

На правах рукописи

ЕФРЕМОВ Олег Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОВЯЗКИХ КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(химическая промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре “Переработка полимеров и упаковочное производство”.

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Клинков Алексей Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Скуратов Владимир Кириллович,
доктор технических наук, доцент
Дмитриев Вячеслав Михайлович

Ведущая организация: ОАО “НИИРТмаш”, г. Тамбов

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 2004 г. в __ ч __ мин на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 Тамбовского государственного технического университета по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1, ауд. 60.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доцент

В.М. Нечаев

Подписано к печати 18.05.2004
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 377

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ЛР № 020851 от 13.01.99 г. Плр № 020079 от 28.04.97 г.

Подписано к печати 20.05.2004.
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем: 0,96 усл. печ. л.; 0,93 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 790.

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность проблемы. Переход от периодических к непрерывным процессам получения высоковязких клеевых композиций позволит устранить многие из недостатков периодических процессов и обеспечить высокий уровень механизации и автоматизации, уменьшить нестабильность физико-механических показателей получаемых смесей в разных партиях, снизить пожаро- и взрывоопасность производства, уменьшить металло- и энергоемкость, повысить экологическую чистоту производств.

В химической промышленности среди разнообразных конструкций машин для осуществления процесса смешения особое место занимают двухшнековые смесители непрерывного действия. Однако их проектирование в настоящее время требует выполнения большого объема трудоемких и дорогостоящих экспериментальных и конструкторских работ на модельных и промышленных образцах.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению и описанию течения перерабатываемых материалов в каналах рабочих органов двухшнековых смесителей непрерывного действия, до настоящего времени не создано надежных инженерных методик для расчета их основных конструктивных и технологических параметров.

Вместе с тем, эффективные методы моделирования процессов смешения высоковязких полимерных композиций в смесителях непрерывного действия позволили бы существенно снизить время и затраты, необходимые для проектирования такого оборудования.

Соответственно существующим сейчас теоретическим работам и методикам инженерного расчета, посвященным описанному вопросу, присущи следующие основные недостатки:

- в большинстве работ исследуется течение полимерных материалов в винтовых каналах шнеков, тогда как все большее распространение приобретает так называемый блочно-модульный способ конструирования, в соответствии с которым рабочие органы смесителей komponуются из различных (не только шнековых) насадок;
- в существующих методиках и программах для расчета смесительного оборудования не рассматриваются вопросы оптимальной компоновки рабочих органов и оптимизации геометрических параметров проектируемых смесителей.

В связи с этим проведенные в настоящей работе исследования по созданию математической модели непрерывного процесса получения высоковязких клеевых композиций и разработке инженерной методики и программного обеспечения для расчета и конструирования двухшнековых смесителей непрерывного действия имеют актуальное научное и практическое значение.

Работа выполнялась в соответствии с научно-технической программой Минобразования РФ “Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники” (код 201. Производственные технологии), 2001 – 2002 гг.

Цель работы. Диссертационная работа посвящена разработке непрерывного процесса и конструкции оборудования для получения высоковязких клеевых композиций. В соответствии с этим в данной работе решались следующие задачи:

- анализ современного состояния и направлений развития непрерывных процессов и конструкций смесительного оборудования для приготовления высоковязких полимерных композиций;
- изучение физической картины процесса течения перерабатываемых материалов в каналах рабочих органов;
- разработка математической модели процесса течения неньютоновских жидкостей в каналах шнеков, оснащенных различными смесительными насадками и вращающихся в одну сторону;
- разработка экспериментальной установки для исследования процесса смешения высоковязких полимерных композиций в зонах с различной геометрией рабочих органов;
- разработка методики инженерного расчета основных технологических и конструктивных параметров двухшнековых смесителей непрерывного действия для получения высоковязких клеевых композиций;
- создание программного обеспечения, позволяющего автоматизировать расчет смесительного оборудования и определять минимальную длину рабочих органов, обеспечивающую требуемое качество смешения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- создана математическая модель процесса смешения высоковязких клеевых композиций в двухшнековых смесителях непрерывного действия, позволяющая рассчитывать производительность смесите-

* Автор выражает глубокую благодарность д-ру техн. наук, профессору Беляеву Павлу Серафимовичу за научные консультации в области тепломассообмена.

