

С.Б. ПУТИН

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ И
УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ
РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА**

Москва
«Машиностроение»
2008

УДК 519.62:66.074.7
ББК 22.193
П90

Рецензенты:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Председатель Военно-научного комитета войск радиационной,
химической и биологической защиты
Вооруженных Сил Российской Федерации
С.П. Никитаев

Доктор технических наук, профессор
Тамбовского государственного технического университета
В.А. Погонин

Путин С.Б.

П90 Математическое моделирование и управление процессом
регенерации воздуха. – М.: Машиностроение, 2008. – 176 с.
ISBN 978-5-94275-432-7

На основе системного подхода рассматриваются вопросы математического моделирования и управления процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме (ПРВ ГЗО) биотехнического

комплекса (БК). Рассмотрены вопросы математического моделирования процессов, протекающих в БК, оптимального управления ПРВ ГЗО, подходы к учету всех типов запаздываний, характерных для данного процесса. Показаны подходы к идентификации параметров модели и алгоритмы расчетов математических моделей.

Для инженеров, занимающихся проектированием и эксплуатацией систем регенерации воздуха, а также научных работников, магистров и аспирантов, изучающих хемосорбционные и адсорбционные процессы, процессы очистки и регенерации воздуха, вопросы создания систем жизнеобеспечения, вопросы управления биотехническими комплексами.

УДК 519.62:66.074.7
ББК 22.193

ISBN 978-5-94275-432-7

© Путин С.Б., 2008

Научное издание

Путин Сергей Борисович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ И
УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ
РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА**

Редактор Т.М. Глинкина

Корректор О.М. Ярцева

Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкова

Сдано в набор 1.10.2008 г. Подписано в печать 12.11.2008 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 10,0.
Тираж 400 экз. Заказ 493

ООО «Издательство Машиностроение»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И АББРЕВИАТУРЫ

a – концентрация вещества в твердой фазе, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
 C – концентрация вещества в газовой фазе, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
 D – коэффициент продольной диффузии, $\text{м}^2/\text{ч}$;
 F – площадь поперечного сечения, м^2 ;
 G – объемный расход воздуха через реактор, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 H – количество выделяемого/поглощаемого вещества человеком в единицу времени, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 h – шаг сетки по координате;
 L – длина реактора, м;
 l – толщина слоя сорбента (хемосорбента), м;
 O – количество выделяемого/поглощаемого вещества другими источниками/стоками в единицу времени, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 P – давление воздушной смеси в реакторе, Па;
 p – парциальное давление газа, Па;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль;
 t – время, ч;
 V – величина герметично замкнутого объема, м^3 ;
 Γ – алгоритм переключения реакторов;
 β – кинетический коэффициент, 1/ч;
 γ – удельный вес, $\text{Н}/\text{м}^3$;
 θ – количество вещества, моль;
 ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 v – порозность;
 τ – шаг сетки по времени;
 ω – линейная скорость воздушного потока в реакторе, м/ч.

Аббревиатуры

БТК – биотехнический комплекс;
ГЗО – герметично замкнутый объем;
ЗС – защитные сооружения;
ПРВ – процесс регенерации воздуха;
СИЗ – средства индивидуальной защиты органов дыхания человека;
СКЗ – средства коллективной защиты органов дыхания человека;
ЧС – чрезвычайная ситуация;
ЕИП – единое информационное пространство;
ВП – выделительно-поглощающий.

Индексы

вх – вход;
вых – выход;
 n – начальный;
 k – конечный;
 b – количество человек в ГЗО;
 hp – количество слоев в реакторе;
 i – номер реактора;
 j – компоненты воздуха, $j = 1, 2$ (1 – диоксид углерода, 2 – кислород);
 m – количество источников/стоков нерегенеративного оборудования;
 \max – максимальный;
 \min – минимальный;
 n – количество реакторов;
 Σ – суммарный;
 χ – номер слоя в реакторе;
 0 – начальный.

**Посвящается 50-летию юбилею ОАО «Корпорация «Росхимзащита»
(ФГУП «ТамбовНИХИ»)**

ВВЕДЕНИЕ

История развития земной цивилизации – сложный, противоречивый, неравномерный процесс. Его траектория в значительной мере зависит от того, насколько человек, общество способны обеспечить свою безопасность, избежать голода и болезней, предотвратить агрессии, сохранить благоприятную среду обитания.

Безопасность в целом – это устойчивое состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внешних и внутренних угроз и необходимость реализации этих интересов на сбалансированной основе. Главнейшим объектом безопасности должна быть признана личность с ее правами и свободами, собственностью и здоровьем. Однако безопасность личности не может быть достигнута, если не обеспечена безопасность общества с его материальными и духовными ценностями, а также государства с его суверенитетом, территориальной целостностью и конституционными завоеваниями.

Универсальных средств, обеспечивающих эффективную защиту человека при различной мощности и продолжительности воздействия, не существует. Все основные характеристики существующих и вновь создаваемых средств защиты обладают двумя ключевыми свойствами: «время защиты от...» и «удобство – эргономика». Очевидно, что индивидуальные средства защиты, предоставляя существенный уровень безопасности и облачая тело человека в некий «кокон», обеспечивают безопасность и необходимую степень свободы и удобства, но не могут создавать защиту длительное время. Это связано не только с неудобством ношения продолжительное время, но и с ограниченностью массы носимых ресурсов защиты. С другой стороны, специальные защитные комплексы могут обеспечивать безопасность длительное время коллективу людей, не накладывая обязательных физических ограничений на каждого человека. Такие комплексы, называемые средствами коллективной защиты, приобретают значительный интерес в мире. Данная работа посвящена рассмотрению систем химической регенерации воздуха на основе надпероксидных продуктов, обладающих, по сравнению с другими, рядом уникальных свойств, а именно:

- постоянной готовностью к применению в процессе хранения, без работ по обслуживанию, при этом гарантийный срок может превышать 20 лет¹;
- возможностью работы без энергии, используя конвективный принцип, при этом обеспечивая источник тепла и электроэнергии для других целей;
- отсутствием сложной запорной арматуры и систем клапанов – обеспечение непревзойденной надежности;
- простотой управления процессом выделения кислорода, поглощения углекислого газа и вредных примесей;
- возможностью работы без систем газового анализа – по алгоритму;
- взрывобезопасностью при горении помещений (в отличие от сжатого кислорода), способностью продолжать свое функционирование в общей вентиляции, находясь в окружении открытого пламени;
- занимают малую площадь и не нуждаются в усилении строительных конструкций;
- простотой в использовании – инструкция эксплуатации доступна даже неспециалисту, что повышает общий вероятностный коэффициент выживаемости людей при тяжелейших катастрофах;
- не требуют специальных навыков в первичной установке и сопровождении.

Все это подтверждает актуальность всестороннего исследования, разработки и создания систем химической регенерации воздуха.

Представленные в монографии результаты получены в течение последних 12 лет. Данные исследования были проведены с использованием богатейшего опыта и научных результатов, полученных в прошлом столетии при исследовании процессов сорбции и хемосорбции.

Основным стимулом развития исследования процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме с позиций системного феноменологического подхода послужило, несомненно, развитие вычислительной техники, обеспечивающей возможность быстрого численного решения задач математической физики, а также исключение значительного количества натуральных, дорогостоящих экспериментов на различных стадиях исследования и разработки систем, реализующих процесс регенерации воздуха.

Таким образом, в данной работе представлены следующие основные результаты:

1. Анализ процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме как замкнутого биотехнического комплекса с наличием «живой системы» и технической составляющей.
2. Математическая модель процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме.
3. Все необходимые процедуры по параметрической идентификации и проверке адекватности полученной математической модели.
4. Подход и алгоритм к численному решению математической модели.
5. Имитационные исследования с использованием математической модели.
6. Анализ запаздываний и их влияние на характер протекания процесса регенерации, а также способ их учета при расчете математических моделей.
7. Подходы к созданию систем управления процессом регенерации воздуха.
8. Подходы к оптимальному управлению процессом регенерации воздуха.
9. Основные принципы и подходы САПР систем регенерации воздуха.

Монография может быть полезна инженерам, занимающимся проектированием и эксплуатацией систем регенерации воздуха, а также научным работникам, магистрам и аспирантам, изучающим хемосорбционные и адсорбционные процессы, процессы очистки и регенерации воздуха, вопросы создания систем жизнеобеспечения, вопросы управления биотехническими комплексами. Кроме этого, самостоятельный интерес представляют подходы численного решения задач ма-

¹ Проверка систем регенерации и очистки воздуха показала, что при соблюдении правил хранения элементы систем сохраняют свои свойства практически полностью по истечении 40 лет, больше страдает металл и резина, применяемые в системе в целом!

тематической физики, подходы к формализации и учету запаздывания, к постановке и решению задач оптимального управления процессами адсорбционного и хемосорбционного характера.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. АНАЛИЗ СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Проблема защиты человека или коллектива людей от воздействия внешних агрессивных сред на государственном уровне возникла относительно недавно [11, 12]. Она росла и обострялась по мере развития промышленности, науки и других специфических областей, и только в последнюю четверть века в развитых странах вышла на уровень экономико-политической значимости [11 – 13]. Поэтому научные исследования всевозможных аспектов данной проблемы являются новой, актуальной научной областью. Причем новизна заключается не только в «возрасте» рассматриваемой проблемы, но и в том, что впервые приходится рассматривать всевозможные стороны взаимодействия и взаимовлияния «Техники» и «Человека» [14].

Объекты производственного, научного или специального назначения делятся условно по степени взаимодействия с окружающей средой на открытые, частично изолированные и герметично изолированные (рис. 1.1) [13, 15].

Открытые или частично изолированные объекты сложны в плане определения возмущающих воздействий, чья природа лежит во влиянии внешней среды, при этом взаимодействие технических средств и персонала проявляется не столь явно и не определяет условия жизнедеятельности. Характерной чертой герметично замкнутых объектов является отсутствие взаимодействия с внешней средой, что обуславливает высокую степень взаимного влияния элементов объекта и персонала. Отсюда следует, что с точки зрения задач обеспечения условий жизнедеятельности человека или коллектива людей (персонала) наиболее сложной является задача, относящаяся к объектам последнего типа.

Жизнедеятельность персонала в ГЗО зависит от комплекса факторов, определяющих обитаемость объекта [16, 17], основные из которых:

- микроклимат в ГЗО (температура, влажность, давление);
- химический состав воздуха ГЗО;
- характер и условия размещения персонала.

Как отмечается в работе [18], при переходе объекта в герметично замкнутое (автономное) состояние происходит существенное изменение состава атмосферы в ГЗО, поэтому одним из важнейших факторов, определяющих условия жизнедеятельности человека в этом случае, является обитаемость по воздушной среде.



Рис. 1.1. Виды взаимодействия объекта и внешней среды

Совершенно очевидно, что для человека, длительное время находящегося в ГЗО, наиболее желательным является поддержание привычного для него земного состава атмосферы, т.е. атмосферы, состоящей, в основном, из кислорода и азота [12, 19, 20, 21]. Согласно данным литературных источников [16, 19, 20 – 26] установлено, что в земном воздухе содержится 20,9 % кислорода, 78,1 % азота, 0,03 % углекислого газа, содержание остальных веществ приведено в табл. Б.1, Б.2. При этом наиболее биологически активными компонентами, определяющими жизнедеятельность и работоспособность людей, являются кислород и диоксид углерода (табл. В.1 – В.3).

Однако, как показали исследования, в действительности указанные параметры могут оказаться далеко не оптимальными, особенно при воздействии на организм различного рода неблагоприятных факторов [18, 20, 21, 24, 26, 27]. Вполне возможно, что целесообразнее поддерживать концентрацию кислорода выше 21 %, но ниже таких величин, при которых он оказывает токсическое действие на организм. В данном случае речь идет о нормальном давлении в объеме, поскольку даже при его незначительном повышении нормальная объемная концентрация кислорода в состоянии оказать вредное

воздействие, что может выразиться в кислородном отравлении, ожогах дыхательных путей и слизистой оболочки, наркотической реакции человека. Помимо этого рост концентрации кислорода обуславливает повышение риска возгорания в герметично замкнутом объеме.

Содержание другого, не менее важного компонента – диоксида углерода, по мнению большинства исследователей [27 – 31], не должно превышать 0,5 – 1 % при нормальных условиях работоспособности и жизнедеятельности. Повышение его концентрации до 1 – 2 % не ощущается, но может привести к снижению эффективности труда, когда концентрация увеличивается до 3 %, человек испытывает затруднение дыхания, нарушаются обменные процессы. Следует заметить, что полное удаление диоксида углерода из атмосферы герметично замкнутого объема недопустимо. Более подробные сведения о токсичности диоксида углерода для человека можно найти в прил. Г (табл. Г.1, Г.2).

Таким образом, на основе анализа литературных источников [14, 16 – 18, 20 – 22, 24, 26, 27, 29, 30] можно заключить, что концентрация кислорода в атмосфере герметично замкнутого объема может изменяться в достаточно широком диапазоне: от 18 до 24 % (при нормальном давлении), не приводя при этом к нежелательным последствиям; концентрация диоксида углерода не должна превышать 2 %.

В большинстве случаев формирование искусственной атмосферы в герметично замкнутом объекте не вызывает серьезных трудностей, гораздо сложнее сохранить ее постоянство. Необходимость поддержания концентрации всех компонентов атмосферы в заданных пределах связано с тем, что организм человека очень быстро реагирует на любые отклонения в составе воздуха, что в свою очередь приводит к снижению работоспособности, травмам и заболеваниям, а в некоторых случаях к смерти [16, 22, 26, 32 – 34].

Наиболее простым способом, который может быть использован для поддержания постоянного газового состава, является непрерывная вентиляция газовой смесью заданного состава. В подавляющем большинстве случаев такой способ неприемлем, поскольку предполагает значительные запасы компонентов воздушной среды, обеспечивающие длительное время автономии.

Альтернативой является применение специальных технических средств коллективной защиты органов дыхания, осуществляющих восстановление необходимого газового состава воздушной среды, т.е. процесс регенерации воздуха [18, 32, 33, 35 – 38].

Процесс регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме заключается в трех основных функциях:

- удаление диоксида углерода;
- восстановление кислорода;
- удаление вредных примесей.

Удаление диоксида углерода из воздуха [18, 26, 32, 35, 39] может проводиться на основе:

- расходуемых химических поглотителей;
- регенерируемых поглотителей (жидких абсорбентов, твердых аминов, молекулярных сит);
- электрохимических методов;
- криогенного вымораживания.

Обеспечение кислородом [18, 26, 35, 39, 40] может осуществляться:

- с помощью сжатого кислорода или воздуха из баллонов;
- с помощью химически связанного кислорода;
- электрохимическим разложением воды, с удалением диоксида углерода с помощью реакций Боша и Сабатье (рис. Д.1 – Д.2);

- из твердых источников кислорода.

Удаление вредных примесей может осуществляться с применением сорбентов, мембран и т.д. в зависимости от конкретного вещества [15, 41 – 45].

Следует также упомянуть, что из воздушной среды ГЗО необходимо удалять также и влагу, для чего существует ряд способов, наиболее известные из которых – вымораживание (конденсация) и применение поглотителей [26, 36, 45 – 47].

По степени использования веществ окружающей среды средства коллективной защиты органов дыхания делятся на разомкнутые, частично замкнутые и замкнутые [18, 35, 36, 38, 47].

Разомкнутые – обеспечивают поддержание заданных концентраций компонентов газовой смеси за счет имеющихся запасов. При этом кислород может находиться в газообразном, жидком или химически связанном состоянии и подается обычно из источников по мере уменьшения его концентрации в объеме. Поглощение диоксида углерода, влаги и вредных примесей осуществляется в таких системах безвозвратно специальными регенерируемыми и нерегенерируемыми поглотителями (рис. Е.1, Е.2).

Средства, работающие по частично замкнутому циклу, предусматривают частичное использование продуктов жизнедеятельности человека (CO_2 , вода) для получения (восстановления) из них необходимого кислорода. В данном случае запасы этого компонента воздуха значительно ограничены. Поглощение углекислого газа, паров воды и вредных примесей осуществляется в подобных системах специальными регенерируемыми поглотителями, в которых углекислота и влага концентрируются и идут далее на восстановление из них кислорода (рис. Е.3).

СКЗ замкнутого типа предусматривают постоянное восстановление кислорода из углекислого газа и метаболической воды, являющихся продуктами окислительных реакций в живых клетках. Процессы восстановления и удаления веществ и химических соединений при этом осуществляются с применением различных физико-химических методов (рис. Е.4).

Возможность и целесообразность использования того или иного типа зависят от времени автономии, технико-экономических ограничений, целей функционирования изолированного объекта и других параметров, однако в большинстве случаев наиболее сложными в реализации и перспективными являются замкнутые системы, основанные на химических поглотителях и химически связанном кислороде [37, 40, 42].

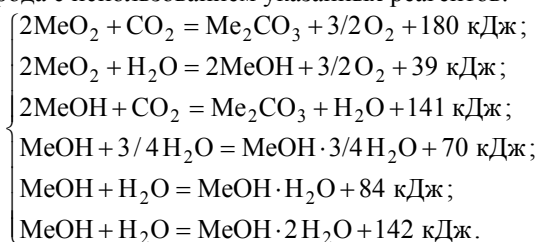
Химически связанный кислород содержится в химическом продукте и выделяется в результате гетерогенной реакции при поглощении из газообразной фазы выдыхаемого человеком углекислого газа. Восстановление кислорода таким способом следует рассматривать как процесс хемосорбции. Хемосорбцией называется процесс адсорбции, при котором

происходит химическое взаимодействие поглощаемого вещества с сорбентом, в результате чего образуется новое химическое соединение [48 – 51].

В процессе хемосорбции продукт обрабатывает послойно, как и в случае физической адсорбции, с той лишь разницей, что рабочий слой не перемещается вдоль газового потока, оставляя за собой уже не работающие слои, а увеличивается по мере отработки продукта, не отрываясь от лобового слоя. В тот момент, когда работающий слой достигает замыкающего, начинается проскок. Отсюда следует, что при работе сорбента существуют два периода: допроскоковый и проскоковый. Длительность работы в проскоковом периоде определяется предельно допустимыми концентрациями поглощаемого вещества на выходе реактора.

Существенной особенностью хемосорбентов является высокая поглотительная способность продукта на единицу массы [38, 40, 48]. Известные хемосорбенты способны поглощать углекислый газ в количестве значительно большем, чем адсорбенты. Именно с этим связано их широкое применение в средствах защиты органов дыхания. В то же время хемосорбционный процесс протекает значительно медленнее, чем процесс адсорбции, так как реакция затрудняется с образованием пленки из продуктов взаимодействия на поверхности твердой фазы.

Широкое применение при создании СКЗ получили хемосорбенты на основе надперекисных соединений щелочных и щелочноземельных металлов (табл. Ж.1, Ж.2). Далее приведены уравнения химических реакций удаления диоксида углерода и влаги и восстановления кислорода с использованием указанных реагентов.



Легко заметить, что при взаимодействии указанных химических соединений с диоксидом углерода и парами воды происходит активное выделение кислорода и тепла, следовательно, имеет место некоторое соотношение величин выделения и поглощения компонентов воздуха, получившее название коэффициента регенерации.

На сегодняшний день в нашей стране и во всем мире наработан огромный инженерный опыт в области получения хемосорбентов, существуют уникальные технологии создания этих химических продуктов с высокими показателями, многие из которых применяются в современных средствах защиты органов дыхания [38].

В настоящее время СКЗ, процесс регенерации воздуха в которых основан на использовании рассматриваемых химических соединений, занимают весомую долю мирового рынка, являются достаточно перспективными, а в некоторых случаях безальтернативными. И сейчас они привлекают все большее внимание исследователей и специалистов, поскольку только подобным образом можно успешно решить проблему обитаемости ГЗО на длительных интервалах времени. Сравнительные характеристики различных типов СКЗ приведены в прил. И (табл. И.1).

На рис. 1.2 приведено схематичное представление СКЗ. Из этой схемы следует, что основными элементами, формирующими заданные характеристики воздушной среды ГЗО, являются реакторы. Их количество, а также последовательность соединения и замещения определяются на стадии проектирования [38].

