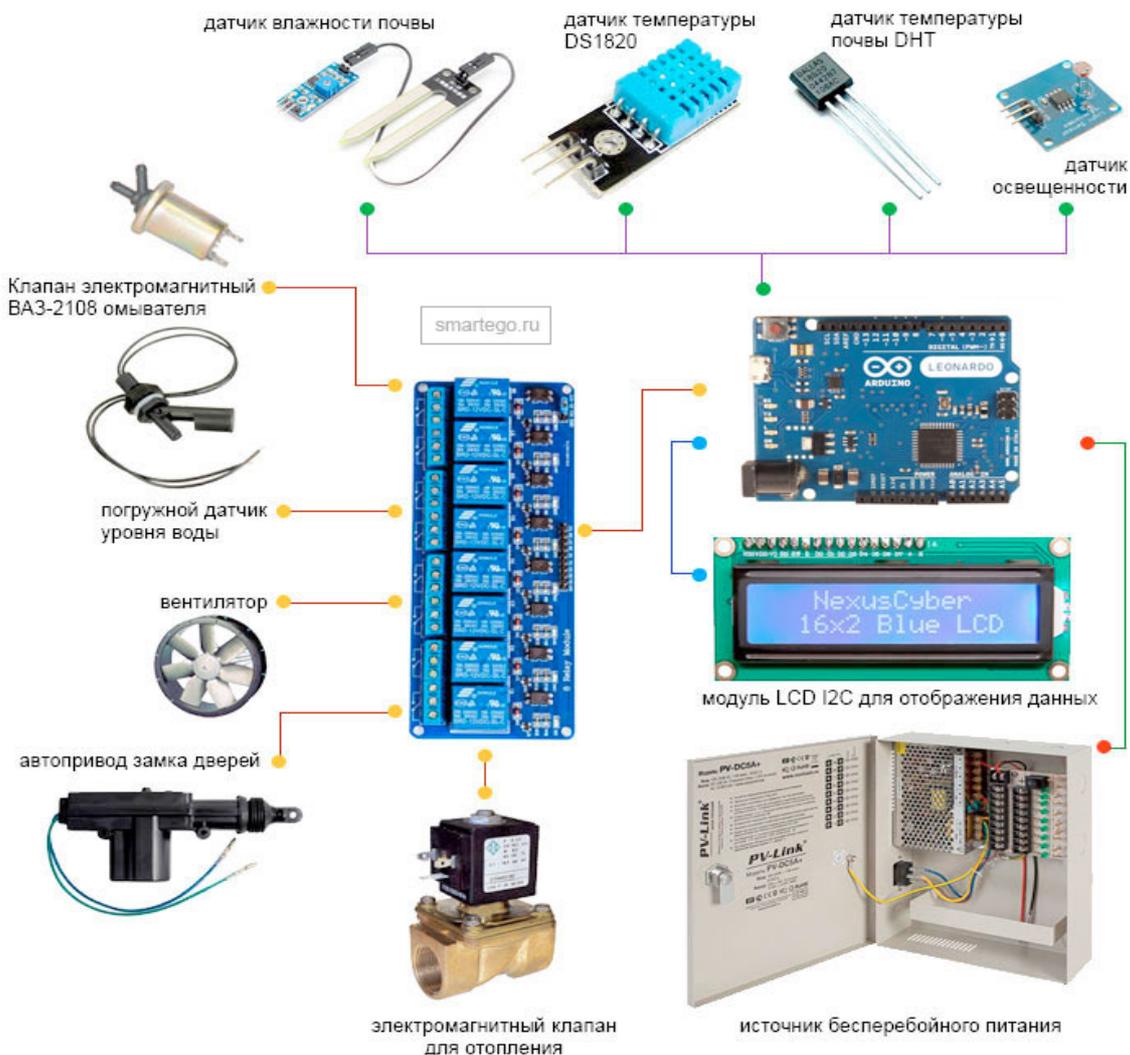


Рис. 1. Комплектующие датчики используемые в системе

Температура почвы – так же важно регулировать, так как поддержание температуры почвы в определенных пределах поможет расширить возможности вашей теплице. Например, таким способом можно увеличить время использования теплицы от ранней весны до поздней осени, и вырастить некоторые экзотические растения. Регулировка температуры в автоматической теплице можно сделать с помощью нагревательных тенов. В магазинах продается нагревательные провода, которые укладываются на дно

грядок. Управление нагревом происходит через контроллер, который постоянно считывает данные с датчика температуры, который должен находиться в грунте. То есть датчик температуры должен быть влагозащищенный. При понижении температуры, контроллер подаст сигнал реле на включение питания для подогрева. Как только температура почвы достигнет заданных пределов, контроллер отключит питания от нагревателя. Чтобы нагревательный элемент не вышел из строя от частого включения и отключения, лучше использовать специальные диммеры, которые будут постепенно подавать нагрузку на нагреватель.

Комплектующие, используемые в системе для теплицы на рис. 1:

- контроллер Arduino Mega;
- блок реле на 8 каналов;
- датчики Температур DHT;
- датчики Температур DS1820;
- модуль отображения данных LCD I2C;
- датчики влажности почвы;
- датчик освещенности;
- электромагнитные клапана для капельного полива;
- блок бесперебойного питания;
- электропривод замка дверей для авто (для форточки);
- поплавковые датчики уровня воды.

Для управления электрооборудованием подойдет плата Relay Shield, количество реле должно соответствовать количеству устройств + запас на будущее, всегда можно добавить. На рисунке 1 четырех-канальная плата. Мы будем включать/выключать насос, электромагнитные краны. Если использовать сервопривода или электропривод замка дверей для авто, можно открывать/закрывать форточки.

Параметры окружающей среды считываются в теплице с помощью датчиков температуры и влажности. Эти данные можно использовать для проветривания.

Так же нужен фоторезистор, который будет включать освещение.

Датчик влажности нужен для своевременного полива, если земля будет подсыхать. Но автополив должен регулироваться несколькими датчиками, так как грядки обычно длинные, и датчик не сможет показать точные данные для всей площади.

Для дополнительных схем автоматки, следует обзавестись платой часов для ардуино. Для полива, стоит использовать таймер совместно с датчиком влажности воздуха. По таймеру можно много что сделать, а если еще использовать календарь, то можно увеличивать или уменьшать интервал освещенности в зависимости от требований у растений разных культур.

Теплицы активно используют сельхозпредприятия. Они помогают контролировать жизненно важные показатели растений и улучшать качество производимой продукции. По этому для повышения производительности была разработана теплица на базе микроконтроллера Arduino с использованием таких датчиков как: температуры, влажности, освещения. Дальнейшая работа будет связана с развитием и внедрением более новых и технологически выгодных устройств.

Список использованных источников

1. **Проскурин, С. Г.** Исследование частотных характеристик электрокардиограммы при помощи дискретного преобразования Фурье / С. Г. Проскурин, В. О. Черешнев // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 8 – С. 89 – 93.
2. **Житин, Ю. И.** Приемы использования отходов производства в агроэкосистемах Центрального Черноземья [Электронный ресурс] : монография / Ю. И. Житин, Н. В. Стекольников. – Электрон. текстовые данные. – Воронеж : Воронежский Государственный Аграрный Университет им. Императора Петра Первого, 2015. – 219 с.
3. **Савельев, В. А.** Программированное изучение растениеводства [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. А. Савельев. – Электрон. текстовые данные. – Саратов : Вузовское образование, 2014. – 166 с.
4. **Котов, В. П.** Овощеводство открытого грунта [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. П. Котов, Н. А. Адрицкая, Н. М. Пуць. – Электрон. текстовые данные. – СПб. : Проспект Науки, 2017. – 360 с.
5. **Осипова, Г. С.** Овощеводство защищенного грунта [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г. С. Осипова. – Электрон. текстовые данные. – СПб. : Проспект Науки, 2017. – 288 с.

УДК 004.021

Немтинов В. А., Крылов А. В., Матрохин М. А., Храмцов В. В.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЕННОГО ГАЗОПРОМЫВАТЕЛЯ

Nemtinov V. A., Krylov A. V., Matrokhin M. A., Khramtsov V. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

PROCESS OF GALVANIZING IN THE INSTALLATION OF THE COATING IN BULK

Аннотация. Рассмотрены преимущества пенного газопромывателя. Обоснована актуальность модернизации пенного газопромывателя при односменном режиме работы гальванической линии. Предложена конструкция дополнительного орошения.

Ключевые слова: пенный газопромыватель, скруббер, абсорбер, центробежные форсунки, винтовые форсунки.

Abstract. The advantages of foam gas washer are considered. The article substantiates the relevance of the modernization of the foam gas washer in single-shift operation of the galvanic line. The design of additional irrigation is proposed.

Keywords: foam washer, scrubber, absorber, centrifugal nozzles, screw nozzles.

Простым и эффективным способом очистки технологических выбросов от пыли является мокрый способ очистки. Мокрое пылеулавливание основано на контакте запыленного газового потока с жидкостью, которая захватывает частицы и уносит их из аппарата в виде шлама. Процесс пылеулавливания в мокрых газоочистных аппаратах сопровождается процессами абсорбции. Поэтому многие аппараты данного типа могут применяться не только для очистки газов от пыли, но и для очистки от капель жидкости, газообразных составляющих, а также для охлаждения газов. Конденсат жидкости, содержащейся в газах, при охлаждении способствует росту эффективности работы мокрых пылеуловителей.

В качестве орошающей жидкости в мокрых пылеулавливающих аппаратах чаще всего применяется вода, а при совместном решении вопросов пылеулавливания и химической очистки газов выбор орошающей жидкости обуславливается процессом абсорбции. Для уменьшения количества отработанной жидкости при работе мокрых аппаратов применяется ее частичная рециркуляция, а иногда и замкнутая система орошения.

Пенные пылеуловители представляют собой аппараты, корпус которых разделен решеткой с равномерно расположенными мелкими отверстиями. Запыленный поток поступает под решетку, очищенный удаляется из верхней части корпуса. Вода поступает на решетку сверху. В зависимости от конструкции пылеуловителя вода с поверхно-

сти решетки отводится через отверстия в решетке и частично через слив, либо только через отверстия. Диаметр отверстий в решетке 3...8 мм. Живое сечение 0,15...0,25 м²/м². Пенные аппараты относятся к низконапорным пылеуловителям. По способу отвода жидкости с решетки их подразделяют на два основных типа: с переливными решетками и с провальными решетками. Аппараты с переливными решетками не нашли широкого распространения, так как наблюдается зарастание решетки в ходе процесса пылеулавливания. Больше распространение получили аппараты второго типа.

Основные преимущества пенных аппаратов: маленький расход воды; эффективность очистки газа от пыли размером 15...20 мкм составляет до 99%.

Одной из главных особенностей работы пенного аппарата является работа в определенном режиме скорости газа. Для создания устойчивого пенного слоя на решетке необходимо поддерживать скорость газа в свободном сечении аппарата в пределах 0,8...2,2 м/с, при этом минимальная скорость газов, необходимая для создания устойчивого пенного режима на тарелке, составляет порядка 1 м/с.

Рассмотрим ситуацию работы пенного аппарата при односменном режиме работы гальванической линии (рабочая смена 8 ч, а остальное время назовем дежурным). В рабочее время система вентиляции гальванической линии работает на полную мощность, в пенном аппарате обеспечиваются необходимая скорость газа и происходит процесс образования пенного слоя и следовательно происходит очистка технологических выбросов. В дежурное время вентиляция не работает на полную мощность, так как это экономически не выгодно, из-за лишнего расхода электроэнергии и возможного уноса раствора. Из-за этих факторов вентиляция работает в четверть мощности и в пенном аппарате не обеспечиваются необходимая скорость газа и не происходит процесс очистки. Устранения этого недостатка возможно за счет внедрения дополнительного орошения в пенном газопромывателе (рис. 1). Запыленный поток будем пропускать через завесу распыляемой жидкости. При этом частицы пыли будут захватываться каплями промывочной жидкости, а очищенный поток удаляется из верхней части корпуса.

Для дополнительного орошения будем использовать центробежные форсунки грубого распыла работающие под давлением 0,3...0,4 МПа и создающие капли требуемого размера. Применение таких форсунок позволяет работать на оборотной воде, содержащей взвеси. Из центробежных форсунок для наших условий подходят спиральные форсунки (рис. 2). Спиральные форсунки – простые, необычные и надежные распылители. Их еще называют пиг тейл (pig tail), поросячий хвост, винтовые форсунки и т.п. Форсунки со спиральным соплом, это универсальный разбрызгиватель для жидкостей, содержащих взвешенную фазу. К ключевым особенностям спиральных форсунок относятся широкий и равномерный угол распыла (полный или полый конус), эффективное распыление вязких жидкостей и самое главное – абсолютная устойчивость к засорению. Конструкция формы распыла данных форсунок представляет собой сплошную спираль жидкости, вращающуюся внутри конического пространства.

Высокая устойчивость к закупоркам, делает эти распылители крайне востребованными, когда стоит задача мелко и равномерно распылить большой объем жидкости,

в составе которой присутствуют взвешенные частицы (загрязнения). Также данные качества незаменимы в условиях, когда безопасность или надежность системы выходят на первый план.

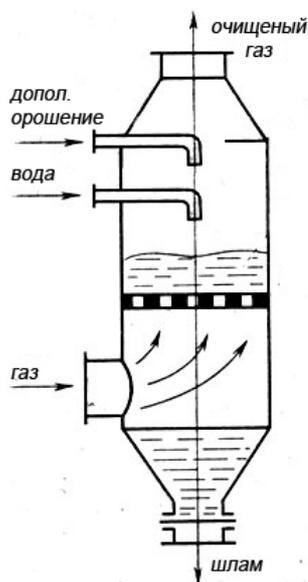


Рис. 1. Схема пенного газопромывателя с дополнительным орошением



Рис. 2. Спиральные форсунки

Заключение. В данной работе рассмотрены преимущества пенного газопромывателя и особенности его работы при одностороннем режиме работы гальванической линии. Предложена конструкция дополнительного орошения с использованием центробежных спиральных форсунок.

Список использованных источников

1. **Алексеев, Б. А.** Оборудование и эксплуатация пылеулавливающих установок : учебное пособие для рабочих профессий / Б. А. Алексеев, А. М. Барановский. – М. : НИИТЭХИМ, 1989. – 44 с.
2. **Ветошкин, А. Г.** Процессы и аппараты пылеочистки : учебное пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 124 с.

УДК 678.028

Дмитриев О. С., Живенкова А. А., Дмитриев А. О.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов,
(Тел. (4752)630369, e-mail: phys@nnn.tstu.ru)

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ МОДУЛЕЙ ИИС ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Dmitriev O. S., Zhyvenkova A. A., Dmitriev A. O.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov,
(Tel. (4752)630369, e-mail: phys@nnn.tstu.ru)

VISUALIZATION OF THE DATA-MEASURING SYSTEM FOR STUDY OF THE POLYMER COMPOSITES CURING CHARACTERISTICS

Аннотация. В статье рассматривается структура и особенности построения прикладного программного обеспечения, системы визуализации и управления информационно-измерительной системы исследования характеристик полимерных композитов. Приведена структура, описаны состав, принципы построения, назначение, возможности и параметры основных модулей прикладного программного обеспечения.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, модуль, прикладное программное обеспечение, полимерные композиты.

Abstract. The article discusses the structure and construction features of application software, visualization and control systems for the data-measuring system (DMS) for studying the characteristics of polymer composites at cure. The structure is given, the composition, construction principles, purpose, capabilities and parameters of the main modules of the application software are described.

Keywords: data-measuring system, module, application software, polymer composites.

Одними из наиболее перспективных полимерных материалов конструкционного назначения являются полимерные композиты (ПК). Качество изделий из ПК определяется оптимальностью температурно-временного режима и возникает необходимость в математическом моделировании процесса тепло- и массопереноса [1]. Для исследования и проектирования процесса разработана интеллектуальная информационно-измерительная система (ИИС), описание которой приведено в работах [1 – 3].

Структурная схема интеллектуальной ИИС для исследования характеристик ПК включает в себя следующие оснащение:

- аппаратно-техническое обеспечение – комплекс технических средств и устройств;
- программное обеспечение – комплекс программных продуктов и приложений;

- информационное обеспечение – комплекс средств визуализации и хранения данных о состоянии исследуемого объекта, предназначенные для последующего применения, главным элементом информационного обеспечения является база данных;
- математическое обеспечение – комплекс математических моделей исследуемого объекта, методов и алгоритмов определения характеристик ПК;
- организационно-методическое обеспечение – комплекс документов, описывающих состав и характеристики элементов ИИС, правила их эксплуатации и т.д.

Взяв за основу совокупность функций и задач, которые должна решать ИИС, приведем ее основные элементы:

- аппаратная платформа, основана на персональном компьютере, в котором имеется системное и прикладное программное обеспечение (ПО), а также измерительная система (ИС), предназначенная для регистрации экспериментальных данных;
- системное программное обеспечение, которое включает в свой состав операционную систему, среду разработки прикладного ПО, офисный пакет и прочее;
- прикладное программное обеспечение, включает в свой состав модули управления ходом эксперимента, расчета теплофизических характеристик, поддержки принятия решения для выбора оптимального алгоритма расчета ТФХ, имитационного моделирования, отображения информации;
- информационное обеспечение, включает базу данных выполненных экспериментов и систему управления базой данных (СУБД).

Общими для всего прикладного программного обеспечения ИИС являются модули **управления и визуализации информации**.

Модуль управления позволяет экспериментатору вводить исходные условия проведения эксперимента, управлять процессом проведения эксперимента, получать и сохранять экспериментальную и расчетную информацию в базе данных.

Началом работы с прикладным ПО ИИС является запуск модуля управления экспериментом. Экранная форма приведена на рис. 1.

В модуле вводятся нужные параметры проведения эксперимента, производится выбор режима работы ИИС и источник исходных данных:

- ввод данных о исследованных ранее материалах из БД;
- режим выполнения эксперимента с помощью ИИС, рис. 1, *а*;
- режим имитационного моделирования и тестирования ПО, рис. 1, *б*.

При использовании готового файла исходных данных из БД при загрузке модуля управления экспериментом анализируется структура файла и выполняется ввод данных в ИИС с целью последующего применения и пересылки их в другие модули. При этом на экран выводятся данные об исследуемом материале и эксперименте.

В случае выбора режима имитационного моделирования в модуль управления экспериментом вводятся данные об эксперименте и материале: ТФХ, тепловые потоки, период опроса датчиков, толщина материала исследуемого образца, количество термо-

пар по толщине образца, передаваемые в модуль имитационного моделирования в котором производится решение прямой и обратной задачи теплопроводности.

В режиме исследования нового материала проводится эксперимент с помощью ИИС. Вводятся условия экспериментального исследования (см. рис. 1, а): данные о материале, его толщина, количество термопар по толщине, напряжение нагревателя, период измерения, и пр. Отображение эксперимента осуществляется в виде таблицы и графиков путем передачи данных в модуль визуализации информации, рис. 2.

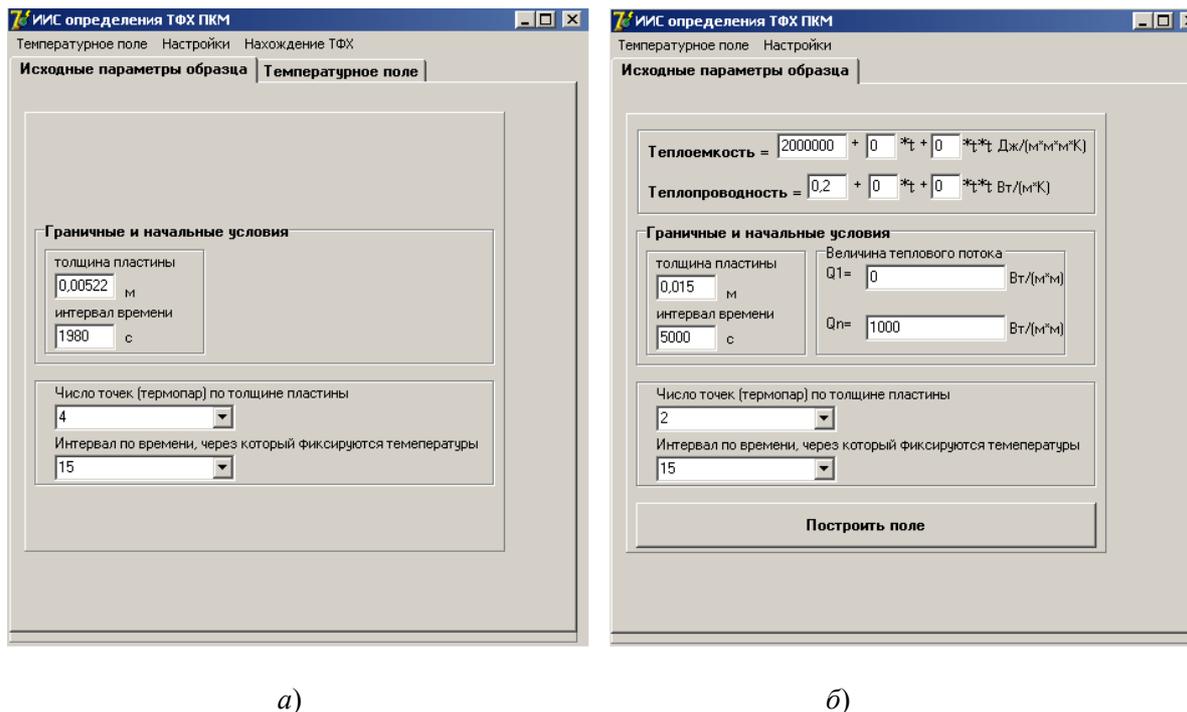


Рис. 1. Задание исходных данных для выполнения эксперимента:
 а – с помощью ИИС; б – для режима имитационного моделирования

Эксперимент заканчивается, когда достигается заданная температура в измерительном устройстве ИИС или когда достигается заданное время выполнения эксперимента. В экстренном случае эксперимент можно остановить кнопкой Esc. После завершения эксперимента, полученные данные сохраняются в БД ИИС модулем управления. На этом его работа заканчивается, и в работу включаются другие модули.

Модуль расчета позволяет определять теплофизические характеристики, т.е. теплоемкость и теплопроводность, а также кинетические и реологические свойства ПК, на основе экспериментально измеренного распределения температуры по толщине исследуемого образца за время эксперимента. Исходными данными для модуля расчета являются экспериментальная информация, которая передается модулем управления экспериментом или модулем имитационного моделирования. Визуализация работы модуля расчета приведена на рис. 3.

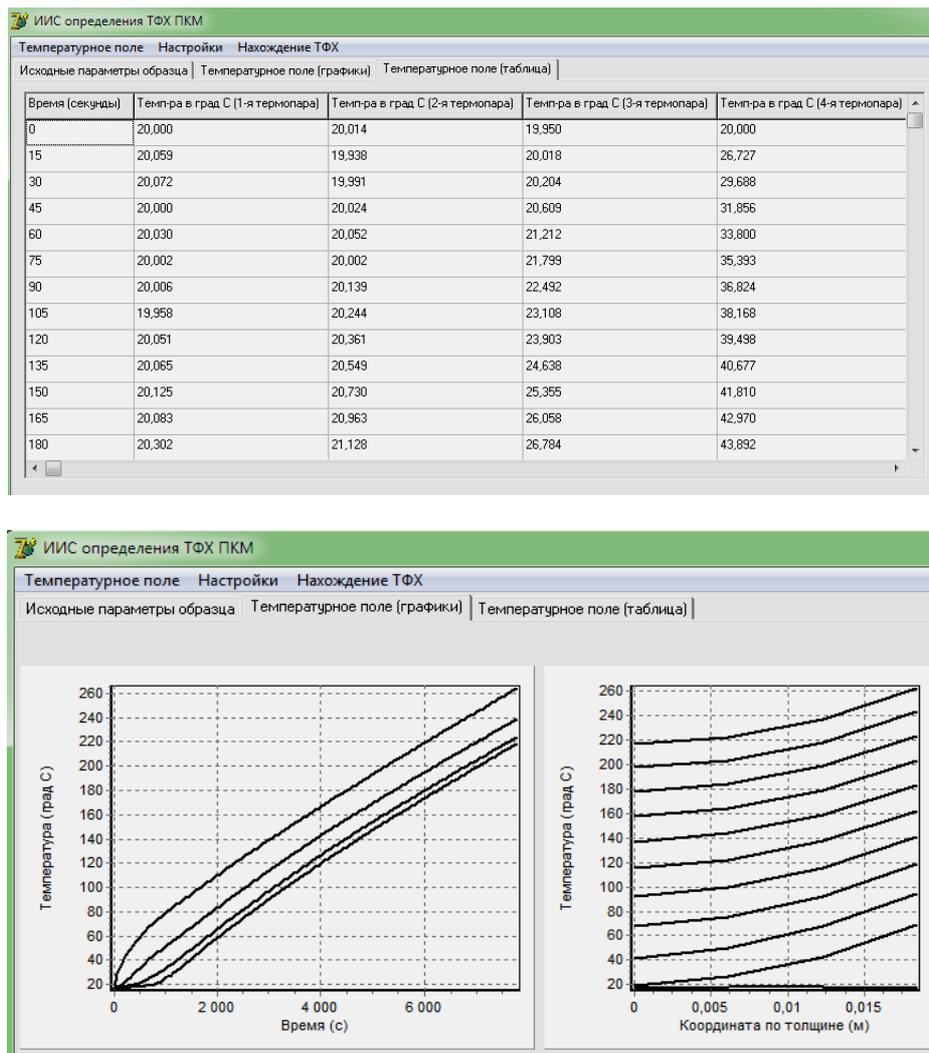


Рис. 2. Текущие данные хода эксперимента по нагреву образца в ИИС

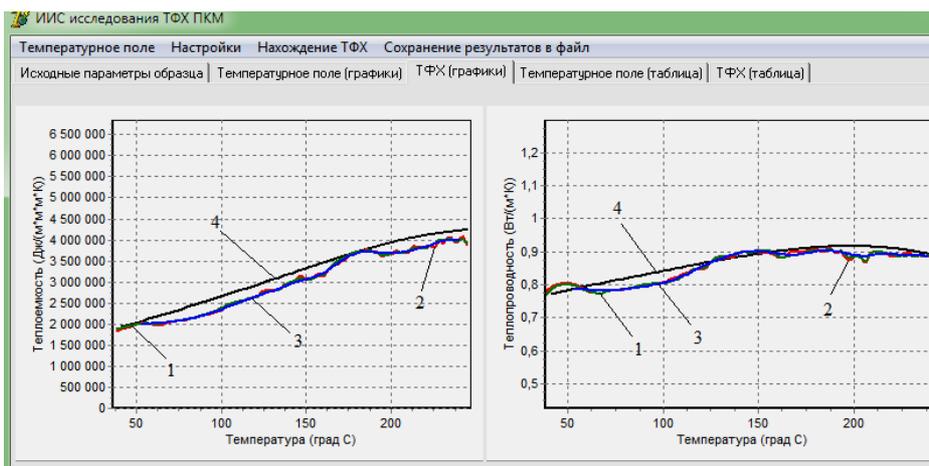


Рис. 3. Визуализация расчетов ТФХ:

- 1 – алгоритм определения ТФХ как константы или зависящей от времени;
- 2 – алгоритм определения временной зависимости ТФХ по температурам поверхности образца;
- 3 – алгоритм определения температурной зависимости ТФХ, основанный на решении интегро-функциональных уравнений;
- 4 – алгоритм фильтра Калмана

Модуль имитационного моделирования позволяет проводить расчеты температурных полей при нагреве аналогичных образцов и сравнивать данные, введенные как исходные при решении прямой задачи с результатами решения обратной задачи, что дает возможность оценить погрешность применяемых алгоритмов расчета.

Модуль поддержки принятия решений позволяет выбирать оптимальный алгоритм расчета ТФХ при отверждении и нагреве ПК, обеспечивающий минимум методической погрешности ТФХ [3, 4]. Это достигается анализом и сравнением входных условий и результатов эксперимента с обширным набором проведенных ранее опытов. Визуализация работы МППР в составе ИИС при выборе оптимального алгоритма расчета ТФХ, приведена на рис. 4.

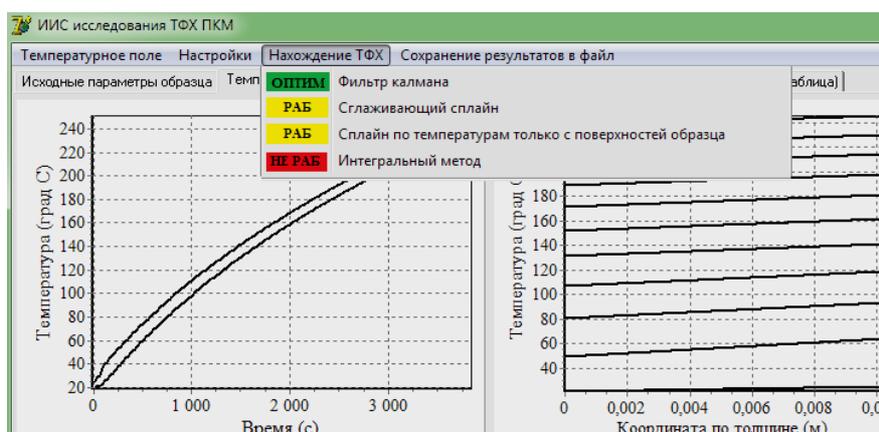


Рис. 4. Визуализация МППР выбора алгоритма расчета ТФХ

Разработана и апробирована система визуализации и управления ИИС, позволяющая представлять входные и выходные данные в виде таблиц и графиков в режиме реального времени в ходе подготовки и выполнения эксперимента, а также визуализировать результаты расчетов, сравнивая их между собой, для анализа полученных данных.

Список использованных источников

1. **Optimization** of Curing Cycles Products of the Polymer Composite Materials on Base of Glutinous Prepregs / O. S. Dmitriev, S. V. Mischenko, S. O. Dmitriev, V. N. Kirillov // Polymer Science, Series D. – 2009. – V. 2, № 4. – P. 223 – 229.
2. **Дмитриев, О. С.** Метод исследования параметров течения связующего при отверждении композитов / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, А. О. Дмитриев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 1. – С. 53 – 61.
3. **Дмитриев, О. С.** Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов / О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова, А. О. Дмитриев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 73 – 83.
4. **Дмитриев, О. С.** Информационная поддержка выбора алгоритма расчета теплофизических характеристик в ИИС / О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова, А. О. Дмитриев // Информатика: проблемы, методология, технологии : материалы XVII междунар. науч.-метод. конф.: в 5 т. Секция 12. – 2017. – С. 298 – 301.

УДК 621.646:62-83

**Соколов В. И., Кроть О. С., Романченко А. В.,
Харламов Ю. А., Батулин Е. А.**

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,
Украина, г. Северодонецк
(Тел. (+38050)8115265, e-mail: sokolov.snu.edu@ gmail.com)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Sokolov V. I., Krol O. S., Romanchenko A. V.,
Kharlamov Yu. A., Baturin E. A.**

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Ukraine, Severodonetsk
(Tel. (+38050)8115265, e-mail: sokolov.snu.edu@ gmail.com)

**SIMULATION DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AUTOMATIC
ELECTROHYDRAULIC DRIVE FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT**

Аннотация. Статья посвящена разработке математических моделей динамических характеристик автоматического электрогидравлического привода технологического оборудования, а также структурная схема математической модели оборудования как объекта автоматического управления. Рассматривается гидравлический привод вращательного движения с объемным регулированием. Привод содержит регулируемый насос и нерегулируемый гидромотор. Регулирование рабочего объема насоса осуществляется электрогидравлическим усилителем. Адекватность математических моделей процесса регулирования рабочего объема насоса, а также привода в целом подтверждена экспериментально по критерию Фишера. Для проверки адекватности были сопоставлены опытные и расчетные переходные характеристики для угла наклона шайбы аксиально-поршневого насоса и скорости вращения вала гидромотора при подаче управляющего сигнала.

Ключевые слова: технологическое оборудование, электрогидравлический привод, объемное регулирование, динамические характеристики, структурная схема, переходной процесс.

Abstract. The article is devoted to the development mathematical models for the dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment, as well as structural scheme of mathematical model for equipment as object of automatic control. The hydraulic drive of rotary motion with volume regulation is considered. The drive contains adjustable pump and unregulated hydraulic motor. The regulation of the working volume of the pump is carried out by the electrohydraulic amplifier. The adequacy of mathematical models for the process of regulating the working volume of the pump, as well as the drive as a whole, has been confirmed experimentally by the Fisher criterion. To verify the adequacy, we compared the experimental and calculated transient characteristics for the angle of inclination of the washer for the axial piston pump and the angular velocity of the motor shaft when applying the control signal.

Keywords: technological equipment, electrohydraulic drive, volume regulation, dynamic characteristics, structural scheme, transient process.

Постановка проблемы. Расширение функциональных возможностей и повышение эффективности технологического оборудования, в частности, оборудования для механической обработки материалов, может быть достигнуто разработкой и применением систем автоматического управления [1 – 5]. Достижение произвольной кинематики рабочего органа, возможности программной реализации оптимальных законов его движения обеспечивается применением автоматических электрогидравлических приводов (ЭГП) с объемным регулированием в оборудовании мощностью свыше 8 кВт. Применение гидропривода в технологическом оборудовании позволяет упростить кинематику, снизить металлоемкость, повысить точность, надежность и уровень автоматизации.

В этой связи актуальной задачей для синтеза и исследования систем автоматического управления является разработка достоверных математических моделей рабочих процессов, протекающих в ЭГП и учитывающих особенности технологического назначения оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблематика математического моделирования характеристик автоматических ЭГП технологического оборудования достаточно широко представлена в литературе [1, 2, 6 – 8]. Исследование рабочих процессов в оборудовании основано на фундаментальных уравнениях гидромеханики, механики твердого тела, электротехники; а для исследования устойчивости и качества регулирования таких систем, для их корректирования применяют методы теории автоматического управления и регулирования.

При математическом моделировании динамических характеристик приводов технологического оборудования с гидравлическим приводом возникают определенные трудности с описанием нестационарных гидромеханических процессов, протекающих в них [1, 6, 8]. В динамике гидросистем имеются особенности, обусловленные взаимодействием гидравлических элементов, а также наличием колебаний давлений, расходов, отдельных деталей вследствие сжимаемости рабочей среды, воздействия рабочей среды на регулирующие устройства и др. Это приводит к сложным нестационарным процессам, которые необходимо учитывать.

Вместе с тем, расширение функциональных возможностей и повышение эффективности технологического оборудования за счет разработки и применения систем автоматического управления требует негромоздких достоверных математических моделей рабочих процессов, протекающих в приводах и достаточно полно учитывающих особенности технологического назначения оборудования.

Цель статьи. Целью данной работы является разработка математических моделей динамических характеристик автоматического ЭГП с объемным регулированием для технологического оборудования, а также структурной схемы математических модели оборудования с гидроприводом вращательного движения как объекта автоматического управления.

Материалы и результаты исследования. На рисунке 1 приведена типовая принципиальная схема силовой части гидравлического привода вращательного движения с объемным регулированием, содержащая две аксиально-поршневые гидромашины:

основной насос 2 и гидромотор 5. Вал насоса приводится во вращение от асинхронного электродвигателя 1. Подача насоса регулируется изменением угла наклона блока цилиндров (или угла наклона шайбы) с помощью устройства 3, которым может быть гидроусилитель. Насос двумя трубопроводами 4 соединен с гидромотором. Вал гидромотора через редуктор 6 соединен с рабочим органом 7. Для восполнения утечек рабочей жидкости служит вспомогательный насос 13, приводимый во вращение от вала основного насоса. Если угол наклона блока цилиндров (угла наклона шайбы) основного насоса регулируется с помощью гидроусилителя, то вспомогательный насос используется также для питания гидроусилителя жидкостью под давлением. Давление в напорной магистрали вспомогательного насоса поддерживается переливным клапаном 10. Эта магистраль через два подпиточных клапана 9 подключена к трубопроводам, соединяющим основной насос и гидромотор. Подпиточные клапаны должны поддерживать в трубопроводе такое минимальное давление, чтобы в основном насосе не возникла кавитация.

От возникновения чрезмерно высокого давления трубопроводы гидропривода защищены двумя предохранительными клапанами 8. В линии нагнетания вспомогательного насоса также имеется предохранительный клапан 12, который защищает насос от повышения давления при засорении фильтра 11.

Отметим обозначения на рис. 1. Здесь P1, P2 – насосы; НМ – гидромотор; CV1, CV2 – клапаны обратные; SV1...SV4 – клапаны предохранительные; F – фильтр; Т – бак; М – электродвигатель; R – редуктор; О – рабочий орган.

При разработке схемных решений автоматических ЭГП технологического оборудования для использования преимуществ объемного способа регулирования важным является правильный выбор системы управления подачи насоса. Анализ систем различного назначения показывает [1 – 3, 9], что применение электрогидравлических усилителей (ЭГУ) позволяет в полном объеме реализовать функциональные требования к оборудованию.

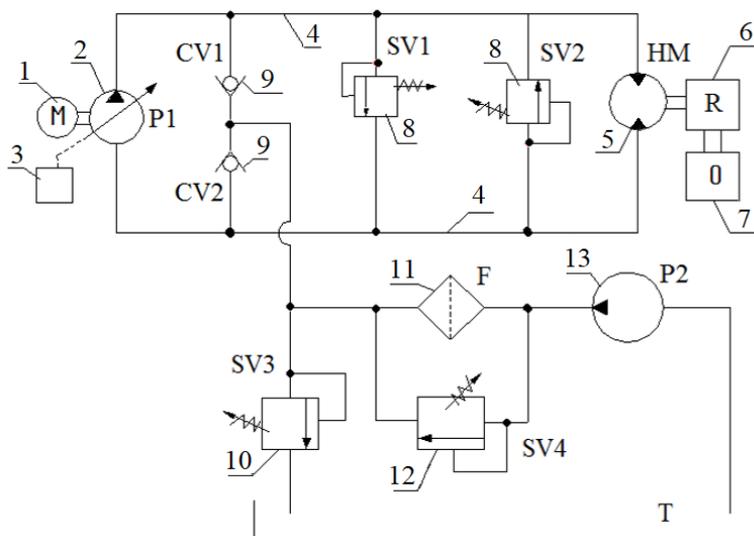


Рис. 1. Схема силовой части ЭГП с объемным регулированием

Гидроусилители по сравнению с другими типами усилителей, например электро-механическими, обладают рядом преимуществ: лучшими динамическими свойствами, большей надежностью, простотой конструкции и очень высокими коэффициентами усиления по мощности (свыше $3 \cdot 10^6$). Достаточно отметить, что отношение массы к мощности гидроусилителя достигает 0,04 кг/кВт, в то время как в электро-механических усилителях этот показатель примерно 20 кг/кВт, а магнитных – до 70 кг/кВт.