ля и динамику коэффициента неоднородности для зон с кулачковыми насадками заданной конфигурации и минимальную длину рабочих органов, обеспечивающую требуемое качество смешения;

– разработана экспериментальная установка, позволяющая определять реологические свойства перерабатываемых полимерных материалов, динамику коэффициента неоднородности и мощность, затрачиваемую на смешение, в зонах с различной конфигурацией смесительных кулачковых насадок;

Практическая ценность. Разработаны методика инженерного расчета и рекомендации по компоновке рабочих органов вновь разрабатываемых и модернизации существующих двухшнековых смесителей непрерывного действия для получения резинового клея, рабочие органы которых оснащены смесительными кулачками заданного типа. Методика позволяет уменьшить длину рабочих органов существующих смесителей до 17 % при условии обеспечения заданного качества смешения.

Предложенная в работе математическая модель может быть также использована и для исследовании процессов смешения и диспергирования промышленных резиновых смесей различных шифров.

Создано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс расчета основных технологических и конструктивных параметров двухшнековых смесителей непрерывного действия и обрабатывать экспериментальные данные на стадии реологических исследований, а также проводить экспресс-анализ качества смешения.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на межреспубликанских и международных научных конференциях “Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений” (Казань, 1998, 2001 гг.), V Международной научной конференции “Методы кибернетики химико-технологических процессов” (Казань, 1999 г.), региональной научно-технической конференции “Проблемы химии и химической технологии Центрально-Черноземного региона РФ” (Липецк, 1997 г.), областной научно-технической конференции “Экология-98 (Инженерное и информационное обеспечение экологической безопасности в Тамбовской области)” (Тамбов, 1999 г.), 7-й региональной научной конференции “Проблемы химии и химической технологии” (Тамбов, 1999 г.), научно-технической конференции “Материалы и изделия из них под воздействием различных видов энергии” (Москва, 2000 г.), III, IV и V научных конференциях, проведенных в Тамбовском государственном техническом университете в 1996 – 2000 гг., Международной научно-практической конференции “Проблемы экологии и ресурсосбережения при переработке и восстановлении изношенных шин” (Москва, 2001 г.), 4-й Международной теплофизической школе (Тамбов, 2001 г.), Международной научно-технической конференции “Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий” (Сочи, 2001 г.), XV Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях” (Тамбов, 2002 г.), Международной конференции “Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий” (Воронеж-Сочи, 2002 г.), 8-й Международной научно-технической конференции “Наукоемкие химические технологии-2002” (Уфа, 2002 г.), 4-й Российской научно-технической конференции “Авиакосмические технологии “АКТ-2003” (Воронеж, 2003 г.) и VII Всероссийской научно-технической конференции “Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования” (Тамбов, 2004 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 1 монография и 24 статьи и тезиса докладов; кроме того, получены 1 патент и 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и результатов, списка использованных источников, включающего 127 наименований, и 2 приложений. Основная часть диссертации изложена на 122 страницах машинописного текста. Работа содержит 50 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, обоснованы ее актуальность и научная новизна, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ современных методов получения высоковязких полимерных композиций, указывающий на преимущества процессов, осуществляемых по непрерывной технологии на базе модульного принципа конструирования рабочих органов смесительного оборудования.

Рассмотрены характерные черты физической картины описываемых процессов.

Исследованы основные задачи, возникающие при моделировании процессов смешения и способы их решения, а также принципы создания модельных установок, необходимых для этого.

Отмечено, что из-за сложной картины потоков перерабатываемого материала в пространстве смешения до сих пор не создано надежных и универсальных инженерных методик расчета смесительного оборудования непрерывного действия для получения высоковязких полимерных композиций.

С практической точки зрения целесообразно создание программного обеспечения для персональных компьютеров, позволяющего автоматизировать проектно-конструкторские работы по созданию двухшнековых смесителей непрерывного действия (включая автоматизацию обработки экспериментальных данных на стадии реологических исследований), в связи с чем проведен анализ существующего программного обеспечения для этих целей.

Первая глава завершается формулировкой задач исследования.

Вторая глава посвящена математическому моделированию течения неньютоновских жидкостей в различных зонах смесителей, а также минимизации длины рабочих органов двухшнековых смесителей непрерывного действия.

Поставлена задача: для получения высоковязких клеевых композиций с заданным качеством смешения на оборудовании, удовлетворяющем условию минимальной длины рабочих органов, создать математический аппарат для моделирования непрерывного процесса клееприготовления и оборудование для их реализации.

Поставленная задача решалась следующим образом: принимались уравнения, описывающие отдельные составляющие процесса смешения. Затем на основании обобщения уравнений созданы модель и инженерная методика для расчета основных параметров двухшнековых смесителей непрерывного действия.