По выполняемым функциям все реакторы СКЗ делятся на поглотительные, регенеративные и фильтрующие, также выделяют источники кислорода [18, 37, 39, 52]. Поглотительные реакторы работают только на поглощение диоксида углерода, влаги и различных вредных примесей. В отличие от них, регенеративные реакторы выполняют и поглотительные, и восстановительные (по кислороду) функции. Фильтрующие реакторы очищают воздух от различных частиц, содержащихся в нем (пыль, аэрозоли и т.д.), а также от некоторых вредных соединений. Источники кислорода соответственно содержат кислород в сжатом или связанном виде и используются для поддержания концентрации в ГЗО на необходимом уровне.

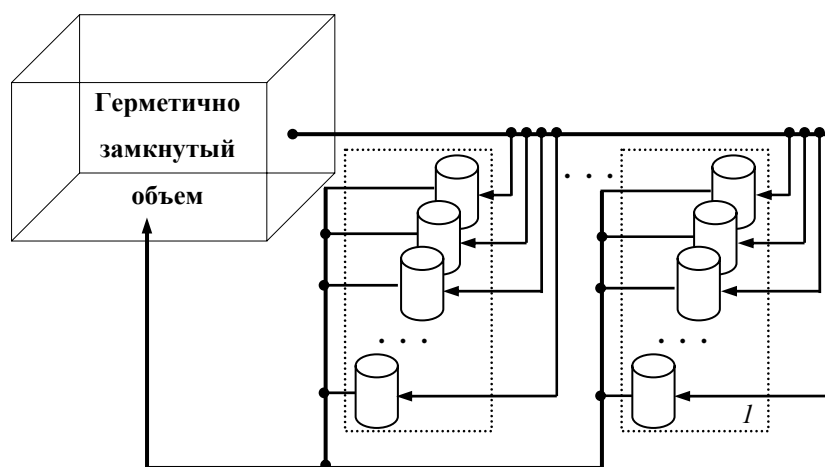


Рис. 1.2. Схематичное представление СКЗ:

1 – блок реакторов $P_1^1, P_2^1, \dots, P_m^1; \dots; N$ – блок реакторов $P_1^N, P_2^N, \dots, P_m^N$

В СКЗ могут использоваться реакторы, которые с течением времени утрачивают свои начальные характеристики – нестационарные, и реакторы, в которых происходит обновление сорбентов – стационарные [18, 37, 39, 52]. Первые нуждаются в физической замене через определенное время, а последние функционируют постоянно, что накладывает соответствующие условия на реализацию химико-технологического процесса регенерации воздуха.

Схема технологической организации ПРВ показывает, каким образом осуществляется удаление из воздушной среды диоксида углерода и проводится ее обогащение кислородом [18, 37, 39].

Раздельная схема регенерации характеризуется использованием различных типов реакторов: поглотительных реакторов для удаления диоксида углерода; источников кислорода (сжатый воздух, генератор кислорода и т.д.) для поддержания его концентрации на заданном уровне. Достоинством данной схемы является простота поддержания заданных концентраций, а основным недостатком – массогабаритные характеристики.

В случае совмещенной схемы регенерации за концентрацию кислорода и диоксида углерода отвечают одни и те же реакторы регенеративного типа, что значительно усложняет управление ПРВ. Данная схема эффективна при близких соотношениях выделения/поглощения кислорода и диоксида углерода реакторами и остальными источниками/стоками веществ в ГЗО, соответственно. В противном случае возникнет необходимость в дополнительных корректирующих данные соотношения средствах (см. полусовмещенная схема регенерации).

Полусовмещенная схема регенерации – за концентрацию кислорода и диоксида углерода отвечают регенеративные реакторы, а поглотительные реакторы дополнительно корректируют концентрацию диоксида углерода. Данная схема является наиболее эффективной, так как при управлении учитывается взаимное влияние поглотительных и регенеративных реакторов.

Выбор той или иной схемы технологической организации ПРВ в ГЗО, а также качественного и количественного состава СКЗ является научно- и трудоемкой задачей, решение которой основывается на детальном анализе исходных данных, требований, условий и ограничений, устанавливаемых техническим заданием на разработку, а также геометрических, технических и функциональных особенностей рассматриваемого герметично замкнутого объекта.

Таким образом, анализ литературных источников в данной предметной области позволяет сделать несколько заключительных выводов:

- защита человека или коллектива людей от воздействия неблагоприятных факторов опасной окружающей среды естественного или искусственного происхождения является в настоящее время актуальной проблемой;
- среди огромного разнообразия средств защиты наиболее эффективны герметично замкнутые объекты со специальным оборудованием, осуществляющим регенерацию внутреннего воздуха;
- наиболее перспективными являются средства коллективной защиты органов дыхания, функционирующие по замкнутому циклу и осуществляющие формирование заданного состава воздуха в результате хемосорбционных процессов;
- СКЗ являются достаточно сложными многокомпонентными системами, создание каждой из которых является практически уникальным процессом и, несмотря на ограниченность и достаточность критериев, которым она должна отвечать, разработка средств коллективной защиты органов дыхания должна проводиться индивидуально для герметично замкнутого объекта в соответствии с конкретными функционально-техническими и геометрическими особенностями.

1.2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОБЛАСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Анализ научной литературы в целях изучения процессов, протекающих при регенерации воздушной среды ГЗО, позволяет отметить высокую сложность исследований вследствие присутствия множества малоизученных факторов, а также значительную стоимость натуральных экспериментов [14, 16, 19]. Эти обстоятельства наряду с необходимостью разработки вопросов управления ПРВ в ГЗО актуализируют задачу математического описания процессов газоформирования воздушной среды ГЗО, в том числе и процесса регенерации воздуха.

Подход к разработке математической модели ПРВ в ГЗО заключается в рассмотрении всех процессов, влияющих на газовый состав воздушной среды, т.е. необходимо исследовать процессы массообмена в ГЗО, источники и стоки основных компонентов воздуха [18, 19].

При математическом описании процессов, влияющих на изменение концентраций компонентов газовой многокомпонентной среды, ГЗО в большинстве работ [53 – 55] принимается как изотермический реактор идеального смешения, полагается, что вентиляция, а также всевозможные источники и стоки компонентов воздуха обеспечивают непрерывное перемешивание воздушной среды ГЗО. В этом случае материальный баланс в ГЗО математически описываются на основе обыкновенных дифференциальных уравнений, приводимых в литературе, посвященной математическому моделированию химико-технологических процессов [49, 52, 56 – 61]:

$$V_{ГЗО} \frac{dC}{dt} = \sum_{i=1}^n G_i C_i - \sum_{j=1}^m G_j C,$$

где $V_{ГЗО}$ – объем ГЗО; G – расход соответствующего компонента C ; n и m – соответственно количество входящих и выходящих в объем потоков.

В случае недопустимости рассмотрения ГЗО в качестве реактора идеального смешения задача математического описания значительно усложняется и приводит к необходимости использовать другие подходы, рассмотренные в ряде работ [49, 52, 62 – 64]. Причем объем и сложность математического описания в этом случае возрастает с уменьшением вводимых допущений и с приближением к реальным условиям.

Характерной особенностью ГЗО является непрерывное взаимодействие коллектива людей с различными техническими средствами. Вместе с тем в литературе отсутствует достаточное количество работ, посвященных математическому моделированию процессов, протекающих в ГЗО, включающих в себя процессы, обуславливаемые как техникой, так и персоналом.

Исторически человек как «система» со своими входами и выходами рассматривался только в медицине [20, 21], в связи с чем обнаружено незначительное количество работ, посвященных математическому моделированию протекающих

в ГЗО процессов, порождаемых персоналом, при этом последний рассматривается как стационарный сток или источник веществ [65 – 67].

В последнее время появился ряд работ [55, 68 – 71], в которых указывается на упрощенность такого подхода. Это обосновывается тем, что при варьировании нагрузки величины потребления кислорода и выделения диоксида углерода человеком могут изменяться в несколько раз, что может привести к непредсказуемым последствиям для систем, созданных на основе стационарного характера ВП свойств человека. Например, Ю. Конеччи и Р.К. Бриз [19, 26] отмечают недостаточность информации по следующим вопросам:

- переносимость человеком различных стрессовых условий в их сочетании;
- переносимость человеком колебаний температуры окружающей среды, особенно в случае резкой разницы между температурой стенок ГЗО и воздушной среды;
- физиологический эффект длительного пребывания в различных искусственно созданных атмосферных условиях;
- скорости образования загрязняющих примесей в воздухе в зависимости от времени использования аппаратуры и материалов в ГЗО.

Исследования, которые проводились в последние десятилетия, в основном, были связаны с экстремальными областями «применения» человека – космос, авиация, подводные работы и т.д., и задачи, которые решались при этом, также отличались для каждого конкретного случая [19, 26]. Поэтому, основываясь на имеющихся данных, сложно получить обобщенную математическую формализацию ВП свойств «нормального» человека в различных условиях жизнедеятельности.

Для получения функциональных зависимостей выделения и поглощения компонентов воздуха, в идеале, необходимо разработать достаточно простые методы, позволяющие составлять такие функции в зависимости от веса, роста, объема легких, общего физического состояния, психологического фактора. А для математического описания ВП характеристик человека, на данных условиях, можно использовать наиболее общую информацию, которая приводится в ряде работ по физиологии человека [20, 21, 24].

В качестве примера на рис. 1.3, 1.4 приведены зависимости нагрузки по CO_2 и O_2 (H – количество выделяемого или поглощаемого вещества в зависимости от времени) от характера выполняемой работы (энергетические затраты) [20, 21, 24]. Соответствующие количественные показатели приведены в прил. К (табл. К.1 – К.3).

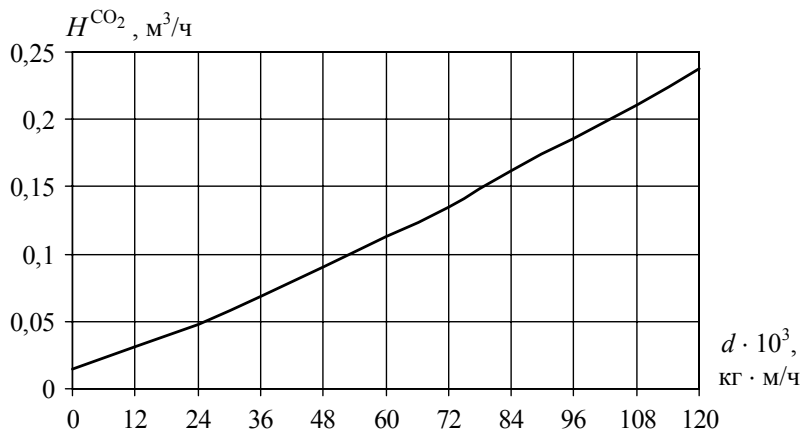


Рис. 1.3. Выделение человеком диоксида углерода в зависимости от режима работы:

H^{CO_2} – количество выделяемого человеком диоксида углерода в единицу времени; d – определяет режим работы, 1 Вт = 360 кг · м/ч

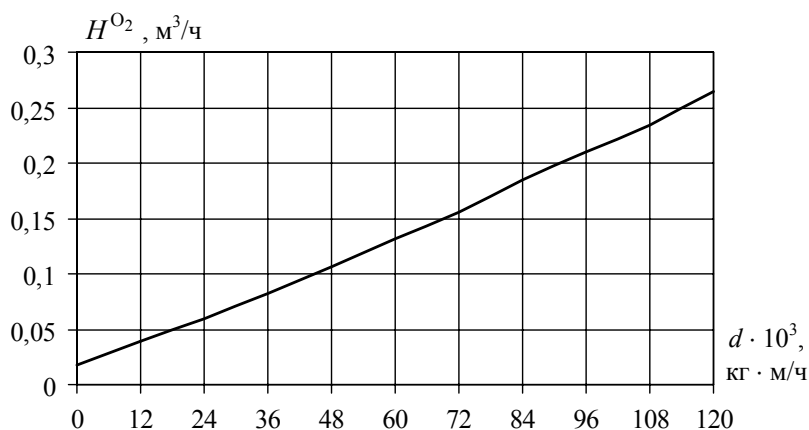


Рис. 1.4. Потребление кислорода человеком в зависимости от режима работы:

H^{O_2} – количество потребляемого кислорода в единицу времени; d – определяет режим работы, 1 Вт = 360 кг · м/ч

При математическом моделировании процессов каждый элемент и связанные с ним процессы должны рассматриваться индивидуально [18]. Например, в [29] изменение концентрации CO_2 в ГЗО объемом V_0 , обусловленное только процессом дыхания, рассматривается как:

$$C_{\text{CO}_2\text{к}} = C_{\text{CO}_2\text{н}} + \frac{bnt}{10^3 V_0} 10^2 = C_{\text{CO}_2\text{н}} + 0,1 \frac{bnt}{V_0} \%,$$

где $C_{\text{CO}_2\text{к}}$ и $C_{\text{CO}_2\text{н}}$ – конечная и начальная концентрации CO_2 , $\text{м}^3/\text{м}^3$; b – среднесуточная нагрузка по CO_2 для одного человека, $\text{м}^3/\text{ч}$; n – количество людей; t – время, ч.

Для кислорода

$$C_{\text{O}_2\text{к}} = C_{\text{O}_2\text{н}} - 0,1 \frac{ant}{V_0} \%,$$

где a – среднесуточная нагрузка по кислороду для одного человека, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Влияние запасов воздуха в ГЗО (система высокого давления и др.) при газообмене с воздушной средой можно рассматривать как сток диоксида углерода и представить в виде:

$$q_b = 10^{-2} v_1 (C_0 - C_6),$$

где q_b – суммарная скорость удаления CO_2 из ГЗО, $\text{м}^3/\text{ч}$; C_6 – концентрация CO_2 в запасах воздуха; C_0 – концентрация CO_2 в ГЗО; v_1 – средняя скорость газообмена между запасами воздуха и ГЗО.

Значение концентрации CO_2 в запасах можно определить из уравнения

$$V_6 \frac{dC_6}{dt} = (v_1 (C_0 - C_6) - v_2 (C_0 - C_a))$$

при условиях: $C_6(0) = C_n$, $C_6(t) = C_6$, где V_6 – объем воздуха в запасах, приведенный к нормальному давлению; v_2 – средняя скорость воздухообмена между запасами воздуха и внешней средой; C_a – концентрация диоксида углерода в наружной атмосфере.

Что касается влияния окислительных процессов органических и неорганических примесей на каталитических и угольных фильтрах, на поверхностях, в воздухе ГЗО и т.д. на концентрации CO_2 и O_2 , то в зависимости от типа окисляемых веществ могут быть получены зависимости выделения CO_2 и потребления O_2 , например, для окисления оксида углерода и органических вредных примесей:

$$q_{\text{к.п}} = 22,4k_t \left(\frac{q_{\text{CO}}}{2M_{\text{CO}}} + \sum_{i=1} \frac{q_{ni} \alpha_{ki}}{M_k} \right);$$

$$q_{\text{у.п}} = 22,4k_t \left(\frac{q_{\text{CO}}}{M_{\text{CO}}} + \sum_{i=1} \frac{q_{ni} \alpha_{yi}}{M_y} \right),$$

где $q_{\text{к.п}}$, $q_{\text{у.п}}$ – расход кислорода и выделение диоксида углерода, соответственно, $\text{кг}/\text{ч}$; q_{CO} и q_{ni} – скорости выделения CO и вредных примесей, $\text{кг}/\text{ч}$; M_{CO} , M_k и M_y – молярные массы CO , O_2 и CO_2 , кг ; α_{ki} – масса кислорода, расходуемая на единицу массы i -й вредной примеси в зависимости от глубины окисления, $\text{кг}/\text{кг}$; α_y – масса CO_2 , образующаяся на единицу массы i -й вредной примеси в зависимости от глубины окисления, $\text{кг}/\text{кг}$.

Реакторы (с принудительной подачей воздушной смеси), применяемые в СКЗ, могут быть как реакторами смешения, так и вытеснения, и в них могут протекать стационарные и нестационарные процессы сорбции, хемосорбции и химические реакции. Сами реакторы, как правило [50, 52, 58, 72], рассматриваются как идеальные, материальный баланс в которых математически описывается уравнениями:

1. Реакторы идеального смешения:

$$V_p \frac{dC}{dt} = \sum_{i=1}^n G_i C_i - \sum_{j=1}^m G_j C + \Psi(t),$$

где V_p – объем реактора, м^3 ; G – расход соответствующего компонента, $\text{м}^3/\text{ч}$; $\Psi(t)$ – функция, описывающая динамику поглощения (выделения) компонента C ; n и m – соответственно количество входящих и выходящих в объем потоков.

2. Реакторы идеального вытеснения:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -w \frac{\partial C}{\partial x} + \Psi(t, x),$$

где C – концентрация компонента воздушной смеси, $\text{м}^3/\text{м}^3$; t – время, ч; $x = \overline{1, L}$ – текущая координата; L – длина реактора, м; w – линейная скорость, $\text{м}/\text{ч}$; $\Psi(t, x)$ – функция, описывающая динамику поглощения (выделения) компонента C .

3. Реакторы диффузионного типа

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - w \frac{\partial C}{\partial x} + \Psi(t, x),$$

где D – коэффициент диффузии.

Наиболее сложным является вопрос определения функции Ψ , которая описывает свойства реагента или (хемосорбента) в реакторах по отношению к концентрации того или иного компонента воздуха. Это связано с тем, что они зависят от протекания сложных процессов на микро- и макроуровне. Задача идентификации параметров таких функций достаточно сложна, так как любое изменение хемосорбента, сырья из которого он изготовлен, технологий изготовления и другого может привести к качественному и/или количественному изменению функций Ψ . Например, данные функции могут быть определены на основе использования литературы, посвященной исследованию адсорбционных, сорбционных и хемосорбционных процессов в адсорбентах, на зерне, в слое шихты, в регенерационных и поглотительных аппаратах с учетом протекания химических реакций и диффузии [65, 73, 74]. В работах В.М. Рамма [75], О. Левеншпиля [76], О.М. Годеса [77], Е.Н. Серпионовой [50], Л.В. Радужкевича [78] и других приводится детальное рассмотрение теоретических и практических вопросов, связанных с методикой определения рассматриваемых функций для процессов адсорбции, абсорбции, хемосорбции, химических реакций, а непосредственно к рассматриваемым процессам в ГЗО относятся работы В.Л. Колина, А.А. Кримштейна и др. [61, 66, 67, 72].

Например, для описания кинетики сорбции, в том числе и хемосорбции диоксида углерода, наибольшее распространение получили уравнения [50, 61, 66, 67, 75, 77, 78]:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta C(a - a_0) \text{ – уравнение типа бимолекулярной реакции;}$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta C \left(1 - \frac{a}{a_0}\right)^\mu \text{ – уравнение типа Трепнела } (\mu = 2);$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta C e^{-\frac{a}{a_0}^\gamma} \text{ – уравнение Зельдовича, Гинского, Еловича;}$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta C \frac{1 - \left(1 - \frac{a}{a_0}\right)^{1/3}}{\left(1 - \frac{a}{a_0}\right)^{1/3}} \text{ – уравнение Бермана и Нагаева;}$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta C \frac{1}{\frac{a}{a_0}} \text{ – уравнение Мельникова и Дубинина.}$$

Здесь a , a_0 – текущая и предельная емкость сорбента, $\text{м}^3/\text{м}^3$; β – кинетический коэффициент, $1/\text{ч}$; C – текущая концентрация поглощаемого вещества в потоке газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; γ , μ – константы.

При рассмотрении сорбционных и ионообменных процессов часто принимается во внимание представление О.М. Годеса и Я.М. Биксона суммарного кинетического коэффициента [74, 77]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \frac{D}{w^2},$$

где β_1 , β_2 – кинетические коэффициенты внешней и внутренней диффузии, $1/\text{ч}$; D – коэффициент продольного переноса, $\text{м}^2/\text{ч}$.

В случае, если подача воздушной смеси на реакторы осуществляется не принудительно, а благодаря некоторым естественным причинам, то рассмотрение процессов, протекающих в реакторах, значительно усложняется. Например, в работах [49, 50, 79] рассматриваются вопросы свободно конвективного переноса воздушного потока в реакторах за счет температуры, обеспечиваемой процессами, протекающими в реакторах.