ЭГУ можно использовать практически с любым типом объемной гидравлической машины. В машиностроении достаточно широко распространены аксиально-поршневые машины, которые обладают хорошими весовыми характеристиками (при равной мощности они в 2–3 раза легче машин других типов), быстродействием и др. [1, 2, 9].

Схема регулирования угла наклона шайбы аксиально-поршневого насоса ЭГУ представлена на рис. 2. Здесь использован однокаскадный ЭГУ, у которого шток пропорционального электромагнита связан непосредственно с золотником управляющего дросселирующего гидрораспределителя. Четырехщелевой дросселирующий гидрораспределитель подает жидкость к плунжерам, которые и перемещают наклонную шайбу аксиально-поршневого насоса.

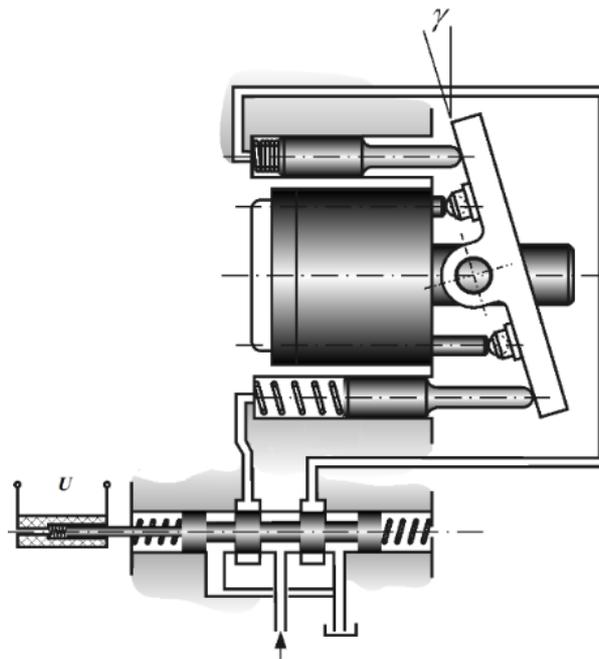


Рис. 2. Управление углом наклона шайбы аксиально-поршневого насоса

Регулируемые аксиально-поршневые насосы с наклонной шайбой, чаще всего, в номенклатуре серийно выпускаемой гидроаппаратуры представлены как гидроагрегаты со встроенным ЭГУ [2, 9]. С использованием паспортных данных допустимо построить динамическую модель второго порядка процесса регулирования угла наклона шайбы насоса γ по управляющему напряжению U

$$T_{2y}^2 \frac{d^2\gamma}{dt^2} + T_{1y} \frac{d\gamma}{dt} + \gamma = k_{yU} U, \quad (1)$$

где $k_{\gamma U}$ – коэффициент передачи ЭГУ, который можно определить по номинальному управляющему напряжению U_{nom} и номинальному углу наклона шайбы аксиально-поршневого насоса γ_{nom}

$$k_{\gamma U} = \frac{\gamma_{nom}}{Q_{nom}}. \quad (2)$$

Постоянные времени T_{2a} , T_{1a} известным образом определяются по частотам ν_1 , ν_2 сдвига по фазе соответственно на -45° и -90° [2, 3, 5].

Данный подход к построению динамической модели автоматического управления углом наклона шайбы аксиально-поршневого насоса вполне применим и в случае использования ЭГУ как самостоятельного устройства, которые в номенклатуре серийно выпускаемой гидроаппаратуры представлены как дросселирующие гидрораспределители или распределители с пропорциональным управлением [5, 6].

Следует отметить, что регулирование подачи насоса может осуществляться не только изменением угла наклона шайбы, а и другими способами, например, изменением угла наклона блока цилиндров. Нетрудно убедиться, что и в данном случае динамическая модель процесса регулирования угла наклона люльки блока цилиндров будет иметь подобный вид.

Таким образом, передаточная функция процесса регулирования угла наклона шайбы (блока цилиндров) в соответствии с (1) имеет вид

$$W_{rp}(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{2a}^2 s^2 + T_{1a} s + 1}, \quad (3)$$

где s – переменная Лапласа.

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, а также анализ характеристик ЭГУ, используемых в регулируемых насосах, передаточную функцию процесса регулирования рабочего объема насоса можно рассматривать как апериодическое звено первого порядка

$$W_{rp}(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{rp} s + 1}, \quad (4)$$

где $T_{rp} = 1/(2\pi\nu_1)$ – постоянная времени процесса регулирования.

В работах авторов [3, 5] получена передаточная функция силовой части ЭГП с объемным регулированием для угла поворота вала гидромотора α по углу наклона блока цилиндров (или шайбы) γ

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{hd} s (T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \quad (6)$$

где T_{hd} – постоянная времени гидропривода; T_m – постоянная времени гидромотора; ζ_m – коэффициент относительного демпфирования гидромотора.

Для построения математической модели ЭГП с объемным регулированием как объекта автоматического управления передаточную функцию для угла поворота вала по углу наклона шайбы (блока цилиндров) привода (7) перепишем в виде

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{\alpha(s)}{\Omega(s)} \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{s} W_{pd}(s) = \frac{k_{\Omega\gamma}}{s(T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \quad (7)$$

где W_{pd} – введенная в рассмотрение передаточная функция силовой части привода (передаточная функция для угловой скорости вращения вала гидромотора по углу наклона шайбы или блока цилиндров)

$$W_{pd}(s) = \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{k_{\Omega\gamma}}{T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1}; \quad (8)$$

$k_{\Omega\gamma}$ – коэффициент передачи силовой части привода [3, 5].

Отметим следующее. Угловая скорость вращения вала гидромотора, в общем случае, определяется не только рабочим объемом насоса, но и величиной нагружающего момента M на валу мотора. Степень влияния устанавливается для конкретного привода, причем, увеличение нагружающего момента однозначно приводит к уменьшению угловой скорости вращения, что в линейном приближении может быть отражено передаточной функцией

$$W_{\Omega M}(s) = \frac{\Omega(s)}{M(s)} = -k_{\Omega M}, \quad (9)$$

где $k_{\Omega M}$ – коэффициент передачи для угловой скорости вращения по нагружающему моменту, величина которого можно оценить по статическим характеристикам объемного гидравлического привода [2, 9].

Таким образом, учитывая принцип суперпозиции, математическую модель технологического оборудования с гидроприводом вращательного действия как объекта автоматического управления можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 3.

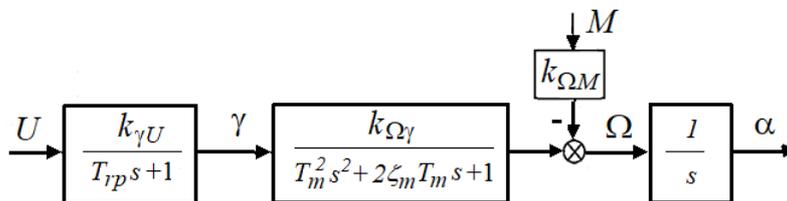


Рис. 3. Структурная схема математической модели ЭГП как объекта автоматического управления

Для проверки адекватности полученных математических моделей процесса регулирования рабочего объема насоса, а также привода в целом разработан автоматизированный стенд экспериментальных исследований и методика обработки опытных дан-

ных. На стенде был использован насос типа НАС 0,04/20 с максимальным рабочим объемом 0,04 л и гидромотор М типа ПМ № 2,5 А с рабочим объемом 0,0317 л. На рисунке 4 сопоставлены опытные и расчетные переходные характеристики для угловой скорости вращения вала гидромотора $\Delta\Omega$ при подаче управляющего напряжения. Экспериментальные значения критерия Фишера (менее 1,2) не превышали табличных значений $\approx 1,8$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. Поэтому разработанные модели динамических характеристик можно считать адекватными и положить в основу дальнейших исследований по синтезу системы автоматического управления технологическим оборудованием.

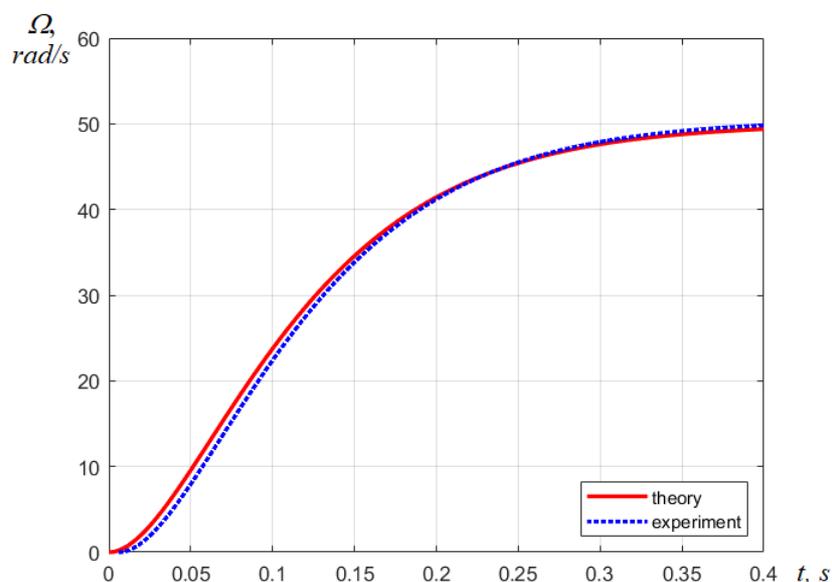


Рис. 4. Переходная характеристика для угловой скорости вращения вала гидромотора

Выводы. Таким образом, разработаны математические модели динамических характеристик автоматического ЭГП с объемным регулированием технологического оборудования, представлена структурная схема математической модели оборудования с гидроприводом вращательного движения как объекта автоматического управления. Адекватность математических моделей процесса регулирования рабочего объема насоса, а также привода в целом подтверждена экспериментально.

Математическая модель технологического оборудования с гидроприводом вращательного движения как объекта автоматического управления положена в основу дальнейших исследований по синтезу систем автоматического управления оборудованием.

Список использованных источников

1. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1987. – 464 с.
2. Навроцкий, К. Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов / К. Л. Навроцкий. – М. : Машиностроение, 1991. – 384 с.

3. **Sokolov, V.** Automatic control system for electrohydraulic drive of production equipment / V. Sokolov, O. Krol, O. Stepanova // 2018 International Russian Automation Conference. (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
4. **Sokolov, V.** Choice of Correcting Link for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment / V. Sokolov, O. Krol, O. Stepanova // Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. LNME. – Cham : Springer, 2020. – P. 702 – 710.
5. **Sokolov, V.** Dynamics research and automatic control of technological equipment with electrohydraulic drive / V. Sokolov, O. Krol, Y. Baturin // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2019.
6. **Sokolov, V.** Transfer function Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction / V. Sokolov // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2019. LNME. – Cham : Springer, 2020.
7. **Sokolov, V.** Diffusion of circular source in the channels of ventilation systems / V. Sokolov // Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. LNNS. – Cham : Springer, 2019. – V. 63. – P. 278 – 283.
8. **Sokolov, V.** Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment / V. Sokolov, O. Krol, O. Stepanova // Journal of Physics: Conference Series 1278, 012003, 2019.
9. **Свешников, В. К.** Станочные гидроприводы : справочник / В. К. Свешников, А. А. Усов. – М. : Машиностроение, 1988. – 512 с.

УДК 004.9

Плутикова А. Н.¹, Абрамова Л. В.²

Северный (Арктический) Федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
Россия, г. Архангельск

¹(Тел. (8182)216100, e-mail: lina.plutikova@mail.ru),

²(Тел. (8182)216100, e-mail: l.abramova@narfu.ru)

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ГИС-СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Plutikova A. N.¹, Abramova L. V.²

Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Russia, Arkhangelsk

¹(Tel. (8182)216100, e-mail: lina.plutikova@mail.ru),

²(Tel. (8182)216100, e-mail: l.abramova@narfu.ru)

PRINCIPLES OF GIS SYSTEM DEVELOPMENT FOR LOGGING ENTERPRISES

Аннотация. Россия – мировой лидер по запасам древесины, а значит, эта отрасль является для страны одной из наиболее значимых. Среди задач лесной отрасли – рациональное использование, сохранение и восстановление лесов. Для решения этих задач необходима информационная система, позволяющая эффективно собирать, обрабатывать и визуализировать информацию. Лесозаготовительные и деревообрабатывающие предприятия активно используют ГИС-системы с целью рационального использования лесных ресурсов путем мониторинга и обработки пространственных данных.

В статье рассмотрена одна из главных проблем отрасли – рациональное использование лесов. Предложен способ решения проблемы посредством разработки и внедрения модуля ГИС-системы на основе кроссплатформенной системы QGIS.

Ключевые слова: лесная отрасль, ГИС-система, QGIS, рациональное использование лесов.

Abstract. Russia is a world leader in wood reserves which means that this industry is one of the most important for the country. The tasks of the forest industry are the rational use, conservation and restoration of forests. To solve these problems an information system is needed to effectively collect, process and visualize information. Logging and woodworking enterprises actively use GIS-systems for the purpose of rational use of forest resources through monitoring and processing of spatial data.

The article deals with one of the main problems of the industry – the rational use of forests. A way to solve the problem by developing and implementing a GIS module based on the cross-platform QGIS system is proposed.

Keywords: forest industry, GIS-system, QGIS, forest management.

Одной из активно развивающихся отраслей в России является лесная промышленность, так как на долю страны приходится 22% мировых лесных ресурсов. Среди главных задач отрасли – рациональное использование, сохранение и восстановление лесов.

Одной из важных проблем являются многочисленные нерациональные вырубки. Уничтожение лесов приводит к таким негативным последствиям, как:

- исчезновение некоторых видов флоры и фауны;
- снижение видового разнообразия;
- уменьшение количества древесного сырья;
- возникновение почвенных эрозий, приводящих к образованию пустынь;
- возрастание количества диоксида углерода в атмосфере;
- заболачивание в местах с высоким уровнем грунтовых вод.

Для решения проблем сохранения и рационального использования лесов необходимо разработать комплекс мероприятий, включающий в себя:

- планирование лесопользования;
- усиление контроля использования природных ресурсов;
- разработку систем мониторинга и учета лесного фонда;
- совершенствование лесного законодательства.

Использование информационных технологий в лесопромышленной области может помочь реализовать первые три мероприятия.

Крупнейшие предприятия в сфере лесозаготовки и деревообработки уделяют особое внимание проблеме сохранения и рационального использования лесов. На территории Архангельской области таким холдингом является ГК «Титан». На протяжении многих лет предприятия холдинга являются участниками добровольной лесной сертификации по системе FSC, а также придерживаются принципов устойчивого лесопользования и соблюдают социальные и экономические требования стандарта в своей деятельности. С целью подтверждения соответствия требованиям стандартов сертификации компании ежегодно проверяются аудиторами FSC.

Применение ГИС-технологий в лесной отрасли является одним из эффективных средств рационального использования лесных ресурсов посредством мониторинга и обработки пространственных данных. Географические информационные системы (ГИС) – автоматизированные информационные системы, предназначенные для обработки пространственно-временных данных, основой интеграции которых служит географическая информация. В ГИС осуществляется комплексная обработка информации – сбор, хранение, изменение, в связи с этим ГИС рассматриваются с различных позиций. Как системы управления ГИС предназначены для обеспечения принятия решений по рациональному управлению землями и ресурсами, использованию различных пространственных объектов. При этом для принятия решений в числе других данных всегда используют картографические данные [1].

Одним из примеров ГИС-систем для лесного хозяйства и лесостроительства является система TopoL-L – адаптированная под задачи непрерывного лесостроительства программа, позволяющая выполнять весь комплекс работ с выделенными совмещенными таксационными и картографическими базами лесостроительной информации. Функциональные возможности программы: создание лесных карт, создание атрибутивных баз

данных, настраиваемые средства контроля корректности баз данных, получение итоговых таблиц для регламентов и проектов освоения лесов. На рисунке 1 представлено окно работы с лесничеством в системе ТороL–L.

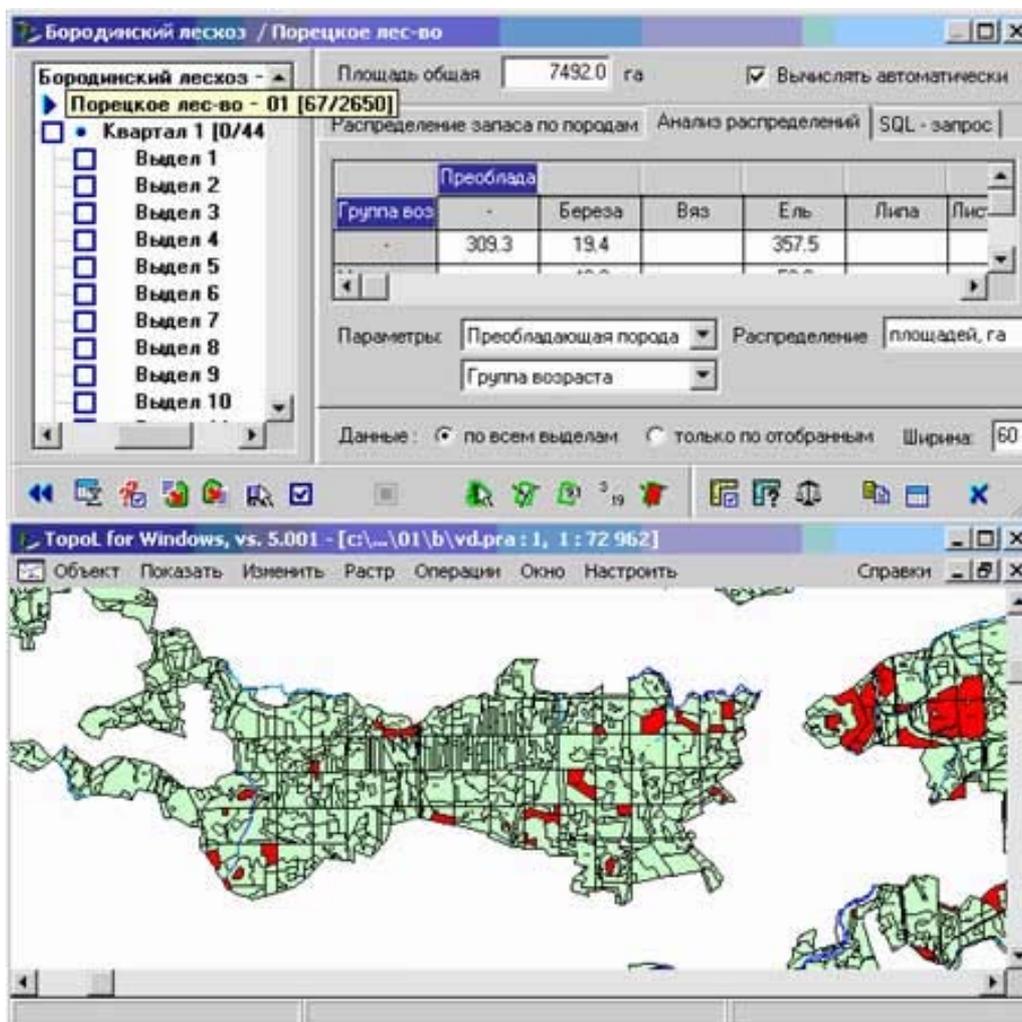


Рис. 1. Интерфейс системы ТороL–L

Система ТороL–L не позволяет полностью решить проблему рационального использования лесного фонда, так как имеет слабые возможности интеграции данных лесоустройства с внешними системами, не обладает функциональными возможностями для учета и контроля плана лесозаготовок, а также требует ежегодной оплаты обслуживания.

Предлагаемый способ решения проблемы сохранения и рационального использования лесов – разработка и внедрение ГИС-систем, в том числе корпоративных ГИС-систем, интегрированных с бизнес-процессами предприятия. На сегодняшний день существующие геоинформационные системы представляют собой инструмент для решения широкого круга задач и применяются в картографии, геологии, метеорологии, землеустройстве, экологии, муниципальном управлении, транспорте, экономике,

обороне и многих других областях, а, следовательно, зачастую содержат универсальные функциональные возможности. Разрабатываемый модуль представляет собой набор инструментов, адаптированный для работы сотрудников лесной отрасли, позволяющий сократить время на обработку информации на предприятии и поддерживать принципы рационального использования лесного фонда.

Выбор средств реализации модуля осуществлялся путем анализа наиболее востребованных и современных ГИС – ArcGIS, MapInfo, QGIS. Для разработки модуля выбрана кроссплатформенная геоинформационная система QGIS, имеющая широкий функционал для реализации потребностей лесной отрасли и возможность интеграции с системами лесного хозяйства. Кроме того, QGIS обладает следующими преимуществами даже перед профессиональными дорогостоящими системами:

- мультиплатформенность: возможность использования данных одновременно из разных программных продуктов без конвертации;
- возможность установки программы на различные операционные системы, в том числе на Windows, MacOS, Ubuntu и другие;
- большой ассортимент бесплатных модулей для специализированных задач;
- возможность публикации карт на картографическом сервисе Mapserver;
- возможность загрузки космических снимков из самых разных источников, в том числе из популярных Google, Yandex, Bing Aerial и многих других;
- программа имеет совместимость с различным специализированным оборудованием, что облегчает разработку и обновление карт;
- открытость и свободный доступ к исходному коду позволяют написать или изменить любой скрипт или модуль программы [2].

Разрабатываемый модуль предполагает поддержку принципов рационального использования лесов – соблюдение расчетной лесосеки, соблюдение плана заготовок древесины в пределах годового прироста.

Разработка модуля для обработки пространственных данных в лесной отрасли позволит:

- повысить качество обработки пространственных данных: топологических карт, снимков местности;
- сократить время преобразования информации за счет внедрения геоинформационных технологий;
- оптимизировать рутинные процессы сбора, хранения и анализа информации в лесной отрасли;
- повысить уровень взаимодействия отрасли с государственными структурами, так, например, данные из разработанного модуля могут быть использованы специалистами МЧС для анализа и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Разработанный модуль позволит выявлять наличие ресурсов древесины по всем видам пользования лесом с учетом интенсивности лесопользования, мест проведения мероприятий, устранения и локализации факторов, неблагоприятно воздействующих

на рост и развитие насаждений, их экологическое состояние. Кроме того, внедрение модуля на предприятиях лесной отрасли позволит сократить трудовые затраты на проведение очередного лесоустройства и ведение документации по учету лесов и лесного кадастра.

Список использованных источников

1. **Геоинформационные** системы [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <http://gis.web.tstu.ru/chtogis2.htm>, свободный (дата обращения: 02.09.2019). – Загл. с экрана.

2. **QGIS** – свободная ГИС с открытым кодом [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <https://qgis.org/ru/site/>, свободный (дата обращения: 03.09.2019). – Загл. с экрана.

3. **Группа** компаний Титан [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <http://www.titangroup.ru/>, свободный (дата обращения: 03.09.2019). – Загл. с экрана.

Секция II

**ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И
ПРОТОТИПИРОВАНИЕ
СОЦИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ОБЪЕКТОВ**



УДК 004.946

Вехтева Н. А., Волков А. А., Дедов Д. Л.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. 89082981042, e-mail: magicanloner@gmail.com)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНИМАЦИЯ ПЕРСОНАЖЕЙ
В РАМКАХ РЕКОНСТРУКЦИИ ИСТОРИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ
ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

Vekheteva N. A., Volkov A. A., Dedov D. L.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. 89082981042, e-mail: magicanloner@gmail.com)

**SIMULATION AND ANIMATION OF CHARACTERS AS PART
OF THE RECONSTRUCTION OF HISTORICAL EVENTS FOR VIRTUAL REALITY**

Аннотация. В статье описаны основные этапы создания трехмерных моделей и настройка их анимации в рамках реконструкции Казачьей слободы XVII века в виртуальной реальности. Отражены основные принципы работы с 3D-графикой и некоторые особенности программного обеспечения Blender 3D.

Ключевые слова: модель, виртуальная реальность, UV-развертка, ре-топология, анимация, реконструкция, скульптинг.

Abstract. The article describes the basic steps for creating three-dimensional models and their animation setting in the reconstruction of the Cossack settlement of the 17th century in a virtual reality. It reflects the basic principles of working with 3D-graphics and some features of Blender 3D software.

Keywords: model, virtual reality, UV-scan, re-topology, animation, reconstruction, sculpting.

Реконструкция исторических событий достоверно и качественно можно провести с помощью технологий дополненной и виртуальной реальностей [1 – 5]. Нагляднее воссоздать, например, крепость с помощью трехмерной визуализации, чем делать макеты, в которых невозможно будет отразить многие детали за счет несовершенства материалов.

В данной работе рассмотрим процесс реконструкции на примере казачьей слободы XVII века. Для этого используется профессиональное программное обеспечение для создания трехмерной компьютерной графики – Blender 3D [5]. Требуется воссоздать в виртуальной реальности набег татар на казачью слободу и повседневную жизнь жителей. На начальном этапе необходимо продумать структуру ключевых предметов, объектов, их свойства, цвет, где они будут расположены. Все детали должны быть на определенном уровне привычны, относиться к своему месту и времени. Поэтому, реконструкция начинается с изучения старых картин, реконструированных изображений, исторических записей. Для воссоздания анимации понадобится найти нужные медиа-ресурсы [2, 3]. Больше референсов – больше знаний об объекте, следовательно, более реалистичный результат.

После сбора материала начинается процесс планирования сцен и действий. В рамках данной работы в первой сцене персонаж находится в повозке. Для создания этой сцены необходимо смоделировать следующие элементы: повозку, лошадь, вожжи, казака и камеру. При создании любой 3D-модели необходимо сразу определить ограничения в количестве полигонов. Для данной задачи их должно быть меньше, чем десять тысяч на одну модель.

Рассмотрим поподробнее создание трехмерной модели лошади. Для этого выбраны прообразы из учебников анатомии животных, а также фотографии, которые используются в качестве изображений для вида справа, спереди и сверху. Располагаем эти картинки фоном в соответствующих проекциях. На этом этапе прорисовываются все особенности и мелкие элементы такие, как копыта, грива, морда, уздечка, некоторые тонкие застежки крепежа. После таких преобразований на рабочем пространстве может находиться пятьсот тысяч плоскостей. При таком количестве полигонов может значительно снизиться производительность сцены. Поэтому воссоздается новый меш (mesh) поверх существующего, но с меньшим количеством полигонов. Такие инструменты, как привязка вершин и обтекание, с возможностью выбора активного объекта, ускоряют процесс ре-топологии [4].

Старая высоко полигональная модель будет использоваться для переноса данных ее нормалей на новую, но перед этим нужно создать ее развертку на текстуре. Для этого выделяются ребра разреза и помечается шов. Далее выбранные элементы разворачиваются программным способом (рис. 1).

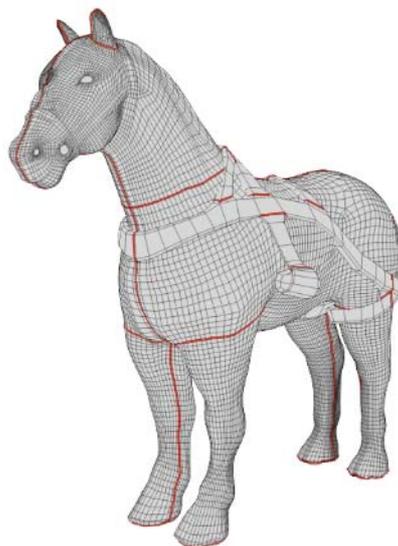


Рис. 1. Выделение швов на модели лошади

Одинаковые и симметричные части можно отредактировать в UV-редакторе (рис. 2), сдвинув их друг на друга для того, чтобы увеличить качество накладываемой текстуры. В завершение выполняется запекание нормалей на созданную развертку. При настройке материалов развертка указывается как карта нормалей. На этом моделирование лошади закончено.

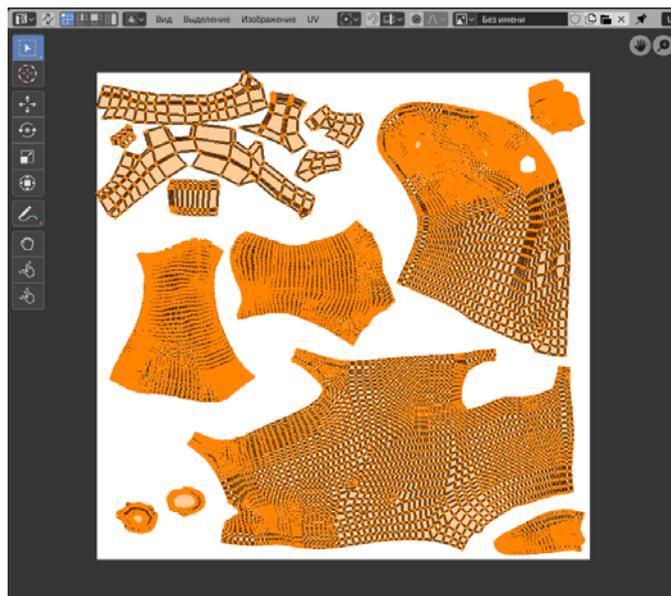


Рис. 2. UV-редактор. Развертка меша лошади

Дальше начинается процесс анимирования. В используемом программном обеспечении присутствуют уже готовые арматуры для управления анимацией персонажей, состоящие из определенного набора костей. Все кости совмещаются с соответствующими местами меша. Для анимации лица и хвоста они не пригодятся. Автоматически связываем меш со скелетом. Но из-за несовершенства программных вычислений приходится подправлять вес, т.е. влияние выбранной кости к определенным точкам меша. Рисуем его с использованием различных кистей и регулировки значения веса в местах, где ноги, голова или туловище выглядят неправдоподобно – искажены, сломаны, имеют другие похожие дефекты (рис. 3).

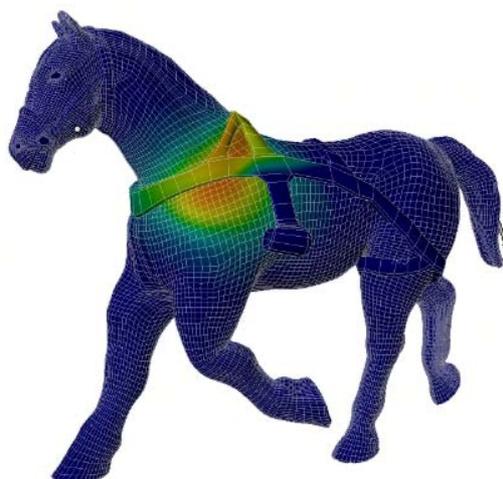


Рис. 3. Редактор веса. Настройка привязки костей

Далее используем один из простых способов анимирования через контрольные точки в промежутках времени (рис. 4).

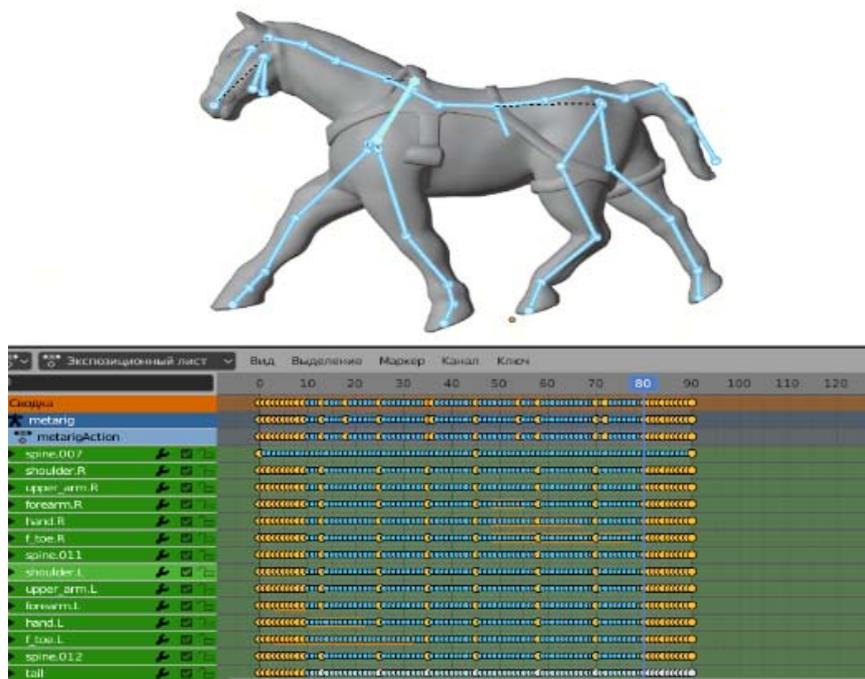


Рис. 4. Настройка ключей анимации

Чтобы правильно анимировать животное была использована последовательность кадров с изображением всадника на бегущей лошади. Выбираем определенное количество шагов анимации. Вращая и перемещая кости придаем нужную позу. Все преобразования запоминается программой при создании ключевого кадра. Движемся по временной шкале, опять передвигаем кости и создаем ключи. Для визуализации ходьбы достаточно зациклить один шаг лошади. Для этого первый и последние кадры должны быть полностью идентичны, чтобы исключить резкие переходы. Когда все ключи расставлены, то переходы между ними сглаживает сама программа. Следующим этапом расставляем дополнительные ключи в местах, где движения выглядят неестественно. Если перехода между началом и концом анимации не видно, то анимирование завершено.

Аналогично создаются остальные модели, но в некоторых моментах есть различия. Так, для повозки и вожжей был использован скелет существующий скелет лошади, но только с добавлением нескольких костей – трех дополнительных, с помощью которых настраивались вращение колес и наклон всей конструкции. Казак имеет свой собственный скелет, а его анимация максимальна проста. Требовалось визуализировать ситуацию, где он сидит и держит вожжи.

Все остальные составляющие проекта создавались аналогичным способом. В ходе изучения Blender 3D был выявлен другой подход к запеканию карты нормалей [5]. Различие в том, что нет необходимости создавать две различные по количеству полигонов модели. Вместо этого создается одна единственная, подходящая под все ограничения задачи, используя модификатор под названием «мультиразрешение». В режиме скульптинга также воссоздаются все украшения и фрагменты. Изменения меша на каждом уровне подразделения запоминаются программой. И поэтому после создания UV-развертки, вернувшись на первоначальный уровень UV-сетки, можем запечь на нее

данные нормалей из мультиразрешения, с самого большого подразделения до выбранного (рис. 5). Этот способ упрощает и ускоряет процесс создания людей или животных, а полученная в результате текстура получается менее искаженной.

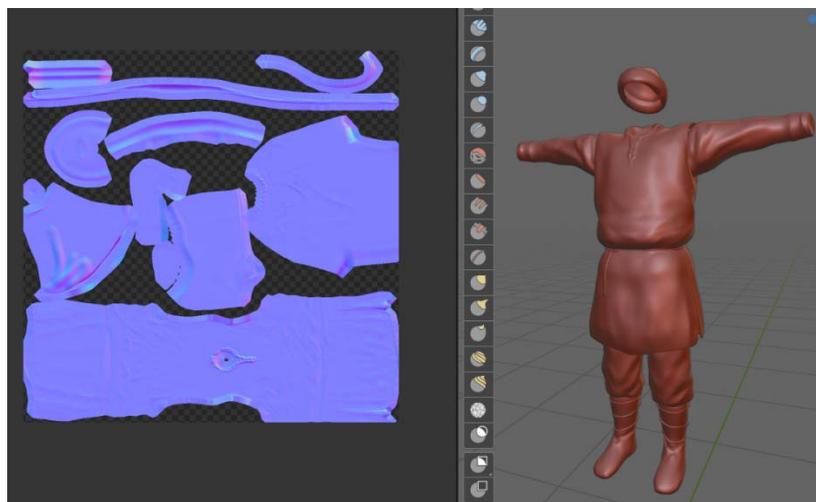


Рис. 5. Скульптинг модели и создание карты нормалей

Когда все нужные объекты готовы, перед экспортом необходимо проверить, чтобы совпадали центры масс меша и скелета, а его оси поворота были направлены в нужную сторону. Для лучшего поиска в структурах проекта, каждый предмет в иерархии подписываем своим именем, тоже касается и текстур.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 19-013-00567 на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение».

Список использованных источников

1. **Математическая** модель процесса обучения в адаптивных тренажерных комплексах для эргатических систем профессионального назначения / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Информатизация образования и науки. – 2018. – № 4(40). – С. 81 – 93.
2. **Системный** анализ и формализация структуры адаптивных тренажерных комплексов эргатических систем / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 4. – С. 45 – 52.
3. **Vaughan, N.** An overview of self-adaptive technologies within virtual reality training / N. Vaughan, B. Gabrys, V. N. Dubey // Computer Science Review. – 2016. – V. 22. – P. 65 – 87.
4. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – V. 327, № 2. – С. 022075.
5. **Kent, B. R.** 3D scientific visualization with blender / B. R. Kent. – Morgan & Claypool Publishers, 2014.