Объемный поток материала в рабочих органах смесителя рассматривался как сумма двух составляющих: одномерного продольного потока в направлении оси смесителя (этот поток создается напорными винтовыми насадками) и двумерного поперечного потока, который создается смесительными кулачковыми насадками.

Для определения скорости потока в продольном направлении, определяющей время пребывания материала в различных зонах смесителя, разработана методика, заключающаяся в следующем.

Рабочие органы рассматриваемого оборудования отличаются от традиционных тем, что часть винтовой нарезки заменена смесительными кулачками. В результате появляется дополнительное гидравлическое сопротивление, которое вызывает уменьшение производительности.

Для определения коэффициента этого уменьшения была проведена серия экспериментов и обобщены данные, полученные другими исследователями. В результате была получена эмпирическая формула зависимости коэффициента k от перепада давления по длине смесительной части рабочих органов (1), рассчитываемого по методике, применяющейся для расчета формирующих головок.

$$Q_m^{(k)} = kQ_m^{(m)}, \quad k = \frac{30,2}{\sqrt{\Delta P}} - 0,63. \quad (1)$$

Производительность двухшнекового смесителя рассчитывали по формуле Шенкеля:

$$Q_V^{(m)} = \frac{\omega}{\pi} \left\{ \pi H(D-H) - \frac{D}{2} \left[D \frac{\alpha}{2} - (D-H) \sin \frac{\alpha}{2} \right] \right\} \frac{B}{\cos \varphi}. \quad (2)$$

В итоге получено выражение для скорости продольного потока:

$$\bar{v} = \frac{L_p Q_m^{(k)}}{\sum_{i=1}^n L_i S_i \rho_i}. \quad (3)$$

Для описания движения материала в поперечном сечении кулачковых зон были использованы следующие соотношения:

– уравнение неразрывности

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\Theta}{\partial \Theta} = 0; \quad (4)$$

– проекции уравнения движения (уравнение Навье-Стокса) на соответствующие оси координат:

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\Theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \Theta} - \frac{v_\Theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) +$$

$$+ \frac{2}{r} \mu \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left[\mu \left(\frac{\partial v_\Theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \Theta} - \frac{v_\Theta}{r} \right) \right]; \quad (5)$$

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_\Theta}{\partial r} + \frac{v_\Theta}{r} \frac{\partial v_\Theta}{\partial \Theta} + \frac{v_r v_\Theta}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \Theta} + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left(\frac{\partial v_\Theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\Theta}{\partial r} - \frac{v_\Theta}{r} \right) \right] +$$

$$+ \frac{2}{r} \mu \left(\frac{\partial v_\Theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\Theta}{\partial r} - \frac{v_\Theta}{r} \right) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left[\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\Theta}{\partial r} - \frac{v_\Theta}{r} \right) \right]; \quad (6)$$

Реологическое уравнение для степенной жидкости имеет вид:

$$\mu = m_0 \dot{\gamma}^{n-1} e^{\frac{E}{RT}}. \quad (7)$$

Сделаем допущение, что скорость сдвига в зазоре

$$\dot{\gamma} \approx \frac{v}{H}. \quad (8)$$

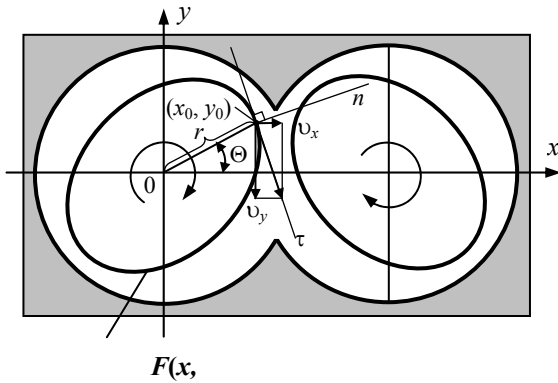


Рис. 1 К выводу граничных условий движения материала в поперечном сечении рабочих органов смесителя

После подстановки (8) в (7), а (7) в (4) – (6) и интегрирования по частям был произведен переход к обобщенному решению, удовлетворяющему системе интегрально-дифференциальных уравнений, которая решалась методом конечных элементов (МКЭ) по стандартной процедуре. В результате было получено поле скоростей и с учетом этого поля определена динамика границ раздела между

областями с различной концентрацией и динамика поля концентраций.

При определении граничных условий (рис. 1) на внутренних стенках материального цилиндра использовали классическое условие прилипания, т.е. скорость среды принималась равной 0, а на поверхностях вращающихся смесительных элементов – равной скорости движения точек поверхностей элементов с учетом условия проскальзывания.