При решении уравнений сорбции (хемосорбции) в случае идеального вытеснения переходят на характеристики и исключают из дифференциального уравнения dC/dt , что приводит к получению решений типа уравнений Шилова и его модификаций, которые описывают время сорбции или время защитного действия слоя шихты. Например, в [50] для слоя регенеративного продукта при поглощении диоксида углерода указывается на возможность использования уравнения Шилова в виде:

$$\tau = \frac{a_0 L}{C_0 w} - \frac{a_0}{\beta C_0} \varphi(C/C_0), \quad \varphi(C/C_0) = \ln \frac{1 - C/C_0}{C/C_0},$$

где C/C_0 – относительная величина проскока газа за слоем; L – длина слоя, м ; β – кинетический коэффициент, $1/\text{ч}$; w – скорость газового потока, $\text{м}/\text{ч}$; a – емкость, $\text{м}^3/\text{м}^3$; C – концентрация CO_2 ; τ – время сорбции (защитного действия) при $\frac{\beta L}{w} \geq 3$.

Серпионова Е.Н. в работе [50] помимо основных уравнений баланса поглощения вещества при адсорбции приводит примеры критериальных уравнений сорбции и уже известное уравнение Шилова как зависимость времени сорбции (защитного действия) от длины слоя поглотителя: $\tau = KL - \tau_0$, где $\tau_0 = Kh$ – потеря времени защитного действия; $K = \frac{a_0}{wC_0}$

– коэффициент защитного действия; $u = \frac{1}{K}$ – скорость движения фронта сорбции; h – длина неиспользованного слоя.

Помимо этого в [75] рассматриваются уравнения кинетики сорбции как уравнения массопередачи $\frac{\partial a}{\partial t} = \beta \Delta u$, где Δu –

движущая сила процесса, разность между рабочей и равновесной концентрациями поглощаемого вещества в инертной фазе.

В работах [55, 68] указывается на наличие инерционности потоков в СКЗ, что обусловлено транспортной задержкой, а также временем выхода процессов хемосорбции или химических реакций на рабочий температурно-технологический режим. Но при построении математической модели данная особенность исследуемого процесса в большинстве работ опускается исходя из предположения о ее малости и несущественном влиянии на ПРВ. Как известно, в дифференциальном уравнении запаздывания аргумента может привести к существенному изменению его решения. В работах В.С. Торпоцова [80, 81] приведены способы учета рассматриваемой инерционности при исследовании систем регулирования, относящихся к рассматриваемым процессам.

Исходя из общего анализа литературы, посвященной вопросам математического моделирования процессов газоформирования воздушной среды ГЗО, можно сделать несколько основных выводов:

- воздушная среда ГЗО рассматривается, как правило, состоящей из двух основных компонентов – кислорода и диоксида углерода, пары воды также принимаются во внимание, но только не как расходуемое вещество, а как требуемое для протекания некоторых реакций при хемосорбции;
- отсутствуют математические описания значительного количества факторов, влияющих на состав воздуха в ГЗО, например ВП свойств человека в зависимости от его физиологических характеристик, нагрузки и т.д.;
- не рассматриваются способы математического описания конструктивно-геометрических особенностей реакторов СКЗ.

Таким образом, для постановки и решения задач управления ПРВ в ГЗО необходимо осуществление полноценного математического моделирования процесса регенерации воздуха.

1.3. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Актуальность и значимость управления процессами газоформирования воздушной среды ГЗО очевидна [18, 19, 71]. Несмотря на это, количество научных работ, посвященных исследованиям данного вопроса, существенно ограничено. Только в последнее время появились публикации, которые затрагивают некоторые аспекты вопросов управления ПРВ в ГЗО [53 – 55, 82].

На сегодняшний день управление установками регенерации воздуха на запасах химически активных компонентов осуществляется введением в действие в обусловленные временные моменты «свежих» регенеративных или поглотительных элементов [53, 54]. На этом принципе управления, по существу, отработанным в процессе эксплуатации установок, основывается применение существующих систем регенерации во всех ГЗО [18, 19]. Одна установка рассчитана на определенное количество людей, изменение же численности персонала приводит к необходимости изменения количества используемых установок.

Управление составом воздушной среды ГЗО также осуществляется посредством функционирования СКЗ с использованием систем автоматического управления (САУ), созданных на основе полуэмпирических знаний о протекающих процессах газоформирования. Именно этим объясняются недостатки работы такой САУ. Все ошибки и неточности управления корректируются «вручную» в соответствии с экспертной оценкой текущей ситуации в ГЗО [55]. На основе этого можно утверждать, что разработка, выбор и реализация алгоритмов и систем управления ПРВ в ГЗО является весьма актуальной задачей.

В ряде научных работ (А.С. Насонова, В.С. Торпоцова, А.П. Афанасьева, С.М. Дзюбы и др.) [53, 54, 83, 84] рассматриваются некоторые стороны управления процессом газоформирования атмосферы ГЗО БТК (основные состояния функционирования). Например, в [53] приведено решение задачи включения и замены отработавших нестационарных реакторов СКЗ для квазистационарного режима нагрузки по потреблению персоналом кислорода и выделению диоксида углерода в ГЗО для нормального – длительного режима функционирования герметично замкнутого объекта. Результаты этой работы могут быть использованы при управлении ПРВ только на значительном интервале времени функционирования СКЗ с жесткими ограничениями на деятельность персонала.

Вместе с тем, в рассмотренных литературных источниках не приводится комплексный анализ факторов, влияющих на процессы газоформирования и регенерации воздушной среды и зависящих от режимов, целей и состояний функционирования биотехнического комплекса.

Одним из важнейших этапов разработки алгоритмов и систем управления является анализ технологического процесса как объекта управления, для осуществления которого могут быть применены известные алгоритмы, приводимые в литературе [85 – 90]. Базовыми при этом становятся выявление и исследование влияния возмущающих воздействий, выделение из них контролируемых, регулируемых и других, проведение выбора САУ и алгоритма управления при выполнении технологических, технических и экономических требований, проведение анализа запаздываний в объекте управления, системах контроля и САУ, а также формулировка целей функционирования на основе возможных состояний, в которых может находиться объект и соответствующих им задач управления, среди которых можно выделить:

- 1) задачи, относящиеся к поддержанию заданных уровней концентраций компонентов воздушной среды в ГЗО:

$$F = \sum_{j=1}^2 \left(\frac{1}{t} \int_0^t C^j(t) dt - \bar{C}^j \right)^2 < \varepsilon,$$

где $C^j(t)$, \bar{C}^j – соответственно текущее и заданное значение концентрации диоксида углерода и кислорода;

- 2) задачи, относящиеся к поддержанию концентраций компонентов воздушной среды ГЗО в заданных диапазонах:

$$C^j(t) \in [C_H^j, C_B^j],$$

где C_n^j, C_b^j – соответственно нижняя и верхняя граница допустимого диапазона изменения концентрации диоксида углерода и кислорода;

3) задачи, относящиеся к поддержанию концентраций компонентов воздушной среды ГЗО в соответствии с заданным законом:

$$F = \frac{1}{t} \int_0^t \sum_{j=1}^2 (C^j(t) - C_{\text{зад}}^j(t))^2 dt < \varepsilon,$$

где $C_{\text{зад}}^j(t)$ – заданная программа изменения концентрации во времени;

4) задачи, относящиеся к нахождению режимов функционирования СКЗ для целей экономии ресурсов:

$$F = \sum_{j=1}^2 \frac{a^j(t)}{a_0^j} < \delta,$$

где $a^j(t), a_0^j$ – соответственно текущее и предельное содержание вещества в сорбенте или хемосорбенте; δ – заданная степень отработки;

5) комбинированные задачи, возникающие при совместном решении задач управления из классов 1 – 4.

Основа решения поставленных задач управления заключается в выборе алгоритма и структуры системы управления. Этот выбор из бесконечного множества систем и алгоритмов является самостоятельной задачей, при решении которой определяется класс алгоритмов управления, а затем и ряд систем управления на основе технико-экономических ограничений [91 – 93].

Подходы и алгоритмы такого выбора рассматриваются в работах В.И. Бодрова, В.Г. Матвейкина и др. [91, 92]. В работе [92] производится выбор целесообразного класса алгоритмов управления, в то время как в [91] происходит выбор систем управления из одного класса. Совместное использование результатов этих работ позволит провести полный цикл выбора искомой системы и алгоритма управления. При этом указывается, что невозможно выполнить полный поиск с рассмотрением всех возможных систем управления, поэтому предлагается получать улучшающуюся последовательность САУ, последняя из которых по заданным критериям будет наиболее близка к идеальной.

В соответствии с классификацией, проведенной в работе [59], для управления процессом регенерации воздуха в ГЗО может быть применен широкий класс систем управления. На рис. 1.5, а рассмотрена пассивная система управления, характерной особенностью которой является отсутствие в ее составе математической модели. Такая система, получая от объекта сигнал о значении выходных параметров Y и возмущений f , формирует управляющие воздействия U , которые подаются на вход объекта управления.

На рис. 1.5, б показана активная система управления, т.е. система, использующая математическую модель для выработки управляющего воздействия. Система получает лишь сведения о значении возмущающего воздействия f . В результате взаимодействия поискового алгоритма и математической модели вырабатываются управляющие воздействия, которые подаются на вход объекта управления.

Пассивные и активные системы подразделяются на системы жесткие и системы с адаптацией.

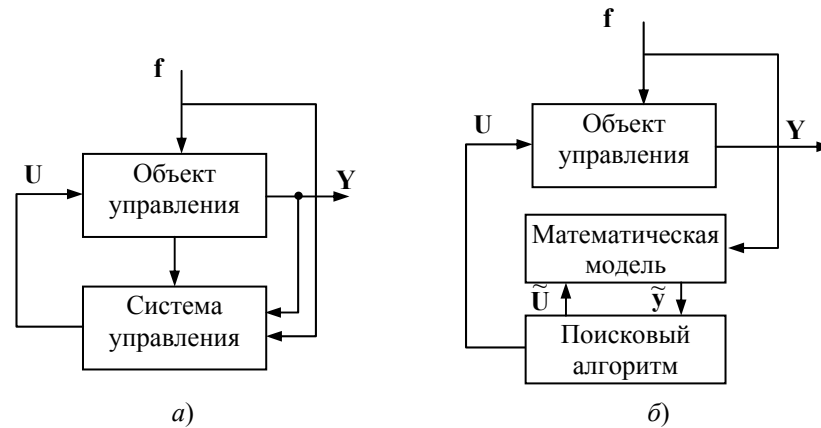


Рис. 1.5. Принципиальная схема пассивной (а) и активной (б) системы управления

Жесткая пассивная система имеет неизменяемый оператор, устанавливающий связь между векторами $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ – выходных параметров, возмущений $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)$ и управляющих воздействий $U = (U_1, U_2, \dots, U_k)$ (рис. 1.6, а).

Адаптивная пассивная система имеет оператор A , меняющийся в зависимости от значений выходных параметров Y и (или) возмущающих воздействий f (рис. 1.6, б).

Жесткой активной является система, у которой имеется неизменная в процессе управления модель. Оператор M устанавливает связь между расчетными значениями управления \tilde{U} , возмущения f и выходными параметрами \tilde{Y} (рис. 1.7, а).

Адаптивная активная система имеет в своем составе математическую модель M , которая меняется в зависимости от значения выходных переменных Y и (или) возмущающего воздействия f (рис. 1.7, б).

В работе [76] применяемые системы в зависимости от цели и задачи управления подразделяются на статические, квазистатические, динамические, оптимизации и удовлетворения.

Исследование САУ для выбора требуемой осуществляется в рамках систем автоматического управления технологическими процессами (АСУТП). При этом в АСУТП существует два основных класса систем управления, первый охватывает управление детерминированными объектами (процессами) [21, 87, 94 – 97], второй – нечеткими, стохастическими [96, 98]. На сегодняшний день наиболее исследованными являются системы первого класса. Практические же результаты применения

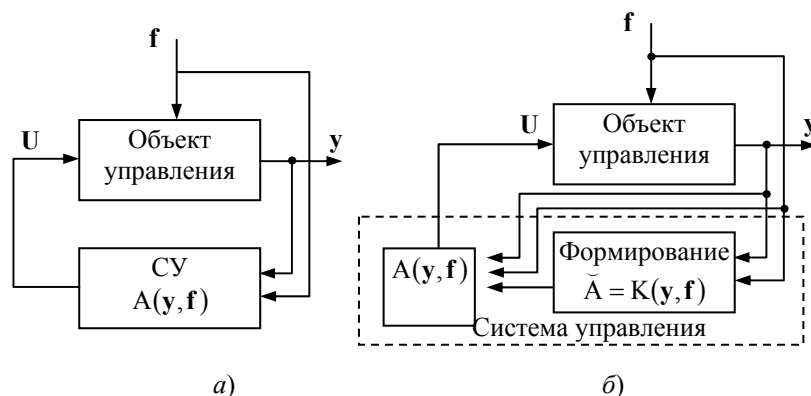


Рис. 1.6. Блок-схема жесткой (а) и адаптивной (б) пассивной системы управления

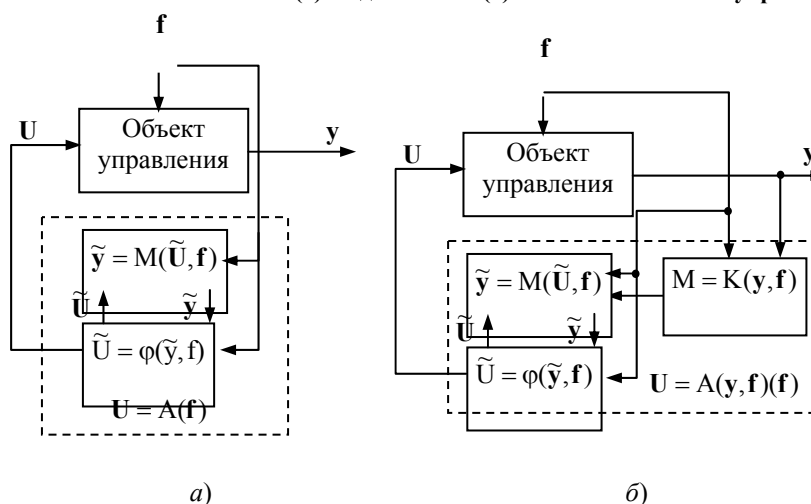


Рис. 1.7. Блок-схема жесткой (а) и адаптивной (б) активной системы управления

таких систем показывают, что их эффективное применение может осуществляться при наличии достаточной априорной информации об объекте, но даже в случае хорошо известных объектов получение полной информации – неосуществимая задача.

Неполнота, стохастичность и неопределенность информации, поступающей с объекта, приводит к необходимости использования второго класса АСУТП. Здесь могут реализовываться как методы адаптивного управления, так и подходы, основанные на аналитико-лингвистических моделях [59, 95]. Однако в настоящее время нет примеров удачного использования АСУТП последнего типа при управлении химико-технологическими процессами.

Если режим функционирования изолированного объекта может изменяться, то существует вероятность появления необходимости корректировать не только настройки и задания регуляторов, но и систему управления, функционально и структурно [90, 92]. Реализация САУ с возможностью проведения таких изменений позволяет приблизиться к системам, именно, адаптивного управления, готовым к реализации всех целей функционирования при любых состояниях объекта с учетом технических ограничений [65, 92] и частично – лингвистических отношений [59, 96].

Реализация систем и алгоритмов управления на объекте может осуществляться с применением специализированных контроллеров или программно-технических комплексов. Существует широчайший спектр контроллеров, применяемых при управлении химико-технологическими процессами, их выбор должен производиться исходя из экономических соображений и достаточности функциональных характеристик.

Таким образом, на основе анализа литературных источников можно сделать вывод, что исследование ПРВ как объекта управления, постановка задач управления, а также выбор и реализация алгоритмов управления являются актуальными, так как:

- очевидна необходимость управления процессами, протекающими в ГЗО, для обеспечения необходимых условий жизнедеятельности;
- используемые подходы, методы, системы и алгоритмы управления не отвечают современным требованиям защиты жизни человека, а также комфорта;
- отсутствуют комплексные работы, посвященные вопросам управления процессами газоформирования воздушной среды ГЗО;
- результаты имеющихся научных работ относятся только к специфическим задачам управления составом воздушной среды ГЗО и не могут являться основой для выбора и физической реализации САУ ПРВ.

1.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ

Среди всех этапов, составляющих производственный цикл, особое положение занимает процесс разработки, поскольку именно здесь формируется до 80 % общих решений при создании изделия. Опыт показывает, что чем дольше проблемы, связанные с выпуском нового изделия, остаются необнаруженными, тем более дорогостоящим становится их устранение в дальнейшем. Решения, принимаемые на ранних стадиях разработки, существенно влияют на весь проект в целом [99, 100].

Повышение качества процессов разработки изделия достигается путем всестороннего компьютерного и математического моделирования, стандартизации методов работы, автоматизации проектных операций, а также совершенствования уровня информационного и документооборота между подразделениями. Поэтому инвестирование в проектирование становится оправданным только с использованием современных информационных технологий, что означает автоматизацию всех процессов разработки изделия [98, 101].

Цель автоматизации – повышение качества проектных работ, снижение материальных затрат, сокращение сроков разработки изделия, снижение числа занятых инженерно-технических работников и, самое главное, замена дорогостоящего и занимающего много времени физического моделирования – математическим [102].

Автоматизация стадии разработки изделия особенно эффективна при комплексном ее характере, т.е. при создании систем, охватывающих весь процесс разработки – от постановки задачи, выбора предпочтительных вариантов построения изделия до проведения имитационных исследований и технологической подготовки производства.

Внедрение комплексных средств автоматизации разработки изделия позволяет [102]:

- повысить качество изделий за счет применения новых методов разработки, ориентированных на использование ЭВМ;
- сократить сроки разработки изделий вследствие уменьшения времени, затрачиваемого на поисковые, расчетные и вспомогательные операции;
- снизить стоимость разработки изделия в результате сокращения числа специалистов по обеспечению и управлению ходом разработки изделий;
- уменьшить стоимость изготовления и эксплуатации изделий посредством снижения затрат на опытно-конструкторские работы, экономии ресурсов в производстве, повышения экономического эффекта при использовании.

Применение автоматизированных средств при этом не изменяет сути процесса разработки изделия. Тем не менее, характер деятельности разработчика существенно меняется. В случае неавтоматизированного, так называемого «ручного» выполнения проектных работ в основном используются экспертные методы исследования и оценки качественных решений разрабатываемого изделия, получаемых на основе инженерного опыта и интуитивных соображений. В процессе автоматизированной разработки на разработчика возлагаются творческо-исследовательские функции (выбор варианта решения, определение структуры, изучение возможного поведения объекта, характера протекания реализуемого химико-технологического процесса), которые трудно формализовать, а его опыт и талант определяют конечный результат. ЭВМ в этом случае выполняет рутинную работу [100, 103]:

- управление необходимыми сведениями, содержащимися в информационном поле;
- численное решение математических задач различного характера;
- обеспечение редактирования текстовой конструкторской документации, создаваемой инженером, и др.

Анализируя существующие методы и процессы разработки средств коллективной защиты органов дыхания, можно заключить, что здесь преобладают традиционные подходы, основанные на инженерном опыте и экспертных оценках, несмотря на применение вычислительной техники. Используемые разработчиками средства автоматизации своей деятельности (текстовый редактор Microsoft Word и графический пакет Autodesk Autocad для создания конструкторской документации, SolidWorks для трехмерного моделирования, программы математических расчетов и др.) имеют индивидуальный, разрозненный характер и приводят к появлению смешанного компьютерно-ручного стиля работы. Таким образом, при достаточно высоких затратах на программно-техническое обеспечение качество проектов, сроки, а также количество специалистов определяются «ручными» этапами, что не допускает максимально рационального использования имеющихся информационных ресурсов и негативно сказывается не только на эффективности стадии разработки, но также на качественных и функционально-технологических характеристиках СКЗ [100].