УДК 004.021

**Немтинов В. А., Горелов А. А., Борисенко А. Б.,
Трюфилькин С. В., Немтинова Ю. В.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

**ВИРТУАЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАМЯТНЫХ МЕСТ В ТАМБОВЕ,
СВЯЗАННЫХ С ПРЕБЫВАНИЕМ АРХИЕПИСКОПА ЛУКИ**

**Nemtinov V. A., Gorelov A. A., Borisenko A. B.,
Tryfilkin S. V., Nemtinova Yu. V.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

**VIRTUAL RECONSTRUCTION OF MEMORABLE PLACES IN TAMBOV
ASSOCIATED WITH THE STAY OF ARCHBISHOP LUKE**

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы информационного анализа данных при создании виртуальной модели памятных мест, связанных с пребыванием в Тамбове архиепископа Луки. По результатам анализа было создано предварительное чертежно-картографическое изображение территории, используемое в дальнейшем при создании виртуальной трехмерной модели.

Ключевые слова: информационный анализ, виртуальная модель территории памятных мест, связанных с пребыванием в Тамбове архиепископа Луки.

Abstract. The article deals with the issues of information analysis of data when creating a virtual model of memorable places associated with the stay of Archbishop Luke in Tambov. Based on the results of the analysis, a preliminary drawing and cartographic image of the territory was created, which is used in the future when creating a virtual three-dimensional model.

Keywords: information analysis, virtual model of the territory of memorable places associated with the stay of Archbishop Luke in Tambov.

На основе собранной информации о пребывании В. Ф. Войно-Ясенецкого в Тамбове [1] авторами была выполнена виртуальная реконструкция [2 – 8] части территории города с целью восстановления исторической памяти. Первым шагом на пути разработки виртуальной модели являлось создание чертежно-картографического изображения того участка территории, где находился дом, в котором жил архиепископ Лука и места, которые чаще всего он посещал. Исходя из выше изложенного, мы подготовили эскиз плана-схемы территории (рис. 1), фоном которой является современный план. Далее авторами разработана виртуальная модель территории, представленная в виде виртуального музея [9 – 12]. Музей представляет собой виртуальную трехмерную реконструкцию территории. Он реализован с помощью программной платформы с открытым кодом OpenSimulator 0.9.0, которая представляет собой серверную платформу для создания трехмерных виртуальных миров [11 – 13].

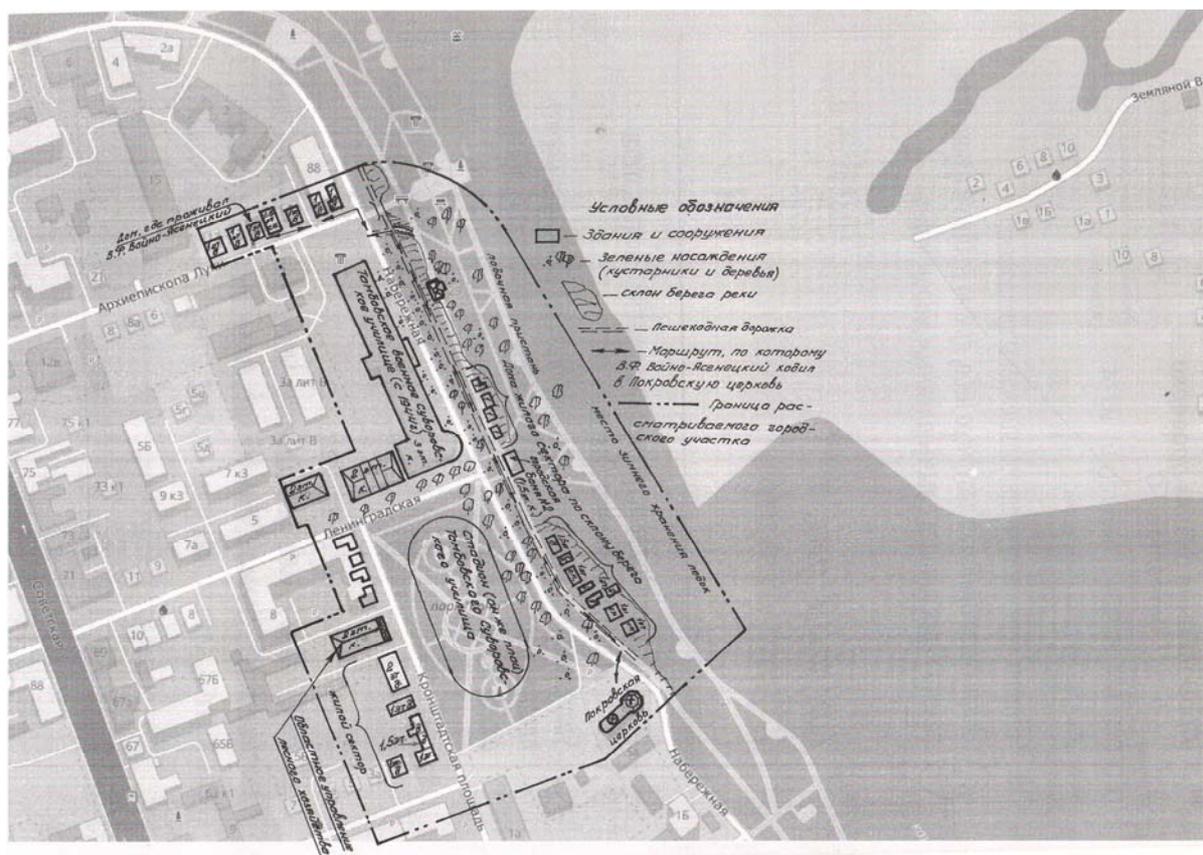


Рис. 1. План-схема территории памятного места, связанного с пребыванием архиепископа Луки в Тамбове

В программах 3D-моделирования (Google SketchUp, Blender) по известным параметрам (размерам, материалу) были построены объемные 3D-модели объектов как существующих объектов, так и утраченных, либо частично разрушенных. Используя программы дизайна ландшафтов (L3DT, Terragen) на основе доступной топографической информации (карт, планов, схем, снимков из космоса) была спроектирована 3D-модель ландшафта.

На основе созданных 3D-моделей объектов и ландшафта в программной системе для создания многопользовательских трехмерных виртуальных миров OpenSimulator формируется итоговое виртуальное пространство. Посетитель музея с помощью специализированного программного клиента (Cool VL Viewer, Singularity) подключается к серверу через Internet и управляет перемещением аватара (виртуального персонажа) внутри смоделированного виртуального мира. На рисунках 2, 3 представлены отдельные фрагменты виртуального музея.

Виртуальные музеи обладают значительным познавательным и исследовательским потенциалом и активно содействуют сохранению культурного наследия. Применение современных информационных технологий позволяет привлечь внимание к объектам исторического и культурного значения. Разработанный авторами виртуальный музей способствует популяризации краеведческой и музейной деятельности, в том числе среди подрастающего поколения.



Рис. 2. Визуализация модели территории памятного места, связанного с пребыванием архиепископа Луки в Тамбове (слева расположено здание Покровской церкви, справа – здание б. Тамбовской духовной семинарии)



Рис. 3. Виртуальная реконструкция территории дома № 9 по ул. Комсомольская, где жил В. Ф. Войно-Ясенецкий

Публикация подготовлена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований «Информационный анализ памятных мест, связанных с пребыванием и деятельностью В. Ф. Войно-Ясенецкого (святителя Луки) На Тамбовской Земле» (проект № 19-49-680004 p_a).

Список использованных источников

1. **Лисичкин, В. А.** Тамбовский путь Святителя Лука / В. А. Лисичкин. – М. : Изд-во «Город», 2010. – С. 6.
2. **Visualization** of a virtual space and time model of an urban development territory / V. A. Nemtinov, A. A. Gorelov, Y. V. Nemtinova, A. B. Borisenko // Scientific Visualization. – 2016. – V. 8, № 1. – P. 120 – 132.
3. **Implementation** of technology for creating virtual spatial-temporal models of urban development history / V. A. Nemtinov, A. A. Gorelov, Y. V. Nemtinova, A. B. Borisenko // Scientific Visualization. – 2018. – V. 10, № 3. – P. 99 – 107.
4. **Двухжилова, И. В.** Информационные ресурсы Тамбовского центра краеведения / И. В. Двухжилова, Г. П. Пирожков // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. – 2013. – № 4-1. – С. 65 – 69.
5. **Информационные** технологии при создании пространственно-временных моделей объектов культурно-исторического наследия : монография / В. А. Немтинов, А. А. Горелов, П. А. Острожков, Ю. В. Немтинова и др. ; М-во обр. и науки РФ, ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2013. – 216 с.
6. **Технология** создания пространственных моделей территориально распределенных объектов с использованием геоинформационных систем / В. А. Немтинов, А. М. Манаенков, В. В. Морозов, К. В. Немтинов // Информационные технологии. – 2008. – № 8. – С. 23 – 25.
7. **Пространственно-временная** модель объекта культурно-исторического наследия / В. А. Немтинов, А. А. Горелов, П. А. Острожков и др. // Информационные технологии. – 2010. – № 7. – С. 36 – 39, обложка.
8. **Немтинов, В. А.** Методологические основы ретроспективного анализа объектов исторического и культурного наследия с использованием информационных технологий / В. А. Немтинов, А. А. Горелов // Клио. – 2008. – № 1. – С. 3 – 8.
9. **Немтинов, В. А.** Моделирование объектов культурно-исторического наследия – основа клиометрических исследований / В. А. Немтинов, А. А. Горелов // Клио. – 2010. – № 4. – С. 3 – 7.
10. **Информационный** анализ объектов культурного наследия с использованием ГИС-технологий / В. А. Немтинов, А. А. Горелов, К. В. Немтинов и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 4. – С. 1001 – 1012.
11. **Немтинов, В. А.** Виртуальное моделирование объектов культурно-исторического наследия с использованием ГИС-технологий / В. А. Немтинов, В. В. Морозов, А. М. Манаенков / Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 709 – 714.
12. **Ретроспективный** анализ городского участка исторической застройки с целью построения его пространственно-временной модели на примере соборной площади г. Тамбова / В. А. Немтинов, А. А. Горелов, Ю. В. Немтинова, П. А. Острожков / Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2011. – № 4. – С. 41 – 46.
13. **Горелов, И. А.** Компьютерные технологии при решении вопросов развития территорий городских муниципальных образований / И. А. Горелов, В. А. Немтинов // Информационное общество. – 2014. – № 1. – С. 49 – 54.

УДК 004.021

Немтинов В. А., Борисенко А. Б., Трюфилькин С. В.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО
ДИЗАЙНЕРА-ВИЗУАЛИЗАТОРА ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

Nemtinov V. A., Borisenko A. B., Tryufilkin S. V.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630706, e-mail: kafedra@mail.gaps.tstu.ru)

**AUTOMATED WORKPLACE
OF THE DESIGNER-VISUALIZER VIRTUAL ENVIRONMENT**

Аннотация. Рассмотрены вопросы формирования автоматизированного рабочего места дизайнера-визуализатора виртуальной среды на примере памятных мест Тамбовского края, связанных с пребыванием в них известных деятелей России. Описана совокупность информационно-программно-технических ресурсов, обеспечивающих: обработку графических данных, полученных с использованием оборудования для съемки панорамных фото- и видеоизображений; разработку виртуальных реконструкций объектов культурного и исторического наследия с использованием технологии виртуального моделирования и объединенных в виде трехмерного виртуального музея; разработку информационного непрерывно действующего интернет-ресурса, включающего разнообразную информацию об объекте исследования; визуализацию созданных объектов виртуальной реальности с использованием соответствующих очков и шлема.

Ключевые слова: автоматизированное рабочее место, дизайнер-визуализатор, виртуальная среда, объекты культурного и исторического наследия, памятные места Тамбовского края, информационно-программно-технические ресурсы.

Abstract. The questions of formation of the automated workplace of the designer-Visualizer of the virtual environment on the example of memorable places of the Tambov region connected with stay in them of the known figures of Russia are considered. Described the totality of the information and software and hardware resources for: processing the image data obtained with the use of the equipment for shooting panoramic photos and videos; development of virtual reconstruction of objects of cultural and historical heritage using virtual modeling technology and combined in the form of a three-dimensional virtual Museum; development of information continuously operating Internet resource, including a variety of information about the object of study; visualization of created objects of virtual reality using appropriate glasses and helmet.

Keywords: automated workplace, designer-Visualizer, virtual environment, objects of cultural and historical heritage, memorable places of Tambov region, information and software resources.

При создании виртуальных реконструкций объектов культурного и исторического наследия, виртуальных музеев и туров автоматизированное рабочее место (АРМ) дизайнера-визуализатора виртуальной среды [1] должно быть оснащено современной

вычислительной техникой, специализированным аппаратным обеспечением для съемки видео и фото в формате 360° [2], квадрокоптером с высококачественной видеокамерой [3], виртуальным шлемом [4], а также необходимым прикладным программным обеспечением.

АРМ представляет собой совокупность информационно-программно-технических ресурсов, обеспечивающих:

- обработку графических данных, полученных с использованием оборудования для съемки панорамных фото- и видеоизображений;
- разработку виртуальных реконструкций объектов культурного и исторического наследия с использованием технологии виртуального моделирования и объединенных в виде трехмерного виртуального музея;
- разработку информационного непрерывно действующего интернет-ресурса, включающего разнообразную информацию об объекте исследования;
- визуализацию созданных объектов виртуальной реальности с использованием соответствующих очков и шлема.

В качестве элементов виртуального музея используются различные виды данных, в том числе как традиционные текстовые данные, видео и фотоматериалы, так и виртуальные туры и трехмерные виртуальные реконструкции.

Виртуальный тур (3D-тур, тур 360°, панорамный тур) – это один из современных видов видеоконтента, интерактивный виртуальный проект, презентация с эффектом присутствия, созданная на основе трехмерных сферических и/или цилиндрических панорам, связанных между собой ссылками-переходами (хотспотами). При этом зритель может «перемещаться» по локациям управляя не только своими движениями, но и движениями камеры. Часто панорамы в виртуальном туре имеют привязку к карте по координатам места съемки и ориентированы по сторонам света. Привязка осуществляется с помощью GPS-приемника.

Для создания виртуального тура рекомендуется использование специализированного аппаратного обеспечения для съемки видео и фото в формате 360°, а также специализированного программного обеспечения (например, 3DVista Virtual Tour Suite). Для демонстрации используется как экран компьютера, однако намного сильнее эффект присутствия достигается с использованием качественных устройств (шлемов) виртуальной реальности. В целях улучшения результатов панорамной съемки требуется использование специализированных камер (как мобильных, так и стационарных), позволяющих как фотографировать и снимать видео в формате 360 градусов в ультра высоком разрешении UHD 8K, так и делать стерео-съемку в режиме 3D. Также качество съемки улучшает использование штатива, который обеспечивает стабилизацию камеры. Для съемки объектов исторического наследия с воздуха необходимо применение квадрокоптеров с высококачественной видеокамерой (формат видео не ниже 4K). Следует отметить, что виртуальные туры, как правило, копируют реально существующие места и объекты реального мира, которые были запечатлены с помощью специализированной фото и видеосъемки.

Трехмерное моделирование позволяет реконструировать утраченные либо частично разрушенные исторические объекты, неосуществленные проекты, исчезнувшие

архитектурные памятники. Технически, создание виртуальной 3D-реконструкции исторического объекта можно представить следующим образом. В программах 3D-моделирования (Google SketchUp, Blender, Maya, Autodesk 3Ds Max) по известным параметрам (размерам, материалу) строятся объемные 3D-модели исторических объектов (построек, зданий и др). Для работы с текстурами объектов используются графические редакторы (GIMP, Paint.NET, Adobe Photoshop). Используя программы дизайна ландшафтов (L3DT, Terragen) на основе доступной топографической информации (карт, планов, схем, снимков из космоса) проектируется 3D-модель ландшафта. Затем на основе подготовленных 3D-моделей объектов и ландшафта в программных системах для создания многопользовательских трехмерных виртуальных миров (OpenSimulator, Second Life, Unreal Engine, Unity3D) формируется итоговое виртуальное пространство. С помощью специализированного программного клиента (Firestorm, Singularity, Cool VL Viewer) пользователь управляет перемещением аватара (виртуального персонажа) внутри смоделированного виртуального мира.

С технической точки зрения для создания необходимого контента как для виртуальных туров, так и трехмерных реконструкций, требуются компьютеры с высокой вычислительной мощностью и большим объемом дискового пространства. Видеоролики высокого разрешения в формате 360 градусов занимают большой объем, и для их монтажа конечного видео необходимы значительные вычислительные ресурсы. Рендеринг виртуальных моделей (процесс создания финального изображения или последовательности изображений, при котором идет преобразование 3D-геометрии, текстур и световых данных сцены в объединенную информацию о цветовом значении каждого пикселя в 2D-изображении) является одним из самых сложных с точки зрения вычислительных затрат этапов. Обычно рендеринг выполняется процессором, однако часто возможно выполнять вычисления, связанные с рендерингом, на видеокарте. Также графические пакеты трехмерной графики, системы трехмерной визуализации для использования совместно со шлемами виртуальной реальности, требуют наличия мощной видеокарты. Для обработки видео в формате 4K и выше требуется использование мониторов с поддержкой разрешения не ниже 3840×2160 пикселей.

Для комфортной работы дизайнера-визуализатора виртуальной среды рекомендуется использование компьютеров с мощными многоядерными процессорами, большим объемом оперативной и дисковой памяти, а также мощной графической подсистемой. Для размещения web-сервера с результатами проекта, запуска серверного программного обеспечения многопользовательского мира OpenSimulator, а также хранения рабочего материала (фото и видеоролики в формате 360 градусов, проектов Unreal Engine и пр.) необходим выделенный сервер [5].

Для выполнения работ по созданию и визуализации виртуальной среды различного назначения (в частности, памятных мест Тамбовского края, связанных с пребыванием в них известных деятелей России), необходимы высокопроизводительные вычислительные ресурсы. В связи с этим вычислительное ядро АРМ дизайнера-визуализатора виртуальной среды должно быть оснащено компьютерным оборудованием со следующими характеристиками: процессор Intel i7 или лучше, оперативная память не менее 32 Гб, дисковая память не ниже 1 Тб, графический процессор не хуже NVIDIA RTX 2070.

Таким образом, при оснащении АРМ дизайнера-визуализатора виртуальной среды выше приведенным оборудованием и необходимым программным обеспечением, можно создавать виртуальные музеи и виртуальные туры по объектам культурного и исторического наследия максимально приближенных к реальному миру [6 – 10].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-18-00044) – «Анализ исторических процессов памятных мест Тамбовского края, связанных с пребыванием в них известных деятелей России, с использованием технологии виртуального моделирования».

Список использованных источников

1. **Дизайнер** виртуальной среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://proforientator.ru/professions/dizayner-virtualnoy-sredy-vr> (дата обращения: 26.06.2019).
2. **INSTA360** – Камеры 360 градусов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://insta360.ru/product/insta360-pro-kamera/?roistat=google8_g_68976418940_339489265406_%2Binsta%20%2B360%20%2Bpro&roistat_referrer=&roistat_pos=1t1&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=cid|1743486390|search&utm_content=gid|68976418940|aid|339489265406|placement|&utm_term=%2Binsta%20%2B360%20%2Bpro&gclid=EAIAIQobChMIhovc8r_h4gIVyKMYCh2E4AO3EAAAYASAAEgLS4vD_BwE (дата обращения: 26.06.2019).
3. **Квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro + Smart Controller** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://tambov.sidex.ru/view.php?id=3585645&utm_source=yandexmarket&utm_medium=cpc&utm_campaign=yamarket&ymclid=15602635115767586897300002 (дата обращения: 26.06.2019).
4. **Система** виртуальной реальности HTC VIVE Pro Full Kit [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://htc-online.ru/catalog/vive/htc-vive-pro-full-kit-vr-system> (дата обращения: 26.06.2019).
5. **Серверы** и серверное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://srv-legion.ru> (дата обращения: 26.06.2019).
6. **Visualization** of a virtual space and time model of an urban development territory / V. A. Nemtinov, A. A. Gorelov, Yu. V. Nemtinova, A. B. Borisenko // Scientific Visualization. – 2016. – V. 8, № 1. – P. 120 – 132.
7. **Implementation** of technology for creating virtual spatialtemporal models of urban development history / V. A. Nemtinov, A. A. Gorelov, Yu. V. Nemtinova, A. B. Borisenko // Scientific Visualization. – 2018. – V. 10, № 3. – P. 99 – 107. doi: 10.26583/sv.10.3.07
8. **Gorelov, I.** Development of an information model of a virtual space of a historically significant territory / I. Gorelov, V. Nemtinov, Yu. Nemtinova // Journal of Physics: Conf. Series 1278. (2019). 012007 doi:10.1088/1742-6596/1278/1/012007
9. **Немтинов, В. А.** Информационный анализ видовых изображений объектов городской застройки / В. А. Немтинов, И. А. Горелов, М. Ю. Воробьева // Информационное общество. – 2015. – № 2-3. – С. 108 – 116.
10. **Горелов, И. А.** Компьютерные технологии при решении вопросов развития территорий городских муниципальных образований / И. А. Горелов, В. А. Немтинов // Информационное общество. – 2014. – № 1. – С. 49 – 54.

УДК 004.021

Немтинов В. А., Пьяных Н. С.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(e-mail: pyanyh1992@mail.ru)

**АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ТРАССИРОВКИ
ГАЗОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Nemtinov V. A., P'yanyh N. S.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia
(e-mail: pyanyh1992@mail.ru)

**ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS FOR TRACING
THE GAS PIPELINE SYSTEM OF THE MUNICIPALITY**

Аннотация. В данной работе поставлена задача трассировки магистрального газопровода являющаяся подзадачей формирования генерального плана территорий муниципальных образований. Выполнена апробация ее решения на примере трассировки газопровода на территории улицы Степная города Рассказово Тамбовской области.

Ключевые слова: трассировка магистрального газопровода, генеральный план территории муниципального образования.

Abstract. In this article, the task of tracing the main gas pipeline is a subtask of the formation of the master plan of the territories of municipalities. The approbation of its solution is carried out on the example of a gas pipeline trace on the territory of Stepnaya street in Rasskazovo city of Tambov region.

Keywords: tracing of the main gas pipeline, the General plan of the territory of the municipality.

Территория муниципальных образований представляют собой сложный комплекс взаимосвязанных объектов различного назначения. Выбор оптимальных объемно-планировочных решений по размещению объектов муниципальных образований в настоящее время невозможен традиционными ручными методами. Повышение качества проектных работ с одновременным сокращением сроков проектирования возможно только на основе широкого использования в процессе поиска оптимальных проектных решений современной вычислительной техники, что в свою очередь невозможно без разработки аналитических моделей, методов и процедур решения соответствующих задач [1 – 3].

Формирование генерального плана территории муниципальных образований с использованием средств вычислительной техники представляет собой сложную задачу размещений зданий и сооружений различных функциональных групп с учетом укрупненных технологических, инженерных и транспортных коммуникаций и природно-климатических особенностей территориального района. Эффективность решения

такой задачи зависит от большого числа факторов, значительная часть которых трудно формализуема. Качество решения задачи, с точки зрения проектировщика, зависит от числа размещенных объектов и их габаритов, количества минимальных и максимальных разрывов между объектами, подлежащих обязательному соблюдению, конфигурации существующих на площадке магистралей и т.п.

Одной из подзадач, решаемых при проектировании генерального плана является задача выбора трубопроводной арматуры для сетей инженерных коммуникаций [4, 5].

Постановка задачи проектирования генерального плана. Осуществим формализацию задачи размещения объектов на генплане. Для этого введем ряд допущений и обозначений.

Допущения: 1) Размещение объектов осуществляется в трехмерном пространстве с метрикой

$$\rho((x_{o_i}, y_{o_i}, z_{o_i}), (x_{o_j}, y_{o_j}, z_{o_j})) = |x_{o_i} - x_{o_j}| + |y_{o_i} - y_{o_j}| + |z_{o_i} - z_{o_j}|; \quad \forall i, j \in [1, \dots, N],$$

где $(x_{o_i}, y_{o_i}, z_{o_i}), (x_{o_j}, y_{o_j}, z_{o_j})$ – координаты центра объектов с номерами i, j ; N – число размещаемых объектов.

2) Объекты задаются в форме параллелепипедов или цилиндров.

3) Инженерные коммуникации, связывающие объекты и источники энергии, коллекторы подвода сточных вод, направляемых на очистку, задаются в виде совокупностей ортогональных фрагментов определенной ширины.

4) Территория разбита на кварталы (модули) с заданными размерами. В процессе размещения объектов допускается изменение размеров кварталов.

5) Фасады объектов максимально приближены к границам кварталов (модулей), на территории которых они размещаются.

6) Подъездные пути проходят (преимущественно) по границам модулей.

Обозначения: 1) Территория (область U), на которой осуществляется размещение объектов задается в форме односвязного многоугольника на плоскости ($z = 0$). Область U делится на кварталы (модули), с учетом уже сформировавшейся части района строительства. Внутри области U необходимо разместить N соединенных определенным образом объектов, с размерами $x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}, x_{d_i}, (x_{d_i} - \text{для объектов, проекция которых на плоскость задана в виде окружности}), i = \overline{1, N}$.

2) Вариант генплана представим как $g = (g^r, g^t)$, где g^r – вариант размещения объектов $g^r = \{g_i^r \mid i = \overline{1, N}\}$; g^t – вариант трассировки инженерных коммуникаций $g^t = \{g_j^t \mid j = \overline{1, N_{k1} + N_{k2}}\}$; $g \in G \subset \Omega$, где G – множество допустимых вариантов формирования генплана; Ω – множество всех возможных вариантов формирования генплана N_{k1}, N_{k2} – соответственно число групповых и одиночных трасс инженерных коммуникаций; $\Omega = \Omega^r \times \Omega^t$, где Ω^r, Ω^t – соответственно множества вариантов размещения объектов и трассировки коммуникаций.

3) Условия, характеризующие правила размещения объектов и трассировки инженерных коммуникаций $M : \Omega \rightarrow G$ или $G = M(\Omega)$ назовем моделью проектного решения.

С учетом приведенных обозначений, задача проектирования генерального плана территории муниципального образования формулируется, как найти

$$g^* = \arg \min \{F(g) | g \in G = M(\Omega)\}. \quad (1)$$

В качестве целевой функции F_3 примем следующие затраты:

$$F_3 = F_3^1 + F_3^2 + F_3^3 + F_3^4, \quad (2)$$

где F_3^1, F_3^2 – соответственно стоимость территории, занятой под объекты и коммуникации; F_3^1 – стоимость коммуникаций; F_3^4 – удорожание (удешевление) стоимости объектов от деления их на части (блокировки с другими объектами).

Составляющие критерия определяются по приведенным ниже вычислениям.

$$F_3^1 = \sum_{i=1}^N xp_i \cdot yp_i \cdot su'_i(xo_i, yo_i), \quad (3)$$

где su'_i – стоимость единицы площади территории, занятой под i -й объект.

$$F_3^2 = \sum_{j=1}^{N_{k1}} \sum_{m=1}^{M'_j} lz'_{jm}(xo_i, yo_i) \cdot lk'_j \cdot su''_{jm}(xo_i, yo_i) + \sum_{t=1}^{N_{k2}} \sum_{l=1}^{M''_t} lz''_{tl}(xo_i, yo_i) \cdot lk''_t \cdot su'''_{tl}(xo_i, yo_i), \quad (4)$$

где M'_j, M''_t – количество кварталов, по территории которых проходят групповые и одиночные трассы; su''_{jm}, su'''_{tl} – соответственно стоимость единицы площади, занятой под групповые и одиночные трассы; $lz'_{jm}, lz''_{tl}, lk'_j, lk''_t$ – соответственно длина и ширина площади, занятой под групповые и одиночные трассы; N_{k1}, N_{k2} – соответственно число групповых и одиночных трасс.

$$F_3^3 = \sum_{j=1}^{N_k} (sk_j \cdot lz_j + sl_j \cdot nl_j), \quad (5)$$

где N_k – количество всех коммуникаций; lz_j, sk_j – соответственно длина и стоимость единицы длины j -й коммуникации; sl_j – затраты на эксплуатацию и техническую реализацию одного поворота для j -й коммуникации; nl_j – количество поворотов j -й коммуникации.

$$F_3^A = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \cdot so_i, \quad (6)$$

где so_i – стоимость i -го объекта; ε_i – коэффициент, учитывающий блокировку (деление объекта на части); $\varepsilon_i < 0$ – i -й объект блокируется с другими объектами; $\varepsilon_i = 0$ – i -й объект размещается отдельно стоящим с учетом всех санитарно-технических и противопожарных ограничений; $\varepsilon_i > 0$ – i -й объект делится на части.

Задача формирования генерального плана территории муниципальных образований относится к классу комбинаторных задач.

Процедурная модель принятия решения задачи проектирования генерального плана. Для описания правил размещения территории муниципальных образований и трассировки коммуникаций необходимо задать достаточно большое количество исходной информации. Рассмотрим некоторую из них.

Проектируемые объекты различных функциональных групп связаны между собой инженерными коммуникациями. Различают наземные и подземные коммуникации. К наземным относятся: эстакады материалопроводов, кабельные линии; к подземным – сети водопровода, водостока, кабельные сети электроснабжения, связи и сигнализации.

При решении задачи необходимо знать расположение источников энергии (ЛЭП, магистральные трубопроводы), расположенные за пределами области, а также транспортные коммуникации, проходящие в области U (автодорога, коллектор и т.п.).

На территории U существуют зоны, где строительство недопустимо вообще (наличие водоемов, действующих объектов и т.п.). На территории строительства могут существовать зоны, где целесообразно разместить объекты определенного назначения. Например, природные водоемы (озера, запруды и т.п.) и т.д.

Для отдельных объектов важны минимальные и максимальные допустимые расстояния между объектами и границей области U , а также между объектами.

Многие виды коммуникаций при прокладке их по территории строительства имеют зоны, в пределах которых недопустимо строительство каких-либо объектов и прокладка других коммуникаций. Для них надо задать противопожарные и санитарные разрывы между различными коммуникациями и между коммуникациями и объектами.

Рассмотрим правила размещения объектов и коммуникаций:

Условие 1. Необходимость соблюдения санитарно-технических и противопожарных разрывов:

а) между объектами: $\forall i, c \in [1, \dots, N]$

$$\left(|xo_i - xo_c| - \frac{xp_i + xp_c}{2} \geq ll'_{ic} \right) \vee \left(|yo_i - yo_c| - \frac{yp_i + yp_c}{2} \geq ll'_{ic} \right); \quad (7)$$

б) между коммуникациями и объектами, не являющимися точками «истока» и «стока» для соответствующих коммуникаций: $\forall i \in \overline{1, N}, \quad \forall j \in \overline{1, N_k}$

$$\left(|x_{o_i} - x_{c_j}| - \frac{xp_i + lk_j}{2} \geq l2''_{ij} \right) \vee \left(|y_{o_i} - y_{c_j}| - \frac{yp_i + lk_j}{2} \geq l2''_{ij} \right), \quad (8)$$

где x_{c_j}, y_{c_j}, hc_j – координаты точки c_j , принадлежащей групповой или одиночной трассе;

в) между коммуникациями:

$$\left(|x_{c_j} - x_{c_h}| - \frac{lk_j + lk_h}{2} \geq l2'_{jh} \right) \vee \left(|y_{c_j} - y_{c_h}| - \frac{lk_j + lk_h}{2} \geq l2'_{jh} \right) \vee \left(|hc_j - hc_h| - \frac{h'k_j + hk_h}{2} \geq l2'_{jh} \right), \quad (9)$$

Условие 2. Прокладка коммуникаций осуществляется на заданных уровнях:

$$H_j = (\pm h_{jt}^o)_{E_j}, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad (10)$$

где E_j – количество возможных уровней прохождения j -й коммуникации; h_{jt}^o – t -й уровень прокладки j -й коммуникации, знак (+) или (–) определяет расположение трассы относительно поверхности земли.

Условие 3. Соблюдение максимальных расстояний между объектами отдельного объекта обеспечивается выполнением неравенства:

$$\forall i, c \in \overline{1, D}, \quad k \in \overline{1, N_{md}} \left(|x_{o_i} - x_{o_c}| - \frac{xp_i + xp_c}{2} \leq l1'''_{3k} \right) \vee \left(|y_{o_i} - y_{o_c}| - \frac{yp_i + yp_c}{2} \leq l1'''_{3k} \right). \quad (11)$$

Условия (7) – (11), характеризующие правила размещения объектов и коммуникаций на генплане муниципального образования, и необходимая для них исходная информация представляют собой модель проектного решения.

Процедура решения задачи проектирования генерального плана. Исходя из особенностей процедурной модели формирования генерального плана территории муниципальных образований предлагается процедура решения задачи, базирующейся на совмещении процесса размещения объектов и трассировки коммуникаций. Укрупненная блок-схема процедуры представлена на рис. 1. Сущность процедуры сводится к следующему.

1. Из множества размещаемых объектов выделяются группы, относящиеся к отдельным комплексам (блокам). Если площадь, занимаемая блоком с номером d , $d = 1, \dots, D$, отнесенная к площади квартала, значительно меньше принятой для территории минимальной плотности застройки кварталов, то делается попытка объединения d -го комплекса с другими или объектами других функциональных групп с учетом правил размещения объектов (7) – (11), плотность застройки которых, при их отдельном размещении в квартале минимальна. Объединение производится исходя из связей между блоками. Очередность размещения блоков определяется из следующих соображе-

ний: блок, занимающий большую площадь санитарно-технических разрывов между объектами, имеет более высокий приоритет при размещении. Для выбранного d -го комплекса определяется квартал (несколько кварталов, если комплекс занимает большую площадь) на территории которого он будет размещен. Критерием оценки выбора квартала является стоимость оптимальных инженерных и транспортных трасс коммуникаций от границы квартала до внешних источников энергии и транспортных коммуникаций, т.е. внешних коммуникаций для рассматриваемого комплекса, исходя из допущений, принятых при описании модели.

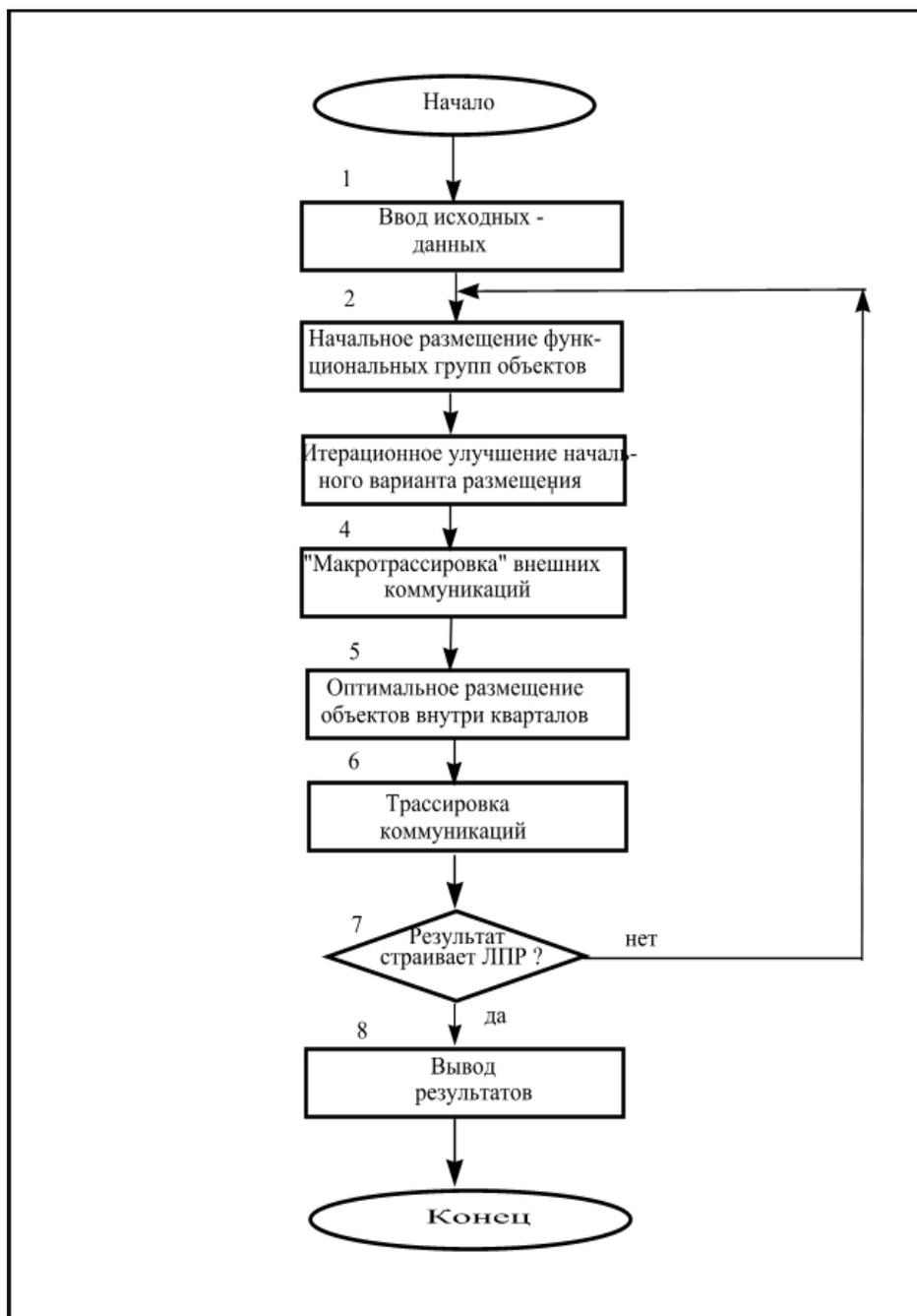


Рис. 1. Укрупненная блок-схема процедуры решения задачи генплана территории муниципальных образований

Оптимальными считаются трассы, проведенные внутри прямоугольника, охватывающего «истоки» и «стоки» коммуникаций. Поиск оптимального квартала осуществляется методом координатной релаксации. В качестве начального приближения выбирается квартал, до границ которого коммуникация с максимальной удельной стоимостью имеет минимальную длину. Выбор квартала для размещения следующего комплекса определяется исходя из минимума стоимости коммуникаций с внешними источниками и объектами уже размещенного (размещенных) комплекса (комплексов). При наличии зоны целесообразного размещения объектов определенного назначения процесс компоновки начинается с данных объектов и квартала, включающего соответствующую зону.