Так как основная черта физической картины исследуемого процесса – растворение в условиях деформации сдвига, то математическая модель была дополнена уравнением диффузии, которое в двухмерном случае имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{L^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right\}. \quad (9)$$

Состояния системы рассматривались через небольшие промежутки времени, поэтому можно допустить, что на каждом временном шаге величина $\frac{\partial c}{\partial t}$, имеющая физический смысл скорости изменения концентрации, является константой. Уравнение (9) на каждом временном шаге также решалось методом конечных элементов.

Для практического использования подобного способа расчета динамического изменения концентрации в различных точках поперечного сечения смесителя необходимо задать начальное распределение компонентов (начальные условия). Здесь был использован статистический метод при задании поля концентраций в начальный момент времени. Заданные таким образом начальные и граничные условия на каждом временном шаге являются исходными для решения системы уравнений на следующем временном шаге.

С учетом особенностей созданной математической модели для оценки качества смешения был использован коэффициент неоднородности смеси:

$$V_c = \frac{100}{C} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2} . \quad (10)$$

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет, исходя из знания начальных реологических характеристик перерабатываемых материалов, геометрической конфигурации рабочих органов смесителей и законов их движения во времени, рассчитывать в любой момент времени состояние элементарных областей смеси. Соответственно, можно прогнозировать ход процесса, определяя необходимые условия переработки и качество смешения.

В третьей главе описаны методика проведения экспериментов, результаты экспериментальных исследований и математический аппарат, использованный при их обработке и анализе.

С целью выявления закономерностей течения перерабатываемых материалов в каналах рабочих органов рассматриваемых смесителей были разработаны экспериментальная установка (рис. 2) и методики проведения экспериментов, позволяющие осуществить проверку адекватности разработанной математической модели.

Зависимости крутящего момента на выходных валах смесительной камеры от угловой скорости вращения рабочих органов использовались для определения мощности, затрачиваемой на процесс смешения, и реологических характеристик перерабатываемых материалов, для чего была проведена корреляция данных, полученных при экспериментах на пластографе Бранднера и на ротационном вискозиметре “Реотест-2”.

В смесительной камере 2 устанавливались сменные кулачковые смесительные насадки четырех видов (рис. 3).

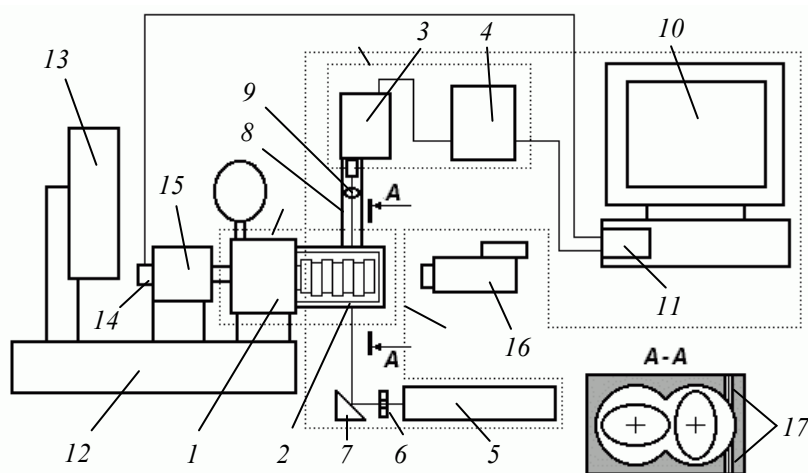


Рис. 2 Схема экспериментальной установки для исследования

процессов смешения высоковязких клеевых композиций:

I – модельная приставка (**1** – редуктор-раздвоитель; **2** – прозрачная смесительная камера со сменными смесительными элементами); **II** – фотометр ФПЧ (**3** – головка фотометрическая; **4** – блок питания и управления); **III** – измерительный комплекс для определения V_c в реальном времени (**5** –

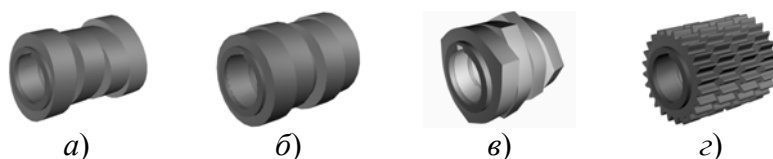


Рис. 3 Виды кулачков, использовавшихся в экспериментах:

a – эллиптические; *b* – эксцентриковые; *в* – треугольные; *г* – зубчатые

Для проверки адекватности математической модели была разработана методика измерения коэффициента неоднородности смеси в режиме реального времени (рис. 2). Для регистрации и записи сигналов, снимаемых с блока питания и управления 4, были созданы программы управления платой расширения АЦП НВЛ-08 11, установленной в персональном компьютере 10.