Анализ российского рынка автоматизированных систем данного класса выявил большое количество разнообразных программных продуктов как зарубежных, так и отечественных разработчиков [100]: Pro/Engineer, Unigraphics, CATIA, EUCLID, I-DEAS, ADEM, Cimatron, Mastercam, Mechanical Desktop и Autodesk Inventor, MicroStation Modeler, Pro/Desktop, SolidWorks, Anvil Express, Solid Edge, Unigraphics Modeling, КОМПАС, БАЗИС, T-FLEX CAD и др. Большинство из них позиционируются как универсальные системы с высокой степенью интеграции отдельных подсистем; обладают мощным графическим ядром 2D- и 3D-моделирования, гибкой подсистемой управления данными и т.д. В то же время подавляющее большинство из них слабо применимо в условиях данной предметной области, не поддерживает математическое моделирование химико-технологических процессов, не обладает возможностями проведения имитационных исследований и испытаний, не затрагивает вопросов определения оптимальных режимов функционирования. Это, а также высокая стоимость приобретения и сопровождения, необходимость перестройки некоторых или всех бизнес-процессов, некорректная или нереализованная «руссификация», слабое соответствие ЕСКД систем зарубежных производителей резко ограничивают возможность внедрения готовой комплексной системы, поскольку велика вероятность получения материальных, трудовых, временных затрат, не соизмеримых с эффектом от внедрения.

В свою очередь проведенный обзор литературных источников и информационных материалов глобальной сети Интернет показал отсутствие сведений о каких-либо специальных разработках в области автоматизации исследований и разработок средств коллективной защиты органов дыхания и входящих в их состав реакторов.

Таким образом, приведенные выше рассуждения однозначно определяют необходимость создания специализированного программно-технического комплекса автоматизации научных исследований и разработки средств коллективной защиты органов дыхания.

Детальная проработка указанного вопроса позволяет сформулировать основные задачи, возлагаемые на автоматизированный комплекс: автоматизированная разработка конфигурации СКЗ с элементами автоматического синтеза, автоматизированная разработка реакторов СКЗ, реализация механизмов имитационных исследований ПРВ в ГЗО и реакторах СКЗ на основе математического моделирования, решение задач управления ПРВ в ГЗО с целью поиска оптимальных режимов функционирования СКЗ, автоматизированное формирование проектной документации, управление данными и документами, используемыми при выполнении проектных работ.

Следует отметить, что реализация данного автоматизированного комплекса должна проводиться в соответствии с наиболее актуальными требованиями современных стандартов в области создания информационных систем, приоритетными из которых являются стандарты информационной поддержки жизненного цикла изделия (ИПИ, отечественный аналог CALS-стандартов).

Анализ информационных материалов как опубликованных в традиционной печати, так и в сети Интернет [104 – 107], позволил выявить ряд основных аспектов, определяющих эффективность применения CALS-технологий. К их числу относятся [108]:

- компьютерная автоматизация, позволяющая повысить производительность основных процессов и операций создания информации;
- информационная интеграция процессов, обеспечивающая совместное и многократное использование одних и тех же данных;
- переход к безбумажной организации процессов и применение новых моделей их организации.

Таким образом, разработка автоматизированного комплекса на основе CALS-стандартов и с учетом регламентируемых ими технологий позволит создать достаточно эффективный и, главное, жизнеспособный информационный ресурс, обладающий потенциалом дальнейшего развития и интеграции в корпоративную автоматизированную систему управления предприятием и позволяющий вывести стадию разработки изделия на качественно новый уровень.

1.5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Критический анализ современного состояния в области управления процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме позволил обнаружить незначительное число научных работ, посвященных данному вопросу, что позволяет сделать вывод о его актуальности и недостаточной проработанности. Вместе с тем, предлагаемые ранее подходы к управлению ПРВ в ГЗО обладают рядом существенных недостатков, важнейший из которых заключается в рассмотрении биотехнического комплекса как квазистационарной системы, функционирующей в нормальном состоянии на длительных интервалах времени. Следовательно, разработанные на основе этих подходов алгоритмы и системы управления ПРВ не учитывают динамический характер процессов газоформирования воздушной среды ГЗО и не способны к формированию адекватных управляющих воздействий с целью поддержания наиболее комфортных условий жизнедеятельности человека на всей продолжительности функционирования БТК с учетом возможных переключений между различными состояниями.

Таким образом, целью работы является разработка алгоритма и систем оптимального управления процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- математического моделирования процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме, осуществляемого в реакторах средств коллективной защиты. При решении данной задачи требуется: выявить источники/стоки основных компонентов воздуха с последующей математической формализацией выделительно-поглотительных процессов; разработать математическое описание процесса регенерации воздуха, осуществляемого в реакторах средств коллективной защиты с многослойной загрузкой шихты и сложной геометрией; определить методы, сформировать и практически реализовать алгоритм решения уравнений математической модели процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме; с использованием экспериментальных данных осуществить идентификацию параметров разработанной математической модели и установить степень ее адекватности реальному процессу;
- анализа процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме как объекта управления с целью определения управляемых величин, выявления управляющих и возмущающих воздействий. При решении этой задачи необходимо с использованием построенной математической модели реализовать вычислительный эксперимент, позволяющий изучить влияние функционально-технологических параметров средств коллективной защиты и биотехнического комплекса на процессы газоформирования воздушной среды, а также определить возможные принципы управления;
- разработки алгоритма и системы оптимального управления процессом регенерации воздуха на множестве состояний функционирования биотехнического комплекса, в рамках чего потребуются классифицировать его возможные состояния, для каждого из которых необходимо определить цель управления, осуществить постановку задач оптимального управления, выбрать методы и сформировать алгоритмы их решения. В дальнейшем в соответствии с найденными законами управления необходимо разработать структуры систем оптимального управления процессом регенерации воздуха;
- создания программно-технического комплекса автоматизации научных исследований и разработки средств коллективной защиты органов дыхания, включающего автоматизированные средства разработки конфигурации средств коллективной защиты и входящих в их состав реакторов, математического моделирования и имитационных исследований процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме и в реакторах средств коллективной защиты, нахождения оптимальных режимов функционирования регенеративного оборудования. Вместе с тем, для функционирования ком-

плекса требуется разработать необходимый сегмент единого информационного пространства, а также определить и реализовать необходимый состав программно-технического обеспечения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Комплексные исследования процесса регенерации воздуха, осуществляемого реакторами СКЗ, факторов, влияющих на характер его протекания, и, особенно, вопросов управления ПРВ в ГЗО, безусловно, должны проводиться на основе адекватной математической модели. Анализ существующих вариантов математического описания показал, что в большинстве случаев не учитывается ряд существенных аспектов либо присутствует излишняя, с точки зрения выполняемой работы, сложность. Таким образом, вполне обоснована необходимость реализации всех этапов математического моделирования ПРВ с формализацией известных факторов, активно участвующих в процессах газоформирования воздушной среды ГЗО.

На первом этапе построения математической модели необходимо определить общую структуру и класс уравнений, которыми предполагается описать ПРВ, т.е. решить так называемую задачу структурной идентификации.

Следующий этап предполагает численное решение полученной математической модели. Он включает в себя выбор эффективных методов и подходов решения и их реализацию на ЭВМ.

Далее необходимо определить параметры, входящие в уравнения математической модели. Здесь возникает задача нахождения числовых значений неизмеряемых параметров по имеющимся экспериментальным данным, т.е. по значениям измеряемых переменных (откликам). Данная задача называется задачей параметрической идентификации.

Построенная на основе физических представлений модель должна верно, качественно и количественно описывать свойства ПРВ, т.е. она должна быть адекватна моделируемому процессу. Для проверки адекватности математической модели реальному процессу необходимо сравнить результаты измерений на объекте в ходе процесса с результатами численного решения математической модели в идентичных условиях.

2.1. СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

2.1.1. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ БИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Совокупность в объекте технологического оборудования и коллектива людей в работе [55] предложено называть биотехническим комплексом (БТК). Основными функциями рассматриваемого БТК являются защита людей от воздействия внешней среды и обеспечение необходимых условий жизнедеятельности посредством использования элементов систем жизнеобеспечения, в частности средств регенерации воздуха.

Рассматривая ПРВ в ГЗО с применением методологии системного подхода, в БТК можно выделить две основные взаимодействующие подсистемы – «биологическую» (БП), представляющую собой совокупность всего персонала (коллектива людей), и «техническую» (ТП), в которую входят технические средства регенерации воздуха – СКЗ, объем, ограничивающий пространство обитания БП, различное технологическое нерегенеративное оборудование (рис. 2.1) [55, 59, 60].

Взаимодействие между биологической и технической подсистемами осуществляется на уровне выделения и поглощения веществ. Активное влияние (случайное физическое вмешательство в ПРВ, т.е. изменение характера функционирования оборудования, разрушение, нарушение герметичности ГЗО и т.д.) персонала на процессы, происходящие в ТП, не рассматривается.

Подход к построению математической модели ПРВ в ГЗО заключается в рассмотрении основных элементов БТК, оказывающих влияние на состав воздушной смеси, т.е. необходимости исследования происходящих в ГЗО процессов массообмена, изучения возможных источников и стоков компонентов воздушной смеси [109].

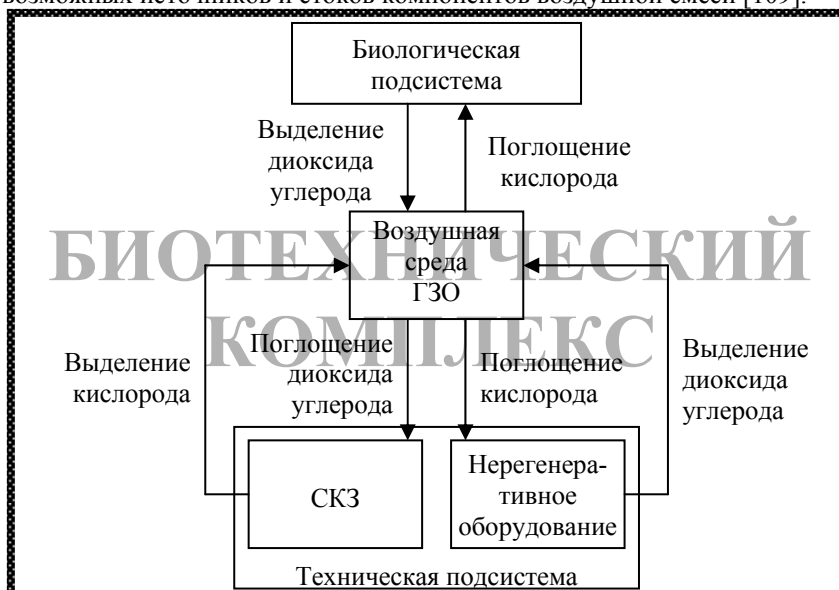


Рис. 2.1. Схема взаимодействия подсистем БТК

2.1.2. СОСТАВЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

При математическом описании процессов, протекающих в герметично замкнутом объеме и влияющих на состав воздушной смеси, введем следующие допущения:

- рассматриваемый герметично замкнутый объем является реактором идеального смешения в связи с тем, что:
 - а) величина расхода воздушной смеси на реакторах соразмерна величине ГЗО, и ее полная замена происходит менее чем за два-три часа, т.е. кратность вентиляции объема высока;
 - б) система вентиляции, являющаяся неотъемлемым элементом ГЗО, обеспечивает непрерывное перемешивание воздуха;
 - отсутствует химическое взаимодействие компонентов воздушной среды ГЗО. Данное допущение определяет, что любое изменение концентраций связано с поглощением или выделением веществ элементами, находящимися в ГЗО [18];
 - изменение состава воздуха в ГЗО не приводит к существенному изменению давления в ГЗО и соответственно свойств воздушной смеси. Таким образом, некоторое количество выделившегося или поглощенного вещества в ГЗО должно быть скомпенсировано БП или ТП.

С учетом принятых допущений уравнения материального баланса процесса регенерации воздуха представляют систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$V \frac{dC^j(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n G_i(t) \left(C_i^j(t, x) \Big|_{x_i=L_i} - C^j(t) \right) \pm \sum_{k=1}^m O_k^j(t) \pm \sum_{s=1}^b H_s^j(t); \quad (2.1)$$

$$C^j(0) = C_0^j, \quad (2.2)$$

где V – величина ГЗО, m^3 ; $G_i(t)$ – объемный расход воздушной смеси через i -й реактор, $m^3/ч$; $C^j(t)$ – концентрация j -го компонента воздуха, m^3/m^3 ; $C_i^j(t, x) \Big|_{x_i=L_i}$ – концентрация j компонента на выходе из реактора i , m^3/m^3 ; L_i – длина i -го реактора, m ; $O_k^j(t)$ – количество выделяемого/поглощаемого вещества j источником/стоком k , $m^3/ч$; $H_s^j(t)$ – количество выделяемого/поглощаемого вещества j человеком, $m^3/ч$; $i = \overline{1, n}$, где n – количество реакторов; $j = \overline{1, 2}$, где 1 – диоксид углерода, 2 – кислород; $k = \overline{1, m}$, где m – количество источников и стоков ТП, не относящихся к регенеративному оборудованию; $s = \overline{1, b}$, где b – количество человек в ГЗО.

Первый член правой части системы уравнений (2.1) характеризует стоки и источники вещества j в реакторах СКЗ, второй – остальные стоки и источники в ГЗО, а третий – описывает поглощение (выделение) веществ персоналом.

2.1.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЫДЕЛИТЕЛЬНО-ПОГЛОТИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

БТК имеют характерную особенность, присущую только системам, находящимся в постоянном взаимодействии с человеком. Человек или характеризующие его выделительно-поглощительные (ВП) свойства и являются этой особенностью, во многом определяющей характер функционирования БТК в целом [16, 19, 36]. Это свидетельствует о том, что анализ и формирование математического описания воздействия биологической подсистемы на воздушную среду ГЗО является одним из ключевых этапов формирования математической модели ПРВ.

Основной задачей людей, находящихся в объеме, является выполнение некоторой работы, характер которой не связан с процессом регенерации, поэтому они будут рассматриваться как источники диоксида углерода и стоки кислорода. Как правило, при функционировании БТК в нормальных условиях все виды работ строго регламентированы по времени и по количеству вовлеченного в них персонала, следовательно, имея некую спецификацию выполняемых работ и соответствующих им обобщенных нагрузок, можно получить динамику изменения ВП свойств. Основной задачей в этом случае становится количественное определение нагрузки, характерной для выполняемой работы в заданных условиях.

Расчет потребления кислорода в зависимости от нагрузки для одного человека можно проводить по формуле, которая является аппроксимацией графика на рис. 2.2:

$$H^{O_2} = \begin{cases} m < 85, & S(0,002154d + 0,0306) \cdot 0,06; \\ m \geq 85, & S(0,002154d + 0,0306 + (m - 85) \cdot 0,04) \cdot 0,06, \end{cases}$$

где m – масса человека, $кг$; S – коэффициент, характеризующий пол человека, для мужчин он равен 1, для женщин 0,8 – 0,7. Можно также учитывать возраст, накладывая соответствующее ограничение на величину максимального потребления кислорода (табл. Л.1).

Количество выводимого из организма диоксида углерода при дыхании можно рассчитывать по формуле:

$$H^{CO_2} = \Xi(d)H^{O_2},$$

где $\Xi(d)$ – параметр, характеризующий соотношение выделенного диоксида углерода к поглощенному кислороду за единицу времени в зависимости от режима работы (рис. 2.2).

Следует отметить, что в модельных случаях и при проведении предварительных расчетов для большого количества людей (>10) и длительного (>10 суток) функционирования ПРВ в ГЗО можно использовать усредненные характеристики человека [18], при этом принимается, что одним человеком выделяется в условиях ГЗО в среднем $(20 \dots 30) \cdot 10^{-3} m^3/ч$ диоксида углерода.

Анализ процессов разработки СКЗ и литературных источников показал, что в большинстве случаев индивидуальные ВП характеристики каждого человека не учитываются, а используются обобщенные сведения об области применения СКЗ, количестве человек и выполняемых ими работах, что выражается в суммарных величинах потребления кислорода и выделения диоксида углерода в заданном интервале времени.

При рассмотрении технической подсистемы, как было указано выше, выделяют различное технологическое оборудование, технические средства регенерации воздуха и непосредственно сам объем.

Исходя из анализа, проведенного в главе 1, известно, что технологическое оборудование способно поглощать и выделять кислород, диоксид углерода, а также различные примеси. Для учета их влияния на состав воздушной среды в каждом конкретном ГЗО необходимо проводить соответствующий анализ с целью выявления, математического описания и идентификации источников и стоков выделяемых и поглощаемых веществ.

Поэтому влияние какого-либо нерегенеративного оборудования не имеет решающего значения, в связи с чем при построении математической модели ПРВ в ГЗО соответствующие нагрузки можно указать в обобщенном виде либо не учитывать.

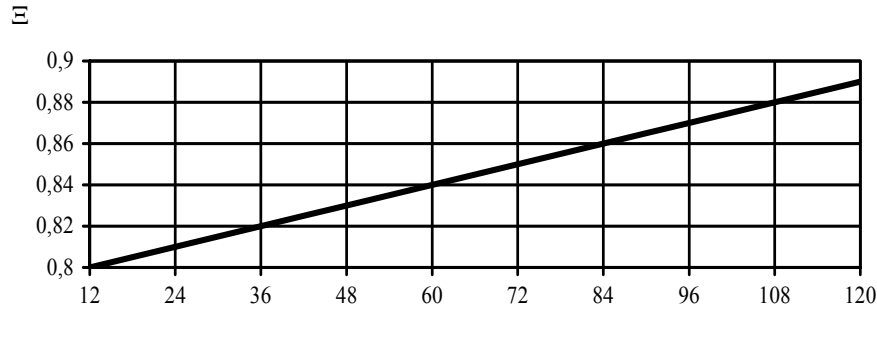


Рис. 2.2. Соотношение выделенного диоксида углерода к поглощенному кислороду за единицу времени в зависимости от режима работы

Большинство изолирующих аппаратов, предназначенных для защиты органов дыхания человека, работают, поглощая углекислый газ, выделяя кислород. Химически связанный кислород содержится в регенеративном продукте и выделяется в результате гетерогенной реакции при поглощении из газообразной фазы выдыхаемого человеком углекислого газа в присутствии паров воды. Восстановление кислорода таким способом следует рассматривать как процесс хемосорбции [110, 111].

Сорбционные и хемосорбционные процессы, протекающие в реакторах СКЗ, базируются на законах динамики сорбции. Ее задачами являются установление степени отработки сорбционной емкости в данном сечении слоя в любой заданный момент времени, определение концентрации поглощаемого вещества в газовой смеси, заполняющей свободное пространство между гранулами, в зависимости от условий проведения процесса и др. Она рассматривает пространственно-временные распределения компонентов между газовой и твердой фазами, возникающие при перемещении этих фаз относительно друг друга [50, 72, 76, 112].

Математическое описание динамики сорбции представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных для каждого поглощаемого/выделяемого вещества.

На основании анализа экспертных сведений и экспериментальных данных, а также детального изучения рассматриваемого химико-технологического процесса при формировании системы уравнений математической модели ПРВ в соответствии с возможностями практического расчета примем ряд допущений:

- в реакторах СКЗ происходит поглощение только диоксида углерода и восстановление только кислорода;
- подвижная фаза несжимаема;
- протекающий в реакторах СКЗ процесс регенерации воздуха является изотермическим;
- реакторы СКЗ являются реакторами диффузионного типа, т.е. помимо основного направления газового потока в реакторе присутствует диффузионное перемешивание по длине (радиальное перемешивание не рассматривается, поскольку имеет место в случае малого отношения длины к диаметру и большой поперечной неравномерности скоростей потоков).

Учитывая, что концентрации веществ в газовой и твердой фазах являются функциями времени и координаты, запишем уравнения материального баланса в общем виде для каждого интересующего нас компонента воздушной смеси и любого реактора СКЗ [50, 56, 77, 112]:

$$\frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i^j(t, x)}{\partial x^2} - \omega_i \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} + \Psi_i^j(t, x); \quad (2.3)$$

$$C_i^j(0, x) = C_0^j, C_i^j(t, x)|_{x=0} = C^j(t), \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_i} = 0, \quad (2.4)$$

где $\Psi_i^j(t, x) = -\frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t}$ – находится из уравнения кинетики сорбции; $\omega_i = \frac{G_i}{F_i}$ – линейная скорость потока в реакторе i , м/ч; G_i – объемный расход воздушной смеси через реактор i , м³/ч; $F_i = v_i F_{\Sigma}$ – часть площади поперечного сечения реактора i , не занятая сорбентом (хемосорбентом), м²; v_i – порозность; F_{Σ} – площадь поперечного сечения реактора i , м²; D_i – коэффициент продольной диффузии, м²/ч; $C_i^j(t, x)$ – концентрация в газовой фазе компонента j в реакторе i , м³/м³; $C_i^j(0, x)$ – начальная концентрация в газовой фазе компонента j в реакторе i , м³/м³; C_0^j – исходная концентрация компонента j в ГЗО, м³/м³; $C_i^j(t, x)|_{x=0}$ – концентрация компонента j на входе реактора i , м³/м³; $C^j(t)$ – концентрация компо-

нента j в воздушной среде ГЗО, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $a_i^j(t, x)$ – текущая концентрация компонента j в сорбенте реактора i ; $x \in [0, L_i]$ – текущая координата по длине реактора, м ; L_i – длина i -го реактора, м .