2. Так как полученное размещение комплексов из-за ряда допущений может быть не оптимальным, произведем оптимизацию начального размещения комплексов с помощью итерационной процедуры, основанной на парных перестановках комплексов. В этом случае можно задав вариант размещения внутри блока и обеспечив его ориентацию в области U , нужно выполнить трассировку внешних коммуникаций (см. пункт 5).

3. В целях получения наиболее качественного размещения объектов внутри кварталов производится предварительная трассировка внешних коммуникаций с целью получения точек подвода коммуникаций к границам (вершинам) квартала. Прокладка трасс внешних коммуникаций на основе современных методов организации строительства осуществляется по границам кварталов.

4. В пределах выбранного квартала (кварталов) производится последовательное размещение объектов, относящихся к d -му производственному комплексу ($d = 1, \dots, D$). Последовательность размещения определяется исходя из размеров (площади) объектов, начиная с объекта, имеющего максимальную площадь.

Оптимизация размещения объектов осуществляется методом координатной релаксации. Идея метода заключается в следующем: для каждого i -го объекта производится циклическая релаксация по координатам. При перемещении объекта, которое осуществляется с заданным шагом (обычно 6 м) выполняется проверка, не пересекается ли перемещаемый объект с остальными и вычисляется стоимость его связей. Если это значение меньше, чем на предыдущем шаге, то процесс продолжается; если больше предыдущего, то движение по этой координате прекращается. После размещения i -го объекта переходим к $(i + 1)$ -му объекту и так выполняется весь цикл. Процесс поиска заканчивается, когда изменение местоположения всех объектов не приводит к улучшению критерия.

5. При формировании генерального плана особый интерес представляет трассировка всех инженерных и транспортных коммуникаций и в первую очередь построение связывающих сетей однородных коммуникаций (деревьев Штейнера).

Как показали экспериментальные исследования, приведенные при использовании метода, основанного на предварительном формировании сетей магистралей, порядок трассировки отдельных коммуникаций или их сетей практически не влияет на качество конечного результата. Однако для облегчения проведения трасс с использованием выше названного метода установим следующий порядок трассировки коммуникаций.

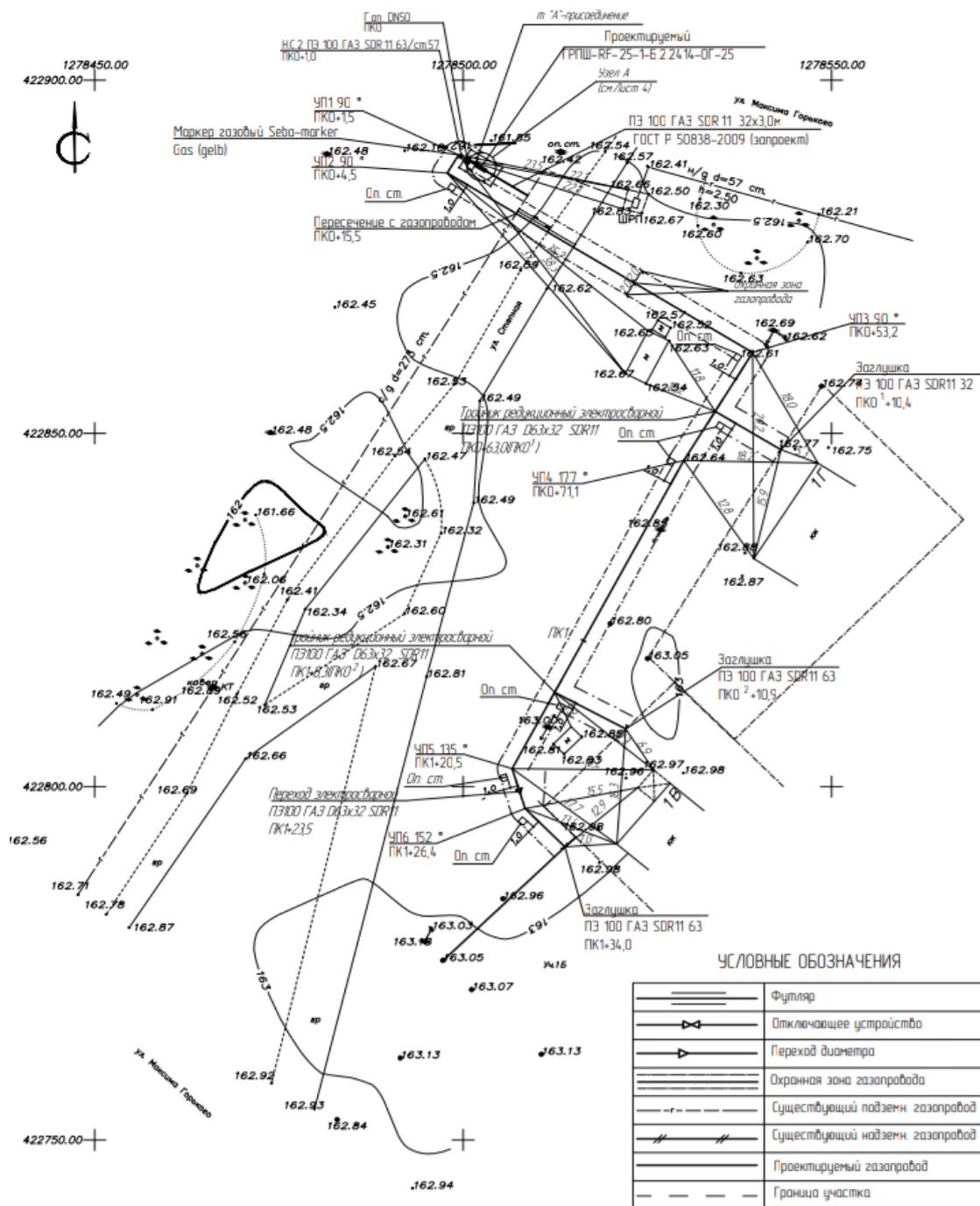


Рис. 2. Результаты решения задачи трассировки газопроводной системы на территории улицы Степная города Рассказово

В первую очередь трассировке подлежат отдельные коммуникации, имеющие наименьшие санитарно-технические разрывы с объектами и число уровней прокладки, так как коммуникации, имеющие большее число уровней легче трассировать в случае пересечения с другими трассами на основном уровне. При равных условиях порядок трассировки определяется исходя из общего эвристического правила Айкерса: коммуникации трассируются в порядке приоритетных номеров, который равен числу «источков» или «стоков» в прямоугольнике, в рамках которого проходят оптимальные трассы.

Обычно короткие фрагменты коммуникаций трассируются первыми, далее трассируются окружающие их коммуникации. После прокладки одиночных коммуникаций осуществляется трассировка коммуникаций, для которых возможна совместная прокладка в одном канале (эстакаде). Под сетью будем понимать некоторое число коммуникаций, имеющих одинаковый уровень проведения трассы, соизмеримые санитарно-технические разрывы с объектами и сравнительно малые разрывы между собой. Последовательность укладки коммуникаций в канале (эстакаде) определяется из размеров охватывающего прямоугольника. Ширина каждого ортогонального фрагмента сети определяется после проведения всех коммуникаций с учетом зон обслуживания.

Рассмотрим приближенный метод построения сетей коммуникаций (деревьев Штейнера) в ортогональной метрике. Перед началом трассировки отдельной сети формируется сеть магистралей. Построение магистралей осуществляется следующим образом: в области U проводятся линии, отстоящие для проведения внешних коммуникаций на расстоянии, определяемом санитарно-техническими нормами для данной сети коммуникаций от линии размещения объектов в кварталах. Для внутренних коммуникаций это расстояние определяется санитарно-техническими нормами для объектов и коммуникаций, а так же расстоянием от границы области U и уже проложенных трасс.

Предложенная процедура размещения объектов на территории муниципальных образований носит локальный характер, но учитывая возможность получения «хорошего» начального размещения объектов с предварительной трассировкой коммуникаций и последующего улучшения решения за счет парных перестановок и окончательной трассировки, полученное решение достаточно близко к глобальному оптимуму.

Апробация процедуры автоматизированного проектирования генерального плана территории муниципального образования проведена на примере решения частной задачи трассировки газопроводной системы на территории улицы Степная города Рассказово Тамбовской области (см. рис. 2).

Список использованных источников

1. **Зайцев, И. Д.** Теория и методы автоматизированного проектирования химических производств / И. Д. Зайцев. – К. : Наукова думка, 1981.
2. **Минаков, И. П.** Использование ЭВМ при проектировании генеральных планов и объемно-планировочных решений / И. П. Минаков, И. И. Рафалович, В. С. Тимощук. – Л. : Наука, 1982.
3. **СНиП 42 01–2002.** Газораспределительные системы. – Введ. 2003-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 2003.
4. **Немтинов, В. А.** Об оценке эффективности инвестиционной деятельности при размещении химических производств / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 375 – 382.
5. **Пахомов, П. И.** Технология поддержки принятия решений по управлению инженерными коммуникациями / П. И. Пахомов, В. А. Немтинов. – М., 2009. – 123 с.

УДК 93(908)

Вязинкин А. Ю.¹, Двухжилова И. В.², Немтинов К. В.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(e-mail: vyazinkin@yandex.ru),

²(e-mail: eriniya711971@mail.ru)

КОММЕМОРАТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАМЯТНОГО МЕСТА «ИМЕНИЕ ДВОРЯН САТИНЫХ «ИВАНОВКА»»

Viazinkin A. Yu.¹, Dvuhzhilova I. V.², Nemtinov K. V.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(e-mail: vyazinkin@yandex.ru),

²(e-mail: eriniya711971@mail.ru)

COMMEMORATIVE MATERIALS OF VIRTUAL RECONSTRUCTION OF THE MEMORIAL PLACE «ESTATE OF THE NOBLES OF SATIN «IVANOVKA»»

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические положения проекта историко-культурной реконструкции памятных мест, на примере достопримечательного места «Имение дворян Сатиных «Ивановка»», методом создания виртуальных моделей объектов культуры. Подчеркивается междисциплинарный подход в выполнении проектов виртуальной реконструкции, использование методов, технологий и материалов, предоставляемых исторической наукой, теоретическими положениями культурной антропологии, данными и результатами виртуального проектирования. Определены основные источники историко-культурной реконструкции памятного места «Имение дворян Сатиных «Ивановка»». Исторический материал, в перспективе обработанный при помощи технологий виртуальной реконструкции, приобретает значимый с культурно-антропологической точки зрения статус источника коммеморативных практик.

Ключевые слова: памятные места, коммеморативные материалы, виртуальное моделирование, виртуальный музей, исторически значимые территории, культурная антропология.

Abstract. The article developed theoretical provisions of the project of historical and cultural reconstruction of memorial places, on the example of the memorable place «A Satin's manor «Ivanovka»», are considered by method of creation of virtual models of objects of culture. Cross-disciplinary approach in implementation of projects of virtual reconstruction is emphasized by use of the methods, technologies and materials provided by historical science, the theoretical provisions of cultural anthropology yielded and results of mathematical modeling and virtual design. The main sources of historical and cultural reconstruction are defined of the memorial place «A Satin's manor «Ivanovka»». The historical material in the long term which processed by means of technologies of virtual reconstruction, acquires the status of a source of the commemorative practices, significant from the cultural and anthropological point of view.

Keywords: memorial places, commemorative materials, virtual modeling, virtual museum, historically significant areas, cultural anthropology.

Цель нашего исследования – определить значение коммеморативных материалов в виртуальной реконструкции «мест памяти» (на примере памятного места «Имение дворян Сатиных “Ивановка”»). **Новизна** исследования состоит в междисциплинарном подходе к обоснованию виртуальной реконструкции, как источника коммеморативных практик. Неоспоримая необходимость для современной России решения историко-культурной проблемы охраны традиции, делает **актуальным** исследования в области виртуальной реконструкции памятников культуры.

Методологической основой исследования памятных мест для нас служат работы классиков истории и социологии: теоретические работы французского историка, автора концепции «мест памяти» П. Нора [5] и крупнейшего специалиста в области исследования коллективной и исторической памяти, французского социолога М. Хальбвакса [6].

Выполненная на основе коммеморативных материалов, исторически достоверная реконструкция памятного места «Имение дворян Сатиных “Ивановка”», связанных с именем С. В. Рахманинова, может быть реализована при помощи программного обеспечения с открытым кодом OpenSimulator 0.9.0, которая представляет собой инструмент для создания трехмерных виртуальных пространств. Опыт подобных историко-культурных реконструкций был научно обоснован и апробирован [7]. Он включает в себя следующие технологии:

- технологию анализа исторических процессов, использующую методы системного и ретроспективного анализа, математического моделирования, теорию нечетких множеств;
- технологию создания 3D-моделей объектов культурного наследия для виртуальной реконструкции исторически значимых памятных мест или муниципальных образований;
- технологию создания информационного интернет-ресурса для обеспечения доступа к информации об объектах культурно-исторического наследия, базирующуюся на использовании методов построения 3D-моделей территориально распределенных объектов;
- технологию создания трехмерного виртуального музея объектов культурного наследия для виртуальной реконструкции памятных мест, реализуемую с помощью программной платформы с открытым кодом OpenSimulator 0.9.0.

Особого внимания из числа памятных мест Тамбовской области, связанных с именем выдающегося композитора С. В. Рахманинова, заслуживает достопримечательное место «Ивановка». Именно с этим местом, с родовой усадьбой дворянской семьи Сатиных, связана не только значительная часть творческого наследия композитора, но и его особо острое национальное чувство родной земли.

Впервые в Ивановку к родственникам Рахманинов приезжает весной 1890 г. С тех пор он будет проводить там почти каждое лето до 1917 г. С «Ивановкой» связаны не только творческая, но и личная жизнь композитора. В 1902 году он женится на будущей владелице усадьбы – С. А. Сатиной.

Воссоздание памятного места, растянувшееся на десятилетия, было начато только в конце 1960-х гг., после постановления бюро Тамбовского областного комитета КПСС и облисполкома от 29 июля 1968 г. № 550 «Об увековечении памяти С. В. Рахманинова». Чертежи и планы реконструкции опирались в том числе на план-рисунок, набросок, сделанный в Швейцарии по памяти самим Рахманиновым [2, с. 11], а также на подробное описание усадьбы, полученное в ходе переписки тамбовского музыковеда Н. Н. Емельяновой с двоюродной сестрой композитора – Софьей Александровной Сатиной [4, с. 3]. Эти материалы стали хорошим подспорьем для работы московского архитектора В. М. Белоусова, который спроектировал реконструкцию флигеля, где жила семья Рахманиновых. На средства, полученные от Музфонда СССР, Центрального Совета ВООПИК и колхоза имени Карла Маркса, начали производиться первые работы по реализации проекта реконструкции. Не только первые чертежи Белоусова, сделанные еще в 1969 г., но и генеральный план реконструкции села Ивановки, утвержденный в 1970 г. областным управлением архитектуры, судя по сведениям московского архитектора, разрабатывались с опорой на план-рисунок из архива С. А. Сатиной [3, с. 19]. Краеведы Д. В. Калашников и О. А. Казьмин утверждают, что план усадьбы и рисунки с планировкой Ивановки и окрестными видами были авторства самой Софьи Александровны [1, с. 95–96].

С целью максимальной исторической достоверности виртуальная реконструкция памятного места, должна опираться именно на эти материалы, а не на фактическую материальную реконструкцию усадьбы, которая была осуществлена только в 1990-е гг.

У виртуальной реконструкции памятных мест можно выделить следующие существенные возможности и преимущества:

- 1) широкая доступность продукта при сохранении всех достоинств «воображаемого музея» («museum without walls») докомпьютерной эпохи (с преимуществом 3D-моделей);
- 2) целевая историко-культурная акцентуированность реконструируемых объектов;
- 3) визуальная (наглядная) модель исторической достоверности.

Современные компьютерные технологии позволяют решать важнейшие культурные задачи, которые стоят перед нашим обществом. Применение подобных информационных технологий позволяет привлечь не только туристическое, но и историческое, и культурное внимание общественности к памятным местам. Ответственность за эффективное использование этого ресурса в целях охраны традиций лежит, несомненно, на людях науки, деятельность которых должна быть связана с формированием социально позитивных коммеморативных практик.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-18-00044) – «Анализ исторических процессов памятных мест Тамбовского края, связанных с пребыванием в них известных деятелей России, с использованием технологии виртуального моделирования».

Список использованных источников

1. **Калашников, Д. В.** «В Ивановку я всегда стремился...»: Сергей Рахманинов на тамбовской земле / Д. В. Калашников, О. А. Казьмин. – Воронеж, 2003. – 269 с.
2. **Архипова, И.** Сад Рахманинова / И. Архипова // Ивановка. Времена. События. Судьбы. – М., 2003. – С. 10 – 13.
3. **Белоусов, В.** Реставрация дома С. В. Рахманинова / В. Белоусов // Музыкальная жизнь. – 1971. – № 14. – С. 19.
4. **Николаева, Н.** День Рахманинова в Ивановке / Н. Николаева // Музыкальная жизнь. – 1970. – № 19. – С. 3.
5. **Нора, П.** Проблематика мест памяти / П. Нора // Франция-память. – СПб., 1999. – С. 17 – 50.
6. **Хальбвакс, М.** Коллективная и историческая память / М. Хальбвакс // Неприкосновенный запас. – 2005. – № 2-3(40-41). – С. 8 – 27.
7. **Visualization** of a virtual space and time model of an urban development territory / V. A. Nemtinov, A. A. Gorelov, Yu. V. Nemtinova, A. B. Borisenko // Scientific Visualization. – 2016. – V. 8, Is. 1. – P. 120 – 132.

УДК 004.94:721.021.23:725.42

Ельчищева Т. Ф.¹, Преображенская Е. М.², Филимонова Е. П.³

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),²(Тел. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),³(Тел. (963)1599835, e-mail: filimonova99@gmail.com)**РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ОБЪЕКТА ДЛЯ ОТДЫХА
НА ОТКРЫТОМ ВОЗДУХЕ ПРИ ПОМОЩИ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ****Elchishcheva T. F.¹, Preobrazhenskaya E. M.², Filimonova E. P.³**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),²(Tel. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),³(Tel. (963)1599835, e-mail: filimonova99@gmail.com)**A PROTOTYPE FACILITY FOR RECREATION
IN THE OPEN AIR WITH THE HELP OF 3D MODELING**

Аннотация. В работе предложена идея по благоустройству города Тамбова. Выявлены недостатки в конструкциях объектов малых архитектурных форм (МАФ) для отдыха на открытом воздухе. Представлено описание разработки промышленного дизайна прототипа объекта с использованием программных продуктов для виртуального 3D-моделирования и рендеринга – SketchUP 2018 (учебная версия) и Lumion 6.0 (пробная версия). Разработанные идеи объектов МАФ в скверах и парках города Тамбова позволяют предупредить акты вандализма на них в общественных местах. Предложена конструкция с концептуальным запросом на устранение недостатков в несущей конструкции существующих МАФ. На первом этапе в программной среде был смоделирован каркас, затем внешние сегменты конструкции и емкости-мусороприемники. Объект запроектирован из экологически чистых материалов и имеет высокие эстетические качества.

Ключевые слова: малая архитектурная форма, моделирование, прототипирование, рендеринг.

Abstract. The idea of improving the city of Tambov is proposed. Deficiencies were revealed in the designs of objects of small architectural forms (SAF) for outdoor recreation. The description of the development of the industrial design of the prototype of the object using software products for virtual 3D modeling and rendering – SketchUP 2018 (educational version) and Lumion 6.0 (trial version) is presented. The developed ideas of the SAF facilities in the squares and parks of the city of Tambov can prevent acts of vandal impact on them in public places. A design with a conceptual request to eliminate deficiencies in the supporting structure of existing SAFs is proposed. At the first stage, the framework was modeled in the software environment, then the external segments of the structure and the garbage collection containers. The object is designed from environmentally friendly materials and has high aesthetic qualities.

Keywords: small architectural form, modeling, prototyping, rendering.

В современном обществе образ объекта, его конструктивные особенности и эстетика в целом выходят на первый план при его разработке. В последнее время все большую роль в проектировании занимает дизайн конструкции, ее детализация и приемлемость тех или иных материалов, которые применяются в создании полноценной формы.

Программа для 3D-моделирования SketchUP 2018 (учебная версия) играет важную роль и расширяет возможности в изучении формообразования, разработке новых форм и поиске идей не только для дизайнеров, но и для всех пользователей, интересующихся 3D-моделированием и прототипированием.

Существующие малые архитектурные формы (далее – МАФ) зачастую являются недолговечными. Так в городе Тамбове во многих скверах уже пришли в негодность новые объекты для отдыха на открытом воздухе (скамейки, лавочки), однако еще не выработавшие свой срок эксплуатации. Причина поломки объектов, на взгляд авторов, заключается не только в вандализме, но и в отсутствии индивидуального подхода при проектировании конструктивного решения, что не позволяет объектам быть достаточно прочными, жесткими и устойчивыми в эксплуатации и стойкими к воздействию атмосферных условий.

Таким образом, является актуальным предложение по разработке и установке новых, более крепких и прочных конструкций, которые смогут противостоять погодным условиям, вандализму и будут выдерживать другие нагрузки, а также отвечать требуемым эстетическим качествам и изготавливаться из экологических материалов. Итогом разработки новой прочно-конструктивной формы будут меньшие затраты на ремонт или установку новых объектов.

Установка таких МАФ необходима для облагораживания улиц, скверов и парков, создания удобства для жителей. Данному вопросу посвящена представленная разработка. Поэтому предлагаемый проект может считаться актуальным и, в будущем, может быть реализован при привлечении соответствующих денежных средств.

В процессе проектирования были пройдены следующие этапы жизненного цикла проекта:

1. **Предложение идеи.** Идея разработанного объекта подразумевает под собой детализированную форму, способную изменяться и приспосабливаться к различным погодным условиям, вне зависимости от нагрузки, действующей на нее.

2. **Определение целей и задач проекта:**

- провести сбор и анализ аналогичных примеров реализованных МАФ;
- проанализировать конструктивные решения установленных объектов для уличного отдыха и выявить причины их разрушения;
- на основе полученного опыта разработать новые варианты форм и конструкций объектов для отдыха на открытом воздухе в соответствии с существующими природно-климатическими и ситуационными условиями;
- приобрести навыки работы с 3D-редакторами;
- предложить и внедрить идеи по благоустройству и облагораживанию городской среды.

В ходе жизненного цикла проекта был проведен поиск проектов-аналогов. Были выявлены следующие группы:

1. Малые архитектурные формы, лаконично вписанные в городскую среду, являющиеся объектами для отдыха в пешеходной зоне (рис. 1) [1].
2. Объекты для уличного отдыха легкой геометрии, отвечающие по своей структуре погодным условиям, сходным с условиями Центрально-Черноземного региона (рис. 2) [2].
3. Малая архитектурная форма с конструктивным решением, приближенная по некоторым параметрам к идее, предлагаемой авторами (рис. 3) [3].



Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3

Все рассмотренные МАФ конструктивно отражают примеры индивидуального подхода в формообразовании и проектировании конструкций для каждой конкретной территории. Данный подход в проектировании авторы считают более перспективным для эстетического восприятия объекта и создания видеоэкологической среды, чем возведение типовых конструкций.

Анализ установленных в сквере объектов для отдыха и сиденья показал, что прочность и толщина выбранных деревянных деталей не соответствует регулярным нагрузкам, которым они подвергались. Нагрузки значительно превышали несущую способность деталей, что привело к их разрушению, что представлено на рис. 4.



Рис. 4. Разрушенные деревянные детали в существующих объектах

В основу идеи проекта легло предложение разработки изменяемой формы, подходящей различным группам пользователей и заведомо превышающей по своей несущей способности те нагрузки, которым она будет подвергнута.

Эскизные наброски выполнялись с целью отражения идей авторов. На них видно разнообразие предложенных решений (рис. 5). Предполагаемая форма объекта изменялась неоднократно, продолжался поиск оптимальной формы конструкции, которая в дальнейшем полностью смогла бы передать главный замысел авторов.

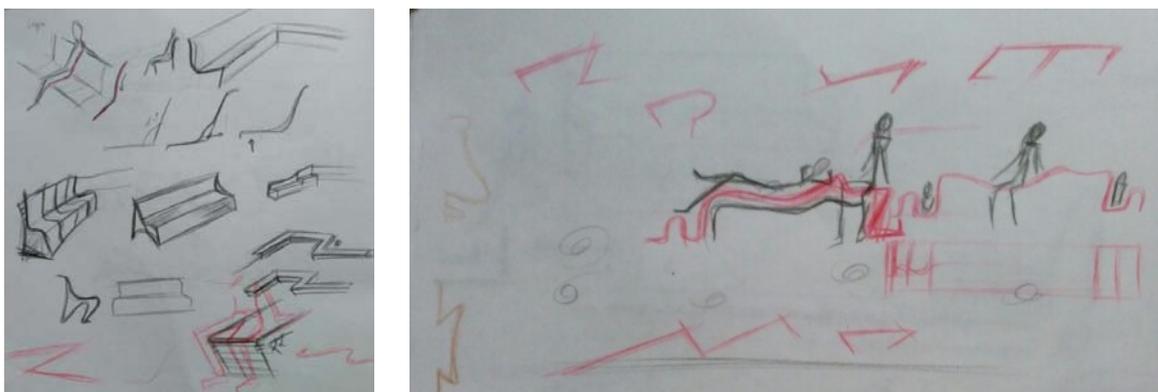


Рис. 5. Этапы эскизирования

На этапе эскизирования были разработаны наброски фасада, плана, бокового вида (рис. 6).

Дальнейшая работа над объемом проходила в программе для 3D-моделирования SketchUP 2018 (студенческая версия) (рис. 7).

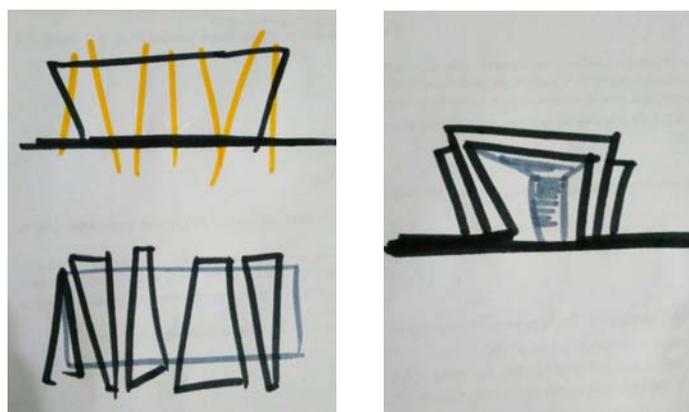


Рис. 6. Наброски объекта

Был смоделирован каркас с учетом требуемых габаритных размеров объекта. Оптимальность и эргономичность размеров определялась по существующим нормативам [4, 5] и опытным путем. Согласно [5], габаритные размеры лавочек (длина×глубина×высота) составляет от 1750×450×750 мм до 3800×450×580 мм. При этом толщина монолитного слоя основания для сидения должна быть не менее 80 мм, а масса изделия – от 160 до 425 кг.

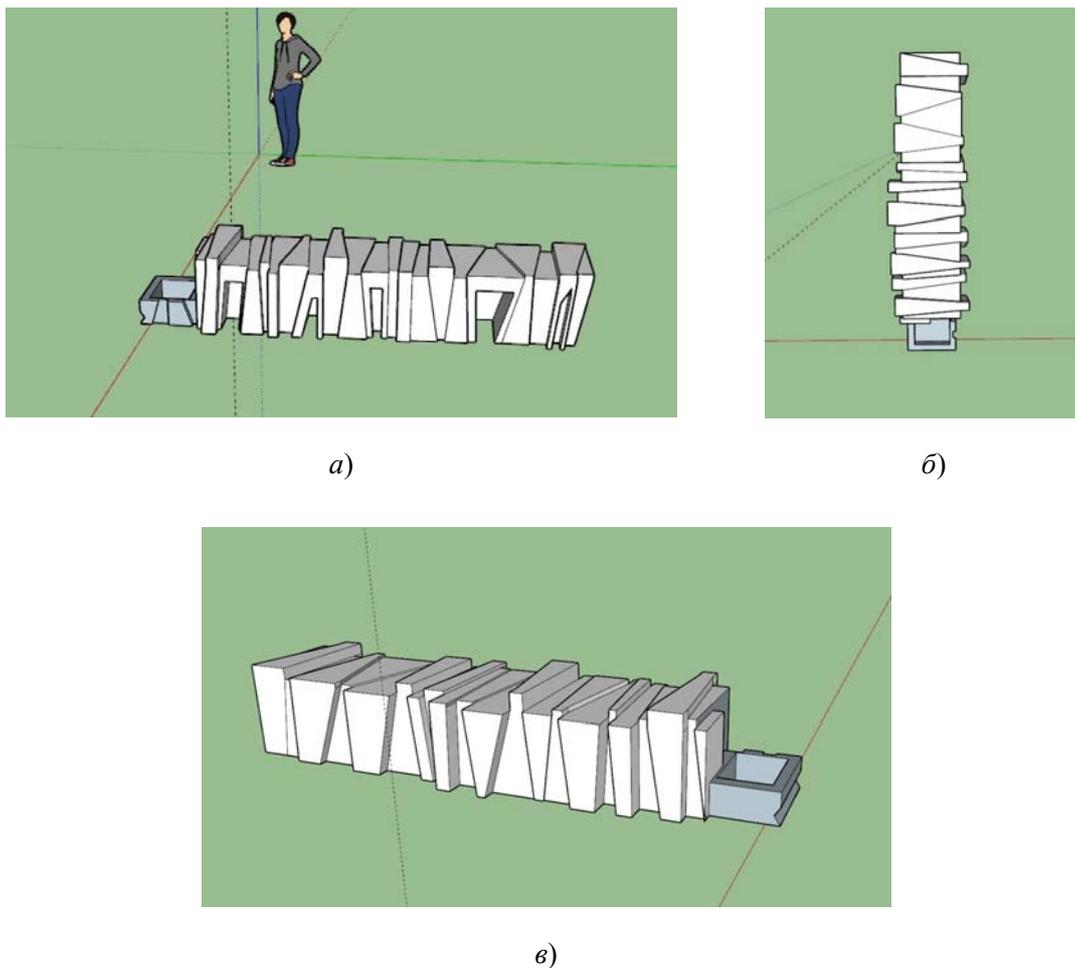


Рис. 7. Моделирование в среде SketchUP 2018 (студенческая версия):
а – в сравнении с ростом человека; *б* – вид сверху; *в* – общий перспективный вид

После установления основных размеров объем разбивался на сегменты. Такое членение, по мнению авторов, позволит проектируемому объему подстраиваться под различные нагрузки, которым он подвергнется в период эксплуатации. Концепция объема предусматривает емкость для сбора мусора, которая может быть съемной. Ее форма поддерживает общий образ предлагаемого объекта для уличного отдыха. Габариты урны должны быть 400×400×520 мм, толщина монолитного слоя урны – не менее 20 мм, а масса 60...80 кг [5].

Сформированный в среде SketchUP 2018 (студенческая версия) прототип был экспортирован в среду программного продукта для рендеринга Lumion 6.0 (пробная версия). В рамках данного редактора прототип был помещен в реалистичную сцену, имитирующую экстерьерную среду. При этом каждой поверхности были присвоены соответствующие текстуры. Настроено солнечное освещение, характерное расположению солнца в период летнего времени года. В результате работы над прототипом объекта для уличного отдыха получены реалистичные изображения, дающие представление о возможных видах использования проектируемого объема непосредственно после установки и введения в эксплуатацию (рис. 8).



Рис. 8. Рендеринг МАФ в программе Lumion 6.0

В рамках работы над проектом был проведен сбор и анализ аналогичных реализованных предложений существующих объектов для уличного отдыха и выявлены их недостатки. Разработаны эскизы с концептуальным запросом на устранение недостатков в несущей конструкции существующих объемов. С помощью программ для моделирования создан прототип по наброскам и эскизам. При использовании программного средства для рендеринга получены изображения, дающие представление об общем эстетическом виде проектируемого объема в случае его реализации и введение в пользование. Дальнейшая работа над проектом будет строиться, исходя из возможностей создания прототипа объема силами авторов в масштабе 1:1.

Список использованных источников

1. **Найдите идеи** на тему «Зеленая Архитектура» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://za.pinterest.com/pin/361765782541376546/> (дата обращения: 19.09.2019).
2. **Ulam, A.** Stemming the Tide / A. Ulam // The Architect's Newspaper [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://archpaper.com/2014/09/stemming-the-tide/> (дата обращения: 19.09.2019).
3. **Desert Plaza in Barakaldo / NO.MAD** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.archdaily.com/449623/desert-plaza-in-barakaldo-no-mad?ad_medium=gallery (дата обращения: 19.09.2019).
4. **Гришина, А. С.** Малые архитектурные формы в городской среде: исторические и формообразующие аспекты / А. С. Гришина // Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ : тез. докл. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. – М. : МАРХИ, 2015. – 704 с.
5. **Технические условия** на малые архитектурные формы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://всероссийская-база-гу.рф/tekhnicheskie-usloviya-na-malye-arkhitekturnye-formy> (дата обращения: 19.09.2019).

УДК 004.94:721.021.23:725.42

Ельчищева Т. Ф.¹, Преображенская Е. М.², Филимонова Е. П.³

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),

²(Тел. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),

³(Тел. (963)1599835, e-mail: filimonova99@gmail.com)

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛАВНОГО УСАДЕБНОГО ДОМА КУПЦА ЕФАНОВА В Г. ТАМБОВЕ

Elchishcheva T. F.¹, Preobrazhenskaya E. M.², Filimonova E. P.³

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),

²(Tel. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),

³(Tel. (963)1599835, e-mail: filimonova99@gmail.com)

CREATING A VIRTUAL MODEL OF THE CITY ESTATE OF MERCHANT EFANOV: THE MAIN MANOR HOUSE. MAIN FACADE

Аннотация. Представлено описание создания виртуальной модели фасада памятника архитектуры «Городская усадьба купца Ефанова: главный усадебный дом» в г. Тамбове с использованием программного продукта ArchiCAD-64 21 EDU. Работа осуществлялась в рамках практики по получению первичных профессиональных умений и навыков, в том числе первичных умений и навыков научно-исследовательской деятельности (обмерной) студентами, обучающимися по направлению подготовки 07.03.01 «Архитектура». Целью работы является сохранение общего вида здания в цифровом виде. На основе фотофиксации восстановлен абрис и объем главного фасада здания. Полученная виртуальная информация может быть использована для реконструкции и реставрации здания и привлечения туристического интереса к историческим зданиям и сооружениям на территории Тамбовской области.

Ключевые слова: 3D-моделирование, виртуальная модель, объект культурного наследия, реконструкция и реставрация.

Abstract. A description of the creation of a virtual model of the facade of the architectural monument “City Estate of the Merchant Efanov: the Main Manor House” in Tambov using the ArchiCAD-64 21 EDU software product is presented. The work was carried out in the framework of the practice of obtaining primary professional skills, including primary skills of research activities (measured) by students studying in the direction of preparation 07.03.01 “Architecture”. The aim of the work is to preserve the general appearance of the building in digital form. Based on the photofixation, the outline and volume of the main facade of the building were restored. The obtained virtual information can be used to reconstruct and restore the building and attract tourist interest in historical buildings and structures in the Tambov region.

Keywords: 3D-modeling, virtual model, object of cultural heritage, reconstruction and restoration.

Каждый город стремится сохранить свой уникальный облик благодаря реконструкции исторических объектов и поддержанию их в надлежащем состоянии. Многие культурные и исторические постройки города Тамбова обнаруживают ветхость, становятся непригодными к эксплуатации. Не получая должного ухода вследствие разных причин, они быстро разрушаются от воздействия погодных условий и вандажных действий. Представляется необходимым сохранить облик исторических зданий для будущих поколений. Не имея возможности провести реконструкцию непосредственно, авторы предлагают перевести внешний облик сооружения в цифровую форму.

Возможно, такой способ не всегда может играть решающую роль в реконструкции зданий, представляющих культурную ценность, но наличие виртуальной модели даст возможность составить довольно полное представление о здании или сооружении в случае физической утраты памятника по прошествии времени. Большую роль наличие виртуальной модели сыграет для развития туризма в Тамбове и области. Современные технологии открывают возможности в области виртуальных туристических путешествий. К примеру, в Бостонском музее изящных искусств (США) американская компания Cuseum предложила способ знакомства с украденными полотнами Рембрандта. Необходимо привести смартфон или другой электронный гаджет на пустую раму, и можно увидеть восстановленные в виртуальной среде утраченные полотна [1]. В Государственном музее архитектуры имени Щусева при помощи виртуальной среды можно увидеть 3D-объекты давно не существующих зданий и нереализованных идей знаменитых архитекторов [2].

Таким образом, с помощью виртуального моделирования можно сохранить архитектурное наследие Тамбова, которое сохранить физически не представляется возможным вследствие уже произошедшей утраты, либо для создания банка данных о памятниках и использовать его для развития туризма и привлечения инвестиций на реконструкцию и реставрацию.

Основополагающим документом сохранности сооружений с богатым историко-культурным капиталом является Единый Государственный реестр объектов культурного наследия памятников истории и культуры народов Российской Федерации, в который входит памятник градостроительства и архитектуры – объект регионального значения «Городская усадьба купца Ефанова: главный усадебный дом», регистрационный номер 681410353740005, построенный в конце XIX – начале XX века [3]. Авторы полагают целесообразным создание базы виртуальных моделей культурных и исторических объектов, что поможет как при реконструкции зданий в будущем, так и в детальном изучении и сохранении их облика в случае утраты.

Целью данной работы является создание виртуальной детализированной модели объекта культурного наследия «Городская усадьба купца Ефанова: главный усадебный дом». Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать принципы создания подобных работ, осуществить фотофиксацию объекта, провести обмеры на месте, освоить возможности программных продуктов в области архитектурной визуализации.