Для определения коэффициента неоднородности слабо прозрачных и непрозрачных композиций разработана методика экспресс-анализа качества, заключающаяся в том, что пробы перерабатываемой композиции на разных стадиях смешения помещались в плоскую прозрачную кассету, которая, в свою очередь, помещалась в сканер, подключенный к персональному компьютеру. Для обработки отсканированных изображений проб композиции была написана программа *Composite Express*, оценивающая различия в цвете, которые нивелируются по мере достижения гомогенности смеси.

Динамика коэффициента неоднородности определялась для растворов натурального каучука в нефрасе С2-80/120 с концентрациями 20, 50 и 80 %. Сравнение результатов, полученных при расчетах по разработанной математической модели, и данных экспериментов показало, что они хорошо коррелируются между собой, так как расхождение между ними не превышает 10 процентов. В качестве примера приведены зависимости V_c от t для композиции концентрацией 50 % (рис. 4).

В четвертой главе описаны инженерная методика расчета основных конструктивных параметров

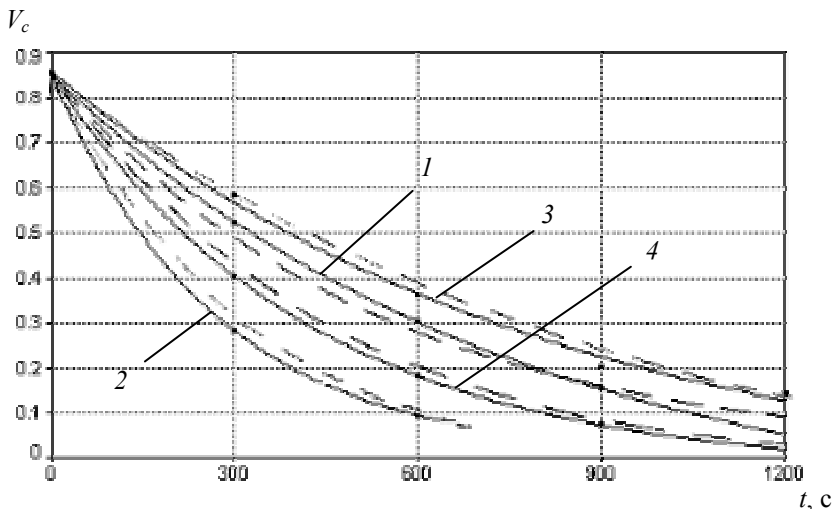


Рис. 4 Динамика коэффициента неоднородности смеси V_c для раствора натурального каучука в нефрасе С2-80/120 концентрацией 50 %:

1, 2, 3, 4 – зоны эллиптических, эксцентриковых, треугольных и зубчатых кулачков соответственно
(- - - - - расчет, ——— эксперимент)

двухшнековых смесителей непрерывного действия для приготовления высоковязких клеевых композиций и реализующее ее программное обеспечение.

Разработанное программное обеспечение (ПО) обладает следующими возможностями:

- автоматизация обработки экспериментальных данных на стадии реологических исследований на разработанной экспериментальной модельной установке, а также на ротационном вискозиметре “Реотест-2” и капиллярном вискозиметре ИИРТ-М;
- моделирование продольного и поперечного потоков перерабатываемых материалов в рабочих органах смесителя;
- расчет основных технологических и конструктивных параметров и минимизация длины рабочих органов двухшнековых смесителей непрерывного действия при условии обеспечения заданного качества смешения.