Следует отметить, что в большинстве случаев рассматривается стационарный поток воздушной смеси через реакторы СКЗ, в связи с чем необходимо провести исследование факторов, влияющих на линейную скорость потока – ω .

Наиболее очевидной здесь является прямая зависимость линейной скорости от объемного расхода смеси, подаваемой вентилятором на вход реактора, т.е. $\omega_i = \omega_i(G_i(t))$. Следующим, не менее очевидным, фактором является изменение площади поперечного сечения для реакторов со сложной геометрией, что подтверждается уравнением $\omega_i F_i(x) = \text{const}$, таким образом $\omega_i = \omega_i(F_i(x))$.

Наряду с вышеназванными факторами существует неявная зависимость линейной скорости от изменения состава воздушной смеси в результате протекающих в реакторе сорбционных (хемосорбционных) процессов, что следует из уравнения Бернулли:

$$\frac{dP_i}{\gamma} + \frac{1}{2} d\left(\frac{\omega_i^2}{g}\right) = 0,$$

где dP_i – изменение давления воздушной смеси в реакторе, Па; $\gamma = \rho g$ – удельный вес; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Тогда

$$d(\omega_i^2) = -2 \frac{dP_i}{\rho}. \quad (2.5)$$

В соответствии с законом Дальтона давление газовой смеси равно совокупности парциальных давлений, входящих в ее состав газов, следовательно, его изменение будет вызвано изменением парциальных давлений, т.е.:

$$dP_i = \sum_{j=1}^2 dp_i^j, \quad (2.6)$$

где dp_i^j – парциальное давление газа j .

В свою очередь из уравнения Клапейрона – Менделеева видно, что изменение парциального давления связано с изменением количества вещества:

$$dp_i^j = d\theta_i^j \frac{RT}{F_i(x)dx}, \quad (2.7)$$

которое зависит от концентрации

$$\theta_i^j = C_i^j \sum_{z=1}^{\zeta} \theta_i^z,$$

где θ_i^j – количество вещества, моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/Кмоль; $T = \text{const}$ – температура, имеет постоянное значение вследствие сделанного допущения, К; ζ – количество входящих в воздушную смесь газов.

Следовательно, зависимость линейной скорости воздушного потока в реакторе от изменения концентраций диоксида углерода и кислорода действительно имеет место, т.е. $\omega_i = \omega_i(C_i^{\text{CO}_2}(t, x), C_i^{\text{O}_2}(t, x))$.

Таким образом, были определены основные факторы, влияющие на линейную скорость потока воздушной смеси в любой точке реактора, т.е. $\omega_i(t, x) = \omega_i(G_i(t), F_i(x), C_i^{\text{CO}_2}(t, x), C_i^{\text{O}_2}(t, x))$.

Уравнение кинетики сорбции, показывающее количество поглощаемого вещества из газового потока в единицу времени единицей объема поглотителя, в общем случае имеет вид [65, 67, 113]:

$$\frac{da}{dt} = \beta(C - C^*),$$

где $a = f(C, T)$ – концентрация поглощенного вещества в поглотителе, или количество вещества, адсорбированное весовой или объемной единицей поглотителя; C – концентрация поглощаемого вещества в газовой фазе, соприкасающейся с поглотителем; T – температура процесса; β – кинетический коэффициент, показывающий, какое количество вещества (кг) передается из газового потока объемом 1 м^3 в слой поглотителя за 1 с при разности концентраций $1 \text{ кг}/\text{м}^3$ (разность концентраций должна быть между содержанием поглощаемого вещества в газовом потоке и концентрацией газа, находящегося в равновесии с поглощенным веществом); C – текущая концентрация поглощаемого вещества в потоке газа; C^* – равновесная концентрация, равная текущей величине сорбции.

При рассмотрении многослойных реакторов с комбинированием различных сорбентов (хемосорбентов) уравнение кинетики сорбции для любой точки реактора и любого типа сорбента можно записать в виде:

$$\frac{\partial a^j(t, x)}{\partial t} = (-1)^{j+1} \beta_\chi^j(x) C^{\text{CO}_2}(t, x) \Phi_\chi(a^j(t, x), a_{\chi 0}^j(x)), \quad (2.8)$$

$$x \in \left[L - \sum_{i=\chi}^{hp} l_i; \sum_{i=1}^{\chi} l_i \right],$$

$$a^{\text{CO}_2}(0, x) = 0, \quad a^{\text{O}_2}(0, x) = a_{\chi 0}^{\text{O}_2}, \quad (2.9)$$

где hp – количество используемых сорбентов (хемосорбентов); χ – номер «текущего» сорбента (хемосорбента),

$\chi = \overline{1, hp}$; l_χ – толщина слоя сорбента (хемосорбента) χ , м; $\Phi_\chi(a^j(t, x), a_{\chi 0}^j(x))$ – зависимость текущей и предельной емкостей сорбента (хемосорбента), определяемая его видом.

Таким образом, система уравнений динамики сорбции с учетом (2.3) – (2.9) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i^j(t, x)}{\partial x^2} - \omega_i(t, x) \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} - \frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t}; \\ d(\omega_i^2) = -2 \frac{dP_i}{\rho}, \quad dP_i = \frac{RT}{F_i(x) dx} \sum_{j=1}^2 d\theta_i^j, \quad \theta_i^j = C_i^j \sum_{z=1}^{\xi} \theta_i^z; \\ \omega_i(t, x) = \omega_i(G_i(t), F_i(x), C_i^{\text{CO}_2}(t, x), C_i^{\text{O}_2}(t, x)); \\ C_i^j(0, x) = C_0^j(x), \quad C_i^j(t, x)|_{x=0} = C^j(t), \quad \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_i} = 0; \\ \frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t} = (-1)^{j+1} \beta_{i\chi}^j(x) C_i^{\text{CO}_2}(t, x) \Phi_{i\chi}(a_i^j(t, x), a_{i\chi 0}^j(x)); \\ x \in \left(L_i - \sum_{i=\chi}^{hp_i} l_{i\chi}; \sum_{i=1}^{\chi} l_{i\chi} \right], \quad a_i^{\text{CO}_2}(0, x) = 0, \quad a_i^{\text{O}_2}(0, x) = a_{i\chi 0}^{\text{O}_2}; \\ i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, 2}, \quad \chi = \overline{1, hp_i}. \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Окончательное формирование математической модели процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме заключается в сведении в единую систему уравнений рассмотренных выше математических описаний процессов газоформирования воздушной среды ГЗО. С учетом сделанных ранее допущений получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} V \frac{dC^j(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n G_i (C_i^j(t, x)|_{x=L_i} - C^j(t)) \pm \sum_{k=1}^m O_k^j(t) \pm \sum_{s=1}^b H_s^j(t); \\ \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i^j(t, x)}{\partial x^2} - \omega_i(t, x) \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} - \frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t}; \\ d(\omega_i^2) = -2 \frac{dP_i}{\rho}, \quad dP_i = \frac{RT}{F_i(x) dx} \sum_{j=1}^2 d\theta_i^j, \quad \theta_i^j = C_i^j \sum_{z=1}^{\xi} \theta_i^z; \\ \omega_i(t, x) = \omega_i(G_i(t), F_i(x), C_i^{\text{CO}_2}(t, x), C_i^{\text{O}_2}(t, x)); \\ C^j(0) = C_0^j, \quad C_i^j(0, x) = C_0^j(x), \quad C_i^j(t, x)|_{x=0} = C^j(t), \quad \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_i} = 0; \\ \frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t} = (-1)^{j+1} \beta_{i\chi}^j(x) C_i^{\text{CO}_2}(t, x) \Phi_{i\chi}(a_i^j(t, x), a_{i\chi 0}^j(x)); \\ x \in \left(L_i - \sum_{i=\chi}^{hp_i} l_{i\chi}; \sum_{i=1}^{\chi} l_{i\chi} \right], \quad a_i^{\text{CO}_2}(0, x) = 0, \quad a_i^{\text{O}_2}(0, x) = a_{i\chi 0}^{\text{O}_2}; \\ i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, 2}, \quad \chi = \overline{1, hp_i}. \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Таким образом, в результате проведенных исследований построена математическая модель процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме, позволяющая решать широкий круг задач, в том числе проведения имитационных исследований, постановки и решения задач управления, разработки алгоритмов и систем управления. Важнейшим достоинством представленной математической модели является возможность моделирования и исследования ПРВ, реализуемого ранее не существующими реакторами СКЗ с многослойной разнородной загрузкой шихты и сложной геометрией. Не менее значимое свойство модели заключается в разработке прикладных средств, в соответствии с ее особенностями, в целях создания и исследования реакторов с любым коэффициентом регенерации (который показывает отношение выделенного кислорода к поглощенному диоксиду углерода), используя различные комбинации сорбентов (хемосорбентов) и принципиально новые геометрические решения.

2.2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Вследствие разнородности уравнений математической модели ПРВ в ГЗО, а также наличия нелинейных граничных условий получение аналитического решения достаточно сложно, если вообще возможно. Следовательно, для расчета полученной математической модели необходимо использовать численные методы.

По выбору метода расчета представленных систем уравнений каких-либо общих рекомендаций не существует. На ранних периодах практического решения систем дифференциальных уравнений применялись в основном вариационные и

другие методы, где приближенное решение получается в виде некоторой аналитической формулы. В дальнейшем, когда наиболее актуальными для решения стали задачи аэро- и гидродинамики, подобные методы стали практически неприменимыми, вследствие чего широкое продвижение получили сеточные методы решения дифференциальных уравнений [114]. В настоящее время эти методы наряду с вариационно- и проекционно-разностными (метод конечных элементов) являются наиболее распространенными. При решении задач сеточными методами получается совокупность приближенных значений решения в некоторой конечной системе точек. В случае необходимости можно построить формулу (например, интерполяционную) для приближенного представления решения во всей области.

Таким образом, для решения системы уравнений (2.11) как универсальный и эффективный метод решения задач математической физики был выбран метод конечных разностей или метод сеток. Он позволяет сводить приближенное решение дифференциальных уравнений к решению систем алгебраических уравнений.

Решение обыкновенных дифференциальных уравнений, входящих в состав математической модели, будем осуществлять с использованием метода Рунге–Кутты четвертого порядка точности. В случае с дифференциальными уравнениями в частных производных осуществляется их аппроксимация явной разностной схемой, после чего получаемая система линейных алгебраических уравнений решается методом Зейделя [115].

Алгоритм решения системы уравнений (2.11) следующий.

Шаг 1. Задаются исходные данные:

а) параметры БТК, в том числе величина ГЗО V ; параметры воздушной среды – вектор начальных концентраций кислорода $C_0^{CO_2}$ и диоксида углерода $C_0^{CO_2}$; количество источников/стоков основных компонентов воздуха, кроме регенеративного оборудования (b – источники/стоки БП, m – источники/стоки ТП); величина нагрузки для каждого источника/стока по каждому компоненту воздуха (H_s^j , $s = \overline{1, b}$ – для БП; O_k^j , $k = \overline{1, m}$ – для ТП); время автономии T_a ;

б) параметры СКЗ – количество n и типы реакторов, функционирующих одновременно;

в) геометрические параметры каждого реактора СКЗ, в том числе длина L_i и площадь сечения $F_i(x)$ реактора, $i = \overline{1, n}$; количество химических продуктов, содержащихся в i -м реакторе hp ; толщина каждого слоя химического продукта l_{χ_i} , $\chi = \overline{1, hp}$;

г) свойства химических продуктов – массообменные и кинетические коэффициенты $a_{\chi 0}^{CO_2}$ и $\beta_{\chi}^{CO_2}$ для всех типов реакторов и $a_{\chi 0}^{O_2}$ и $\beta_{\chi}^{O_2}$ для регенеративных реакторов, а также зависимость текущей и предельной емкостей сорбента (хемосорбента) – $\Phi_{\chi}(a^j(t, x), a_{\chi 0}^j(x))$;

д) значение или функциональная зависимость объемного расхода через каждый реактор $G_i(t)$;

е) параметры расчета – шаги дискретизации по времени τ и по длине реактора h ;

ж) критерии остановки расчета – превышение величины проскока $\varepsilon = |C^{BX} - C^{BXX}|$, достижение предельных значений

концентраций основных компонентов воздуха $C_{\max}^{CO_2}$ и $C_{\min}^{O_2}$.

Шаг 2. Формализация начальных и граничных условий:

– начальные концентрации в реакторах СКЗ: $C^{CO_2}(0, x) = 0$; $C^{O_2}(0, x) = C_0^{CO_2}$;

– начальные концентрации веществ в твердой фазе в реакторах СКЗ: $a^{CO_2}(0, x) = 0$; $a^{O_2}(0, x) = a_0^{O_2}$;

– концентрации веществ на входе реакторов: $C_i^j(t, 0) = C_v^j(t)$;

– граничные условия: $\left. \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} \right|_{x=L_i} = 0$.

Шаг 3. Рассчитывается линейная скорость потока воздушной смеси $\omega_i(t_{y-1}, x_z)$.

Шаг 4. На основе явной разностной схемы уравнения материального баланса в реакторах СКЗ

$$\frac{C_i^j(t_y, x_z) - C_i^j(t_{y-1}, x_z)}{\tau} = D_i \frac{C_i^j(t_y, x_{z+1}) - 2C_i^j(t_y, x_z) + C_i^j(t_y, x_{z-1}))}{h^2} - \omega_i \frac{C_i^j(t_y, x_z) - C_i^j(t_y, x_{z-1}))}{h} + \Psi_i^j(t_{y-1}, x_z),$$

где $\Psi_i^j(t_{y-1}, x_z) = (-1)^j \beta_{i\chi}^j(x_z) C^{CO_2}(t_{y-1}, x_z) \Phi_{\chi}(a_i^j(t_{y-1}, x_z), a_{i0}^j(x_z))$,

составляются рекуррентные соотношения

$$C_i^j(t_y, x_z) = \frac{\tau h^2}{h^2 + 2D_i\tau + \omega_i\tau h} \times \left(\frac{D_i}{h^2} C_i^j(t_y, x_{z+1}) + \frac{1}{\tau} C_i^j(t_y, x_z) + \frac{D_i + \omega_i h}{h^2} C_i^j(t_y, x_{z-1}) + \Psi_i^j(t_{y-1}, x_z) \right),$$

в соответствии с которыми методом Зейделя вычисляются значения концентраций основных компонентов воздуха в газовой фазе.

Шаг 5. Уравнение кинетики сорбции аппроксимируется разностным уравнением

$$\frac{a_i^j(t_y, x_z) - a_i^j(t_{y-1}, x_z)}{\tau} = (-1)^{j+1} \beta_{ix}^j(x_z) C^{\text{CO}_2}(t_{y-1}, x_z) \Phi_\chi(a_i^j(t_{y-1}, x_z), a_{i0}^j(x_z)),$$

$$x_z \in \left(L - \sum_{l=\chi}^{hp} l_l; \sum_{l=1}^{\chi} l_l \right],$$

что позволяет методом Рунге – Кутты четвертого порядка точности вычислить значения концентраций основных компонентов воздуха в твердой фазе.

Шаг 6. Уравнения материального баланса в ГЗО аппроксимируются разностным уравнением

$$\frac{C^j(t_y) - C^j(t_{y-1})}{\tau} = \sum_{i=1}^n G_j(t_{y-1}) \left(C_i^j(t_{y-1}, x) \Big|_{x_i=L_i} - C^j(t_{y-1}) \right) + \sum_{s=1}^b H_s^j + \sum_{k=1}^m O_k^j,$$

после чего методом Рунге – Кутты четвертого порядка точности вычисляются значения концентраций кислорода и диоксида углерода в воздушной среде ГЗО.

Шаг 7. Проверка критериев останова расчета, в случае отрицательного результата происходит возврат к шагу 3.

На рис. 2.3 представлена упрощенная блок-схема алгоритма решения математической модели.

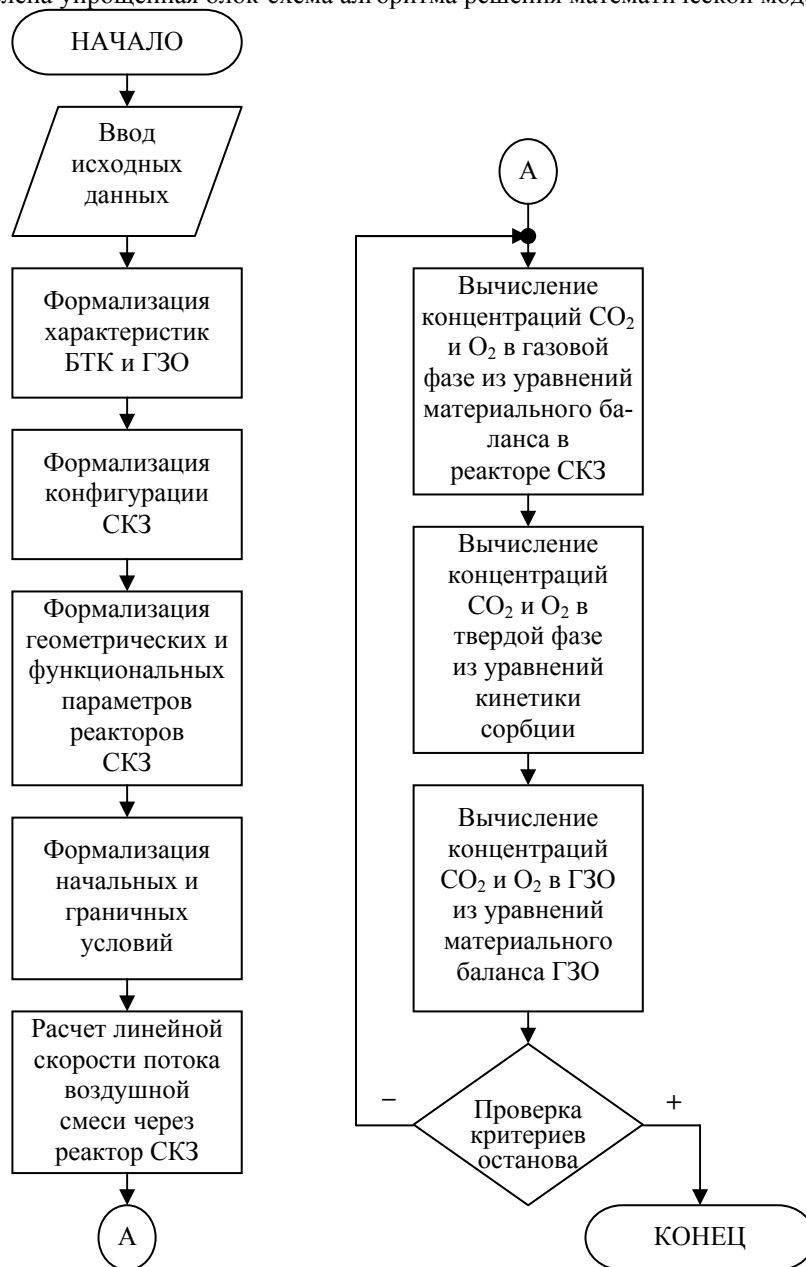


Рис. 2.3. Блок-схема алгоритма решения математической модели ПРВ

Следует отметить, что использование математической модели в виде (2.11) в рамках дальнейших исследований сопряжено с рядом трудностей, среди которых отсутствие экспертной и экспериментальной информации для многослойных реакторов и реакторов со сложной геометрией. В связи с этим представляется необходимым некоторое упрощение математической модели. Предположим, что изменение давления потока воздушной смеси в реакторах СКЗ не оказывает су-

ществленного влияния на ПРВ, реакторы имеют постоянное поперечное сечение, являются однослойными и включают только один вид сорбента (хемосорбента). При этом численное решение математической модели при проведении вычислительного эксперимента будет осуществляться с использованием уравнения кинетики сорбции на примере уравнения типа бимолекулярной реакции:

$$\Psi_i^j(t, x) = -\frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t} = \begin{cases} \beta_i^{O_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(\frac{a_i^{O_2}(t, x)}{a_{i0}^{O_2}} \right), & \text{выделение;} \\ -\beta_i^{CO_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(1 - \frac{a_i^{CO_2}(t, x)}{a_{i0}^{CO_2}} \right), & \text{поглощение.} \end{cases}$$

С учетом сделанных допущений математическая модель примет вид [116]:

$$\begin{cases} V \frac{dC^j(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n G_i \left(C_i^j(t, x) \Big|_{x=L_i} - C^j(t) \right) \pm \sum_{k=1}^m O_k^j(t) \pm \sum_{s=1}^b H_s^j(t); \\ \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i^j(t, x)}{\partial x^2} - \omega_i(t) \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} - \frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t}, \quad \omega_i(t) = \frac{G_i(t)}{F_i}; \\ C^j(0) = C_0^j, \quad C_i^j(0, x) = C_0^j(x), \quad C_i^j(t, x) \Big|_{x=0} = C^j(t), \quad \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} \Big|_{x=L_i} = 0; \\ \frac{\partial a_i^j(t, x)}{\partial t} = \begin{cases} \beta_i^{O_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(\frac{a_i^{O_2}(t, x)}{a_{i0}^{O_2}} \right), & \text{выделение;} \\ -\beta_i^{CO_2} C_i^{CO_2}(t, x) \left(1 - \frac{a_i^{CO_2}(t, x)}{a_{i0}^{CO_2}} \right), & \text{поглощение;} \end{cases} \\ a_i^{CO_2}(0, x) = 0, \quad a_i^{O_2}(0, x) = a_{i0}^{O_2}; \\ i = 1, \dots, n, \quad j = 1, 2. \end{cases} \quad (2.12)$$

2.3. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Построенная на основе физических представлений математическая модель должна верно качественно и количественно описывать свойства моделируемого процесса. Таким образом, для достижения целей, поставленных в данной работе, требуется осуществить идентификацию неизвестных параметров и проверку адекватности математической модели [109].