Эта деятельность осуществлялась в рамках практики по получению первичных профессиональных умений и навыков, в том числе первичных умений и навыков науч-

но-исследовательской деятельности (обмерной) во втором семестре студентами, обучающимися по направлению подготовки 07.03.01 «Архитектура». Объект выбран в связи с его состоянием – оно вызывает опасение – бывшая усадьба быстро разрушается от воздействия непогоды и вандализма после того как перестала быть жилой в 2015 г.

Здание построено в неоготическом стиле. Дом отличается разнообразием арок и оконных проемов, правая часть фасада завершается высоким треугольным щипцом с круглым световым окном, затем идет надвратная часть с декоративным шатровым завершением (рис. 1).



Рис. 1. Городская усадьба купца Ефанова – главный усадебный дом

В качестве платформы для построения виртуальной модели использовался программный продукт, созданный фирмой Graphisoft, ArchiCAD-64 21 EDU (учебная версия) – это программный пакет для архитекторов и дизайнеров, который предназначен для проектирования архитектурно-строительных решений и конструкций, а также элементов ландшафта, мебели и т.п. [4].

При работе в пакете используется концепция Виртуального здания. Суть ее состоит в том, что проект, выполненный в ArchiCAD, представляет виртуальную модель реального здания, существующую в памяти компьютера. Для ее выполнения проектировщик на начальных этапах работы с проектом фактически виртуально «строит» здание, используя при этом инструменты, имеющие полные аналоги в реальности. Ими являются стены, перекрытия, окна, лестницы, разнообразные конструктивные элементы и т.д. [4].

Начальным этапом представленной работы является построение общего абриса главного фасада дома на основе проведенной фотофиксации (рис. 1) и студенческих эскизов, выполненных на подрамниках во время прохождения практики (рис. 2, а, б).

Затем выполняется нанесение оконных проемов. Окна первоначально создавались из замкнутой фигуры, затем, при осуществлении детализации, производилась проработка их арочных конструкций (рис. 3).

Были сглажены большинство форм и неровностей при помощи возможности программы. Для восстановления деталей входной двери использованы кроки из архива студенческих работ кафедры «Архитектура и строительство зданий» (рис. 4).

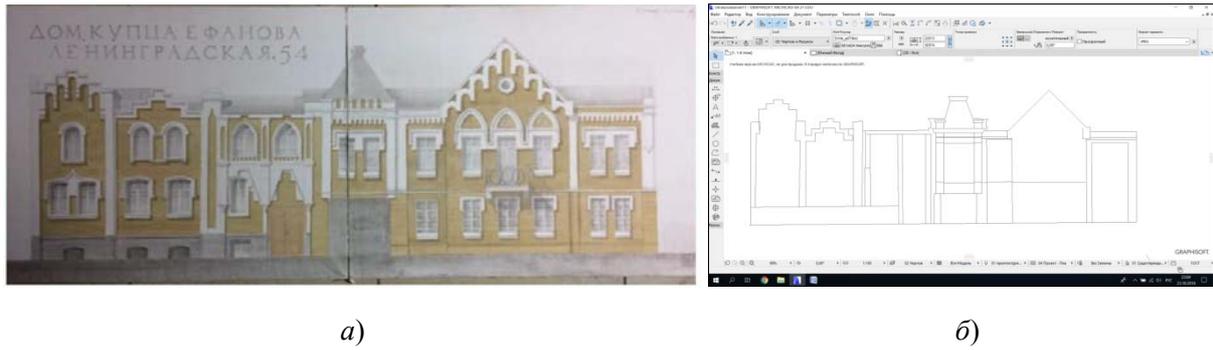


Рис. 2. Начальный этап работы:
а – студенческие эскизы на подрамниках; *б* – построение абриса здания в ArchiCAD

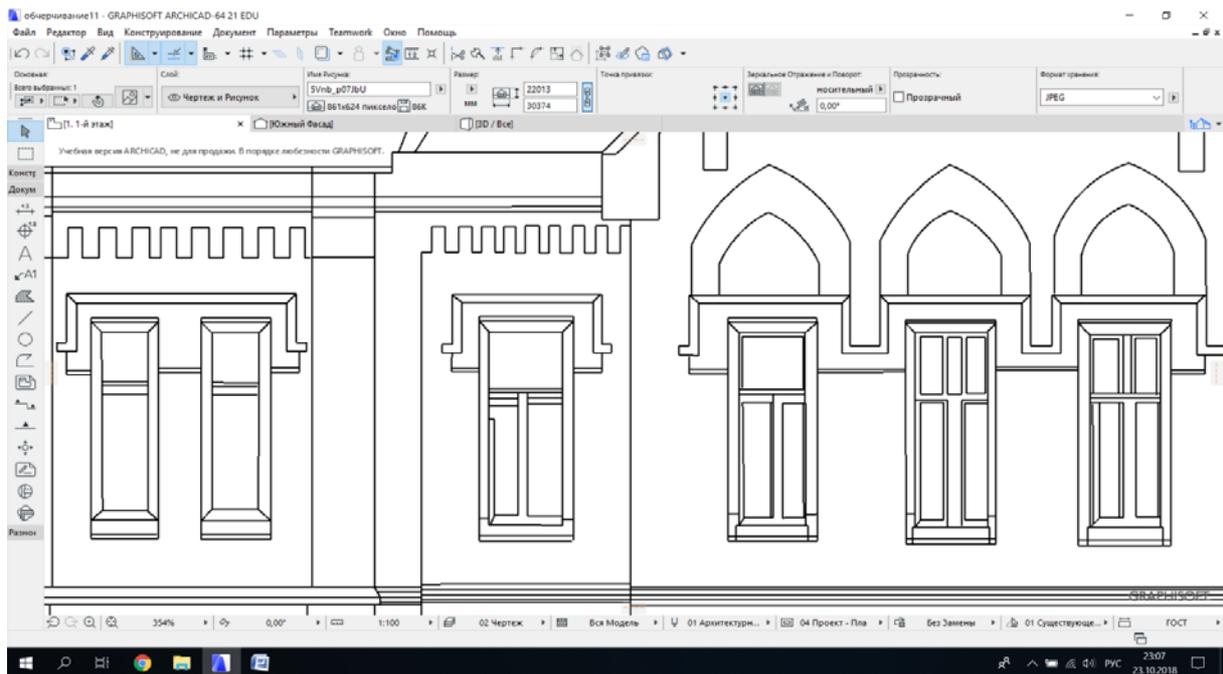


Рис. 3. Проработка деталей окон

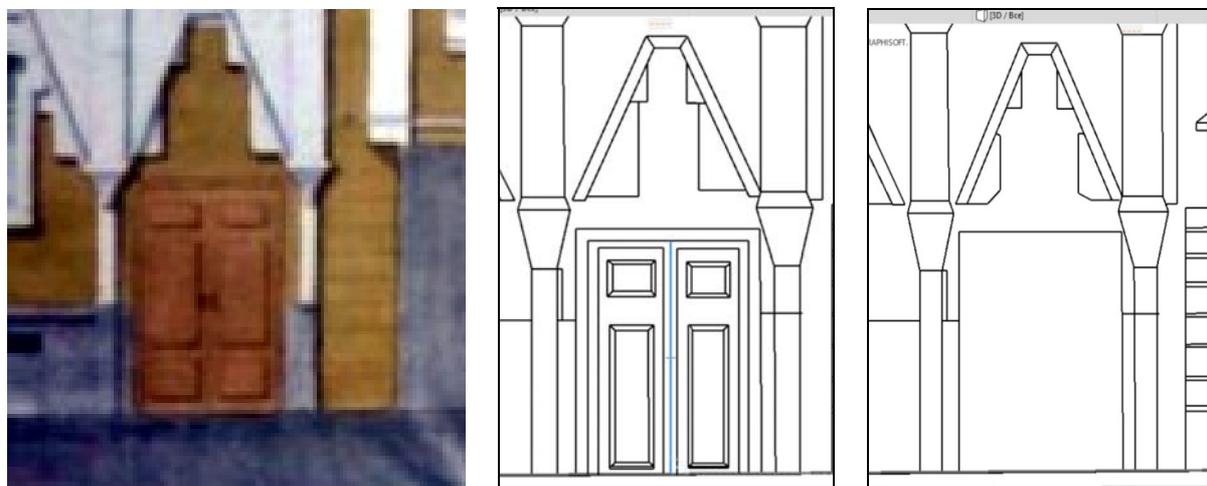


Рис. 4. Кроки из архива кафедры и этапы проработки главного входа



Рис. 5. Проработка деталей фасада

Работа над деталями фасада велась по фотографиям и учебным чертежам студентов (рис. 5).

При работе в среде Archicad-64 21 основным инструментом для вычерчивания главного фасада являлись инструменты «Линия», «Перекрытие». Полученный в результате объект сохранялся как параметрический библиотечный объект Archicad на основе технологии GDL (Geometric Description Language) с расширением gdl. Это встроенный в Archicad язык программирования, который является самым оптимальным способом описания строительных конструкций, изделий для их последующего применения в системах проектирования и программах для служб эксплуатации здания. Он содержит всю информацию полного описания всех элементов в виде 2D-символов САПР, 3D-моделей и спецификаций, что может использоваться в чертежах, презентациях и расчетах.

Важным моментом при создании виртуальной модели исторического здания является создание архитектурных деталей – карнизов, поясков, наличников и т.д., так как именно эти детали определяют неповторимый облик здания. В работе оконные наличники и другие выступающие элементы фасада были созданы следующим способом:

- наличнику, образованному инструментом «Перекрытие», задавалась требуемая толщина, мм;

– выделялась нужная деталь наведением на нее курсора, осуществлялся переход в 3D-окно;

– во вкладке «3D-проекция» настраивался вид на проекцию – «Вид сбоку», азимут камеры 90°, азимут солнца 270°;

– модель сохранялась как файл с расширением .gsm. Это новый библиотечный объект, который можно использовать не только в этом, но и в будущих проектах. Элемент затем открывался в библиотеке и вставлялся в нужное поле на чертеже.

В результате работы была получена цифровая модель главного фасада объекта «Городская усадьба купца Ефанова: главный усадебный дом» в г. Тамбове по улице Ленинградской, дом 54 [5] в детальной проработке отдельных элементов (рис. 7), соответствующий облику на фото (рис. 6).

Так как в работе был использован инструмент «Перекрытие», то фасад имеет формат виртуальной модели. В последующих работах планируется восстановление по фото и кроки других фасадов памятника, планов первого и второго этажей, а также кровли. Третьим этапом планируется соединение из полученных оцифрованных чертежей, моделей фасадов и планов полноценной объемной виртуальной модели объекта культурного наследия «Городская усадьба купца Ефанова: главный усадебный дом», максимально приближенной к оригинальному виду.



Рис. 6. Дом купца Ефанова. Фото главного фасада

Подобные модели в будущем могут быть использованы для создания базы архитектурных памятников, внесенных в Единый Государственный реестр объектов культурного наследия города Тамбова с целью сохранения их облика с использованием цифровых технологий для возможной реконструкции и реставрации и развития туризма в Тамбовской области.



Рис. 7. Оцифрованный главный фасад Дома купца Ефанова

Список использованных источников

1. **Популярная механика** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.popmech.ru/technologies/news-416682-dopolnennaya-realnost-vernet-v-muzej-ukradennye-kartiny-rembrandta/> (дата обращения: 19.09.2019).

2. **Культура РФ** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.culture.ru/news/167025/novaya-virtualnaya-ekspoziciya-muzeya-arkhitektury-imeni-shuseva> (дата обращения: 19.09.2019).

3. **Государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов России** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://kartarf.ru/dostoprimechatelnosti/176070-gorodskaya-usadba-kupca-efanova-glavnyy-usadebnyy-dom> (дата обращения: 19.09.2019).

4. **ArchiCAD** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/ArchiCAD> (дата обращения: 19.09.2019).

5. **Дома в Тамбове, Ленинградская улица. Достопримечательности** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://kraeved1147.ru/tambov-dom-3/> (дата обращения: 19.09.2019).

УДК 004.94:721.021.23:725.42

Ельчищева Т. Ф.¹, Преображенская Е. М.², Красивская Д. А.³

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),

²(Тел. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),

³(Тел. (953)7232447, e-mail: dkrasivskaya@mail.ru)

ПОДГОТОВКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЗДАНИЯ ВЫСТАВОЧНОГО ПАВИЛЬОНА К ВЫРАЩИВАНИЮ ПРОТОТИПА НА 3D-ПРИНТЕРЕ

Elchishcheva T. F.¹, Preobrazhenskaya E. M.², Krasivskaya D. A.³

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),

²(Tel. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),

³(Tel. (953)7232447, e-mail: dkrasivskaya@mail.ru)

PREPARATION OF THE VIRTUAL MODEL OF THE BUILDING OF THE EXHIBITION PAVILION FOR GROWING A PROTOTYPE ON A 3D-PRINTER

Аннотация. В данной работе представлено описание создания проекта выставочного павильона в центральной части города Тамбова. В рамках описанной в статье проблемы производится выявление целей и задач с учетом обозначенной актуальности. На основе анализа опыта известных архитекторов с помощью примеров реализованных проектов выставочных павильонов, нормативных документов и условий выбранной территории формулируются основные этапы проектной деятельности, описывается генеральный план, определяются особенности объемно-планировочного решения и внешнего облика здания, создается эскиз, а затем пространственная модель в программной среде ArchiCAD, формируется проект, отвечающий поставленным целям. Итогом работы является подготовка пространственной модели здания для выращивания прототипа на 3D-принтере методом аддитивной печати.

Ключевые слова: общественное здание, выставочный павильон, объемно-пространственная модель, метод аддитивной печати, прототип.

Abstract. This paper describes the creation of the project of the exhibition pavilion in the central part of the city of Tambov. In the framework of the problems described in the article, goals and objectives are identified taking into account the indicated relevance. Based on the analysis of the experience of famous architects using the examples of implemented projects of exhibition pavilions, regulatory documents and conditions of the selected territory, the main stages of the project activity are formulated, the master plan is described, the features of the space-planning solution and the appearance of the building are determined, a sketch is created, and then a spatial model in the software ArchiCAD environment, a project is formed that meets the goals. The result of the work is the preparation of a spatial model of the building for growing a prototype on a 3D printer using the additive printing method.

Keywords: public building, exhibition pavilion, three-dimensional model, additive printing method, prototype.

В целях удовлетворения духовных потребностей человека необходимо создание строений, несущих функцию эстетического просвещения, этим обладают здания выставочных павильонов. Организация пространства для выставки временных и постоянных экспозиций актуальна как один из методов решения обозначенной проблемы. Рост уровня культуры необходимо поддерживать и стимулировать, что только повышает значение общественных зданий подобного назначения.

Создание современного выставочного павильона в г. Тамбове может иметь такие положительные следствия, как повышение уровня заинтересованности в объектах культурного и эстетического значения и искусства в целом не только среди взрослого населения, но и среди детей и молодежи; общее благотворное влияние на уровень культуры и образования; появление перспектив для развития региона в сфере культуры и туризма.

Существенную роль играет выбранное размещение павильона. Одна из главных улиц города Тамбова – Интернациональная, – с широкими тротуарами, благоустроенными зелеными зонами, богатая памятниками культурного и архитектурного значения. В недавнем прошлом она была популярным местом среди горожан за счет деятельности областной библиотеки, кинотеатра, кафе и многих других развлекательных заведений. Однако с течением времени многие из этих заведений закрылись и сегодня пребывают в запустении, например, здание бывшего кинотеатра «Родина», которое является памятником архитектуры, не эксплуатируется с 2014 г., что постепенно ведет к его разрушению. Появление посещаемого места на этой улице может помочь увеличить поток людей, что сделает ее более популярной среди горожан, и в дальнейшем может привести к заинтересованности администрации города и предпринимателей в использовании пустующих зданий для целей культуры и благоприятному развитию данной улицы и города в целом.

Проект выставочного павильона в центральной части города Тамбова был создан в рамках курсового проектирования по дисциплине «Архитектурное проектирование» в 3-м семестре (направление подготовки 07.03.01 «Архитектура»).

Целью данного проекта является организация выставочного пространства для временных и постоянных экспозиций.

Для достижения цели необходимо было решить некоторые *задачи*: проанализировать примеры существующих павильонов со сходной функцией; изучить нормативные документы по проектированию общественных зданий подобного типа; выбрать местоположение будущего объекта; на основе изученных данных и результатов анализа подготовить проект выставочного павильона применительно к условиям выбранной местности; разработать внешний облик, гармонично вписывающийся в окружающую застройку; создать виртуальную модель здания для последующего выращивания прототипа на 3D-принтере методом аддитивной печати.

В процессе изучения реализованных проектов выставочных павильонов были проанализированы некоторые из них.

1. Павильон «Махорка» (рис. 1), представленный СССР на международной выставке в Париже, 1925 г. Это павильон Всероссийского махорочного синдиката на пер-

вой Всероссийской сельскохозяйственной и кустарно-промышленной выставке 1923 г. Архитектор – К. Мельников. Павильон имеет следующие особенности: он выдержан в стиле «конструктивизм»; не имеет в углах конструктивных опор – массив здания сдвинут с опоры; используются ступени-консоли, прозрачное угловое остекление, односкатная кровля. Это легкое, деревянное здание без фундаментов [1].

2. Национальный павильон Словении на выставке ЭКСПО 2015 в Милане (рис. 2). Особенности павильона: построен из натуральных материалов (дерево, стекло); состоит из пяти призматических структур, форма которых напоминает словенский культурный ландшафт; имеет большое количество выставочных площадей. Архитектурная концепция здания – любовь к Словении, отражение природы страны, экология, здоровье, движение [2].

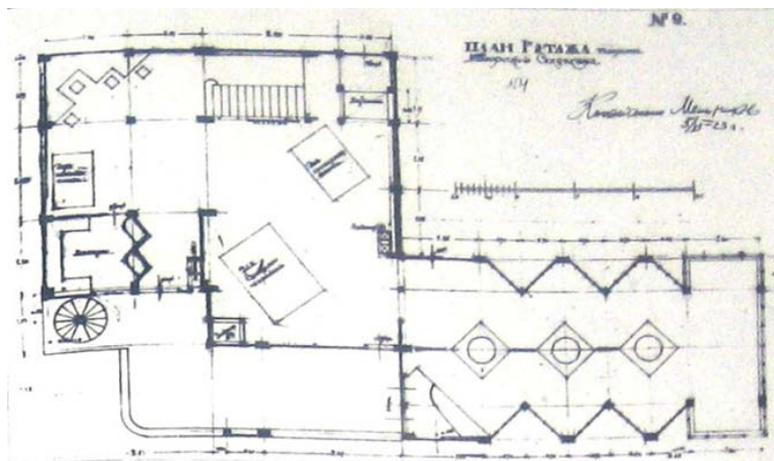


Рис. 1. Павильон «Махорка»: внешний вид и план здания

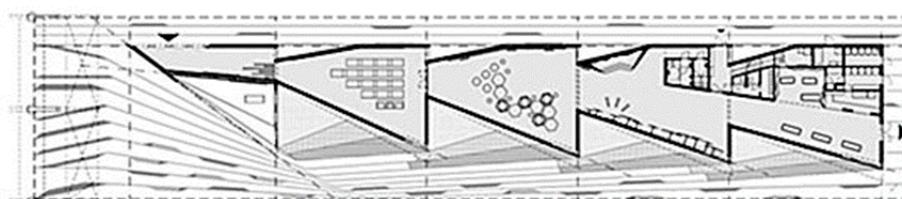


Рис. 2. Национальный павильон Словении на выставке ЭКСПО 2015

3. Первый летний павильон художественной галереи «Серпентайн» в Лондоне (рис. 3), 2000 г., архитектор – Заха Хадид. Особенности: павильон выполнен в стиле деконструктивизм, имеет тентовую структуру, легкий, функциональный, простой, переломы кровли в различных направлениях создают эффектное внутреннее пространство [3].



Рис. 3. Летний павильон галереи «Серпентайн», Лондон

В ходе анализа проектов зданий были выявлены интересные архитектурно-планировочные, концептуальные и эстетические решения, в дальнейшем подводящие к формированию особенностей описываемого проекта.

Изучение норм проектирования такого типа зданий и анализ положений свода правил СП 118.13330.2012 «Общественные здания и сооружения» позволил сформулировать основные требования, предъявляемые к проекту, что в итоге оказало существенное влияние на планировочные и конструктивные решения.

Определение расположения объекта на местности, описание местных условий. Территория, выбранная для размещения объекта, находится в зоне общественно-деловой застройки центральной части города, на ул. Интернациональной, одной из центральных улиц Тамбова, между такими объектами, как ЗАГС (дом купца В. М. Селезнева, памятник архитектуры) и областная библиотека имени А. С. Пушкина (рис. 4). Розовым цветом на схеме выделена зона общественно-деловой застройки в соответствии картой градостроительного зонирования города Тамбова [4].

Площадь всего участка земли, расположенного между улицей и проездами, составляет 0,5 га. Площадь проектируемого объекта и открытой площадки – 0,06 га. В результате исследования местности *разработан генеральный план*, на котором отражены особенности организации общественного пространства (рис. 5, слева).

С помощью заездов со стороны улиц К. Маркса и Интернациональной может происходить загрузка здания со стороны заднего фасада. Здесь же создается парковка для служебного транспорта и транспорта посетителей. Для того чтобы сделать выставочный зал доступным для пешеходов, необходимо проложить дополнительные пешеход-

ные пути: со стороны библиотеки им. А. С. Пушкина и от памятника В. И. Агапкину и И. А. Шатрову. В пешеходной доступности от объекта находится остановка общественного транспорта.

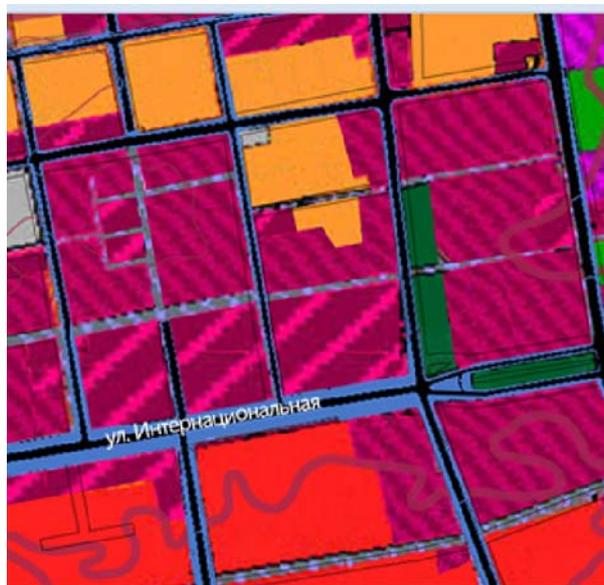


Рис. 4. Участок местности в г. Тамбове на ул. Интернациональной под застройку павильона

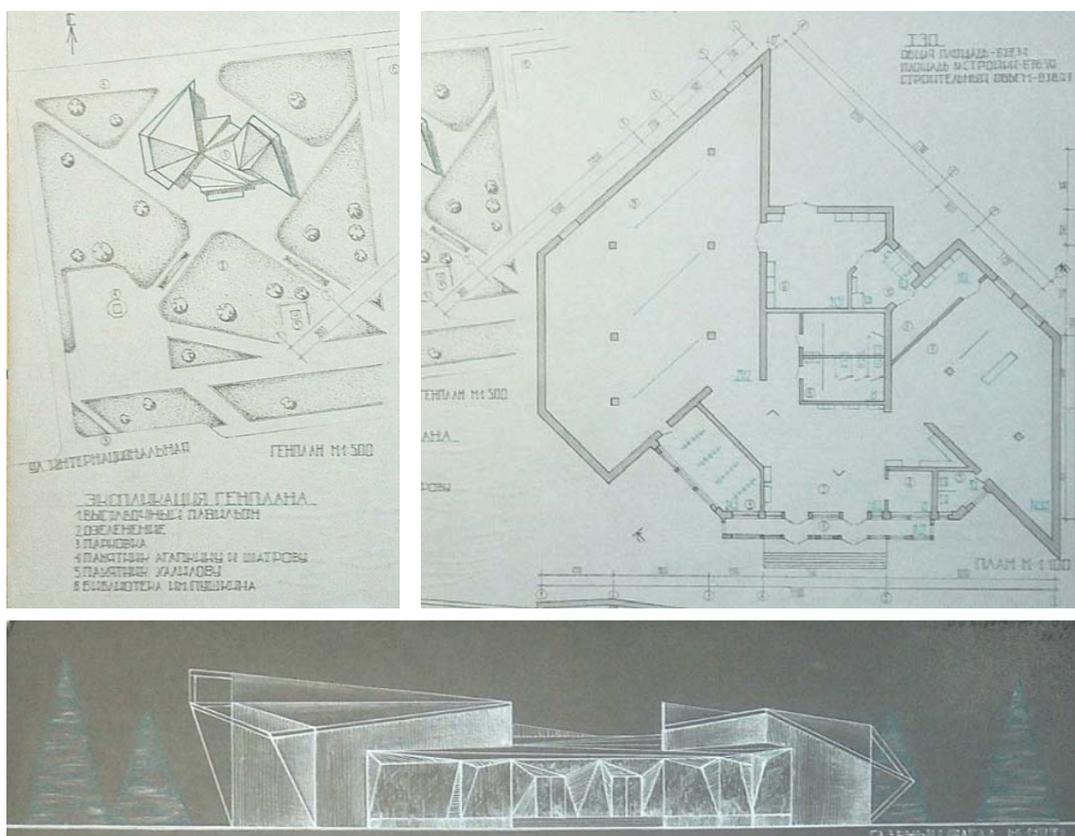


Рис. 5. Генеральный план (слева), план (справа) и главный фасад (снизу) выставочного павильона, «ручная» подача

Проектируемый павильон состоит из двух залов: большого – для временной экспозиции и малого – для постоянной (рис. 5, справа). Большой зал многофункционален, призван легко адаптироваться под любую выставку, для чего предполагается устройство современного интерактивного оборудования пространства.

В объемно-планировочном решении здания можно выделить следующие ниже приведенные особенности. Форма объекта отражает образ летящей птицы, в крыльях которой расположены основные залы; между ними находятся необходимые помещения – вестибюль с выходами в гардероб, санитарные узлы, кассы и выставочные залы. С фасада, противоположного главному, осуществляется вход в хозяйственное помещение, через которое можно попасть в кабинет администрации или большой зал. Геометрические формы фасада позволяют зданию гармонично вписаться в окружающую застройку, рационально использовать территорию и организовать удобные пешеходные пути (рис. 5, снизу).

Создание объекта в «ручной» подаче позволило в полной мере понять основные принципы проектирования общественного здания малой этажности, чтобы в дальнейшем применить полученные практически знания в объемно-пространственной модели.

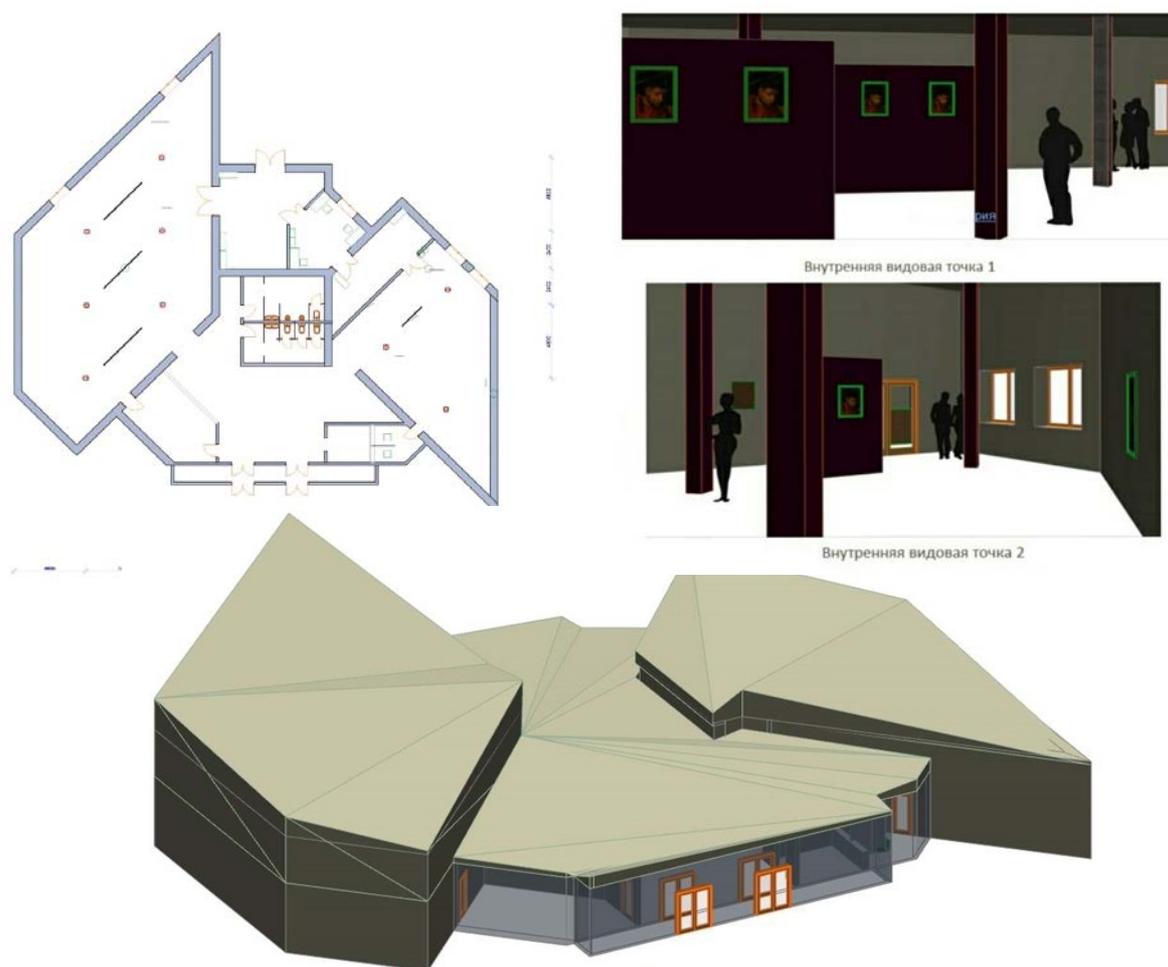


Рис. 6. Проектируемый выставочный павильон (выполнен в ArchiCAD 16)

Создание виртуальной модели здания в учебной версии ArchiCAD 16. План павильона вычерчен с использованием инструмента «Система сетки» с расстановкой конструктивных элементов и мебели (рис. 6). На основе плана создается пространственная модель здания, разрабатывается внутренний интерьер помещений. Полученная виртуальная модель здания может использоваться для выращивания прототипа на 3D-принтере.

Список использованных источников

1. **Архитектор** Константин Мельников. Павильоны, гаражи, клубы и жилье советской эпохи [Текст] : издательская серия / Коллекция Музея архитектуры им. А. В. Щусева. – М. : Кучково поле, 2015. – ISBN 978-5-9950-0553-7.
2. **Милан** Экспо 2015, национальный павильон Словении [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.socialdesignmagazine.com/mag/blog/architettura/milano-expo-2015-il-padiglione-nazionale-della-slovenia/> (дата обращения: 14.09.2019).
3. **Летние** павильоны Serpentine Gallery [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://rdh.ru/site/baza_dannykh/258--ind-architects/ (дата обращения: 14.09.2019).
4. **Правила** землепользования и застройки городского округа – город Тамбов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://archit.tmbreg.ru/deyatelnost/gradostroitelnaya-deyatelnost-v-gorodskom-okruge-gorod-tambov/pravila-zemlepolzovaniya-i-zastrojki.html/> (дата обращения: 14.09.2019).

УДК 004.4

Токарева М. А.¹, Зубкова Т. М.²

Оренбургский государственный университет, Россия, г. Оренбург

¹(Тел. 89033675391, e-mail : tokareva@mail.osu.ru),

²(Тел. 89619152559, e-mail: bars87@mail.ru)

СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

Tokareva M. A.¹, Zubkova T. M.²

Orenburg State University, Russia, Orenburg

¹(Tel. 89033675391, e-mail: tokareva@mail.osu.ru),

²(Tel. 89619152559, e-mail: bars87@mail.ru)

CREATION OF AN AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR ACCOUNTING OBJECTS OF ARCHAEOLOGICAL HERITAGE

Аннотация. В настоящее время в археологии используются методы и технологии географических информационных систем (ГИС). Объекты обработки ГИС представляют собой пространственно-временные данные географической информации, расположение археологических находок в пространстве, привязка археологических данных к местности, а также прогнозирование их месторасположения на еще не исследованных территориях, основываясь на тенденциях их распространения. В базе данных ГИС хранится информация из научных отчетов по результатам проведения археологических полевых работ об объектах археологического наследия. Автоматизированная информационная система предусматривает права доступа пользователей специалистов-археологов и специалистов других направлений. Используя метод статистических гипотез, осуществляется проверка достоверности наличия на определенной территории памятников археологического наследия.

Ключевые слова: археологическое наследие, ГИС-технологии, автоматизированная информационная система, база данных, информационные потоки, метод статистических гипотез.

Abstract. Currently, archeology uses methods and technologies of geographical information systems (GIS). GIS is an automated system for processing spatio-temporal data, the basis of integration of which is geographical information. The use of GIS makes it possible not only to fix the spatial location of archaeological finds, but also to predict the location of monuments in unexplored territories, based on trends in their distribution. GIS allows you to link archaeological data to the area. The GIS database stores information from scientific reports on the results of archaeological field work on archaeological heritage sites. Automated information systems provide access rights for users of archaeologists and other specialists. Using the method of statistical hypotheses, the reliability of the presence of archaeological heritage monuments in a certain territory is checked.

Keywords: archaeological heritage, GIS technology, automated information system, database, information flows, statistical hypothesis method.

Введение. В настоящее время в археологии широко используются методы и технологии географических информационных систем (ГИС) и дистанционного зондирования Земли из космического пространства (ДЗЗ). Эти методы и технологии имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными средствами археологических исследований. Это и более высокая точность географического расположения, и автоматизация анализа памятников архитектуры, и их визуализация и др. В современных условиях состояния археологии в Российской Федерации на передний план выходят задачи полного учета объектов археологического наследия страны.

При большом количестве памятников архитектуры их исследование традиционными методами становится сложно и возможности пространственного анализа уменьшаются. Тогда целесообразно применять ГИС-технологии.

Широкое использование географических систем связано с привязкой археологической информации к местности. Благодаря применению ГИС возможна привязка пространственно-временных данных географической информации. Исходными данными для создания археологических информационных систем отдельных географических регионов являются древние карты. Их изучение, автоматизированная обработка позволяет более точно и обоснованно планировать раскопки археологических памятников.

Применение ГИС выявляет тенденции распространения исторических памятников, не только фиксирует расположение археологических находок, но и прогнозирует их местонахождение на еще не исследованных территориях, основываясь на статистических исследованиях [1].

Анализ предметной области. Археологические исследования это сложный организованный процесс по изучению древних памятников культуры. Все археологические работы должны вестись учеными соответствующей квалификации и образования, работающими в профильных государственных учреждениях в соответствии с законодательством и инструкциями по ведению археологических работ. Порядок написания научных отчетов по результатам раскопок и разведок как основных видов археологических поисковых действий, на протяжении истории развития полевой археологии оформились в определенную законодательством административно-научную процедуру [2].

Проектирование АИС. Цель проектирования – разработать автоматизированную информационную систему (АИС), позволяющую обрабатывать информационные процессы учета объектов археологического наследия Оренбуржья [4].

В базу данных (БД) ГИС вносится информация из научных отчетов по результатам проведения археологических полевых работ об объектах археологического наследия, это:

- наименование объекта археологического наследия и его краткое пояснение;
- категория, к которой относится археологическая находка;
- материал, из которого сделана находка;
- административная принадлежность;
- принадлежность к речному/морскому бассейну;
- географические координаты;
- тип объекта археологического наследия;

- даты и фамилии исследователей памятника;
- хронологическая атрибуция;
- вид проведенных работ, с указанием площади исследования;
- место хранения археологических находок.

Каждый исторический объект с учетом своих характеристик относится к определенной археологической культуре. С помощью ГИС можно увидеть на карте преобладающую археологическую культуру.

Автоматизированная информационная система должна обеспечивать разделение прав доступа к материалам и быть реализована для двух категорий пользователей:

- с полным доступом (для специалистов в области археологии и истории);
- с частичным доступом (специалисты другой области знаний).

О каждом пользователе должны иметься следующие сведения: фамилия, имя, отчество, возраст, пол, образование, специальность, организация, уровень доступа (полный, частичный).

При проектировании АИС, реализующей сохранение археологического наследия Оренбуржья, можно выделить следующие информационные потоки, они показаны на рис. 1.

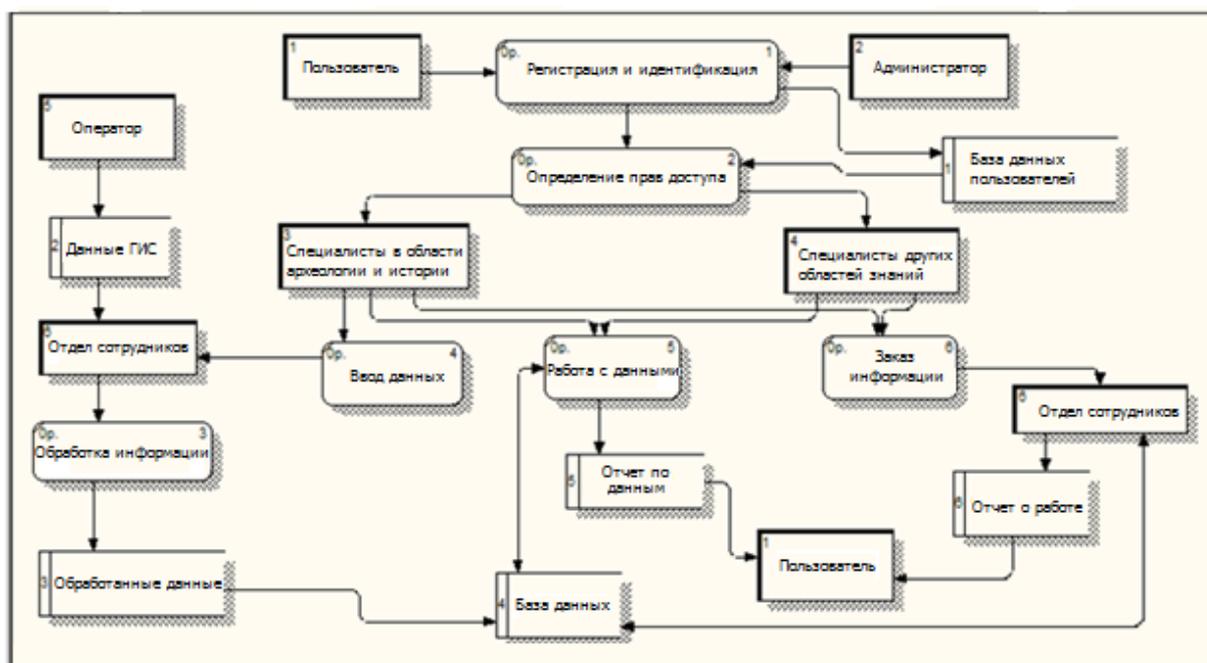


Рис. 1. Схема информационных потоков АИС

Контекстная DFD-диаграмма состоит из функциональных блоков и нескольких внешних сущностей.