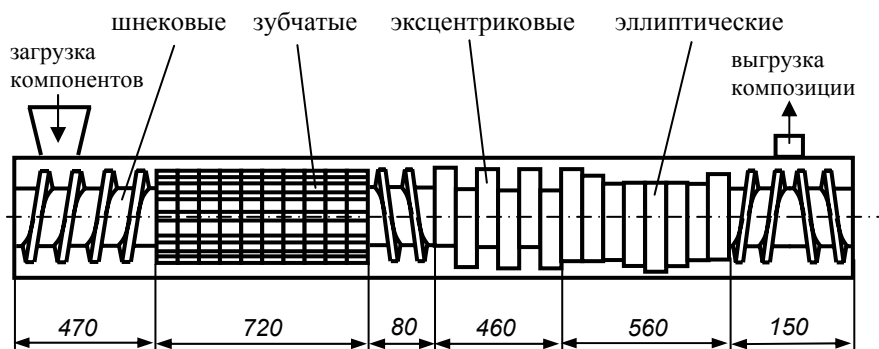
Разработанный пакет ПО состоит из трех программ: *Анализатор-Самописец* (для регистрации и обработки сигналов, снимаемых с платы АЦП), *Composite Express* (для обработки данных при экспресс-анализе коэффициента неоднородности слабо прозрачных и непрозрачных композиций) и *MixerCAD*. На последнюю программу было получено свидетельство об официальной регистрации программы для

ЭВМ “Система автоматизированного проектирования двухшнековых смесителей непрерывного действия MixerCAD” № 2001611816.

Созданное программное обеспечение позволяет анализировать процессы смешения различных полимерных материалов в зонах с различной конфигурацией смесительных насадок.

Приведен пример минимизации по разработанной методике длины рабочих органов двухшнекового смесителя типа СН-100 с диаметром рабочих органов 0,1 м для приготовления резинового клея. Чертеж компоновки рабочих органов смесителя до модернизации приведен на рис. 5. При этом длина зоны с зубчатыми насадками была увеличена с 0,720 м до 0,840 м; длина зоны с эксцентриковыми кулачками была уменьшена с 0,460 м до 0,310 м, а зоны с эллиптическими насадками – с 0,560 м до 0,240 м. В целом длина рабочих органов была уменьшена с 2,44 до 2,09 м, т.е. на 14 %, что позволило снизить металлоемкость машины при обеспечении заданного качества смешения.

Экспериментальные исследования, проведенные на лабораторном смесителе СН-40 с рабочими органами, рассчитанными по разработанной методике, подтвердили ее адекватность.



Разработанная методика позволяет сократить время обработки экспериментальных данных и проектирования двухшнековых смесителей непрерывного действия с оптимальной компоновкой и минимальной длиной рабочих органов и, соответственно, минимальными габаритами всей машины. Кроме того, разработанные методики и программное обеспечение могут быть также применены и для расчета двухшнековых смесителей непрерывного действия для получения промышленных резиновых смесей различных шифров. При модернизации существующего оборудования снижение металлоемкости составляет до 17 % за счет оптимальной компоновки и определения оптимального соотношения длин зон с различной конфигурацией смесительных кулачковых насадок.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Разработана математическая модель непрерывного процесса смешения высоковязких клеевых композиций в двухшнековых смесителях непрерывного действия, позволяющая определять производительность машины и изменение во времени коэффициента неоднородности в зонах с различной конфигурацией смесительных элементов.

2 Создана экспериментальная установка для определения реологических свойств исследуемых композиций, динамики коэффициента неоднородности и мощности, расходуемой на процесс смешения в зонах с различной конфигурацией рабочих органов при заданном режиме смешения.

3 По разработанным методикам экспериментально определены реологические свойства растворов НК в нефрасе С2-80/120 (индекс течения и коэффициент консистенции), динамика коэффициента неоднородности смеси в режиме реального времени и в режиме экспресс-анализа и мощность, затрачиваемая на процесс смешения.

4 На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика инженерного расчета основных конструктивных и технологических параметров двухшнековых смесителей непрерывного действия с учетом минимизации длины рабочих органов при обеспечении заданного качества смешения.

5 Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для персональных компьютеров для автоматизации расчетов при проектировании (включая автоматизацию обработки экспериментальных данных на стадии реологических исследований).

6 Разработанные методика инженерного расчета и программное обеспечение внедрены на ОАО “НИИРТМаш” и ОАО “Тамбоврезинаасботехника” (г. Тамбов), что позволяет снизить затраты времени на разработку смесителей и уменьшить их металлоемкость до 17 %. Программное обеспечение для пер-

сональных компьютеров внедрено в учебный процесс подготовки инженеров по специальности 170500 и магистрантов по программе 551826.