Целью решения задачи параметрической идентификации является определение таких численных значений неизвестных параметров модели, при которых решение задачи соответствовало бы, в некотором смысле, экспериментальным данным. При этом найденные значения параметров не должны противоречить физическому смыслу [112].

В данной работе решается обратная коэффициентная задача, поскольку необходимо определить неизвестные коэффициенты β^{CO_2} , β^{O_2} , D (значения параметров $a_0^{CO_2}$, $a_0^{O_2}$ считаются известными, так как их определение возможно методом химического анализа сорбента (хемосорбента)).

Определение параметров β^{CO_2} , β^{O_2} , D производится по экспериментальным данным методом наименьших квадратов, т.е.

$$E = \sum_{j=1}^2 \sum_{u=1}^h [C_p^j(u, \beta^j, D) - C_s^j(u)]^2 \rightarrow \min_{\beta^{CO_2}, \beta^{O_2}, D}.$$

Для проведения параметрической идентификации использовались поглотительный и регенеративный реакторы со следующими характеристиками:

$$F = 50,625 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}, \quad L = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad G = 25 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad \omega = \frac{G}{F} = 493,8 \text{ м}/\text{ч};$$

регенеративный реактор: $a^{CO_2} = 106 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $a^{O_2} = 120 \text{ м}^3/\text{м}^3$;

поглотительный реактор: $a^{CO_2} = 106 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

В результате решения задачи параметрической идентификации были получены значения искомых параметров:

– для регенеративного реактора

$$\beta^{CO_2} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ 1/ч}; \quad \beta^{O_2} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ 1/ч}; \quad D = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{ч};$$

– для поглотительного реактора

$$\beta^{CO_2} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ л/ч}; D = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{ч}.$$

Полученные величины практически совпадают со значениями указанных параметров, которые используются при проведении соответствующих аналитических расчетов.

Математическая модель объекта является лишь его определенным в рамках принятых допущений аналогом. Поэтому значения переменных, получаемые на модели и объекте, различаются. Здесь возникает задача установления близости модели реальному объекту, т.е. оценки адекватности модели [50, 112].

Степень адекватности модели и объекта можно оценить путем сравнения их выходных сигналов при подаче одинаковых входных воздействий на объект и его модель (рис. 2.4, 2.5).

Среднеквадратичное относительное отклонение экспериментальных C_3^j и расчетных C_p^j значений концентраций диоксида углерода и кислорода рассчитано по формуле $\Delta = \max_{j=1,2} \left\{ \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{u=1}^h \left(\frac{C_3^j(u) - C_p^j(u)}{C_3^j(u)} \right)^2} \cdot 100 \% \right\}$ и составило 11,34 %, что соизмеримо с погрешностью измерений.

Таким образом, построенную математическую модель можно считать адекватной реальному процессу регенерации воздуха.

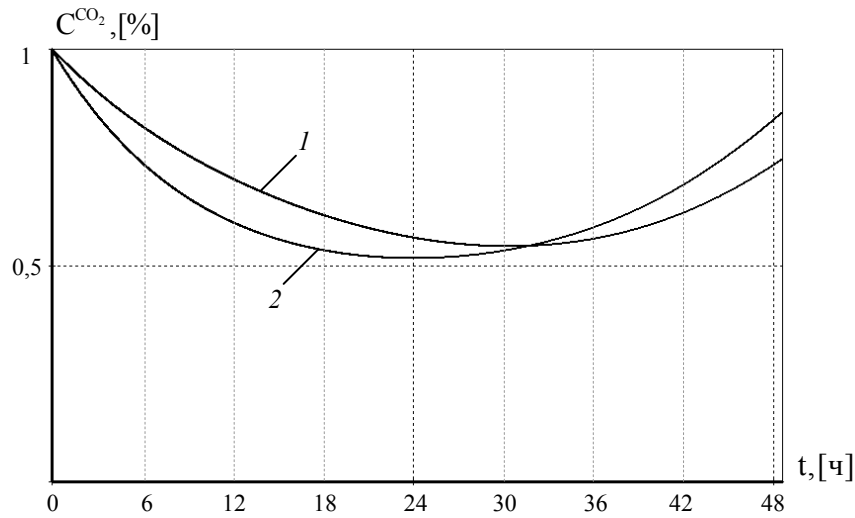


Рис. 2.4. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме:
1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные

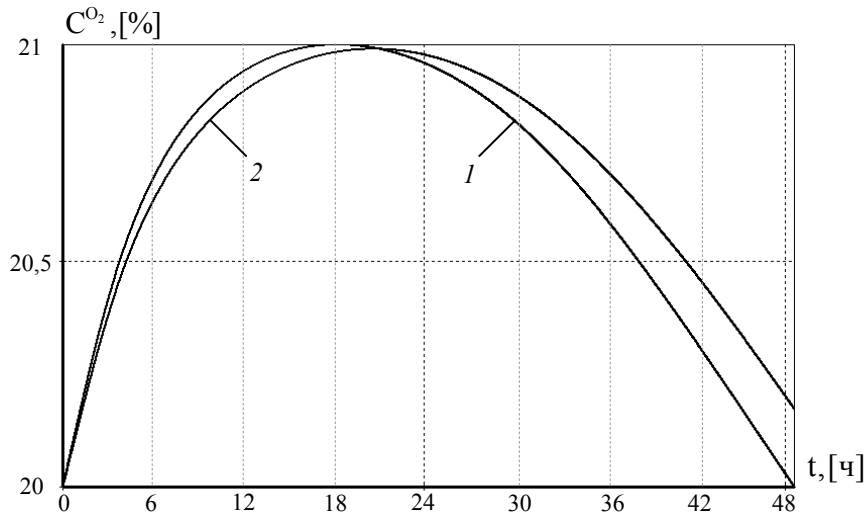


Рис. 2.5. Изменение концентрации кислорода в объеме:
1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные

2.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В главе рассмотрены вопросы математического моделирования процессов, протекающих в ГЗО БТК и влияющих на состав воздушной среды. На основе проведенных исследований были получены следующие результаты:

- получено функционально-структурное описание БТК;
- проанализировано влияние каждой подсистемы БТК на процессы газоформирования воздушной среды ГЗО;
- проведены структурная и параметрическая идентификации математической модели ПРВ в ГЗО;

– осуществлена проверка адекватности математической модели реальному процессу регенерации воздуха.

Таким образом, формирование адекватной математической модели ПРВ в ГЗО позволяет приступить к исследованию процесса регенерации воздуха как объекта управления и непосредственно к разработке вопросов оптимального управления ПРВ в ГЗО.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Исследования вопросов управления ПРВ в ГЗО и, в частности, осуществление анализа ПРВ как объекта управления возможны только при владении наиболее полными сведениями о процессах газоформирования воздушной среды ГЗО и степени влияния на ПРВ различных элементов БТК. Источником подобных данных могут являться научная литература в данной предметной области, различная экспертная информация, результаты натурных испытаний, а также вычислительного эксперимента, проводимого с использованием построенной математической модели [117]. Полученный таким образом объем данных позволит в дальнейшем осуществить подробный анализ различных параметров биотехнического комплекса с целью выявления управляемых, управляющих и возмущающих координат относительно выбранного объекта управления.

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью вычислительного эксперимента является определение влияния параметров биотехнического комплекса на процессы, протекающие в реакторах СКЗ и в герметично замкнутом объеме, для чего решаются следующие задачи исследования:

- влияния конструктивных и технологических параметров ГЗО, СКЗ и реакторов СКЗ на характер протекания ПРВ;
- поведения воздушной среды ГЗО при наличии воздействий биологической и технической подсистем БТК;
- режимов функционирования СКЗ при стационарной и нестационарной нагрузках по основным компонентам воздушной смеси.

Для реализации вычислительного эксперимента используется математическая модель ПРВ в ГЗО (2.12), а также БТК со следующими базовыми параметрами составляющих его компонент:

- величина ГЗО $V = 100 \text{ м}^3$, численность персонала $b = 2$;
- нагрузка БП $H^{\text{CO}_2} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$, $H^{\text{O}_2} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$;
- исходное состояние воздушной среды ГЗО $C^{\text{CO}_2} = 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $C^{\text{O}_2} = 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- ограничения $C^{\text{CO}_2} \in (0 \%, 3 \%)$, $C^{\text{O}_2} \in (18 \%, 22 \%)$;
- геометрические параметры реакторов СКЗ $F = 50,625 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $L = 0,4 \text{ м}$;
- функциональные характеристики реакторов СКЗ:

регенеративный реактор: $a^{\text{CO}_2} = 106 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $\beta^{\text{CO}_2} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ 1/ч}$;

$a^{\text{O}_2} = 120 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $\beta^{\text{O}_2} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ 1/ч}$;

поглотительный реактор: $a^{\text{CO}_2} = 106 \text{ м}^3/\text{м}^3$, $\beta^{\text{CO}_2} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ 1/ч}$.

3.1. План вычислительного эксперимента

№	Наименование эксперимента	Варьируемый параметр	Изменение конструкции	Принимаемые значения
Э1	Регенеративный реактор	Изменение величины входной концентрации CO_2	Нет	1 %; 3 %; 5 %
Э2	Регенеративный реактор	Изменение величины входной концентрации O_2	Нет	18 %; 20 %; 22 %
Э3	Регенеративный реактор	Изменение величины входной концентрации CO_2	Нет	Ступенчатое и равномерное (в течение 1 ч) изменение от 1 до 2 %
Э4	Регенеративный реактор	Изменение величины расхода воздушной смеси через реактор	Нет	50 $\text{ м}^3/\text{ч}$; 25 $\text{ м}^3/\text{ч}$; 10 $\text{ м}^3/\text{ч}$; 5 $\text{ м}^3/\text{ч}$
Э5	Регенеративный реактор	Изменение величины расхода воздушной смеси через реактор	Нет	Ступенчатое и равномерное (в течение 1 ч) изменение от 10 до 25 $\text{ м}^3/\text{ч}$

Э6	Регенеративный реактор	Изменение длины реактора	Нет	0,1 м; 0,4 м; 1 м; 2 м
Э7	БТК, стационарная нагрузка, регенеративный реактор	Изменение величины ГЗО	Замена отработавших реакторов	100 м ³ ; 300 м ³ ; 500 м ³
Э8	БТК, стационарная нагрузка, регенеративный реактор	Изменение количества персонала	То же	2 человека; 4 человека; 8 человек
Э9	БТК, нестационарная нагрузка, регенеративный реактор	Изменение количества персонала	Замена отработавших реакторов	2 человека; 4 человека; 8 человек
Э10	БТК, стационарная нагрузка, регенеративный и поглотительный реакторы	Изменение количества персонала	То же	2 человека; 4 человека; 8 человек
Э11	БТК, нестационарная нагрузка, регенеративный и поглотительный реакторы	Изменение количества персонала	«	2 человека; 4 человека; 8 человек.
Э12	БТК, стационарная нагрузка, регенеративный и поглотительный реакторы	Изменение величины расхода воздушной смеси через каждый реактор	«	Р-5 П-25, м ³ /ч; Р-25 П-25, м ³ /ч; Р-25 П-5, м ³ /ч

При изменении какого-либо параметра в ходе проведения вычислительного эксперимента остальные остаются неизменными.

3.2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА

Э1. Изменение концентрации диоксида углерода на входе регенеративного реактора.

На основе анализа представленных на рис. 3.1, 3.2 графиков можно сделать вывод о прямой зависимости ПРВ от входной концентрации диоксида углерода. Повышение концентрации «ускоряет» процесс регенерации, что выражается в увеличении объемов поглощенного диоксида углерода и выделенного кислорода в единицу времени, при этом снижается время защитного действия реактора. Следует отметить, что при заданных параметрах регенеративного реактора и величины расхода проскок (количество непоглощенного диоксида углерода в реакторе) в начальный момент времени на выходе реактора составляет 15 – 20 % от входного количества диоксида углерода независимо от входной концентрации.

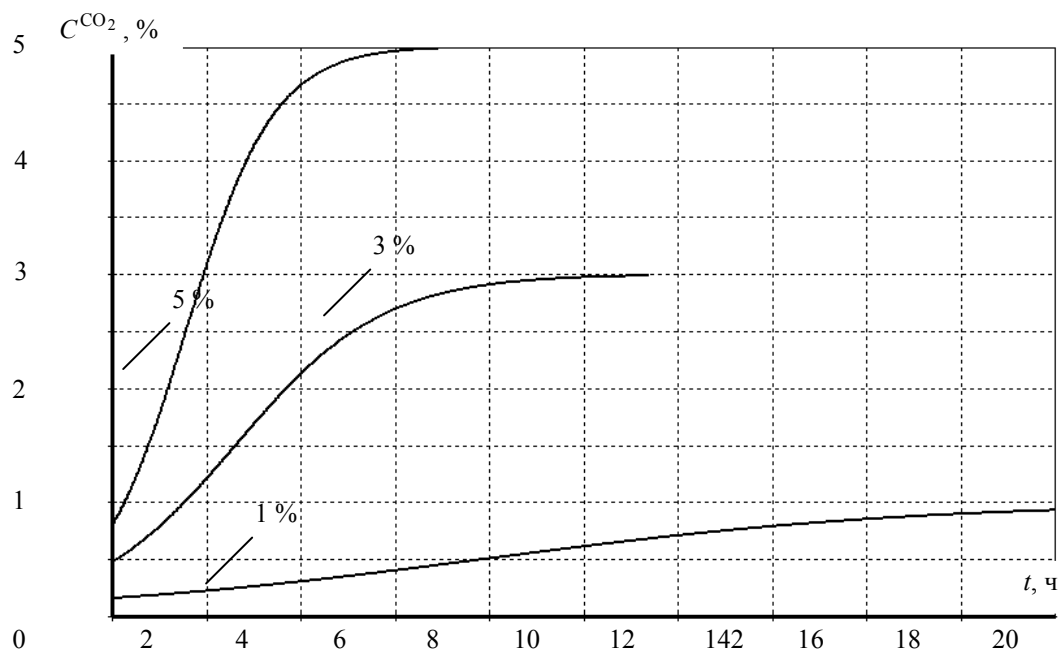


Рис. 3.1. Изменение концентрации диоксида углерода на выходе регенеративного реактора

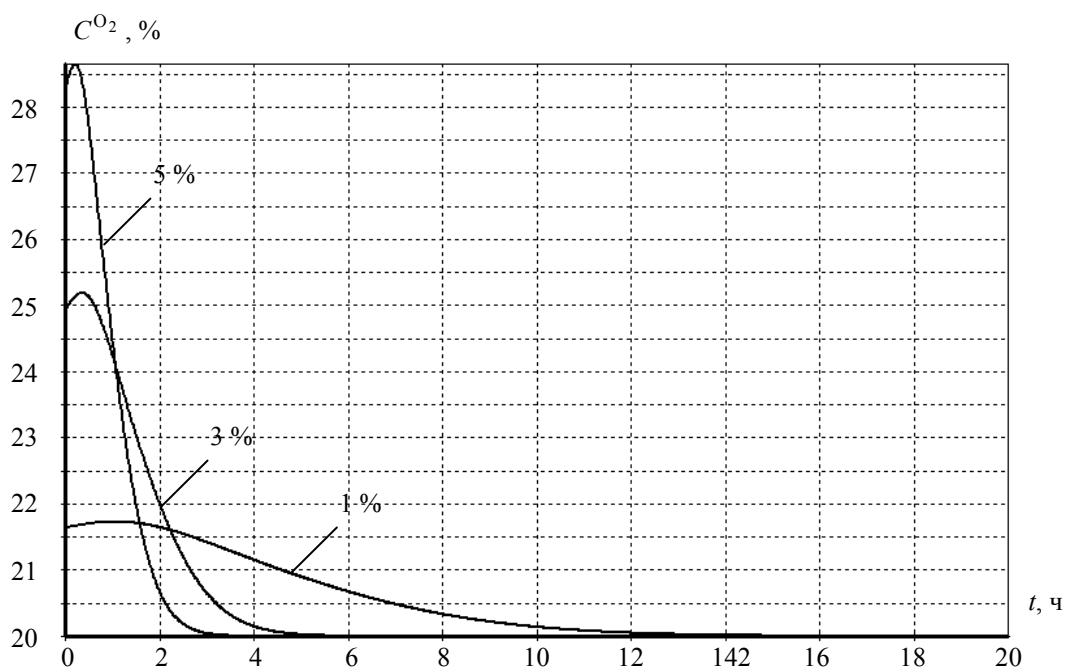


Рис. 3.2. Изменение концентрации кислорода на выходе регенеративного реактора

Кислород выделяется тем активнее, чем больше диоксида углерода на входе реактора, но и отработка сорбента в этом случае происходит быстрее. При значительном повышении входной концентрации CO_2 выходная концентрация кислорода достигает пожароопасных уровней, что следует учитывать при размещении системы регенерации, а также при расположении точек выхода регенерированной воздушной смеси.

Э2. Изменение концентрации кислорода на входе регенеративного реактора.

Из рис. 3.3 следует, что варьирование концентрацией кислорода на входе реактора не приводит к изменению скорости поглощения диоксида углерода, в связи с чем графики выходов по CO_2 совпадают.

Изменение концентрации кислорода на выходе реактора (рис. 3.4) для разных входных значений также не показывает каких-либо различий в процессе восстановления O_2 . Если совместить уровни входных концентраций кислорода, то графики выходных концентраций также совпадут.

Из этих двух экспериментов следует, что функционирование регенеративного реактора зависит от входной концентрации диоксида углерода, при этом зависимости от входной концентрации кислорода не наблюдается. Сделанные выводы подтверждаются и следующим опытом.

Э3. Ступенчатое и равномерное изменение концентрации диоксида углерода на входе регенеративного реактора.

Как видно из рис. 3.5, 3.6, изменение входной концентрации диоксида углерода в процессе функционирования регенеративного реактора практически мгновенно отражается на значениях выходных концентраций диоксида углерода и кислорода. Причем ступенчатое воздействие на входе приводит к ступенчатому характеру отклика, а равномерное увеличение в течение одного часа имеет более сглаженный вид. Это свойство играет значительную роль при управлении ПРВ.

Э4. Изменение расхода воздушной смеси на входе реактора.