Функциональными блоками являются: регистрация и идентификация, проверка прав доступа, обработка информации, ввод данных и работа с ними, заказ информации.

Сущностями служат: неавторизованный пользователь, администратор, зарегистрированный пользователь.

При внесении данных о новой археологической находке, создается уникальный идентификационный номер находки.

Пользователь, который имеет полный доступ к БД, может проводить поиск, сделать запрос об интересующей его информации, вводить новую и изменять существующую информацию об археологических объектах. Пользователь с частичным доступом имеет право на ограниченный поиск информации в БД и запрос информации об объектах. Администратор БД управляет регистрацией пользователей и археологическими объектами в АИС. Сотрудники организации вносят информацию об археологических объектах в АИС, следят за внесенными изменениями, принимают заказы на предоставление информации, вводят запросы на предоставление отчетов о выполненной работе [4].

Потоки, которые подлежат автоматизации, показаны на рис. 2.

Информационными потоками, которые подлежат автоматизации в АИС, являются результаты поиска по определенным заданным параметрам. В результате автоматизации данных процессов пользователь получит результат поиска с отметкой найденных объектов на карте.



Рис. 2. Схема информационных потоков, подлежащих автоматизации

Метод решения задачи. Так как задачей является проверка достоверного наличия на определенной территории исторических памятников археологического наследия, то для ее решения был использован метод статистических гипотез.

Статистические методы обычно используются, когда экспериментальные данные представляют собой значительные объемы результатов измерений и наблюдений. При этом совокупная структура исходных данных неоднородна и выражает различные соотношения зависимостей. Статистический анализ при использовании археологических данных позволяет выявлять скрытые закономерности, которые при наличии большого практического опыта специалистов в области архитектуры могут быть выявлены только на интуитивном уровне.

Укрупненную схему алгоритма проверки гипотезы о равенстве вектора средних значений заданному вектору показан на диаграмме состояний, изображенной на рис. 3.

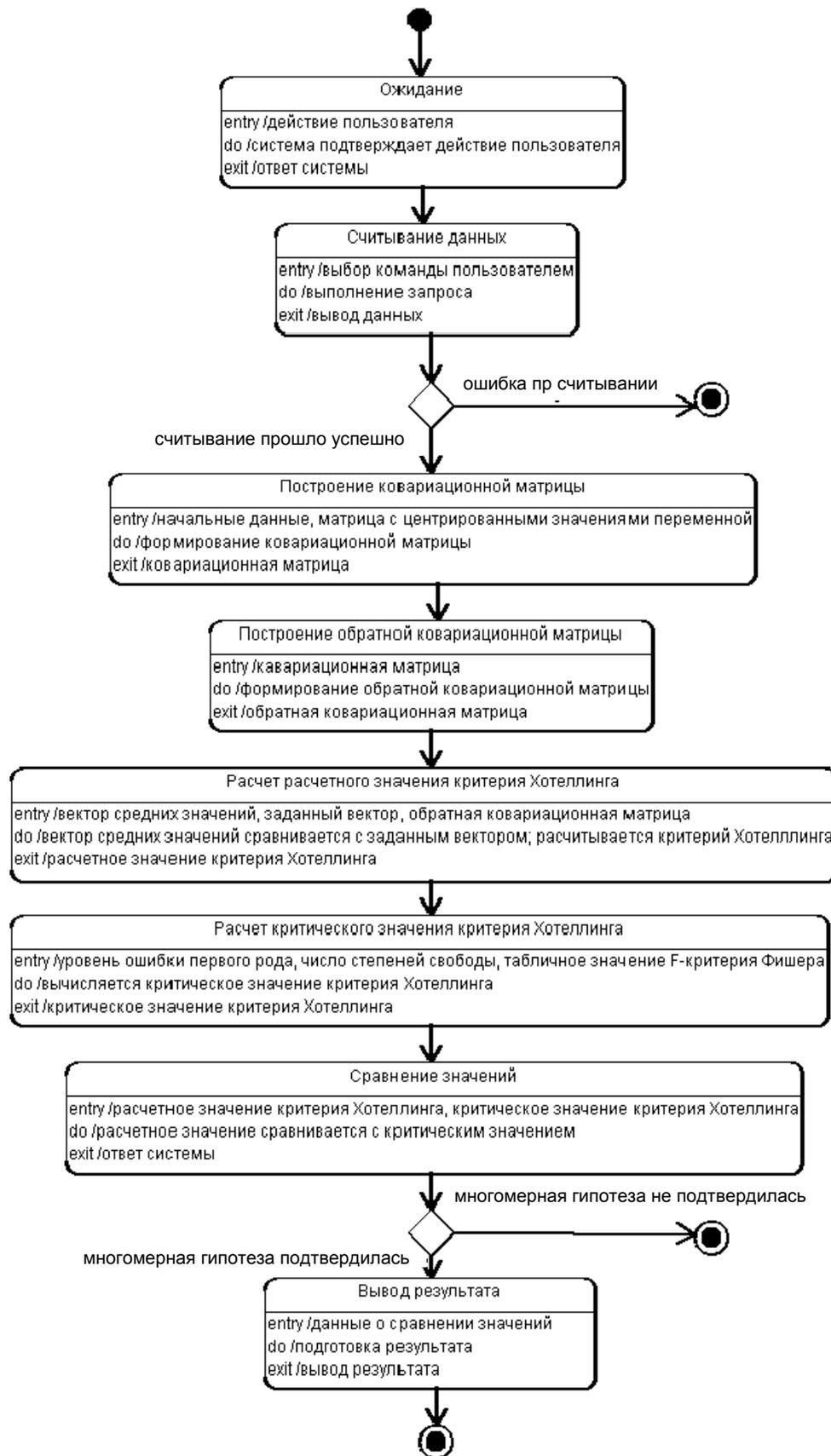


Рис. 3. Диаграмма состояний алгоритма проверки гипотезы о равенстве вектора средних значений заданному вектору

Таким образом, результатом работы является АИС по учету объектов археологического наследия Оренбургской области.

Список использованных источников

1. **Макаров, Н. А.** Археологи в современной России: перспективы и задачи / Н. А. Макаров, Л. А. Беляев, А. В. Энговатова // Российская археология. – 2015. – № 2. – С. 5 – 15.
2. **Россия** как археологическое пространство: первые итоги работы по созданию национальной географо-информационной системы «Археологические памятники России» / Н. А. Макаров, О. В. Зеленцова, Д. С. Коробов и др. // Российская археология. – 2016. – № 4. – С. 5 – 15.
3. **Зубкова, Т. М.** Технология разработки программного обеспечения : учебное пособие / Т. М. Зубкова. – СПб. : Лань, 2019. – 323 с.
4. **Токарева, М. А.** К вопросу создания автоматизированной информационной системы учета объектов археологического наследия / М. А. Токарева, Е. П. Иванова // Актуальные задачи фундаментальных и прикладных исследований : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Оренбург, 2018. – С. 22 – 29.

УДК 004.94:721.021.23:725.42

Ельчищева Т. Ф.¹, Преображенская Е. М.², Жоркина Д. Г.³

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

¹(Тел. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),

²(Тел. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),

³(Тел. (960)6644711, e-mail: dzhorkina@mail.ru)

ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЩЕСТВЕННОГО КАФЕ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ARCHICAD

Elchishcheva T. F.¹, Preobrazhenskaya E. M.², Zhorkina D. G.³

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

¹(Tel. (4752)639373, e-mail: elschevat@mail.ru),

²(Tel. (4752)639373, e-mail: kiki198608@yandex.ru),

³(Tel. (960)6644711, e-mail: dzhorkina@mail.ru)

VIRTUAL DESIGN OF A PUBLIC CAFE IN THE ARCHICAD SOFTWARE

Аннотация. В работе описывается создание объемной модели и интерьера основных помещений здания общественного кафе в г. Тамбове по ул. Никифоровская, 42. Проект разработан в рамках курсового проектирования по дисциплине «Архитектурное проектирование» в 3-м семестре (направление подготовки 07.03.01 «Архитектура», профиль «Архитектурное проектирование»). В ходе предварительного исследования выявлена необходимость данного типа здания в этой части г. Тамбова. Поиск идеи проекта осуществлялся путем анализа существующих проектов-аналогов. «Ручная» подача выполнена на подрамнике. Компьютерное моделирование здания кафе реализовано с помощью программного обеспечения ArchiCAD, предназначенного для проектирования, 3D-моделирования и рендеринга. Осуществлена детальная разработка внутреннего интерьера здания.

Ключевые слова: проектирование, проект-аналог, 3D-моделирование, общественное кафе, ArchiCAD.

Abstract. The work describes the creation of a three-dimensional model and interior of the main premises of the building of a public cafe in the city of Tambov on the street. Nikiforovskaya, 42. The project was developed as part of course design in the discipline “Architectural Design” in the 3rd semester (area of preparation 07.03.01 “Architecture”, profile “Architectural Design”). A preliminary study revealed the need for this type of building in this part of the city of Tambov. The search for a project idea was carried out by analyzing existing peer projects. “Manual” feed is made on a stretcher. Computer modeling of the cafe building is implemented using ArchiCAD software designed for design, 3D-modeling and rendering. A detailed development of the interior of the building was carried out.

Keywords: design, similar project, 3D-modeling, public cafe, ArchiCAD.

Во многих городах можно выявить наличие неблагоустроенных территорий, часто расположенных в центре города. При этом существует недостаток площадей для застройки. В рамках выполнения курсового проекта по дисциплине «Архитектурное про-

ектирование» в 3-м семестре (направление подготовки 07.03.01 «Архитектура», профиль «Архитектурное проектирование») было установлено, что в г. Тамбове на данный момент по адресу ул. Никифоровская, 42 располагается здание бывшего кафе «Рябина», подсобные строения. На территории отсутствует инфраструктура в связи с ее запустением. В указанном районе отсутствуют предприятия общественного питания. Поэтому стала очевидна актуальность проектирования общественного кафе «Share», которое может быть местом отдыха для горожан, а особенно будет востребовано среди студентов Тамбовского государственного технического университета в связи с непосредственной близостью с корпусами учебного заведения и зданиями общежитий. Новое залное пространство позволит проводить в кафе торжественные мероприятия. Также в кафе «Share» будет разработан интерьер, отвечающим современным стандартам проектирования. Помещение кафе будет грамотно разделено на функциональные зоны, благодаря чему в здании не составит труда ориентироваться как персоналу кафе, так и его гостям. Открытая площадка позволит принимать большее количество гостей в летний период.

Целью исследования является разработка проекта общественного кафе и выявление оптимальных составляющих для удобного использования здания. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- изучить проекты-аналоги зданий кафе, выявить оптимальные решения интерьеров основных помещений здания;
- обосновать размещение кафе на выбранной территории;
- выявить функциональные особенности общественного кафе;
- подобрать форму общественного здания;
- осуществить деление здания на требуемые функциональные зоны, разработать план;
- подобрать подходящие материалы для оформления фасада и интерьеров здания;
- создать объемную модель для наглядной демонстрации проектного решения кафе, используя виртуальную программную среду ArchiCAD [1].

В процессе предпроектного исследования были изучены примеры аналогичных проектов кафе и конструкций зданий общественного пользования, структура подобных сооружений, форма и функциональные особенности зданий кафе.

Например, дизайнер LEE Hsuheng разработал проект интерьера кафе «Хижина гуся» [2]. Это заведение расположено в центральном деловом районе Пекина, Китай. В интерьере объединены две темы – «подлинного» и «простого» образа жизни. Особенности кафе являются панорамные окна, из которых посетители могут наслаждаться видами на улицы города, а также обильное использование дерева в интерьере (рис. 1).



Рис. 1. Использование дерева и панорамные окна в интерьере кафе «Хижина гуся»

Убранство кафе Vulka (Булка) в Москве отличается от многочисленных аналогичных заведений своей яркостью и выразительностью [3]. Дизайн разработан в архитектурном агентстве Crosby Studios. Помещение кафе отличается оригинальными балками и панорамными оконными блоками, формирующими выразительную индустриальную обстановку (рис. 2, слева). Панорамный декор окон дает возможность наполнить пространство солнечным сиянием и теплотой, формирующей уютную атмосферу для приятного отдыха и неспешного времяпрепровождения посетителей (рис. 2, справа).



Рис. 2. Интерьер кафе Vulka со стороны главного фасада (слева) и панорамные окна в интерьере (справа)

Интерьер кафе, разработанный агентством Kiwi&Rom (Великобритания) [4]. В основе дизайнерского решения было желание создать свежий, светлый и просторный зал, где размываются границы между внутренним и внешним пространством (рис. 3).

Был проведен *анализ территории*. В результате было выявлено, что участок местности, выбранный под проектирование кафе, соответствует месту сосредоточения пешеходных потоков: студентов, обучающихся в ТГТУ, людей с остановок общественного транспорта, парка Победы и жителей данного района, так как территория прилегает к ул. Дегтянской, на которой находятся жилой комплекс и частные дома. Территория находится в центре транспортных потоков: участок расположен на ул. Никифоровская, которая имеет непосредственную связь с одной из главных и оживленных улиц города Тамбова (ул. Мичуринская) (рис. 4).



Рис. 3. Интерьер кафе, разработанный агентством Kiwi&Rom

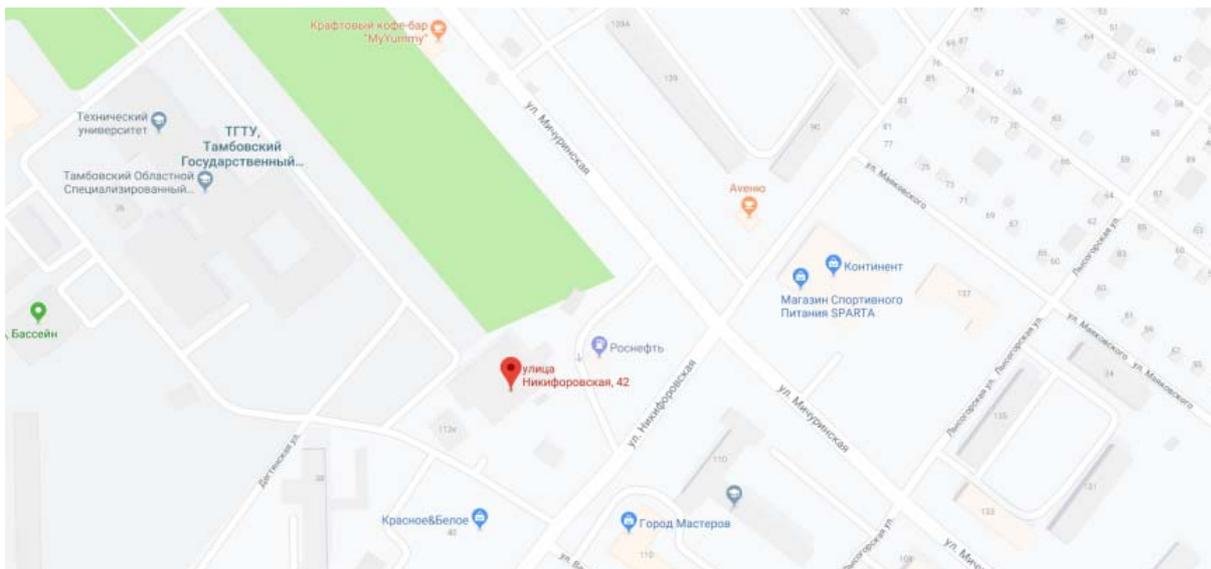


Рис. 4. Территория застройки на пересечении улиц Мичуринская и Никифоровская

На этапе *эскизирования* были разработаны наброски фасадов, плана, генерального плана объекта. На ватмане были построены точные чертежи кафе. «Ручная» подача проекта была выполнена с разработкой генерального плана (рис. 5), где предложено озеленение территории, прилегающей к проектируемому объекту. Для создания зеленой зоны используются хвойные растения: голубая ель, пихта.

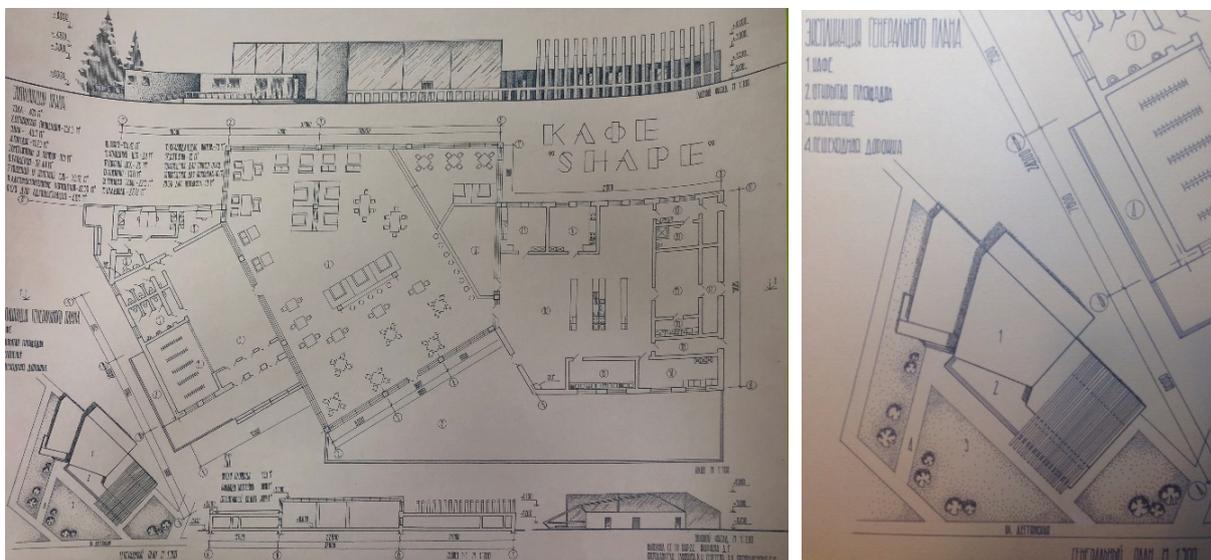


Рис. 5. «Ручная» подача проекта (слева) и генеральный план застройки (справа)

Вычерчивания плана кафе в программной среде ArchiCAD основано на применении технологии информационного моделирования зданий [1]. Стены, перегородки, перекрытия, окна и двери при этом являются параметрическими объектами с редактируемыми параметрами. Проектируется крыша и утверждается композиция внешнего облика кафе.

Все формы конструкции проекта выбраны не случайно. Здание спроектировано на контрасте форм, размеров, материалов, что создает интересную, цельную, динамичную конструкцию. «Инструменты» ArchiCAD позволяют с точностью создавать планы (рис. 6, слева) объемная пространственная модель здания для демонстрации объемно-планировочных решений с помощью виртуальной среды (рис. 6, справа), фасады (рис. 7).



Рис. 6. План (слева) и 3D-изображение кафе (справа) в программной среде ArchiCAD



Рис. 7. Боковой (слева) и задний (справа) фасады кафе

Здание функционально и визуально разделено на три зоны. Первая зона – входная. К ней предусмотрены два подхода: главный, оборудованный лестницей и пандусом для обеспечения доступа маломобильных групп населения и служебный – для администрации. Здесь расположены тамбур, вестибюль, гардероб и санузлы для посетителей, административные помещения.

Вторая зона отведена под кухню, цехи и хозяйственные помещения. К ней предусмотрен отдельный подход и подъезд для загрузки продуктов и удаления отходов.

Третья зона расположена в центре. Она является объединяющим звеном, отличается сложной формой и имеет наибольшую площадь и высоту, так как является главной в концепции проекта. В ней расположены просторный зал, разделенный, для удобства посетителей, на зоны с помощью мебелировки и перепада высот, и бар [6].

В состав проекта входит открытая площадка с ограждением, где можно расположиться в летнее время. С правой стороны ограждение продолжается декоративным элементом в виде балок, которые, с эстетической точки зрения, придают фасаду здания динамичность, а с точки зрения функциональности, служат опорой для тентового навеса для защиты гостей, находящихся на летней площадке, от воздействия погодных условий.

Проект здания кафе имеет следующие параметры: общая площадь – 1095 м², площадь застройки – 1890 м², строительный объем – 4968 м³. На этаже расположены:

тамбур и вестибюль – 105 м²; гардероб – 37,4 м²; санузелы – 33,1 м²; санузел для администрации – 4,9 м²; административное помещение – 42,4 м²; зал – 495 м²; бар – 40,5 м²; кухня – 174,4 м²; холодный цех – 20 м²; горячий цех – 20 м²; моечная – 19,8 м²; моечная тары – 22,5 м²; кладовая – 27,7 м²; охлаждаемая камера – 7,5 м²; загрузка – 15 м²; помещение для транспортируемых отходов – 10 м²; помещение для персонала – 10 м²; санузел и душевая для персонала – 10 м². Площадь летней площадки составляет 232,5 м², площадь твердого покрытия – 52,5 тыс. м² и площадь озеленения – 75 тыс. м².

Конструктивный тип здания – каркасно-стеновой.

Используемые строительные материалы. Несущие (510 мм) и самонесущие (380 мм) стены и перегородки (120 мм) выполнены из кирпича, колонны (300×300 мм) – из железобетона. Плиты перекрытия – железобетонные многопустотные, толщиной 220 мм. Окна – пластиковые (со створчатым механизмом открывания и глухие), с двумя стеклами, двери – стеклянные и металлические, распашные.

Интерьер зала кафе «Shape». На этом этапе осуществляется расстановка мебели в помещениях и необходимого оборудования. В интерьере используются холодные светлые оттенки в цветах мебели и отделки. Особенностью центрального зального помещения является сплошное остекление стен. Этот материал привлекает внимание и является яркой деталью. Прием облицовки стеклом выделяет зал на фоне остальных зон объекта. Также в декорировании используется дерево. Из него выполнены поручни, ограждения, декоративные балки [5]. Интерьер помещения не требует дополнительного декора, лаконичность и сдержанность ему придают однотонная белая мягкая мебель и использование предметов мебелировки из дерева. Барная стойка выполнена с применением стеклянных элементов, что повторяет облицовку стен помещения (рис. 8).



Рис. 8. Интерьер зала и бара (слева) и выход на летнюю террасу (справа) кафе «Shape»

В графическом редакторе Adobe Photoshop был создан подрамник «компьютерной» подачи проекта (рис. 9).

В итоге проектирования были решены все поставленные задачи и достигнута цель проектирования.



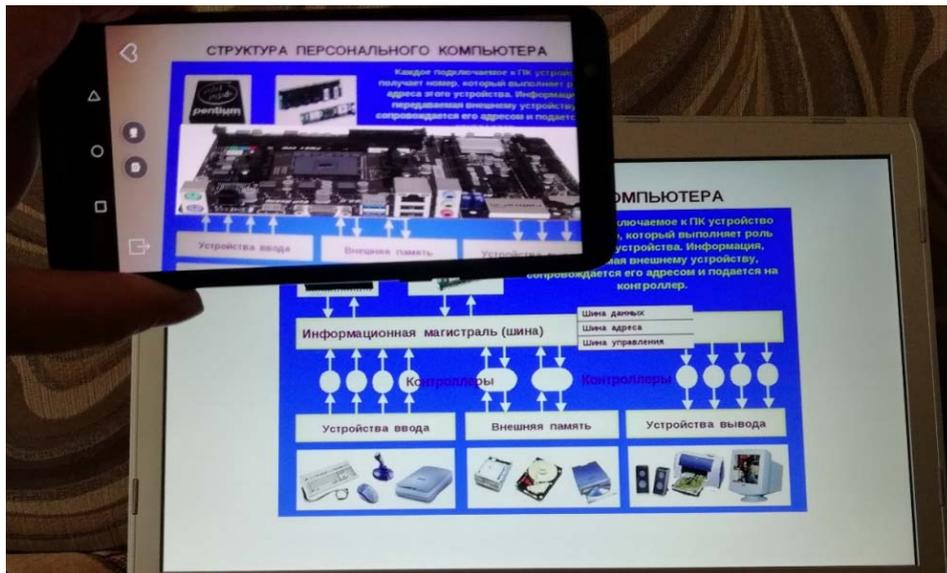
Рис. 9. «Компьютерная» подача проекта

Список использованных источников

1. **ArchiCAD** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/ArchiCAD> (дата обращения: 13.09.2019).
2. **Проект интерьера кафе «Хижина гуся»** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://interiorscafe.ru/interyer-bistro-khizhina-gusya/> (дата обращения: 13.09.2019).
3. **Кафе Vulka в Москве** [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://interiorscafe.ru/bulka/> (дата обращения: 13.09.2019).
4. **Интерьер кафе**, разработанный агентством Kiwi&Rom [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://interiorscafe.ru/prostornyj-restoran/> (дата обращения: 13.09.2019).
5. **СП 118.13330.2012***. Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06–2009 (с изменениями № 1, 2). Введ. в действие с 01.09.2014. – М.: Минстрой России, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/1200092705> (дата обращения: 10.09.2019).
6. **СНиП 3.03.01–87**. Несущие и ограждающие конструкции [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/871001100> (дата обращения: 10.09.2019).

Секция III

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ, ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ И СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ



УДК 519.6, 62.2

Корнаев Н. В.

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева», Россия, г. Орел
(Тел. 8-925-841-26-13, e-mail: rusnkor@bk.ru)

ВЫЯВЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ РОТОРНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Kornaev N. V.

Orel State University Named After I. S. Turgenev, Russia, Orel
(Tel. 8-925-841-26-13, e-mail: rusnkor@bk.ru)

IDENTIFICATION OF ROTOR SYSTEM FAULTS WITH THE USE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Аннотация. Выявление закономерностей движения несбалансированных роторных систем возможно производить с использованием современных информационных технологий. В статье рассмотрено применение искусственных нейронных сетей для решения задачи диагностики нелинейной динамики роторов, а также выявления неисправностей роторных систем в части качающейся изменения массы опорных узлов роторных машин и дисбаланса.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, распознавание, диагностика неисправностей, подшипник жидкостного трения, дисбаланс роторной системы.

Abstract. It is possible to reveal patterns of motion of unbalanced rotor systems using modern information technologies. The article considers the application of artificial neural networks to solve the problem of diagnostics of nonlinear dynamics of rotors and revealing of defects of rotor systems in part of oscillating change of mass of supporting units of rotor machines and imbalance.

Keywords: artificial neural network, recognition, fault diagnosis, liquid friction bearing, rotor system imbalance.

Введение. В настоящий момент роторные машины широко распространены во всех отраслях промышленности. Ряд роторных систем обладают отличительной особенностью, такой как: изменение в процессе работы массогабаритных характеристик. Подобного рода особенности усложняют изучение динамических характеристик роторных машин, тем не менее, в процессе проектирования и эксплуатации необходимо исследование динамических свойств системы в целом. В рамках диагностики и выявления неисправностей в вышеуказанных динамических системах необходимо привлечение современных средств мониторинга и распознавания состояния по комплексу измеряемых параметров.

Дисбаланс и смещение являются наиболее вероятными ошибками во вращающихся машинах [1]. Эти неисправности приводят к выходу машины из строя или сокращению срока службы машины. В настоящее время для диагностики, доступны различные ме-

тоды, такие как: анализ масла, акустическая эмиссия и вибрационный анализ. Качественным дополнением к современным методам диагностики служат искусственные нейронные сети (ИНС), способные эффективнее производить расчеты сложных динамических систем с учетом всех возможных факторов [2].

Современные исследования [3, 4] демонстрируют эффективное использование функции распознавания образов с использованием ИНС для диагностики состояния, как отдельных элементов, так и состояния роторных систем в целом. Показательный пример продемонстрирован в работе [4], где сверточная нейронная сеть на основе поступающих изображений успешно выявляет дефекты отдельных компонентов роторной системы: подшипник качения, привод вращения, ступенчатый вал. Важно отметить, что диагностика в вышеуказанных работах не производится в режиме реального времени, а также не выработан единообразный принцип построения ИНС выявляющих дефекты, что подчеркивают актуальность исследования.

Цель данного исследования является разработка, тестирование и интеграция программных средств диагностики неисправностей роторно-опорной системы на основе ИНС в части касающейся выявления дисбаланса ротора.

Основы решения задач классификации с использованием искусственных нейронных сетей. Поставленную задачу выявления дефектов, возможно, решить с использованием типовых методов решения задач классификации. Классификация возможна как с наличием обучающей выборки (обучение с учителем) так и без. Для решения задач классификации различных динамических процессов, продуктивнее использовать программы-классификаторы обученные на отсортированной выборке, полученные данные в которой корректно разделены на классы заблаговременно [4, 5].

Непосредственно принцип классификации рассматривается на примере двух классов, а после обобщается. Предположим, класс это одна из двух возможных состояний ротора. В данном случае единственным классифицирующим фактором выступает непосредственно масса ротора, а задача классификации сводится к определению значения фактора к какому-либо из двух множеств, как это сделано на рис. 1.

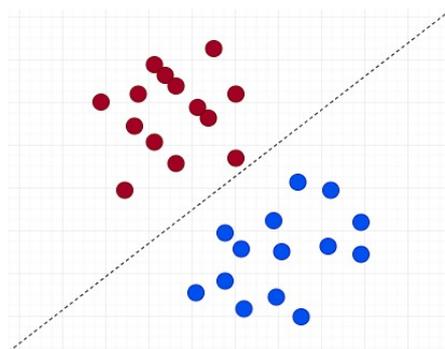


Рис. 1. Линейное разделение двух множеств

Для удобства, в качестве классифицируемых множеств, возьмем дискретные величины, принимающие два значения $Y = \{0;1\}$. Далее задача сводится к аппроксимации этих данных логистической регрессией.

Перед аппроксимацией значения фактора преобразовывается в вид $z = f(u)$ так, чтобы один класс соответствовал отрицательным значениям видоизмененного фактора, а другой – положительным. В качестве аппроксимирующей функции удобно выбрать непрерывную функцию вида [6]:

$$H_{\theta}(u) = (1 + \exp(-z(u)))^{-1}, \quad (1)$$

которая принимает значения в интервале $[0; 1]$. Тогда принадлежность i -го объекта к конкретному классу определяется функцией (1) в соответствии с правилом:

$$\text{«если } H_{\theta}(u_i) \geq 0.5, \text{ то } y_{i_{\text{теор}}} = 1, \text{ иначе } y_{i_{\text{теор}}} = 0\text{»}.$$

Граница классов определяется соотношением $H_{\theta}(u) = 0.5$, что соответствует нулевому значению функции $z(u) = 0$. В общем случае, граница между классами может быть нелинейной, тогда ее можно описывать полиномами различных степеней, например на рис. 2 изображена граница $z(\mathbf{U}) = 0$ в виде полинома третьей степени:

$$z(\mathbf{U}) = \theta_0 + \theta_1 u_1 + \theta_2 u_2 + \theta_3 u_1^2 + \theta_4 u_2^2 + \theta_5 u_1^3 + \theta_6 u_2^3.$$

Последнее выражение, как и полином любой степени, можно преобразовать к линейному виду посредством замены [3]:

$$z(\mathbf{U}) = \theta_j u_j, \quad j = \overline{0, N}, \quad u_0 = 1, \quad (3)$$

вводя новые факторы: $u_3 = u_1^2$, $u_4 = u_2^2$, где N – итоговое количество факторов [7].

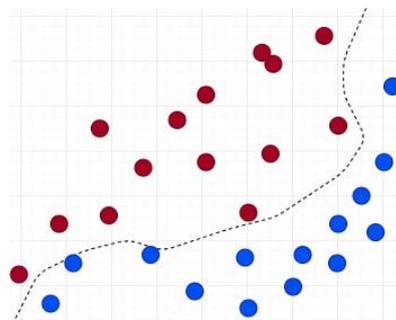


Рис. 2. Нелинейное разделение двух множеств

Для рассматриваемой в данной работе задачи количество классов превышает два, поэтому для классификации была использована нейронная сеть, архитектура которой представлена на рис. 3. Входной слой содержит N_{inp} нейронов, где N_{inp} – количество факторов. В выходном слое сети количество нейронов равно количеству классов, а значения в каждом нейроне соответствуют значению логистической функции типа (1) для каждого элемента выборки объемом Q [8]. Таким образом, на выходе получается матрица размерности $[Q \times N_{out}]$, столбцы которой соответствуют номеру класса, а значения в них (1) соответствуют степени принадлежности этому классу. Другими словами для многоклассовой классификации с помощью нейронной сети как и в случае

с простой логистической регрессией реализуется простой принцип «один против всех» [9]. Скрытый слой представлен N_{hid} нейроном. В качестве функции активации на скрытом слое используется «сигмоида» типа (1), а на выходном слое – логистическая функция типа «softmax» [10].

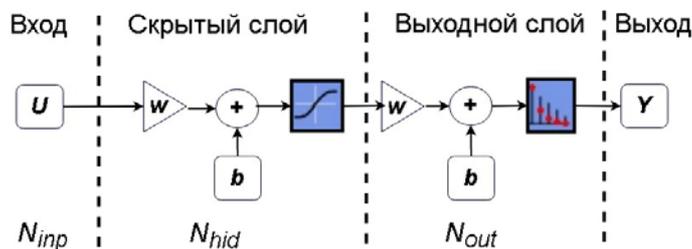


Рис. 3. Структура искусственной нейронной сети

Экспериментальный модуль (см. рис. 4) состоит из роторной установки с двумя опорами жидкостного трения, привода вращения, контура смазки, управляющих элементов и информационно-измерительной системы. В состав роторной установки входят две опоры жидкостного трения, одна из которых представляет собой радиальный гидростатодинамический подшипник с жиклерной подачей смазочного материала, а второй опорой может служить гладкий цилиндрический подшипник с осевым дросселированием смазки. Ротор представляет собой ступенчатый вал с закрепленной втулкой, в которой имеются резьбовые отверстия для крепления элементов с регулируемой величиной дисбаланса. Циркуляционная система смазки и охлаждения включает в себя емкость для хранения масла или другой смазочной жидкости, насос, фильтры, дроссели, краны и трубопроводы, в которых установлены датчики давления и расхода. Привод вращения ротора представляет собой высокооборотный электродвигатель с частотным регулированием и упругой компенсирующей муфтой. В измерительно-информационную систему модуля (см. рис. 3) входят токовихревые преобразователи радиальных перемещений ротора в радиальном зазоре подшипника, датчики давлений и расхода смазочного материала, аналого-цифровые преобразователи, соединенные с системой LabVIEW.



Рис. 4. Фотография установки

Информационно-измерительная система (далее – ИИС) установки была разработана в той же среде программирования, что и нейронная сеть. Основу ИИС составили: модульная плата аналого-цифрового преобразователя National Instruments и первичные преобразователи для измерения виброперемещений, частоты вращения ротора, температуры, давления и расхода жидкости. Вихретоковые преобразователи AE051.00.07 в сочетании с устройством согласования D210A-C.05.05 образуют средство измерения виброперемещений ротора в двух взаимно перпендикулярных направлениях в диапазоне расстояний 0,1...2,1 мм с погрешностью не более 5% после обработки сигнала в устройстве согласования. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой использовалось шасси NI cDAQ 9178 с модулем NI 9205, которое подключается к пользовательскому компьютеру.

Анализ траекторий движения ротора с использование ИИС. В данной работе измерение виброперемещений ротора производилось в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По результатам измерений анализировались траектории, развертки колебаний (рис. 5).

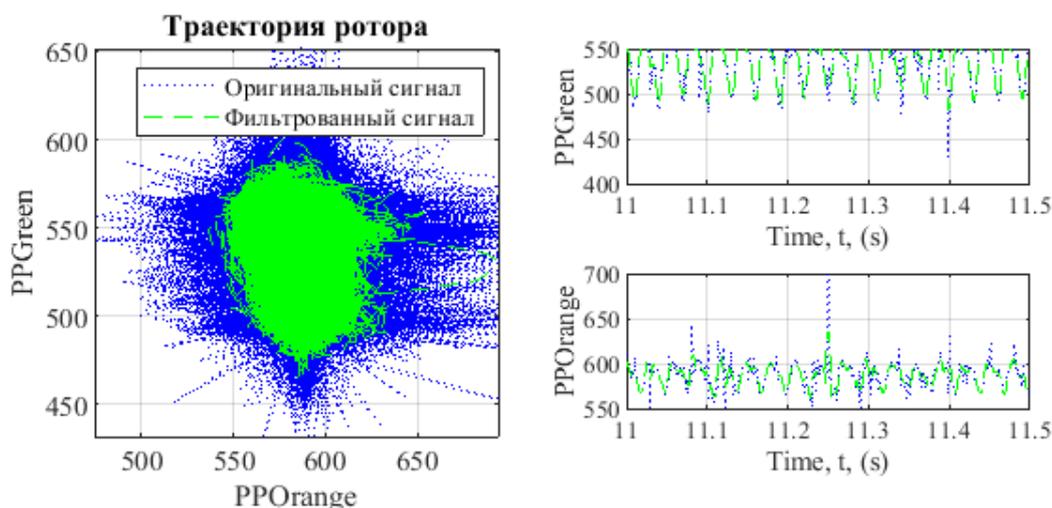


Рис. 5. Фрагмент траектории колебаний (слева), разверток по двум осям (справа)

План эксперимента включал фиксацию стабильного состояния ротора и 2 различных вариантов дисбаланса ротора, путем подвешивания дополнительного груза.