7 Разработанные модели, алгоритмы и программное обеспечение могут быть применены для расчета двухшнековых смесителей непрерывного действия для получения промышленных резиновых смесей различных шифров.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

НК – натуральный каучук; Q_V, Q_m – объемная и массовая производительности смесителя, м³/ч и кг/ч; ω – угловая скорость вращения рабочих органов, с⁻¹; D, H, B – соответственно диаметр, глубина нарезки и ширина гребня винтовых насадок, м; φ – угол наклона винтовой линии, рад; α – угол сопряжения шнеков, рад; k – коэффициент уменьшения производительности из-за дополнительного гидравлического сопротивления; $^{(ш)}, ^{(к)}$ – индексы, обозначающие величины, рассчитанные соответственно для шнековых рабочих органов и рабочих органов, набранных с использованием смесительных кулачков; ΔP – перепад давления по длине смесительной части рабочих органов, МПа; \bar{v} – скорость продольного перемещения перерабатываемого материала, м/с; L_p – длина рабочих органов, м; L_i, S_i, ρ_i – соответственно длина, площадь поперечного сечения и плотность материала в i -й зоне; (x, y) – координаты точек в декартовой системе координат; r и Θ – радиус-вектор и угол точки в радиальной системе координат; v_r и v_Θ – проекция скорости на соответствующие оси координат цилиндрической системы; $F(x, y)$ – уравнение поверхности смесительных кулачков в декартовой системе координат; μ – эффективная вязкость, Па·с; n – индекс течения; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с⁻¹; m_0 – коэффициент, зависящий от природы жидкости, МПа/с ^{n} ; E – энергия активации, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); T – температура, К; c, C – концентрация; L – длина границы раздела между элементарными областями с различной концентрацией, м; D_e – эффективный коэффициент диффузии, м²/с; t – время, с; V_c – коэффициент неоднородности смеси; N – количество проб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1 Исследование процесса набухания клеевых композиций в камере набухания непрерывного действия / А.С. Клинков, О.Г. Маликов, С.П. Хрущев, О.В. Ефремов и др. // III науч. конф. ТГТУ: Тез. докл. – Тамбов, 1996. – С. 111.

2 Аппаратурное оформление экологически чистых производств резинового клея / А.С. Клинков, О.Г. Маликов, С.Н. Хабаров, О.В. Ефремов // Проблемы химии и химической технологии Центрально-Черноземного региона РФ: Сб. докл. – Липецк, 1997. – С. 116 – 119.

3 Исследование реологических характеристик резиновых клеевых композиций, подвергнутых стадии предварительного набухания / С.Н. Хабаров, О.Г. Маликов, О.В. Ефремов и др. // Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений: Тез. докл. межресп. конф. – Казань, 1998. – С. 115.

4 Экологически безопасные технологии и оборудование для производства резиновых клеев и высоковязких композиций / А.С. Клинков, О.Г. Маликов, С.Н. Хабаров, О.В. Ефремов // Экология-98 (Инженерное и информационное обеспечение экологической безопасности в Тамбовской области): Сб. докл. областной науч.-техн. конф. – Тамбов, 1999. – 152 с.

5 Ефремов О.В. К вопросу о моделировании процессов смешения высоковязких клеевых композиций в двухшнековых смесителях непрерывного действия / О.В. Ефремов, А.С. Клинков // Труды ТГТУ. – Тамбов, 1999. – Вып. 3. – С. 44 – 46.

6 Ефремов О.В. Способ оптимизации процессов смешения высоковязких клеевых композиций для экологически чистых производств / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, О.Г. Маликов // Проблемы химии и химической технологии: Сб. докл. 7-й региональной науч. конф. – Тамбов, 1999. – 137 с.

7 Исследование реологических свойств резиновых клеевых композиций / С.Н. Хабаров, А.С. Клинков, О.Г. Маликов, О.В. Ефремов // IV науч. конф. ТГТУ: Тез. докл. – Тамбов, 1999. – С. 21.

8 Ефремов О.В. Способ моделирования течения высоковязких клеевых композиций под действием активных элементов двухшнековых смесителей с применением персональных компьютеров / О.В. Ефремов, А.С. Клинков,

О.Г. Маликов // Материалы и изделия из них под воздействием различных видов энергии: Сб. докл. науч.-техн. конф. – М., 1999. – С.78 – 80.

9 Ефремов О.В. Моделирование течения высоковязких клеевых композиций в двухшнековых смесителях с использованием персональных компьютеров / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, О.Г. Маликов // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тез. докл. V Междунар. науч. конф. – Казань, 1999. – 152 с.

10 Установка для непрерывного процесса приготовления резиновых клеев и высоковязких полимерных композиций / О.Г. Маликов, А.С. Клинков, С.Н. Хабаров, О.В. Ефремов // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тез. докл. V Междунар. науч. конф. – Казань, 1999. – С. 112 – 113.