Из анализа рис. 3.7, 3.8 можно сделать вывод о том, что величина проскока меняется в зависимости от величины расхода воздушной смеси на реакторе, и при $G \rightarrow 0$ проскок также стремится к 0. Уменьшение расхода приводит к более качественной обработке входного потока по удалению из нее диоксида углерода, но в то же время приводит к уменьшению (линейному от расхода) количества поглощаемого вещества в единицу времени и, следовательно, к уменьшению скорости выделения кислорода.

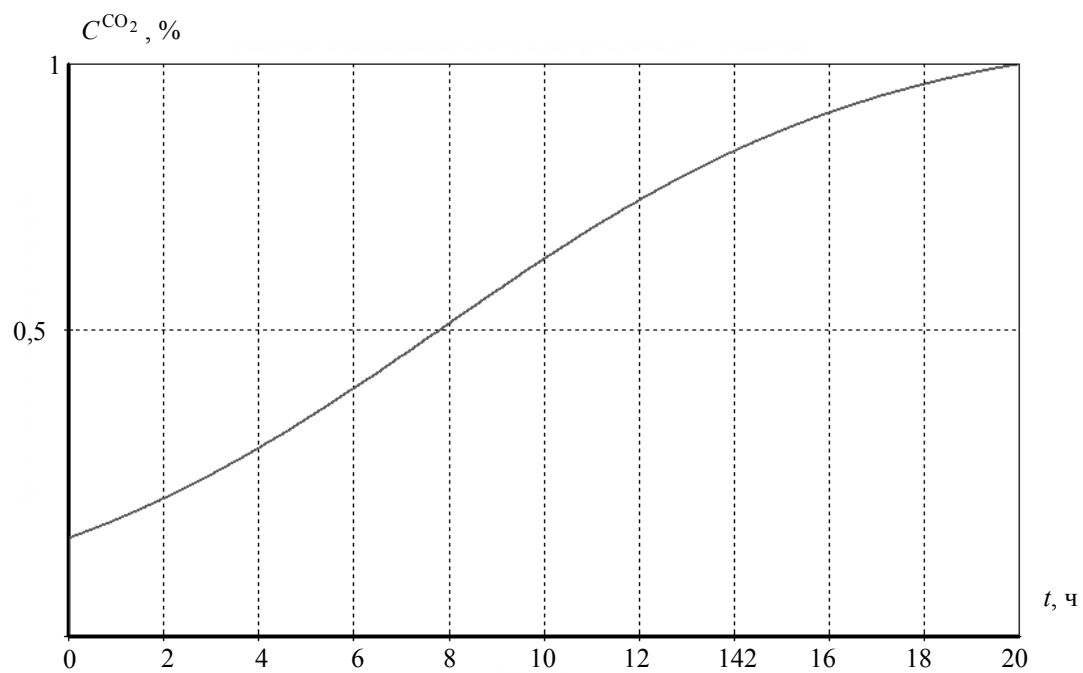


Рис. 3.3. Изменение концентрации диоксида углерода на выходе регенеративного реактора

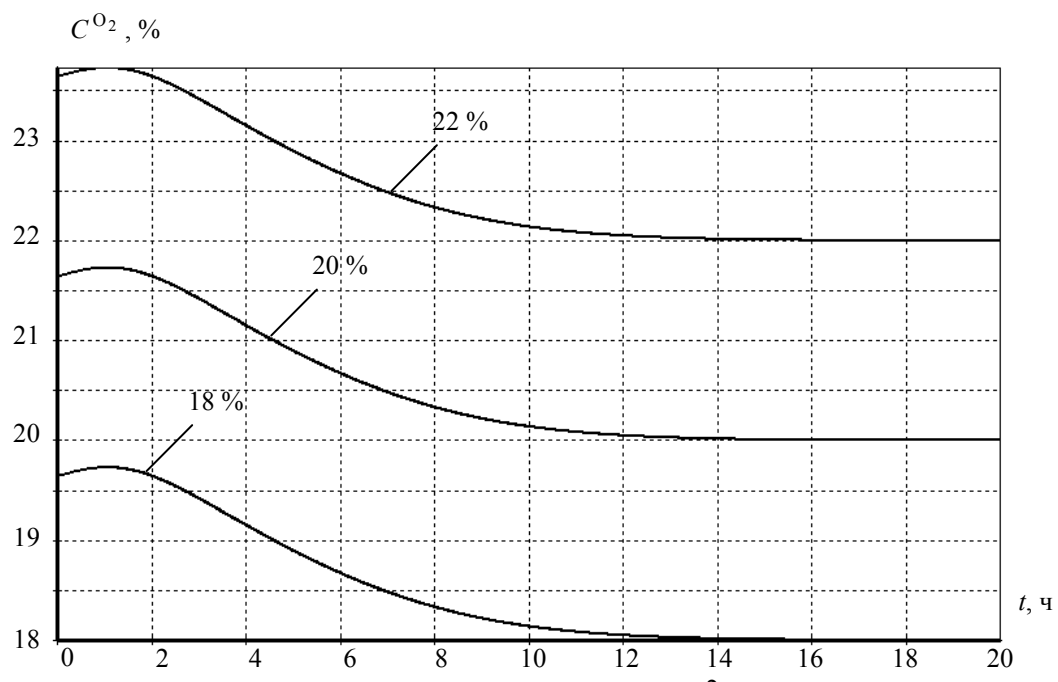


Рис. 3.4. Изменение концентрации кислорода на выходе регенеративного реактора

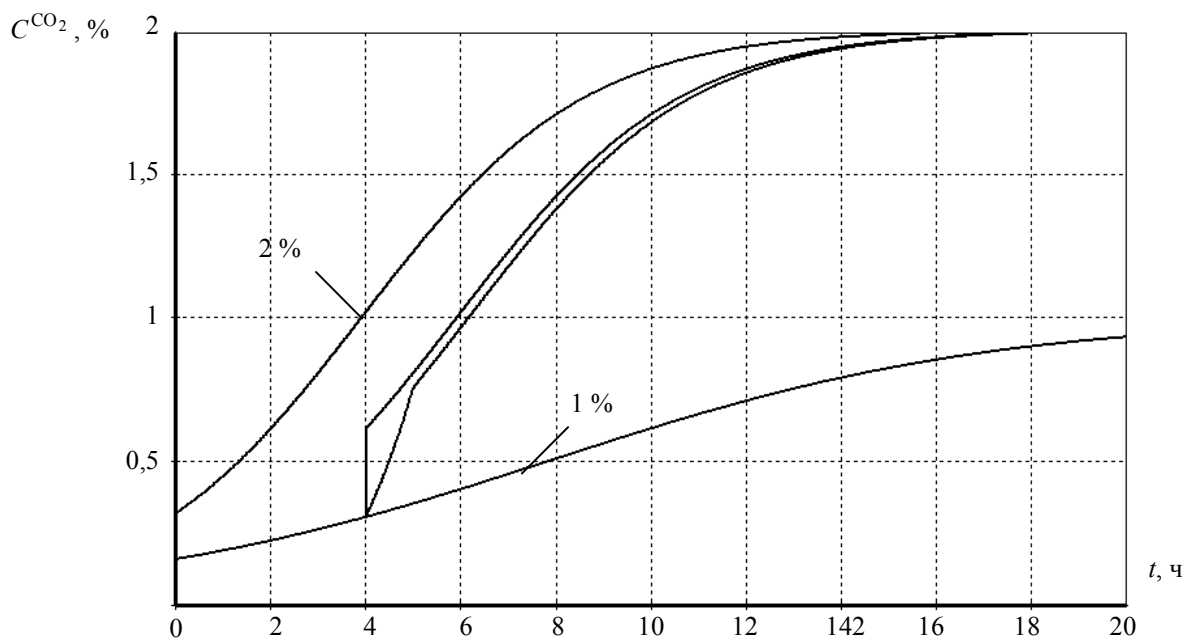


Рис. 3.5. Изменение концентрации диоксида углерода на выходе регенеративного реактора

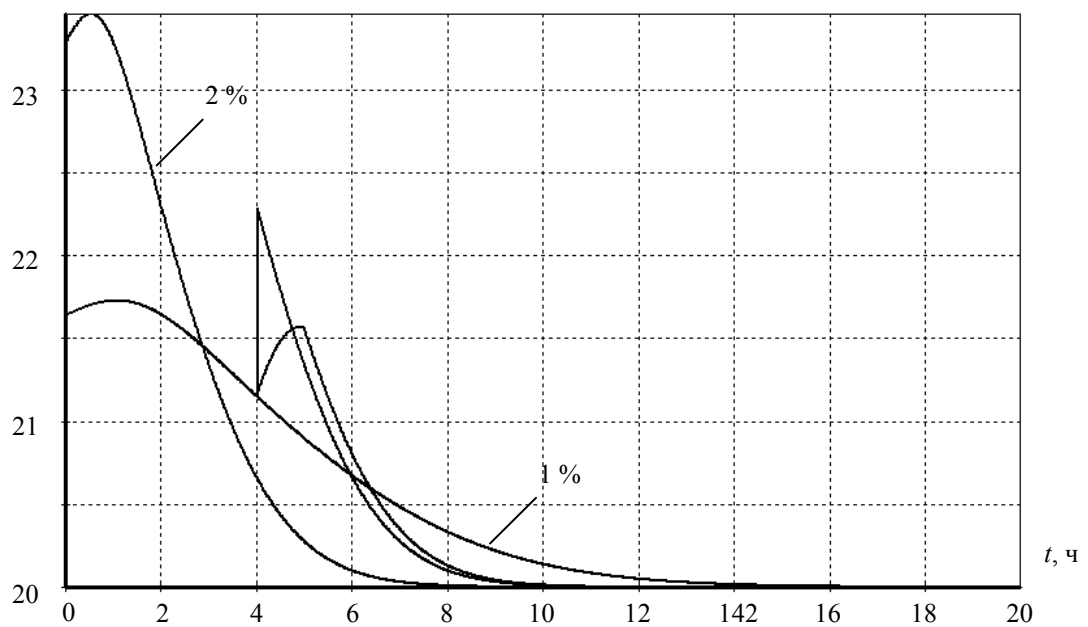


Рис. 3.6. Изменение концентрации кислорода на выходе регенеративного реактора

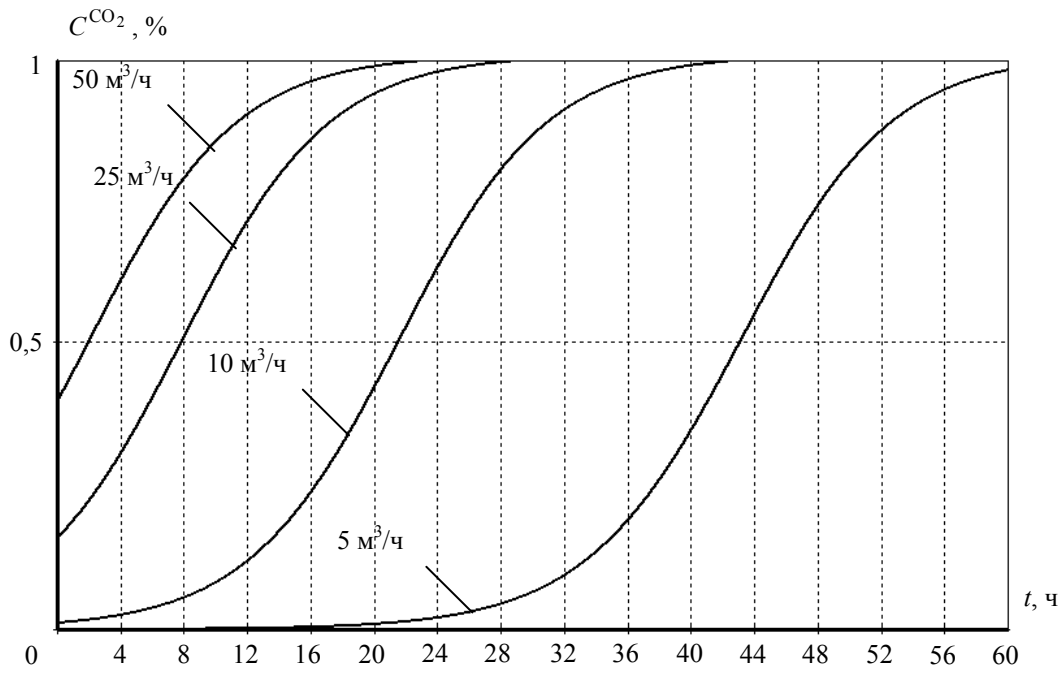


Рис. 3.7. Изменение концентрации диоксида углерода на выходе регенеративного реактора

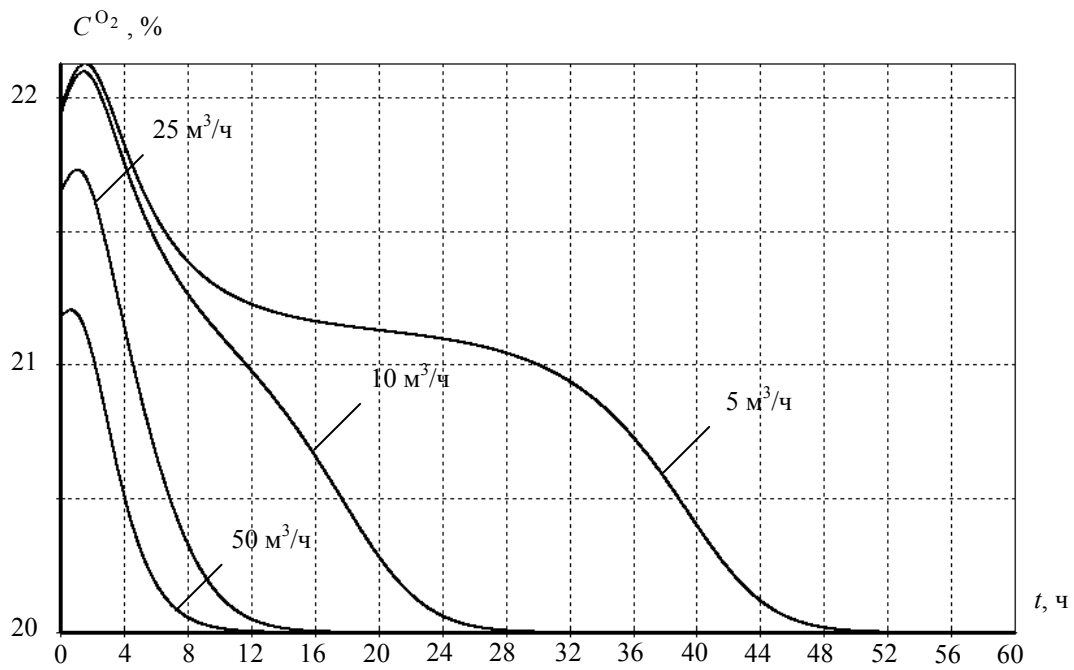


Рис. 3.8. Изменение концентрации кислорода на выходе регенеративного реактора

Э5. Ступенчатое и равномерное изменение расхода на входе реактора.

Как и в случае с входной концентрацией диоксида углерода, изменение расхода воздушной смеси в процессе работы реактора приводит к заметному эффекту (рис. 3.9, 3.10). Ступенчатое изменение также приводит к ступенчатому характеру отклика и по CO_2 , и по O_2 , а равномерное увеличение в течение одного часа придает «выходам» более сглаженный вид. Подобную зависимость также стоит принять во внимание при разработке алгоритмов управления ПРВ.

Э6. Изменение длины реактора.

Рис. 3.11 и 3.12 отражают прямую зависимость характера работы регенеративного реактора в зависимости от длины реактора. Подобная картина наблюдается и в случае варьирования площадью сечения реактора, из чего следует, что геометрические параметры реактора имеют определяющее значение в процессе регенерации воздуха. Увеличение размеров реактора влечет за собой увеличение объема содержащегося в нем сорбента, что сказывается на емкостных характеристиках всего реактора.

Тип используемого в реакторе сорбента, также относящийся к конструктивным характеристикам, имеет первостепенное значение, поскольку именно массообменные и емкостные коэффициенты определяют скорость и эффективность процесса регенерации воздуха в реакторе.

Следует отметить подобие графиков на рис. 3.7, 3.11 и 3.8, 3.12, что объясняется временем контакта единичного слоя воздушной смеси с сорбентом. Следовательно, увеличение длины реактора аналогично пропорциональному уменьшению расхода в реакторе с меньшей длиной. Сравним графики на рис. 3.8 и 3.12: графики рис. 3.8 характеризуют реактор длиной 0,4 м для расхода 25 и 5 $\text{м}^3/\text{ч}$, соответственно, а реакторы на графиках рис. 3.12 имеют длину 0,4 и 2 м при расходе

25 $\text{м}^3/\text{ч}$. Соответствующие графики совпадают, так как $40 / 40 = 25 / 25$ и $200 / 40 = 25 / 5$. Это свойство можно использовать при создании систем, обеспечивающих ПРВ в ГЗО, так как изменить качество регенерируемой смеси (уменьшить проскок, увеличить насыщенность кислородом выходного потока) можно не только путем изменения расхода, но и увеличением длины реактора.

Отдельное рассмотрение в рамках данной работы поведения поглотительного реактора с аналогичными конструктивными и функциональными параметрами можно опустить, вследствие подобия получаемых результатов по отношению к регенеративному реактору. Соответственно основным отличием является отсутствие выделяемого кислорода.

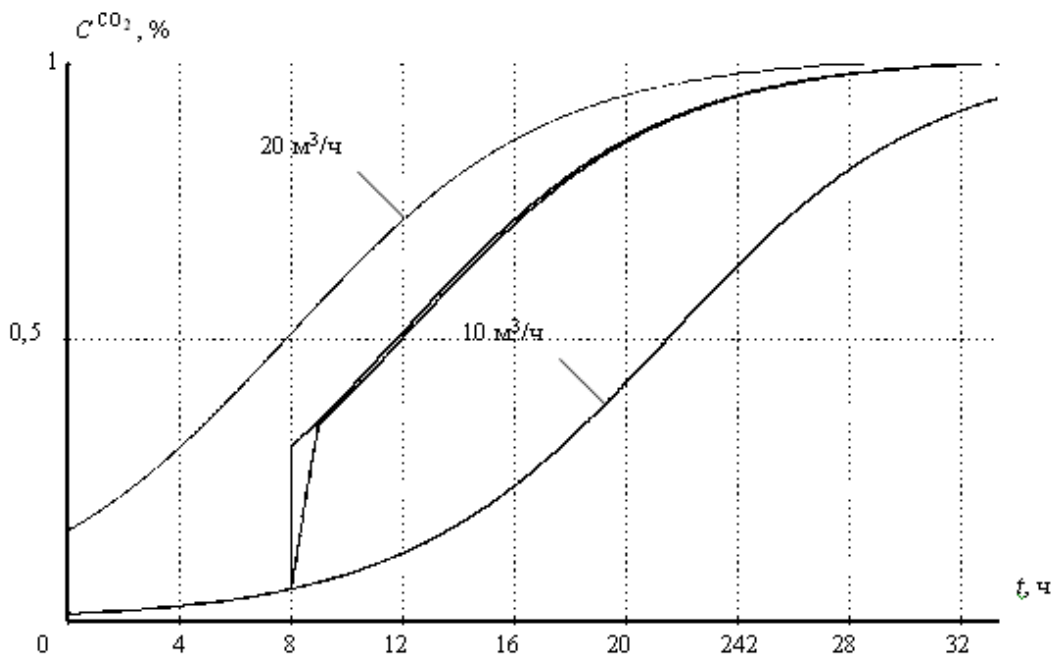


Рис. 3.9. Изменение концентрации диоксида углерода на выходе регенеративного реактора