По результатам проведенных экспериментов визуальный анализ траекторий по определению дисбаланса ротора не дал результатов и не позволил выявить закономерностей влияния дополнительного груза ротора на траектории колебаний. Возможно, что анализ осложнен наличием помех, наведенных датчиками друг на друга. Для диагностики состояния роторно-опорной системы посредством решения задачи классификации использовалась нейронная сеть с архитектурой, представленной на рис. 3. Использовалась ИИС прямого распространения с одним скрытым слоем размером N_{hid} , и выходным слоем размером N_{out} с 3 нейронами. Входной слой нейронной сети в виде матрицы-столбца U формировался из следующих данных: выходной сигнал с датчика

давления, выходной сигнал с контура сопротивления смазочного слоя, напряжение на расходомере, напряжение на датчике температуры, выходные сигналы с датчиков перемещений, выходной сигнал нагрузки с частного преобразователя.

На выходе из нейронной сети определялась вероятность каждого из трех возможных типов дисбаланса ротора. В качестве ответа ИНС выбиралось состояние с наибольшей вероятностью. ИНС была спроектирована и обучена на базе пакета программ GNU Octave [11].

Для анализа точности решения задачи классификации была проведена серия вычислительных экспериментов, план и результаты которого представлены в табл. 1. Данные для проведения вычислительного эксперимента случайным образом изымались из данных физического эксперимента по измерению виброперемещений ротора и давления в подшипнике. По плану вычислительного эксперимента варьировалось количество обучающих выборок Q , их размер N_{inp} , а также количество нейронов в скрытом слое N_{hid} . Обучающие выборки разбивались на 3 части: $0,65Q$, $0,10Q$, $0,15Q$, для проведения обучения, валидации и тестирования ИНС соответственно.

1. Результаты вычислительного эксперимента по классификации данных физического эксперимента с помощью ИНС

№	Варьируемые параметры ИНС	Значения параметров (время (с), эксперимента)	Минимальная точность, % Тестирование
1	Объем обучающих выборок Q	9	30,3
		60	76,3
		120	80,3
		360	97,3
2	Количество нейронов в скрытом слое N_{hid}	100	70,3
		300	76,3
		500	97,3
		700	(переобучение)
		800	(переобучение)

Из результатов вычислительного эксперимента видно, что наибольшее влияние на точность оказали объем обучающих выборок, наименьшее количество нейронов в скрытом слое. Таким образом, в результате проведения серии вычислительных экспериментов была достигнута точность 97,3% в решении задачи классификации и диагностики состояния роторно-опорной системы.

Заключение. Искусственный дисбаланс ротора оказывает значимое влияние на состояние механической системы. Это влияние с точностью более 97,3% удалось установить с помощью искусственной нейронной сети после обработки данных измерений. Таким образом, искусственные нейронные сети являются действенным и дос-

тупным средством диагностики состояния роторных систем с подшипниками жидкостного трения. Используемая в данной работе комплектация оборудования не позволяет выявлять и классифицировать другие дефекты роторной системы. Этот вопрос будет исследован в дальнейшем.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта по гранту Президента РФ № 14.Z56.17.1643-МК. Автор выражает благодарность фондам за поддержку.

Список использованных источников

1. **Reddy, M. C. S.** Application of artificial neural networks for identification of unbalance and looseness in rotor bearing systems / M. C. S. Reddy, A. S. Sekhar // International Journal of Applied Science and Engineering. – 2013. – V. 11, Is. 1. – P. 69 – 84.
2. **Li, W.** The experimental study of the expert system for diagnosing unbalances by ANN and acoustic signals / W. Li, Y. P. Tsai, C. L. Chiu // Journal of Sound and Vibration. – 2004. – V. 272. – P. 69 – 83.
3. **Круглова, Т. Н.** Интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, эксплуатируемых в экстремальных условиях / Т. Н. Круглова // Мехатроника, автоматизация, управления. – 2011. – № 3.
4. **Шпрехер, Д. М.** Нейросетевые оптимизационные модели поиска неисправностей электромеханических систем / Шпрехер, Д. М. // Мехатроника, автоматизация, управления. – 2011. – № 3. – С. 5.
5. **Dongare, A. D.** Predictive tool: an artificial neural network / A. D. Dongare, A. D. Kachare // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2012. – V. 2. – P. 209.
6. **Goodfellow, I.** Deep Learning / I. Goodfellow, Yo. Bengio, A. Courville. – MIT Press. – 2016. – 802 p.
7. **Корнаева, Е. П.** Применение искусственных нейронных сетей для мониторинга состояния мехатронного подшипника жидкостного трения в условиях температурно-вязкостного клина / Е. П. Корнаева, А. В. Корнаев, Н. В. Корнаев. (в печати)
8. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Softmax> (дата обращения: 01.07.2018).
9. **Haykin, S.** Neural Network Theory / S. Haykin // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 936 p.
10. **Галушкин, А. И.** Теория нейронных сетей // А. И. Галушкин. – М. : ИПРЖР, 2000. – 107 – 111 с.
11. **GNU Octave.** – URL : [http:// www.gnu.org/software/octave](http://www.gnu.org/software/octave) (дата обращения: 01.08.2019).

УДК 62-529

Казаков Ю. Н.

Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, Россия, г. Орел
(Тел. +79200894719, e-mail: KazakYurii@yandex.ru)

СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ШЕСТИСТЕПЕННОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

Kazakov Yu. N.

Orel State University Named After I. S. Turgenev, Orel, Russia
(Tel. 89200894719, e-mail: KazakYurii@ yandex.ru)

COMPUTER VISION SYSTEM 6-D OF ROBOT

Аннотация. В статье рассматриваются основные принципы в создании систем машинного зрения. Представлены результаты проделанной работы по созданию программного обеспечения для управления системой технического зрения. Представлены возможности искусственных нейронных сетей в распознавании объектов на изображении, а также возможность использовать их в определении характеристик объектов.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, ИНС, системы технического зрения, робототехника, кибернетика, обработка изображений.

Abstract. The article discusses the basic principles in the creation of computer vision systems. The results of the work done on the creation of software for the management of the vision system are presented. The possibilities of artificial neural networks in the recognition of objects in the image, as well as the ability to use them in determining the characteristics of objects.

Keywords: artificial neural networks, ANN, vision systems, robotics, cybernetics, image processing.

Введение. Системы технического зрения являются одним из наиболее популярных и перспективных направлений интеллектуализации. Они нашли широкое применение во многих сферах жизни. Сегодня создание таких систем в основном основывается на разработке искусственных нейронных сетей (ИНС) [1, 2]. На сегодня существуют две противоположные точки зрения на применение искусственных нейронных сетей. ИНС применяются для широкого круга задач: классификация, обработка, сжатие данных, а также прогнозирование и т.д. [3]. Для классификации изображений широкое применение нашли сверточные нейронные сети [4]. Данный тип ИНС представляет из себя многослойную нейронную сеть с разным количеством нейронов в слоях [5]. Распознавание и классификация изображений является одной из приоритетных задач искусственных нейронных сетей. Реализация таких сетей позволяет создавать гибкие системы, направленные на решение задач в условиях неопределенности.

Формирование библиотеки изображений. В ходе исследования было предложено создать программное обеспечение по обнаружению объекта на изображении и опреде-

ление его ориентации в пространстве. В качестве объекта исследования была взята монета.

Для обучения искусственной нейронной сети была сформирована библиотека изображений, количество которых в общей сложности составило 6000 изображений. Использовались черно-белые изображения размером 80×80. Изображения были разделены на 6 классов по 1000 штук. Деление на классы было следующее: изображения на которых была представлена монета целиком, верхняя, нижняя, правая и левая части монеты, а также изображения фона.

В качестве программного обеспечения при создании системы технического зрения использовалась среда MATLAB. Для выполнения разметки изображений применялась команда «imageSet» которая позволяет сформировать структуру для MATLAB через которую можно обратиться к изображениям, находящимся в файлах. Работа с изображениями проводилась при помощи шести циклов по тысячи итераций равных количеству изображений. Для обучения изображения были заранее получены в черно-белом цвете, затем внутри цикла производилось изменение типа данных каждого изображения и преобразование матрицы изображения в строку. Последняя операция необходима для создания выборки изображений, которые будут находиться в массиве в виде строк:

```
im1 = read(image(1,1),i); %Считывание изображения
n1 = size(im1,1); %nxn - размер изображения
im1 = im2double(im1); %Преобразование типа данных
im1 = reshape(im1,1,n1^2); %Преобразование квадратной матрицы
в строку»
```

Так же в цикле формируется матрица классов. Данная матрица представляет из себя 6 столбца и количество строк равное количеству изображений, входящих в выборку. Каждый столбец соответствует определенному классу изображений и несет значения ячеек равные единице, остальные имеют нули.

После получения шести матриц изображений и классов производится их объединение в единые матрицы изображений и классов. Таким образом была получена матрица 6000×64 000 в строках которой находятся изображения и матрица размерностью 6000×6 состоящая из нулей и единиц и определяющая классы. Затем данные матриц рандомизируются для получения матриц смешанных изображений и соответствующих им классов.

Разработка искусственной нейронной сети для классификации изображений. Для реализации ИНС был использован тулбокс «nnstart» пакета программ MATLAB. Структура сети была выбрана для классификации данных. В качестве входных параметров была подана матрица изображений, а в роли классов выступала сформированная ранее матрица классов.

В ходе работы использовались сети с разным количеством нейронов. Было выявлено что при обучении искусственные нейронные сети с большим количеством нейронов обучаются в разы дольше, однако достаточная точность обучения достигается уже при 10 нейронах. В связи с этими факторами рабочая ИНС состояла из 10 нейронов.

В ходе обучения изображения были поделены на три группы: для обучения, проверки и тестовая выборка для проверки уже обученной искусственной нейронной сети. Они были поделены в процентном соотношении 70, 15, 15% соответственно. В результате обучения конечная точность сети достигла 98,9%.

Программа автоматического поиска и выделения фрагментов изображений.

Для определения наличия шахматных фигур на изображениях разного размера, использовался принцип создания плавающей рамки. Искусственная нейронная сеть осуществляет работу с изображениями того же размера и формата что и изображения, используемые при обучении. Так как обучение проводилось на снимках фигур размером 80×80 то и величина рамки должна соответствовать данному размеру.

Рамка перемещается по изображению в горизонтальном направлении с дальнейшим смещением по вертикали. Используются переменные *a* и *b* которые задают размер рамки по высоте и ширине соответственно. Внутри цикла каждый фрагмент изображения преобразуется в отдельную матрицу которая проходит обработку, а затем используется для проведения классификации при помощи ИНС. На выходе получается матрица 1×6 в ячейках которой содержатся вероятности соответствия данного фрагмента тому или иному классу. Все вероятности сохраняются в отдельную матрицу, а также рассчитывается самая высокая вероятность классификации фрагментов и координаты пикселя, определяющего положение рамки на изображении. Данная операция позволяет выделить фрагмент изображения который содержит необходимый для определения класс:

```

«%Проверка фрагмента изображения в нейронной сети
  izobr = I(i:i+a-1,k:k+b-1);
  izobr = im2double(izobr);%преобразование типа данных
  izobr = reshape(izobr,1,n^2);%преобразование квадратной матрицы в строку
  [Ver] = myNeuralNetworkFunction_8_classes_30_ner(izobr);
%Проведение классификации изображения
  matrix_ver = [matrix_ver;Ver];»
    
```

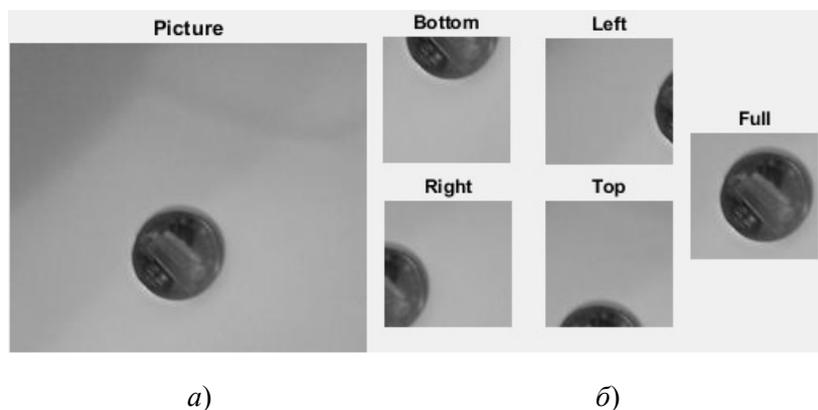


Рис. 1

a – обрабатываемое изображение; *б* – результат обработки

Для проверки результата работы программы были выбраны изображения монеты размером 224×224. На рисунке 1, а представлено одно из проверочных изображений. Результат работы программы при обработке данного входного изображения представлен на рис. 1, б. Видно, что ИНС удалось корректно определить все части монеты, а также найти участок где изображен объект полностью.

Результаты работы, данной ИНС могут быть использованы для определения геометрических характеристик объекта, а также его размеров, габаритов и ориентацию в пространстве.

Заключение. В ходе работы удалось успешно реализовать программу по определению фрагментов фигур и их классификации. Результаты показали, что определение фрагментов объекта исследования является корректным и может быть применено для определения ориентации объекта в пространстве, а также его геометрических характеристик.

Работа подготовлена в рамках выполнения инициативного проекта ОГУ имени И. С. Тургенева «Система компьютерного зрения шестистепенного робота-манипулятора».

Список использованных источников

1. **Круг, П. Г.** Нейронные сети и нейрокомпьютеры : учебное пособие по курсу «Микропроцессоры» / П. Г. Круг. – М. : Издательство МЭИ, 2002. – 176 с.
2. **Оганезов, А. Л.** Применение нейронных сетей в задачах распознавания образов [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / А. Л. Оганезов. – Тбилиси, 2006. – 128 с.
3. **Анализ** эффективности применения искусственных нейронных сетей для решения задач распознавания, сжатия и прогнозирования [Текст] / А. А. Талалаев, И. П. Тищенко, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 2.
4. **Друки, А. А.** Применение сверточных нейронных сетей для выделения и распознавания автомобильных номерных знаков на изображениях со сложным фоном [Текст] / А. А. Друки // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 5.
5. **Солдатова, О. П.** Применение сверточной нейронной сети для распознавания рукописных цифр [Текст] / О. П. Солдатова, А. А. Гаршина // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2.

УДК 004.946

Захарова Т. Ю., Прокудина Н. Н., Дедов Д. Л., Печатнова Е. С.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +79156711255, e-mail: zaharovatany110401@gmail.com)

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИГРОВОГО ДВИЖКА UNITY С ДРУГИМ ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ

Zakharova T. Yu., Prokudina N. N., Dedov D. L., Pechatnova E. S.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. +79156711255, e-mail: zaharovatany110401@gmail.com)

ORGANIZING THE NETWORK INTERACTION OF THE UNITY GAME ENGINE WITH ANOTHER SOFTWARE

Аннотация. В статье описываются способы организации сетевого взаимодействия игрового движка Unity с внешними устройствами и сторонним программным обеспечением, отмечены особенности каждого вида соединения.

Ключевые слова: Unity, сетевой протокол, программные обеспечения, UNET, UDP, TCP.

Abstract. The article describes how to organize the network interaction of the Unity game engine with external devices and third-party software, notes the features of each type of connection.

Keywords: Unity, network protocol, software, UNET, UDP, TCP.

В век инновационных технологий активно применяется различные программные обеспечения, которые в дальнейшем используются в различных областях человеческой деятельности, также применяется для обучения как школьников, так и студентов. Для обучения могут использоваться симуляторы и различные тренажеры [1 – 3], в которых есть объекты, позволяющие реализовать взаимодействие между человеком и виртуальным пространством [4, 5]. На современном движке Unity создаются приложения не только для компьютеров, но и для мобильных устройств (например, на базе Android, Apple iOS), а также для игровых приставок. Это инструмент для разработки двух- и трехмерных приложений и игр, работающих на операционных устройствах Windows, Linux и OS X [8].

Одним из важных вопросов при разработке приложений на Unity является организация взаимодействия приложения со сторонним программным обеспечением и внешними системами [7]. Для этого требуется использование различных сетевых технологий, которые будут рассмотрены в рамках данной работы [6].

Одним из способов организации связи является сетевая технология UNET. В логическом плане низкоуровневая библиотека UNET – это набор сетевых протоколов, построенных поверх UDP и включающих в себя «сетевой» слой и «транспортный» слой. Сетевой слой используется для соединения между узлами, доставки пакетов и контроля

над возможными утечками и заторами. Транспортный слой работает с «сообщениями», принадлежащими различным каналам связи. У каналов есть два назначения, они могут разделять сообщения логически и обеспечивать различные гарантии доставки и качество обслуживания [6].

UNET поддерживает следующие способы доставки [8]:

- **Unreliable (Негарантированный)**: негарантированное сообщение может быть потеряно по разным причинам, связанных с UDP. Пример использования: короткие лог сообщения.

- **Unreliable Fragmented (Негарантированный Фрагментный)**: максимальная длина пакета ограничена. Такой способ доставки будет разбивать большое сообщение на мелкие части при отправке, и собирать обратно при получении. Так как способ не гарантирует доставку, то сообщение может быть потеряно. Пример использования: длинный лог файл.

- **Unreliable Sequenced (Негарантированный Упорядоченный)**: канал гарантирует порядок сообщений, хотя сообщения могут быть потеряны. Пример использования: голос, видео.

- **Reliable (Гарантированный)**: канал гарантирует доставку сообщения (или отключение), но не гарантирует порядок. Пример использования: объем воздействия на объект.

- **Reliable Fragmented (Гарантированный Фрагментный)**: аналог Unreliable Fragmented, но гарантирует доставку. Пример использования: передача данных.

- **Reliable Sequenced**: аналог Unreliable Sequenced, но гарантирует доставку сообщения (аналогично TCP потоку). Пример использования: передача файлов.

- **State Update (Обновление Состояния)**: аналог Unreliable Sequenced, только отбрасывает старые сообщения при отправке/получении. Если отправляются сообщения из канала, то только последнее будет отправлено, остальные отбрасываются. При получении сообщений из канала, также только последнее будет прочитано, остальные игнорируются. Пример использования: отправка позиции.

- **All Cost Delivery (Доставка Любой Ценой)**: схожий с Reliable способ. Reliable канал перешлет недоставленное сообщение основываясь на значении RTT, которое является динамический. В отличие от него All Cost Delivery автоматически перешлет сообщение после определенного промежутка времени, который можно настроить. Это может быть полезно для коротких важных сообщений. Пример использования: создание событий в сцене.

При реализации сетевого взаимодействия приложения Unity с другим программным обеспечением часто требуется создание сетевого сервера. Для этого необходимо вызвать метод `Network.Initialize Server()` в программном коде. Если необходимо присоединиться к уже существующему серверу как клиент, используется метод `Network.Connect()`.

`Network View` (просмотр сети) – это компонент, который отправляет данные через сеть. Компонент `Network View` дает объектам `Game Object` возможность отправлять данные, используя удаленный вызов процедур `RPC` или синхронизацию состояний `State Synchronization`.

Протокол сетевого уровня использует UDP, который можно использовать для надежной отправки упорядоченных пакетов, подобно тому, как это делает TCP. Чтобы это сделать, Unity внутренне использует протокольные сообщения ACK и NACK, чтобы контролировать передачу пакетов, гарантируя тем самым, что ни один пакет не потеряется. У такого использования надежно упорядоченных пакетов есть и обратная сторона: если пакет потеряется или задерживается, все остановится до тех пор, пока этот пакет не придет целиком. Это может вызывать запаздывание передач, если сеть работает со значительными задержками (лагами) [6].

Ненадежные передачи данных можно использовать в тех случаях, когда точно известно, что данные хоть как будут меняться каждый кадр. Например, в игровых проектах, виртуальных тренажерах данные обрабатываются каждый кадр, так что эффекты от потери пакета вскоре будут исправлены следующим пришедшим пакетом.

Благодаря мульти-платформенному подходу к разработке приложений, сетевой код, написанный в Unity, будет полностью совместим с сетевыми соединениями для настольных устройств, платформ iOS/Android. Однако, может потребоваться адаптации приложения для работы с Wi-Fi или сотовой сетью. В последнем случае сервер должен иметь публичный IP адрес (доступным через интернет).

Изложенные подходы использовались для организации взаимодействия Unity с программой на Python для управления беговой дорожкой, что позволило синхронизировать положение пользователя на дорожке с движением камеры в виртуальной сцене. Для организации этой связи использовался UDP протокол [6 – 8].

Пример такого взаимодействия представлен на рис. 1.

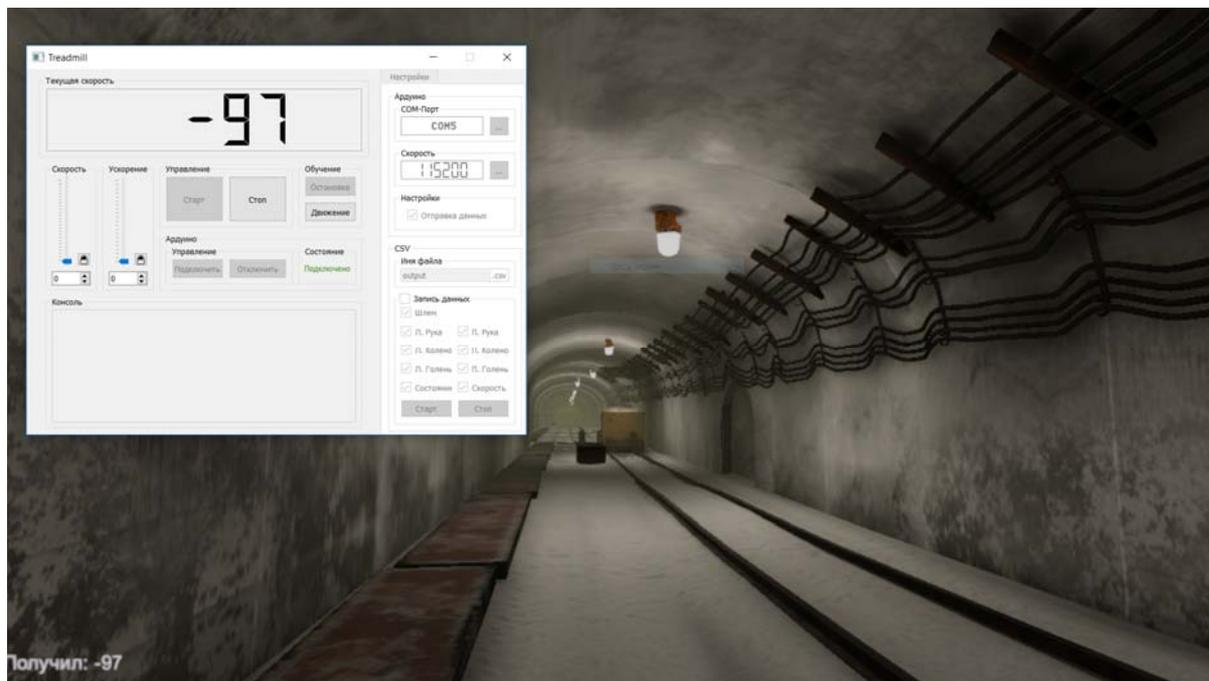


Рис. 1. Скорость дорожки, определяемая в программе на Python, передается в сцену Unity

Таким образом, встроенные в Unity способы работы с сетями поддерживают создание серверов, подключение клиентов, обмен данными между подключенными клиентами, определение какой игрок управляет какими объектами, а также доступ через различные конфигурации сети. Перечисленные инструменты позволяют приложениям на Unity взаимодействовать с любым программным обеспечением на различных языках программирования независимо от используемой операционной системы.

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение» в рамках гранта РФФИ № 19-07-00660.

Список использованных источников

1. **Математическая** модель процесса обучения в адаптивных тренажерных комплексах для эргатических систем профессионального назначения / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Информатизация образования и науки. – 2018. – № 4(40). – С. 81 – 93.
2. **Development** of a virtual training complex for training personnel of industrial enterprises in the rules of operation of insulating breathing apparatus / A. Obukhov, M. Krasnyanskiy, S. Alekseev et al. // Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2019. – V. 1.3. – P. 225 – 232.
3. **Системный** анализ и формализация структуры адаптивных тренажерных комплексов эргатических систем / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 4. – С. 45 – 52.
4. **Optimization** of the learning process on adaptive training complexes / S. Karpushkin, M. Krasnyanskiy, D. Dedov et al. // Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2019. – V. 5.4. – P. 229 – 236.
5. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – V. 327. № 2. – P. 022075.
6. **Сетевой** протокол передачи данных в Unity [Электронный ресурс]. – URL : <https://devby.ru/afrokick/2015/04/01/podrobnee-o-setevom-protokole-peredachi-dannyh-v-unity3d.html> (дата обращения: 16.09.2019).
7. **Обухов А. Д.** Математическая модель обработки информации в системе управления электронным документооборотом / А. Д. Обухов, М. Н. Краснянский, И. Л. Коробова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – № 3. – С. 382 – 399.
8. **Unity** [Электронный ресурс]. – URL : // <https://unity.com/ru> (дата обращения: 16.09.2019).

УДК 004.946

Прокудина Н. Н., Печатнова Е. С., Дедов Д. Л., Захарова Т. Ю.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +79606614944, e-mail: saltantem@yandex.ru)

СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ЧАСТИЦ В UNITY

Prokudina N. N., Pechatnova E. S., Dedov D. L., Zakharova T. Yu.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. +79606614944, e-mail: saltantem@yandex.ru)

COMPARISON OF APPROACHES TO PARTICLE SYSTEMS IN UNITY

Аннотация. В статье рассматриваются различные подходы к реализации систем частиц, применяемые в межплатформенной среде разработки Unity, их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: среда разработки, система частиц, Unity, Particle System, Visual Effect Graph, виртуальная реальность.

Abstract. The article discusses various approaches to the implementation of particle systems used in the cross-platform development environment Unity, their advantages and disadvantages.

Keywords: development environment, particle system, Particle System, Visual Effect Graph, virtual reality.

Строительство, дизайн, тренажеры и симуляторы, маркетинг, военные и космические технологии, проектирование, индустрия развлечений – во всех этих областях в настоящее время широко применяются технологии виртуальной реальности [1 – 6]. Однако для создания виртуальных пространств требуется определенное техническое оборудование: мощное вычислительное оборудование, шлем или очки виртуальной реальности, а также проектирование и создание различных компьютерных макетов и сцен [4]. Реалистичность и функциональность виртуальной реальности обеспечивается инструментами выбранной среды разработки [2].

Сегодня популярным средством разработки виртуальных сцен является Unity [3, 7, 8]. Одним из ключевых факторов, влияющих на качество виртуальной сцены, выступает такой компонент, как система частиц. Частицы – это небольшие изображения или сетки, которые отображаются и перемещаются в большом количестве, управляемые системой частиц.

В данной статье проводится сравнение систем частиц Particle System и Visual Effect Graph на примере симуляции дыма при пожаре [3].

В качестве первого примера рассмотрим облако дыма, созданное с помощью Particle System (рис. 1) [8]. Дым от огня обычно движется вверх, расширяется и в конце рассеивается, поэтому применим восходящую силу к частицам дыма, увеличим их в размере и изменим уровень их прозрачности с течением времени жизни системы.

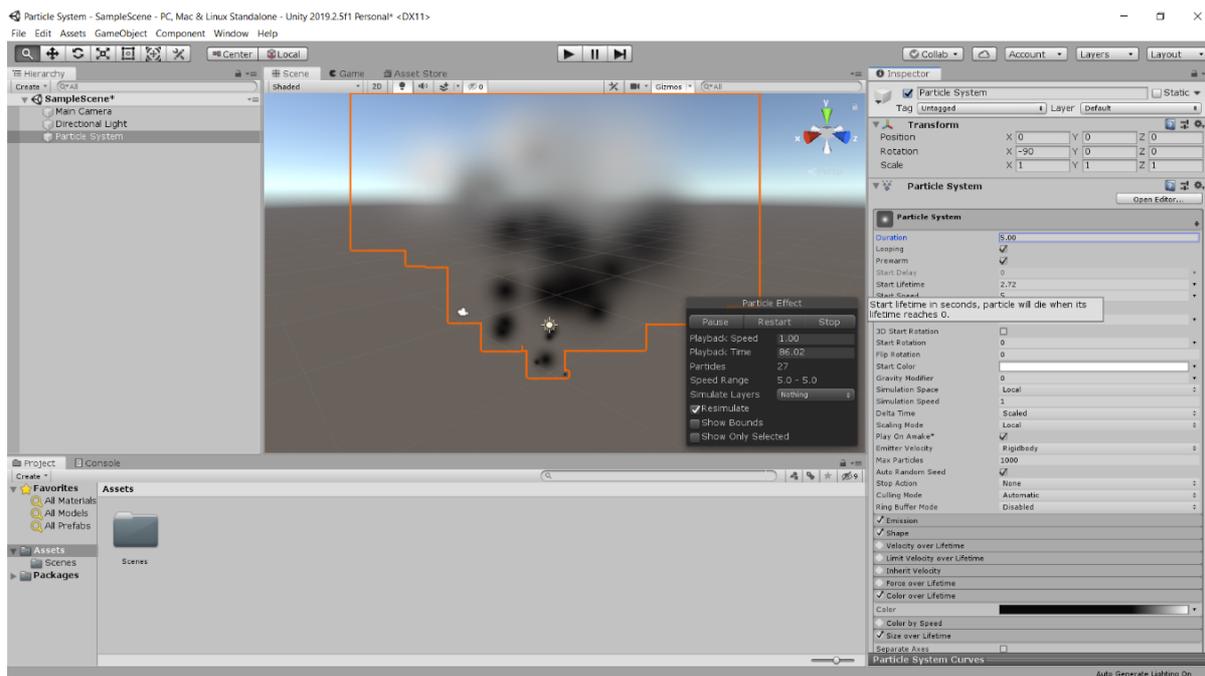


Рис. 1. Облако дыма на основе Particle System

Каждая частица имеет текстуру дыма в виде облака. Система создает частицы в случайных точках пространства, ограниченного регионом в форме конуса. Все параметры конуса настраиваются вручную.

Частица начинает существование, когда она создана своей системой частиц. Частица отображается до тех пор, пока не закончится время ее жизни, затем она удаляется из системы.

Каждая частица имеет вектор скорости, определяющий направление и расстояние, которое проходит частица за один кадр. Скорость может быть изменена с помощью сил и гравитации, применяемых самой системой, или когда на частицы воздействуют воздушные потоки. Также у каждой частицы настраиваются ее параметры взаимодействия с окружающей средой, что помогает избежать проникновения сквозь элементы локации и добавляет реалистичности при наблюдении за ее поведением в сцене. Эта функция может быть полезна для отработки механизма столкновений частиц с объектами.

Далее рассмотрим систему частиц Visual Effect Graph (рис. 2) [7]. Узловая архитектура (для графического представления параметров системы) и адаптивные функции (единообразный подход к созданию систем частиц различной сложности и структуры) дают возможность создавать красивые визуальные эффекты в реальном времени.

Visual Effect Graph функционирует на основе графовых структур – узлов, которые определяют применяемые к системе частиц эффекты. Узлы соединяются вместе для выполнения серии вычислений, которые вводятся в блоки, которые в свою очередь определяют свойства частиц.

Дадим основные определения.

Контексты – совокупность блоков, представляющая собой порядок операций, применяемых к частицам.

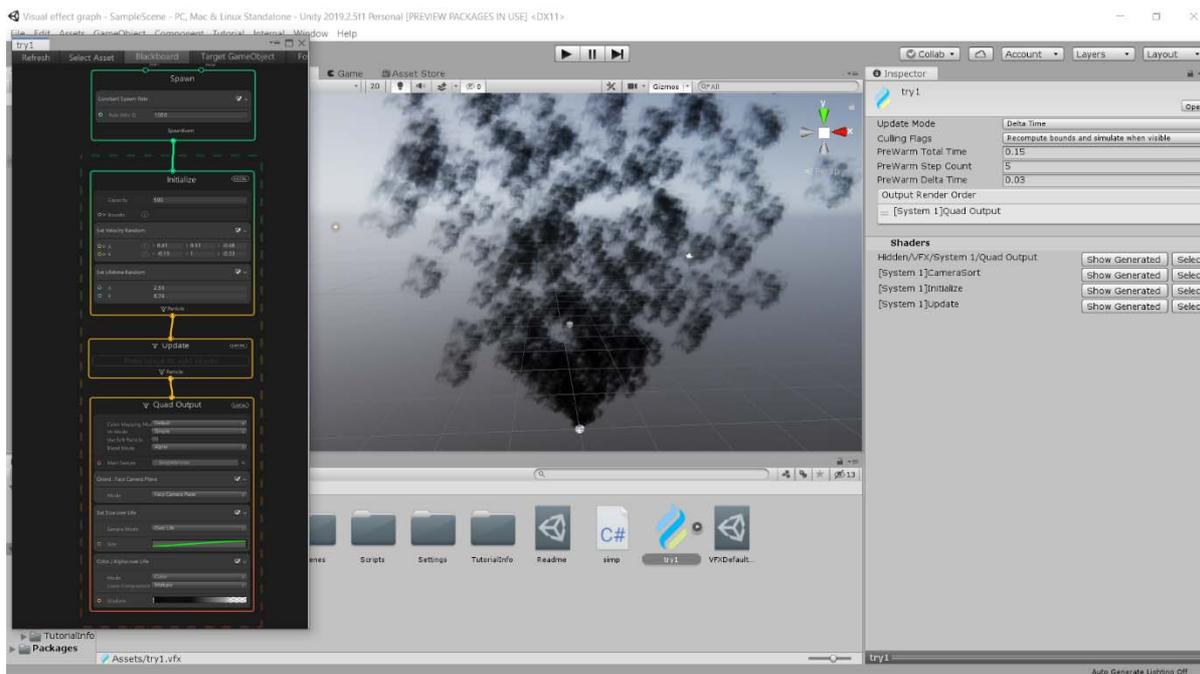


Рис. 2. Облако дыма созданное в Visual Effect Graph

Системы – это коллекция контекстов инициализации, обновления и вывода. В одной системе частиц может существовать несколько систем.

Spawn – контекст, который определяет сколько частиц будет порождено и с какой синхронизацией (например, периодический взрыв, константа, одиночный взрыв).

Следующий контекст **Инициализация**. Он состоит из блоков Capacity и Bounds: **Capacity** определяет, сколько частиц из этой системы может существовать одновременно. Этот блок выделяет соответствующий объем памяти для количества частиц, и поэтому это число должно соответствовать количеству, которое может быть создано.

Bounds определяют область, которая имитирует частицу, если она видна камерой.

Update изменяет свойства частиц с течением времени и является единственным контекстом, который позволяет вам использовать силы. Здесь возможно применить столкновение, поле с подписанным расстоянием или векторное поле.

Output визуализируют частицу, определяя, какой тип частицы порождается, ее текстуру, цвет и ориентацию. Окончательные корректировки могут быть внесены в размер частицы, положение и т.д. Каждая система может иметь несколько выходов, и каждый выход может регулировать большинство атрибутов частиц.

Таким образом, Visual Effect Graph имеет преимущество в моделировании миллионов частиц, может вычислять сложные моделирования и считывать буферы кадров, перемещает многие расчеты для вычисления шейдеров, которые работают на GPU. С другой стороны, Particle System может использовать базовую физическую систему и может быть прочитана для взаимодействия с игровым процессом, но она моделируется на процессоре [7, 8].

Работа выполнена на базе центра коллективного пользования «Цифровое машиностроение» в рамках гранта РФФИ № 19-013-00567.

Список использованных источников

1. **Revolution** mapping with bump mapping support / A. Ragragui, A. O. Chahdi, A. Halli, K. Satori // Graphical Models. – 2018. – № 100. – P. 1 – 11.
2. **Математическая** модель процесса обучения в адаптивных тренажерных комплексах для эргатических систем профессионального назначения / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Информатизация образования и науки. – 2018. – № 4(40). – С. 81 – 93.
3. **Development** of a virtual training complex for training personnel of industrial enterprises in the rules of operation of insulating breathing apparatus / A. Obukhov, M. Krasnyanskiy, S. Alekseev et al. // Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2019. – V. 1.3. – P. 225 – 232.
4. **Системный** анализ и формализация структуры адаптивных тренажерных комплексов эргатических систем / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 4. – С. 45 – 52.
5. **Optimization** of the learning process on adaptive training complexes / S. Karpushkin, M. Krasnyanskiy, D. Dedov et al. // Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2019. – V. 5.4. – P. 229 – 236.
6. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – V. 327. № 2. – P. 022075.
7. **Unity** [Электронный ресурс] : Unity Documentation. – URL : <https://docs.unity3d.com/ru/530/Manual/PartSysReference.html>
8. **Unity** [Электронный ресурс] : Unity Blog. – URL : <https://blogs.unity3d.com/2018/11/27/creating-explosive-visuals-with-the-visual-effect-graph/>

УДК 004.946

Печатнова Е. С., Захарова Т. Ю., Прокудина Н. Н., Дедов Д. Л.
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. +79537022878, e-mail: serpet33@yandex.ru)

ВЫБОР СПОСОБОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДОЙ В UNITY С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ

Pechatnova E. S., Zakharova T. Yu., Prokudina N. N., Dedov D. L.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Тел. +79537022878, e-mail: serpet33@yandex.ru)

SELECTION OF WAYS OF INTERACTION WITH THE VIRTUAL ENVIRONMENT IN UNITY FROM THE POINT OF VIEW OF QUALITY OF LEARNING

Аннотация. В статье исследованы различные способы взаимодействия с виртуальной реальностью в движке Unity и рассмотрены их плюсы и минусы с точки зрения качества обучения практическим навыкам.