11 Ефремов О.В. Способ оптимизации процессов смешения высоковязких клеевых композиций для экологически чистых производств / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, О.Г. Маликов // Вестник ТГУ. Сер. Естественные и технические науки. – Тамбов, 1999. – С. 242 – 243.

12 Пат. РФ № 2134198, МКИ В29В 7/46. Червячный смеситель для композиционных полимерных материалов / А.С. Клинков, О.Г. Маликов, С.Н. Хабаров, О.В. Ефремов – № 97120285/25; Заявл. 9.12.97; Опубл. 10.08.99. Бюл. № 22.

13 Ефремов О.В. Применение информационных технологий при подготовке специалистов технических специальностей / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, П.С. Беляев // Информационные технологии в образовании: Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Шахты, 2000. – С. 72 – 74.

14 Ефремов О.В. Математическое моделирование и создание на его основе программного обеспечения для симуляции процессов смешения высоковязких клеевых композиций / О.В. Ефремов // Труды ТГТУ. – Тамбов, 2000. – Вып. 6. – С. 144 – 147.

15 Simulation of the worn out tires processing in high-viscosity compositions in continuous operation mixers / O.V. Efremov, P.S. Belyaev, A.S. Klinkov etc. – Проблемы экологии и ресурсосбережения при переработке и восстановлении изношенных шин: Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. – М., 2001. – С. 37 – 38.

16 Способ моделирования процесса смешения высоковязких клеевых композиций / О.В. Ефремов, М.П. Беляев, А.С. Клинков, О.Г. Маликов // Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений: Тез. докл. междунар. конф. – Казань, 2001. – С. 105.

17 Использование пластографа Брабендера для оценки характера энергосилового воздействия на материал в двухшнековом смесителе непрерывного действия / С.П. Хрущев, О.В. Ефремов и др. // Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений: Тез. докл. междунар. конф. – Казань, 2001. – С. 107.

18 Ефремов О.В. Учет диффузии растворителя в полимер при моделировании смешения высоковязких полимерных композиций / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, М.П. Беляев // 4-я Международная теплофизическая школа: Тез. докл. – Тамбов, 2001. – С. 92 – 93.

19 Использование пластографа Брабендера для реологических исследований высоковязких полимерных композиций / О.В. Ефремов, О.Г. Маликов, С.Н. Хабаров, С.П. Хрущев, А.С. Клинков // 4-я Международная теплофизическая школа: Тез. докл. – Тамбов, 2001. – С. 94 – 95.

20 Ефремов О.В. Автоматизированное проектирование смесителей непрерывного действия для приготовления высоковязких полимерных композиций / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, М.П. Беляев // Материалы Международной конференции “Современные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий”. – Сочи, 2001. – С. 46 – 50.

21 Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ “Система автоматизированного проектирования двухшнековых смесителей непрерывного действия MixerCAD” / О.В. Ефремов, А.С. Клинков. – № 2001611816; Заявка № 2001611534; Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.12.2001 г.

22 Ефремов О.В. Моделирование и оптимизация процессов приготовления высоковязких полимерных композиций / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, П.С. Беляев // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XV Междунар. науч. конф. – Тамбов, 2002. – Т. 8. – С. 187 – 189.

23 Ефремов О.В. Реологические исследования и моделирование непрерывных процессов приготовления высоковязких полимерных композиций / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, П.С. Беляев // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий: Материалы Междунар. конф. – М.-Воронеж-Сочи, 2002. – Ч. 7. – Разд. III. – С. 3 – 7.

24 Ефремов О.В. Выбор рациональных режимов непрерывных процессов производства высоковязких полимерных композиций / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, С.Н. Хабаров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Химические технологии 2002: Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа, 2002. – С. 213 – 214.

25 Ефремов О.В. Опыт исследования и моделирования непрерывных процессов приготовления высоковязких полимерных композиций / О.В. Ефремов, А.С. Клинков, П.С. Беляев // Авиакосмические технологии “АКТ-2003”: Труды 4-й Российской науч.-техн. конф. – Воронеж, 2003. – С. 63 – 66.

26 Ефремов О.В. Компьютерный экспресс-анализ качества диэлектрических полимерных композиций для производства конденсаторов / О.В. Ефремов, М.П. Беляев, Ю.М. Головин // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: Материалы VII Всероссийской науч.-техн. конф. – Тамбов, 2004. – С. 528 – 531.

27 Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: Монография / М.В. Соколов, А.С. Клинков, О.В. Ефремов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. – М.: Изд-во “Машиностроение-1”, 2004. – 246 с.