Ключевые слова: виртуальная реальность, контроллеры, клавиатура, мышь, качество обучения.

Abstract. The article explores various ways of interacting with virtual reality in the Unity engine and considers their pros and cons in terms of the quality of teaching practical skills.

Keywords: virtual reality, controllers, keyboard, mouse, quality of training.

Виртуальная реальность сейчас применяется во многих сферах человеческой деятельности: образовании, дизайне, медицине, военном деле, строительстве, индустрии развлечений, обучении летчиков и космонавтов. Однако для ее использования требуется специальное техническое оборудование: шлем или очки виртуальной реальности, подготовленные помещения, контроллеры и т.д.

В данной статье рассматриваются способы взаимодействия с виртуальной реальностью на примере процесса получения практических навыков в ходе обучения на тренажерных комплексах [1, 4]. В качестве основной среды разработки выбрана Unity, как один из популярных инструментов для реализации виртуальных сцен в игровых и обучающих проектах [3].

Unity поддерживает ввод с клавиатуры, контроллера движений, джойстика и перчаток. Виртуальные оси и кнопки могут быть созданы в Input Manager, и конечные пользователи смогут настраивать ввод с клавиатуры на экране конфигурационного диалогового окна.

Классическим способом взаимодействовать с виртуальными объектами является использование клавиатуры и мыши [2]. Из программного кода виртуальные оси дос-

тупны по именам. Каждый проект при создании содержит следующие оси ввода по умолчанию:

- Horizontal и Vertical привязаны к w, a, s, d и клавишам направления;
- Fire1, Fire2, Fire3 привязаны к клавишам Control, Alt и Command соответственно;
- Mouse X и Mouse Y привязаны к перемещениям мыши;
- Window Shake X и Window Shake Y привязаны к перемещению окна.

Однако стоит отметить, что этот способ взаимодействия устарел. Главная проблема использования клавиатуры и мыши в обучении – недостаток тактильных ощущений. VR применяется при повышении квалификации персонала и отработке последовательности действий в опасных и чрезвычайных ситуациях. Разработчики видят большие перспективы в обучении с помощью виртуальной реальности, ведь иногда сотрудники компаний невнимательно изучают инструкции, к примеру, по пожарной безопасности, из-за неумения видеть связь между своими действиями и возникновением опасной ситуации. Несоблюдение правил и норм приводит к поломке оборудования, травмам и человеческим жертвам. Другие контроллеры способны решить эту проблему. Например, перчатки для трекинга (рис. 1).



Рис. 1. Перчатки для трекинга рук

Человек в VR-очках, надевший перчатки, может как рассмотреть, так и потрогать виртуальные предметы. Для взаимодействия с 3D объектами «внутри» сцены важно «видеть свои руки», так намного комфортнее и легче освоиться в виртуальной реальности. С помощью перчаток и VR очков обеспечивается полноценное погружение в процесс обучения и появляется возможность для достижения лучших результатов. Хотя большинство из перчаток пока еще находятся в начальной стадии разработки и далеки до готового универсального продукта, их перспективность и эффективность в ряде сценариев уже отмечена в ряде исследований [3, 5].

Вторым оборудованием, обеспечивающим взаимодействие с виртуальной реальностью и, как следствие, повышение качества обучения, являются контроллеры движений (motion controller), которые идут в комплекте с VR шлемами. Это альтернатива перчаткам для взаимодействия с предметами в VR. Возможностей данных устройств хватает, чтобы удовлетворить множество потребностей в сфере систем управления (рис. 2) [6].



Рис. 2. Контроллеры движений

Устройство работает так: человек надевает шлем VR, берет в руки контроллеры и переходит в иммерсивную среду. Особенность этих устройств состоит в том, что современные модели оборудованы трекингом пальцев и 87 сенсорами, которые позволяют точно отследить положение каждого пальца и силу сжатия. Ранее отслеживание точного положения каждого пальца в VR было невозможно.

Среда разработки Unity поддерживает все из рассмотренных способов взаимодействия с виртуальной реальностью [7]. При реализации тренажерных систем, основанных на виртуальной реальности, было замечено, что различные способы взаимодействия с ней дают непохожие результаты по качеству обучения.

Для пультовых тренажеров, реализованных в виде двухмерных или трехмерных моделей, хорошо подходят классические способы взаимодействия в виде клавиатуры и мыши, так как они позволяют сосредоточиться на процессе управления пультом, обеспечивают большую точность позиционирования и, в целом, более привычны среднестатистическому пользователю. Аналогично с джойстиком, которые обеспечивают оптимальный уровень контроля для различных симуляторов (авиа, космических и т.д.).

Для трехмерных простейших тренажеров и виртуальных сцен (например, интерактивных экскурсий, представлений интерьеров, простых игр и т.д.) достаточно контроллеров движений, позволяющих перемещаться по сцене и взаимодействовать с объектами.

Однако, когда от обучаемого требуется наибольшая точность действий, сложные жесты, взаимодействие с мелкими предметами и т.д., наилучшее качество взаимодействия с виртуальной реальностью показывают VR перчатки.

Если сравнивать VR очки и обычные мониторы, то для пультовых двумерных тренажеров предпочтительнее использование обычных мониторов, так как это снижает нагрузку на зрение, обеспечивает высокую четкость изображения. Для трехмерных тренажеров эффект погружения, обеспечиваемый VR очками, имеет большее значение, несмотря на меньшее разрешение экранов, используемых в них (что влечет некоторую зернистость изображения) [7].

Таким образом, проанализированы различные подходы к взаимодействию с виртуальной средой в Unity. Их выбор не является тривиальной задачей, так как многое зависит от типа тренажера и поставленными перед задачами.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 19-013-00567.

Список использованных источников

1. **Математическая** модель процесса обучения в адаптивных тренажерных комплексах для эргатических систем профессионального назначения / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Информатизация образования и науки. – 2018. – № 4(40). – С. 81 – 93.
2. **Обухов, А. Д.** Математическая модель обработки информации в системе управления электронным документооборотом / А. Д. Обухов, М. Н. Краснянский, И. Л. Коробова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – № 3. – С. 382 – 399.
3. **Системный** анализ и формализация структуры адаптивных тренажерных комплексов эргатических систем / М. Н. Краснянский, Д. Л. Дедов, А. Д. Обухов, С. Ю. Алексеев // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 4. – С. 45 – 52.
4. **Optimization** of the learning process on adaptive training complexes / S. Karpushkin, M. Krasnyanskiy, D. Dedov et al. // Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference. – 2019. – V. 5.4. – P. 229 – 236.
5. **Vaughan, N.** An overview of self-adaptive technologies within virtual reality training / N. Vaughan, B. Gabrys, V. N. Dubey // Computer Science Review. – 2016. – V. 22. – P. 65 – 87.
6. **Obukhov, A. D.** Development of structural model of adaptive training complex in ergatic systems for professional use / A. D. Obukhov, D. L. Dedov, A. E. Arkhipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – V. 327, № 2. – P. 022075.
7. **Unity** [Электронный ресурс] : Unity Documentation // URL : <https://docs.unity3d.com/ru/530/Manual/PartSysReference.html>

УДК 004.925

Тимохин П. Ю., Мальцев А. В.

ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук», Россия, г. Москва
(Тел. (499)1247974, e-mail: webpismo@yahoo.de)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА GPU ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕНЕЙ ОТ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА В КОСМИЧЕСКИХ ВИДЕОТРЕНАЖЕРАХ

Timokhin P. Yu., Maltsev A. V.

Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis
of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Moscow
(Tel. (499)1247974, e-mail: webpismo@yahoo.de)

MODELING ON THE GPU THE DYNAMIC SHADOWS FROM CLOUD COVER FOR SPACE SIMULATORS

Аннотация. В статье рассматривается задача моделирования в масштабе реального времени динамических теней от облачного покрова Земли. Предложена эффективная технология каскадных карт альфа-теней, которая позволяет визуализировать в реальном времени реалистичные тени от облачного покрова, моделируемого на основе полупрозрачной сверхбольшой текстуры, в сложных космических виртуальных сценах. Технология включает в себя этап разбиения пирамиды видимости разделяющими плоскостями, этап построения каскадных карт альфа-теней и этап применения таких карт для синтеза теней. В работе созданы методы и алгоритмы, реализующие распараллеливание построения и применения карт альфа-теней на современных многоядерных графических процессорах (GPU) с помощью созданных фрагментных шейдеров. На основе предложенного решения были разработаны программные модули и успешно апробированы в системе визуализации, предназначенной для космических видеотренажеров. Полученные результаты могут быть также использованы при создании систем виртуального окружения, информационно-образовательных систем и др.

Ключевые слова: визуализация, облачный покров, карты теней, реальное время, GPU.

Abstract. The paper deals with the task of real-time modeling of dynamic shadows from the Earth's cloud cover. An effective technology of cascaded alpha-shadow maps is proposed, which allows realistic shadows from cloud cover based on semitransparent extra-large texture to be visualized in real-time in complex space virtual scenes. The technology includes the stage of parallel-splitting of view frustum, the stage of constructing of cascaded alpha-shadow maps, and the stage of applying these maps to synthesize shadows. In the work the methods and algorithms, implementing the parallelization of constructing and applying cascaded alpha-shadow maps on modern multi-core graphics processors (GPU) using developed fragment shaders, are created. Based on the solution proposed, program modules were developed, and successfully tested in a visualization system designed for space video simulators. The obtained results can also be used at developing of virtual environment systems, information and educational systems, etc.

Keywords: visualization, cloud cover, shadow maps, real-time, GPU.

Введение. Одной из важных задач современных космических видеотренажеров является повышение реалистичности моделируемой светотеневой обстановки Земли, наблюдаемой с орбиты Международной космической станции (МКС). В частности, это задача визуализации динамических теней от облачного покрова в масштабе реального времени (с частотой синтеза изображений не менее 25 раз в секунду). Такие тени могут простираются на сотни километров [1] и добавляют в видеоизображения Земли высококонтрастные детали, что помогает космонавту осуществлять визуальный контроль построения ориентации корабля в условиях помех и искажений телесигнала.

Ввиду строгого ограничения на время формирования изображений, окружающую обстановку в космических видеотренажерах целесообразно моделировать с помощью трехмерных полигональных сцен, для обработки которых на современных видеокартах реализована мощная аппаратно-программная поддержка. В таких сценах подвижный облачный покров Земли можно эффективно смоделировать с помощью медленного вращения полигональной сферической оболочки с полупрозрачной сверхбольшой текстурой облаков (с разрешением от 250 м/пиксел и выше [2]), созданной на основе детальных спутниковых снимков. Пример такой текстуры изображен на рис. 1.

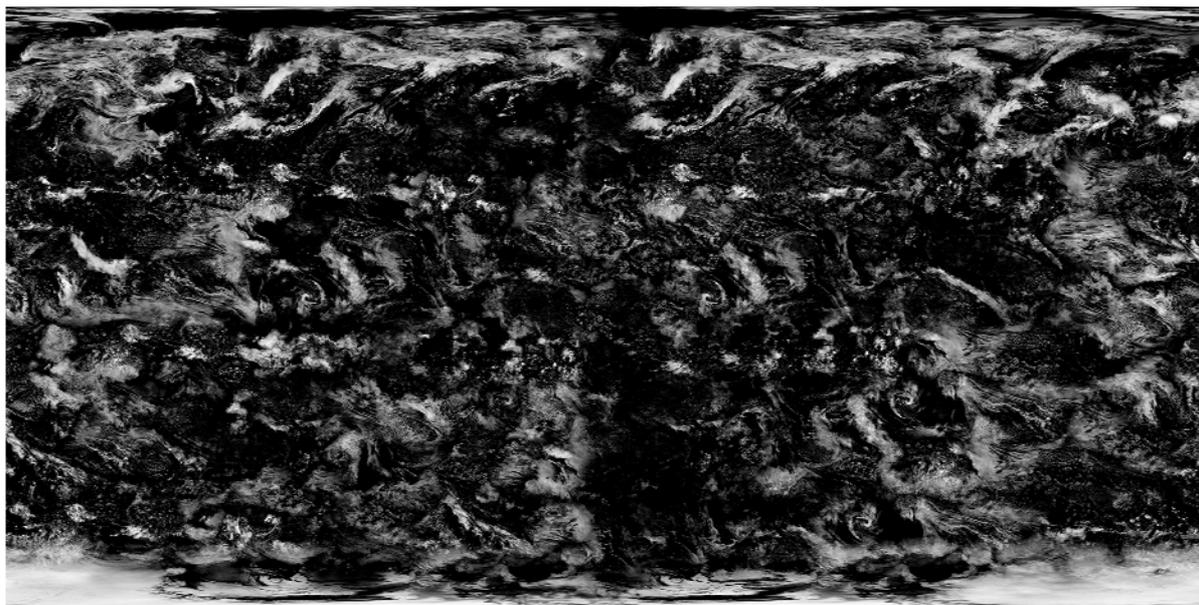


Рис. 1. Полупрозрачная сверхбольшая текстура облачного покрова Земли

Для моделирования теней в трехмерных виртуальных сценах в настоящее время применяются методы и подходы, основанные на использовании различных типов теневых карт: планарных, параболических и каскадных [3]. Каждый из этих методов эффективен для своей области применения, которая зависит от размеров виртуального пространства и типа источника света. В случае протяженного облачного покрова Земли и направленного источника освещения (Солнца) для качественного моделирования теней в реальном времени наиболее подходит метод каскадных теневых карт [4]. Однако, классическая реализация данного метода учитывает только полигональную геометрию

объектов, что не позволяет получать тени от объектов, геометрические свойства которых записаны в текстуру (как это в случае с облачным покровом). В данной работе предлагаются эффективные технология, методы и алгоритмы решения этой задачи с помощью каскадных карт альфа-теней, основанные на распараллеливании графических расчетов на GPU с помощью фрагментных шейдерных программ.

Технология моделирования теней с помощью каскадных карт альфа-теней.

Пусть имеется виртуальная сцена, включающая в себя текстурированные полигональные модели земной поверхности (ЗП) и облачного покрова (ОП), а также направленный источник освещения, имитирующий Солнце (рис. 2). На высоте, соответствующей орбите МКС, расположена виртуальная камера (наблюдатель), направленная на модель Земли. Рассмотрим задачу моделирования теней от облачного покрова на видимом наблюдателем участке модели Земли. Предлагаемая технология решения этой задачи включает в себя следующие три этапа.

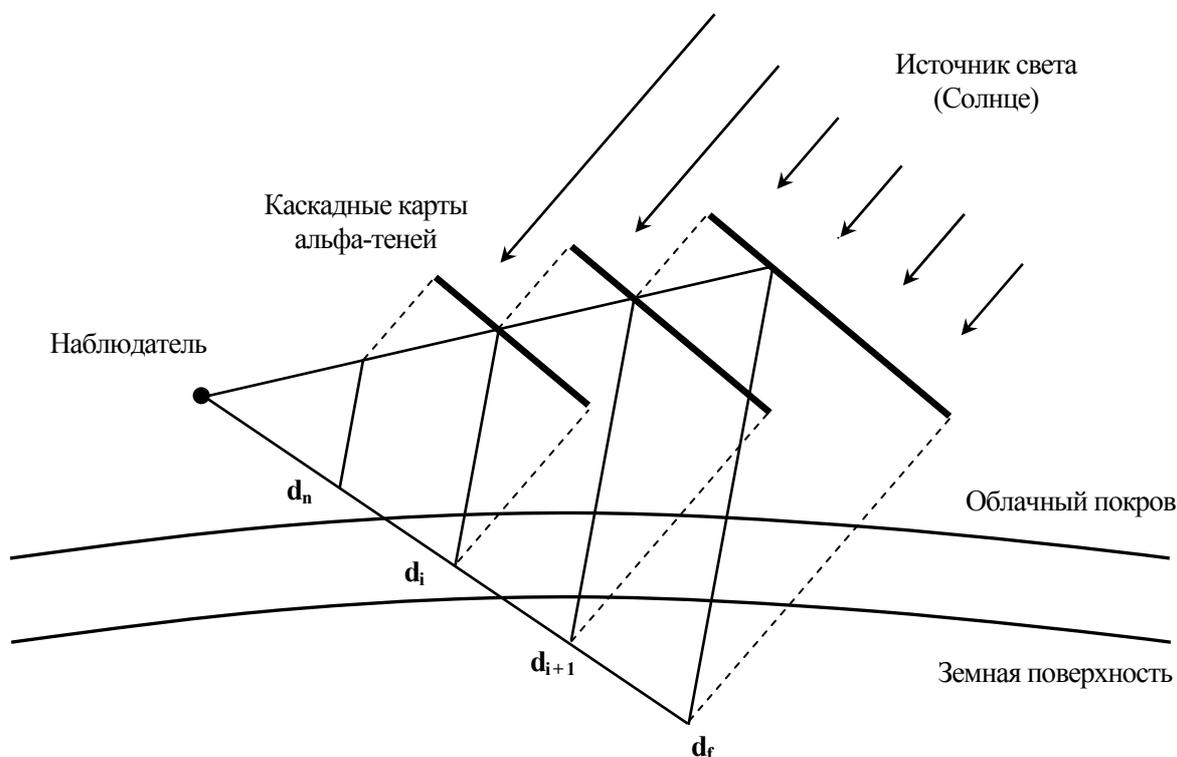


Рис. 2. Каскадные карты альфа-теней облачного покрова

На *первом этапе* пирамида видимости виртуальной камеры разбивается плоскостями, параллельными ближней и дальней плоскостям отсечения, на N усеченных пирамид (см. рис. 2). Расстояние d_i от позиции наблюдателя до i -й разделяющей плоскости вычисляется в видовой системе координат наблюдателя (View Coordinate System, VCS) согласно формуле смешанного разбиения [3]:

$$d_i = \lambda d_n (d_f / d_n)^{i/N} + (1 - \lambda)(d_n + (i / N)(d_f - d_n)), \tag{1}$$

где d_n и d_f – расстояния до ближней и дальней отсекающих плоскостей, $i \in [0, N]$, а $\lambda \in (0, 1)$ – весовой коэффициент, подбираемый опытным путем. Результатом данного этапа является массив D расстояний d_0, \dots, d_N .

На *втором этапе* для каждой полученной усеченной пирамиды выполняется построение *карты альфа-теней*. Это одноканальная 2D-текстура вещественного формата, в альфа-канал которой записаны значения коэффициента α прозрачности цветов точек полигональной модели ОП, видимых из позиции источника освещения (0 – полностью прозрачный, 1 – полностью непрозрачный).

На *третьем этапе* для каждого фрагмента синтезируемого изображения ЗП на основе построенных каскадных карт альфа-теней выполняется расчет цвета C_s земной поверхности, затененной облачным покровом. Затенение задается вещественным коэффициентом γ , который принимает значения из отрезка $[\gamma_{dense}, 1]$, где $\gamma_{dense} \geq 0$ соответствует наиболее плотной тени, а 1 – отсутствию тени.

Рассмотрим последние два этапа более подробно.

Метод построения карт альфа-теней. Обозначим через F_i усеченную пирамиду, образованную разделяющими плоскостями i и $i + 1$ (см. рис. 2). Рассмотрим процесс построения карты A_i альфа-теней для усеченной пирамиды F_i (для остальных усеченных пирамид он будет аналогичен). Создадим внеэкранный буфер кадра с текстурой A_i , подключенной в качестве буфера цвета. Установим в позиции источника света фиктивную виртуальную камеру (ФВК) с направлением взгляда, совпадающим с направлением освещения. Так как в рассматриваемой задаче источник света является направленным (освещает сцену параллельными лучами), то установим для созданной ФВК режим ортографического проецирования. Далее будем выполнять визуализацию полигональной модели ОП в созданный внеэкранный буфер с помощью следующего алгоритма:

1. Вычислим матрицу $M_{ortho,i}$ ортографической проекции усеченной пирамиды F_i (см. исследование [3]).
2. Установим $M_{ortho,i}$ в качестве текущей проекционной матрицы с помощью оператора *glLoadMatrix* графической библиотеки OpenGL.
3. Обнулим альфа-канал текстуры A_i с помощью операторов *glClearColor* и *glClear*.
4. Выполним отбор, подкачку и загрузку в видеопамять тайлов полупрозрачной сверхбольшой текстуры ОП, необходимых для синтеза изображения модели ОП в ФВК (подробно описано в работе [2]).
5. Выполним рендеринг в текстуру A_i полигональной модели ОП с помощью разработанного фрагментного шейдера *S1*. Для каждого фрагмента изображения ОП данный шейдер выполняет выборку значения коэффициента α прозрачности из тайлов полупрозрачной сверхбольшой текстуры [2] и записывает это значение в текстуру A_i .

Выполнив приведенный алгоритм для каждой усеченной пирамиды, мы получим набор каскадных карт альфа-теней, необходимый для расчета затенения модели ЗП.

Метод расчета затенения модели земной поверхности. На данном этапе будем выполнять визуализацию модели ЗП из позиции наблюдателя. Для каждого фрагмента синтезируемого изображения ЗП будем выполнять расчет цвета C_s затенения, параллельно и независимо друг от друга, с помощью разработанного фрагментного шейдера *S2*.

Рассмотрим некоторый фрагмент G , обрабатываемый шейдером $S2$. Введем следующие обозначения: P – точка модели ЗП, соответствующая фрагменту G ; P_{OCS} – координаты точки P в объектной системе координат (OCS) модели ЗП; M_{model} – матрица модельного преобразования, переводящая координаты точки P из системы OCS в мировую систему координат (WCS); M_{view} и M_{fvc} – матрицы видовых преобразований, переводящие координаты точки P из системы WCS в систему VCS и из системы WCS в видовую систему координат ФБК соответственно; C_f – цвет фрагмента G изображения ЗП без учета затенения от облачного покрова. Расчет цвета C_s затенения для фрагмента G реализует следующий алгоритм:

1. Вычислим номер k карты альфа-теней, к которой относится фрагмент G :

Вычислим координаты P_{WCS} точки P в системе WCS: $P_{WCS} = M_{model} P_{OCS}$.

Вычислим координаты P_{VCS} точки P в системе VCS: $P_{VCS} = M_{view} P_{WCS}$.

Запишем глубину $d_{VCS} = |P_{VCS,z}|$ фрагмента G в системе VCS.

Запишем флаги b_0, \dots, b_N , где $b_i = (D[i] \leq d_{VCS}) \& \& (d_{VCS} < D[i+1])$.

$$k = \sum_{i=0}^N i b_i .$$

2. Вычислим текстурные координаты (s, t) фрагмента G в карте A_k альфа-теней:

Вычислим координаты P_{FNDCS} точки P в системе координат нормализованного объема видимости ФБК (FNDCS): $P_{FNDCS} = M_{ortho,k} M_{fvc} P_{WCS}$.

Приведем координаты P_{FNDCS} к отрезку $[0, 1]$ (см. работу [3]).

$$(s, t) = (P_{FNDCS,x}, P_{FNDCS,y}) .$$

3. Выполним выборку значения α_{map} из карты A_k на основе координат (s, t) .

4. Вычислим коэффициент γ затенения фрагмента G : $\gamma = (1 - \alpha_{map}) + \alpha_{map} \gamma_{dense}$.

5. $C_s = \gamma C_f$.

Отметим, что в п. 3 данного алгоритма выборка из карты альфа-теней реализуется с использованием процентно-приближенной фильтрации [5]. Это осуществляется во избежание проявления эффекта «ступенчатости» тени (так называемого альясинга), а также для придания теням от облачного покрова характерной размытости краев. В результате выполнения приведенного алгоритма для всех фрагментов изображения ЗП в буфере кадра будет сформировано изображение освещенной модели ЗП с мягкими, неоднородными тенями от облачного покрова.

Заключение. В работе рассмотрена задача моделирования динамических теней от облачного покрова Земли в трехмерных полигональных сценах в масштабе реального времени. Предложена эффективная технология каскадных карт альфа-теней, позволяющая визуализировать мягкие тени с неоднородной плотностью от облачного покрова, моделируемого на основе полупрозрачной сверхбольшой текстуры. Также были разработаны новые методы и алгоритмы построения и применения каскадных карт

альфа-теней, использующие распараллеливание графических расчетов на GPU с помощью фрагментных шейдерных программ. Предложенные технология, методы и алгоритмы были реализованы в программном комплексе визуализации виртуальной модели Земли и прошли апробацию в системе визуализации сложных космических виртуальных сцен, разработанной в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. Апробация подтвердила адекватность предложенного решения поставленной задаче и возможность его использования при создании космических видеотренажерных комплексов, систем виртуального окружения, информационно-образовательных систем и др.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00243.

Список использованных источников

1. **Gerst, A.** (ESA astronaut). – URL : https://www.flickr.com/photos/astro_alex/albums (дата обращения: 22.09.2019).
2. **Тимохин, П. Ю.** Система визуализации текстурированных моделей планет для тренировок проведения космических экспериментов / П. Ю. Тимохин // Программные продукты и системы. – 2015. – № 4. – С. 99 – 104.
3. **Мальцев, А. В.** Применение теневых карт для моделирования теней в виртуальных 3D сценах в реальном времени / А. В. Мальцев // Труды НИИСИ РАН. – 2014. – Т. 4, № 2. – С. 69 – 77.
4. **Parallel-Split Shadow Maps for Large-Scale Virtual Environments** / Z. Fan, H. Sun, L. Xu, K.-L. Lee // In Proceedings of ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications. – 2006. – P. 311 – 318.
5. **Bunnell, M.** Shadow Map Antialiasing / M. Bunnell, F. Pellacini // GPU Gems: Programming techniques, tips and tricks for real-time graphics, Addison-Wesley. – 2004. – P. 185 – 192.

УДК 004.9

Уварова Е. А., Пыкин И. С., Попов А. В.

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА
РАСХОДА ЭЛЕКТРОДОВ**

Uvarova E. A., Pykin I. S., Popov A. V.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)6307040, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

**METHOD OF AUTOMATED CALCULATION
OF ELECTRODE CONSUMPTION**

Аннотация. Описывается метод определения удельной нормы расхода электродов, выраженной в штуках на погонный метр шва.

Ключевые слова: сварка, расчет, расход электродов.

Abstract. A method for determining the specific electrode consumption rate expressed in units per linear meter of the weld is described.

Keywords: welding, calculation, consumption of electrodes.

В ряде случаев целесообразно определять удельную норму расхода электродов, выраженную в штуках на погонный метр шва.

Этот метод обладает рядом преимуществ. Он позволяет осуществлять оперативный контроль за расходом электродов (особенно дефицитных и дорогостоящих) сварщиками, тем самым создается объективная основа для материального стимулирования их за экономию электродов. Кроме того, рассматриваемый метод позволяет дифференцировать расход электродов по маркам на сварку корня шва, подварку его и заполнение металлом основного шва. Все это сказывается на эффективности использования электродов и снижении себестоимости сварочных работ.

Использование метода нормирования в штуках создает благоприятные условия для обоснования потребностей в электродах на производственную программу с применением ЭВМ.

Сущность метода [1]. По массе наплавленного металла на метр каждого типа шва, дифференцированной по толщине свариваемого металла, и выходу наплавленного металла (в граммах) из одного электрода, дифференцированного по маркам, длине и диаметру, определяется расход электродов в штуках.

Для однопроходных швов без подварки норма расхода электродов ω_0 может быть определена из выражения

$$\omega_0 = \frac{Q_H L 1000}{N},$$

где N – выход металла из одного электрода данных марки, длины и диаметра, г.

При многопроходных швах норма расхода электродов определяется по формуле

$$\omega_M = \frac{(Q_H 1000 - m)L}{N},$$

где m – масса наплавленного металла при сварке корня шва, г.

Поскольку сварка корня шва осуществляется в один проход,

$$m = \frac{\alpha_n I}{V}.$$

Здесь α_n – коэффициент наплавки, г/А·ч; I – сварочный ток, А; V – скорость перемещения дуги, м/ч.

По этой же формуле можно определить массу наплавленного металла для подварки корня шва m_1 .

Для сварки швов типов С9, С10, С18 – С20 с подваркой корня формула расчета принимает вид

$$\omega = \frac{[Q_H 1000 - (m + m_1)]L}{N}.$$

При расчетах можно применять: $m = 110 \dots 120$ г; $m_1 = 50 \dots 60$ г.

Выход наплавленного металла из одного электрода приведен в таблице при длине огарка 50 мм. При отклонении от указанного размера выход металла можно корректировать на поправочный коэффициент изменения длины огарка

$$\lambda = \frac{l_3 - 50 \text{ мм}}{l_3 - p},$$

где l_3 – длина электрода, мм; p – фактическая длина огарка, мм. Значения коэффициентов λ приведены в таблице.

Коэффициенты корректировки для сварки при различном пространственном положении шва:

- нижнее – 1,0;
- потолочное – 1,1;
- горизонтальное – 1,1;
- вертикальное – 1,2.

Представленная методика используется при разработке системы автоматизированного проектирования технологического оборудования [2 – 6].

Работа выполнена под руководством проф. каф. КИСМ ТГТУ В. Г. Мокрозуба.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00660/2019).

Список использованных источников

1. **Нормирование** расхода электродов для дуговой сварки / Н. И. Панащенко, П. Ф. Харченко, А. М. Бейнц и др. ; под общ. ред. В. В. Подгарецкий. – Киев : Наукова думка, 1978. – 128 с.

2. **Информационная** модель объекта сложной технической системы / В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, Ю. В. Немтинова, Е. С. Егоров // Радиотехника. – 2010. – № 12. – С. 41 – 43.

3. **Мокрозуб, В. Г.** Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373.

4. **Мокрозуб, В. Г.** Структура реляционной базы данных для хранения групповых спецификаций изделий с взаимозаменяемыми элементами / В. Г. Мокрозуб // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 3. – С. 30 – 35.

5. **Мокрозуб, В. Г.** Процедурные и информационно-логические модели планирования выпуска продукции и ремонтов технологического оборудования многоассортиментных производств / В. Г. Мокрозуб, С. Я. Егоров, В. А. Немтинов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 2. – С. 72 – 76.

6. **Мокрозуб, В. Г.** Разработка интеллектуальных информационных систем автоматизированного проектирования технологического оборудования : учебное пособие / В. Г. Мокрозуб. – Тамбов : Тамбовский ГТУ, 2008. – 80 с.

УДК 004.9

Пыкин И. С., Попов А. В., Лагутин Д. А., Грудинин Н. С.
Тамбовский государственный технический университет,
Россия, г. Тамбов
(Тел. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ТАРЕЛОК КОЛОННЫХ АППАРАТОВ

Pykin I. S., Popov A. V., Lagutin D. A., Grudin N. S.
Tambov State Technical University, Russia, Tambov
(Tel. (4752)630704, e-mail: mokrozubv@yandex.ru)

INFORMATION MODEL FOR DETERMINING THE SIZE OF COLUMN APPARATUS PLATES

Аннотация. Описываются основные размерные признаки тарелок колпачковых колонных аппаратов и правила их определения.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, искусственный интеллект, информационная модель, колонные аппараты, тарелки.

Abstract. The main dimensional features of the plates of the cap column apparatus and the rules for their determination are described.

Keywords: computer-aided design, artificial intelligence, information model, column devices, plates.

Основой интеллектуальных систем автоматизированного проектирования технологического оборудования (ТО) являются информационные модели, позволяющие находить параметры элементов ТО.

Информационную модель ТО можно представить кортежем $ИМ = \langle \text{Элементы, Признаки, Правила} \rangle$.

Ниже представлены основные размерные признаки колпачковых колонных аппаратов и правила их определения.

Элементы: e_0 – колонна, e_1 – элемент тарелка, e_5 – переливная перегородка.

Признаки колонны:

$e_{0.p1}$ – диаметр колонны D_k ;

$e_{0.p2}$ – высота колонны H ;

$e_{0.p3}$ – расстояние между тарелками H_{MT} ;

Признаки переливной перегородки:

$e_{5.p1}$ – высота переливной перегородки;

$e_{5.p2}$ – длина переливной перегородки;

Признаков тарелки:

$e_{1.p1}$ – тип тарелки;

$e_{1.p2}$ – внешний диаметр тарелки D_T ;

$e_{1.p3}$ – толщина тарелки s ;

$e_{1.p4}$ – количество колпачков Z ;

$e_{1.p5}$ – материал тарелки;

$e_{1.p6}$ – коэффициент сопротивления тарелки;

$e_{1.p7}$ – гидравлическое сопротивление единичной тарелки;

$e_{1.p8}$ – внутренняя площадь сечения аппарата F_B ;

$e_{1.p9}$ – площадь сечения паровых патрубков P_{II} ;

$e_{1.p10}$ – площадь сечения слива F_C ;

$e_{1.p11}$ – длина линии барботажа L_B ;

$e_{1.p12}$ – длина линии слива L_C ;

$e_{1.p13}$ – количество рядов колпачков в направлении движения жидкости $Z1$;

$e_{1.p14}$ – активная площадь тарелки A/F_B ;

$e_{1.p15}$ – расстояние между нижним торцом колпачков и дном тарелки K ;

$e_{1.p16}$ – высота жидкости над прорезью колпачков (гидрозатвор) h_g ;

$e_{1.p17}$ – крепление к опорной раме;

$e_{1.p18}$ – количество секций из которых состоит тарелка;

$e_{1.p19}$ – ширина рабочей зоны;

$e_{1.p20}$ – гидравлическое сопротивление единичной тарелки;

$e_{1.p21}$ – сопротивление сухой тарелки;

$e_{1.p22}$ – сопротивление, обусловленное силами поверхностного натяжения;

$e_{1.p23}$ – сопротивление слоя жидкости;

$e_{1.p24}$ – длина сливной трубы;

$e_{1.p25}$ – исполнение тарелки.

Признаки сливного патрубка:

$e_{12.p1}$ – длина сливного патрубка;

$e_{12.p2}$ – материал сливного патрубка;

$e_{12.p3}$ – площадь сливного патрубка.

Примеры правил для тарелки типа ТМК–III:

Правило 1 (выбор диаметра тарелки типа ТМК–III).

Если $e_{1.p1} = \text{ТМК–III}$, то $e_{1.p2} = e_{0.p1}$.

Правило 2 (выбор толщины тарелки).

Если $(e_1.p_1 = \text{ТМК-III} \wedge e_0.p_1 \leq 1600 \text{ мм})$, то $e_1.p_3 = 2,5 \text{ мм}$.

Правило 3 (выбор толщины тарелки). Если $(e_1.p_1 = \text{ТМК-III} \wedge e_0.p_1 \geq 1800 \text{ мм})$, то $e_1.p_3 = 3 \text{ мм}$.

Правило 4 (выбор расстояния между нижним торцом колпачка и дном тарелки).

Если $e_1.p_1 = \text{ТМК-III}$, то $e_1.p_{15} = 0$.

Правило 5 (выбор расстояния между тарелками).

Если $e_1.p_1 = \text{ТМК-III}$, то $e_0.p_3 = 170 \text{ мм} \vee e_0.p_3 = 200 \text{ мм} \vee e_0.p_3 = 240 \text{ мм}$.

Правило 6 (выбор высоты прорези в колпачке).

Если $(e_1.p_1 = \text{ТМК-III} \wedge e_2.p_2 = 100 \text{ мм} \wedge e_2.p_1 = \text{ГОСТ 9634-68})$, то $e_2.p_9 = 20 \text{ мм}$.

Правило 7 (выбор высоты прорези в колпачке).

Если $(e_1.p_1 = \text{ТМК-III} \wedge e_2.p_2 = 100 \text{ мм} \wedge e_2.p_1 = \text{МН 5262-64})$, то $e_2.p_9 = 25 \text{ мм}$.

Правило 8 (выбор высоты приемного порога).

Если $e_1.p_1 = \text{ТМК-III}$, то $e_5.p_1 = 35 \text{ мм}$.

Правило 9 (выбор высоты переливной перегородки (высота жидкости над прорезью колпачков)).

Если $e_1.p_1 = \text{ТМК-III}$, то $e_1.p_{16} = 9 \text{ мм}$.

Правило 10 (выбор длины сливного патрубка).

Если $e_1.p_1 = \text{ТМК-III}$, то $e_{12}.p_1 = e_1.p_{16} = 5 \text{ мм}$.

Представленная модель используется при разработке виртуального кабинета «Конструирование технологического оборудования» [1 – 5].

Работа выполнена под руководством проф. каф. КИСМ ТГТУ В. Г. Мокрозуба.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00660/2019).

Список использованных источников

1. **Информационная** модель объекта сложной технической системы / В. А. Немтинов, В. Г. Мокрозуб, Ю. В. Немтинова, Е. С. Егоров // Радиотехника. – 2010. – № 12. – С. 41 – 43.

2. **Мокрозуб, В. Г.** Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин //

Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373.

3. **Мокрозуб, В. Г.** Структура реляционной базы данных для хранения групповых спецификаций изделий с взаимозаменяемыми элементами / В. Г. Мокрозуб // Автоматизация. Современные технологии. – 2015. – № 3. – С. 30 – 35.

4. **Мокрозуб, В. Г.** Процедурные и информационно-логические модели планирования выпуска продукции и ремонтов технологического оборудования многоассортиментных производств / В. Г. Мокрозуб, С. Я. Егоров, В. А. Немтинов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2009. – № 2. – С. 72 – 76.

5. **Мокрозуб, В. Г.** Разработка интеллектуальных информационных систем автоматизированного проектирования технологического оборудования : учебное пособие / В. Г. Мокрозуб. – Тамбов : Тамбовский ГТУ, 2008. – 80 с.

Научное электронное издание

**ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН**

**Материалы VI Международной
научно-практической конференции**

Выпуск 6, Том I

Компьютерное макетирование Т. Ю. Зотовой, М. Н. Рыжковой

ISBN 978-5-8265-2192-2



Подписано к использованию 20.12.2019.

Упаковка и тиражирование 21.01.2020.

Тираж 100 шт. Заказ № 157

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.

Телефон (4752) 63-81-08.

E-mail: izdatelstvo@tstu.ru