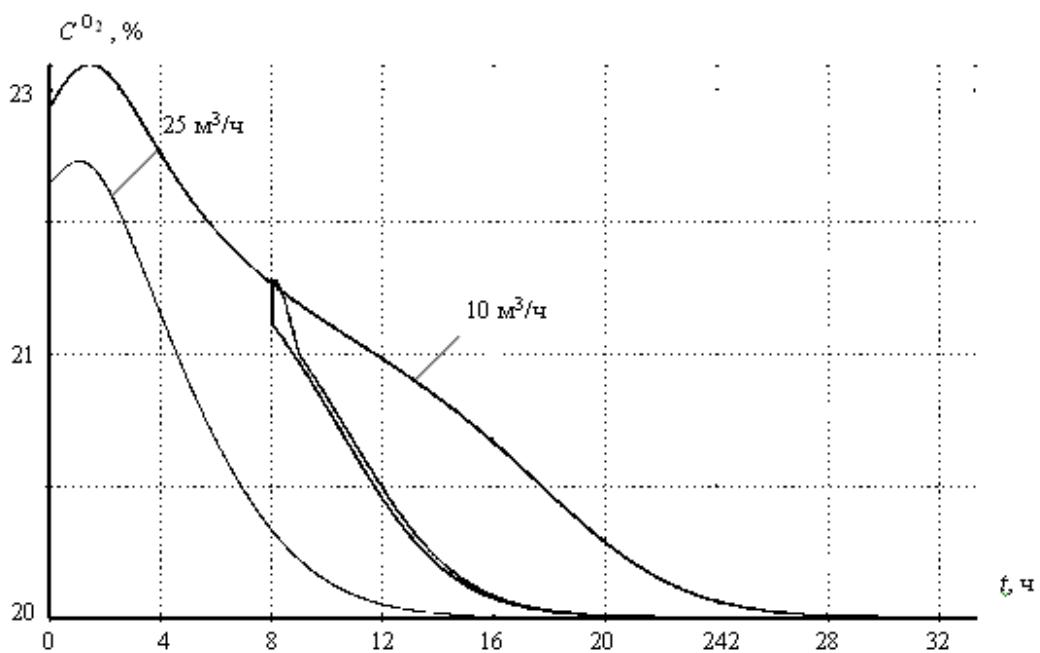


Рис. 3.10. Изменение концентрации кислорода на выходе регенеративного реактора

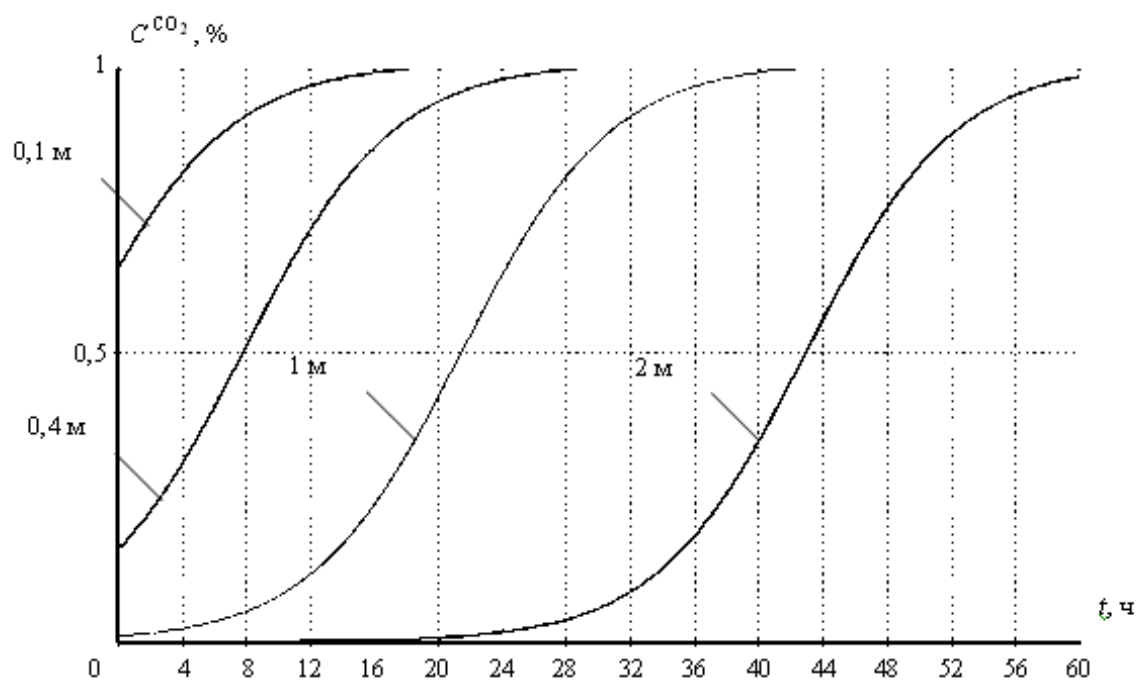


Рис. 3.11. Изменение концентрации диоксида углерода на выходе регенеративного реактора

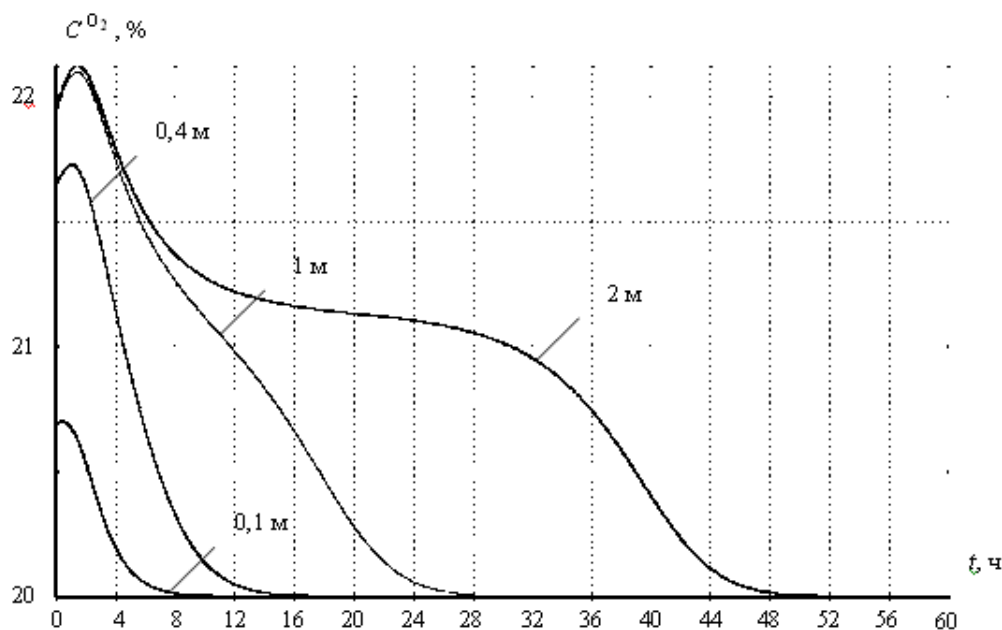


Рис. 3.12. Изменение концентрации кислорода на выходе регенеративного реактора

Далее рассматривается объем с персоналом и системой регенерации, которая изменяет свои конструктивные свойства в процессе функционирования путем замены реакторов на основе жестких условий.

Э7. Изменение величины ГЗО (100, 300, 500 м³).

Рис. 3.13, 3.14 отражают характерную картину изменения концентраций кислорода и диоксида углерода в ГЗО.

На анализируемых графиках видно, что меньший объем имеет более выраженные колебания концентраций основных компонентов воздуха и наоборот. Такое явление можно назвать «инерционностью объема». Очевидно, что чем больше объем, тем выше его инерционность. Инерционность объема также характеризует его чувствительность к источникам веществ, чем больше объем и чем меньше расход вещества источника в нем, тем слабее влияние на концентрацию воздушной смеси в ГЗО данного источника.

Э8. Изменение количества человек в ГЗО, нагрузка постоянная.

Графики на рис. 3.15, 3.16 показывают высокую ключевую роль персонала (и технологического оборудования) в формировании воздушной среды ГЗО. Увеличение числа людей в объеме приводит к пропорциональному повышению объемов поглощенного кислорода и выделенного диоксида углерода, что в свою очередь отражается на снижении времени защитного действия одного реактора и стремлении уровней концентраций к предельно допустимым значениям.

Э9. Изменение количества человек в ГЗО, нагрузка переменная.

Понятно, что рис. 3.17 отражает модельный случай нагрузки в ГЗО, которая может иметь другой вид, зависящий от рода и длительности деятельности. В дальнейших экспериментах предполагаем, что все люди, находящиеся в ГЗО одновременно, меняют род деятельности (нагрузку).

Несмотря на несколько другой вид, качественно концентрации рассматриваемых компонентов воздушной смеси в ГЗО на рис. 3.18, 3.19 ведут себя так же, как и на рис. 3.15, 3.16, только замена реакторов производится в другие моменты времени, причем, если для рис. 3.15, 3.16 с течением времени замены будут происходить через равные промежутки, а степень отработки сорбента в реакторах будет стремиться к постоянной величине (для постоянной нагрузки), то на рис. 3.18, 3.19 картина несколько иная. В данном случае сказывается влияние меняющейся нагрузки, что приводит к замене реакторов через разные промежутки времени, хотя с течением времени появляется периодичность их замены. Степень отработки остается разной, что согласуется с экспертными, экспериментальными и литературными данными [53, 55, 66].

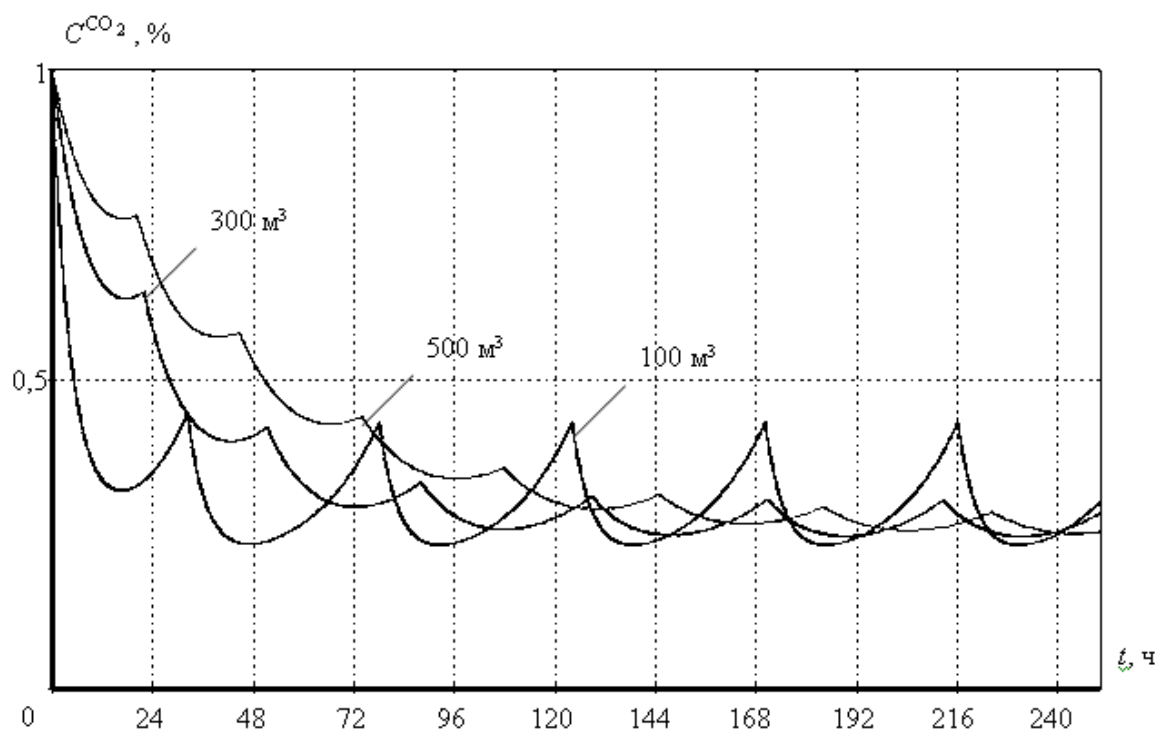


Рис. 3.13. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме

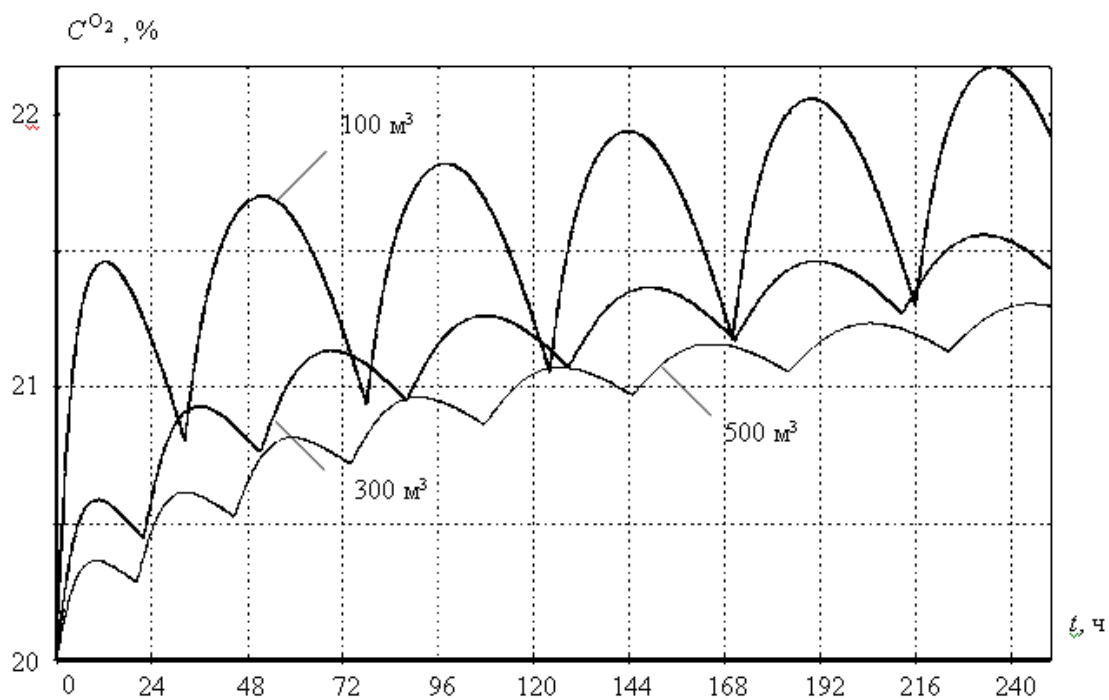


Рис. 3.14. Изменение концентрации кислорода в объеме

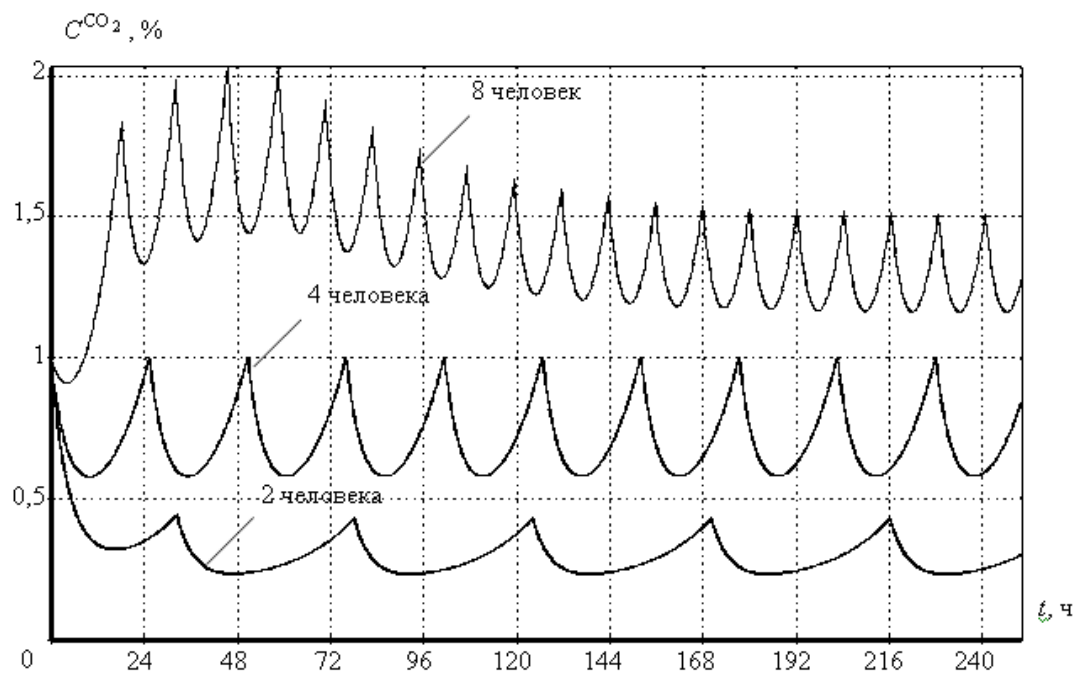


Рис. 3.15. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме

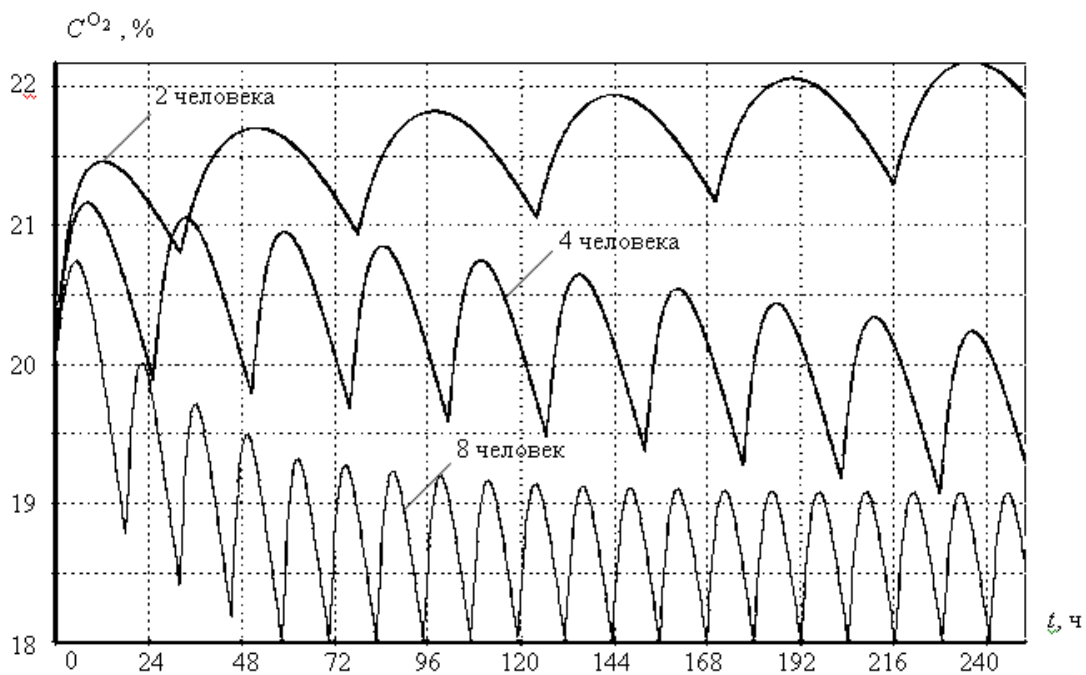


Рис. 3.16. Изменение концентрации кислорода в объеме

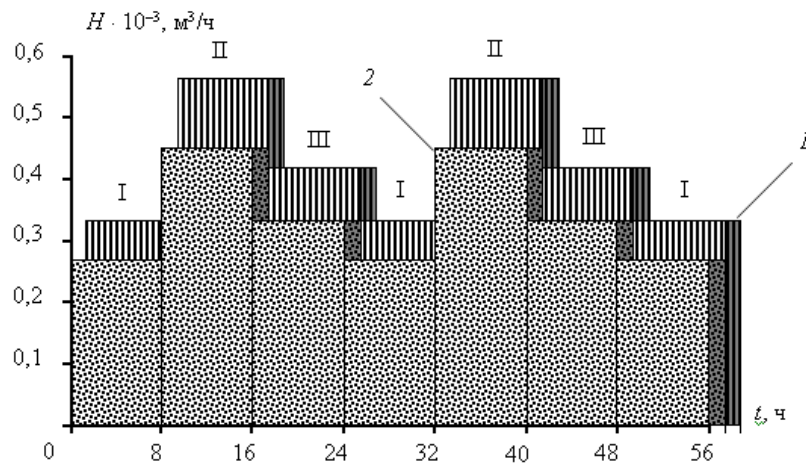


Рис. 3.17. Вид подаваемой в объеме нагрузки по кислороду и диоксиду углерода (дыхание одного человека), цикл 24 часа:

1 – количество поглощаемого кислорода; 2 – количество выделяемого диоксида углерода;

зона I – $H^{CO_2} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$, $H^{O_2} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$;

зона II – $H^{CO_2} = 27 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$, $H^{O_2} = 34 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$;

зона III – $H^{CO_2} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$, $H^{O_2} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$

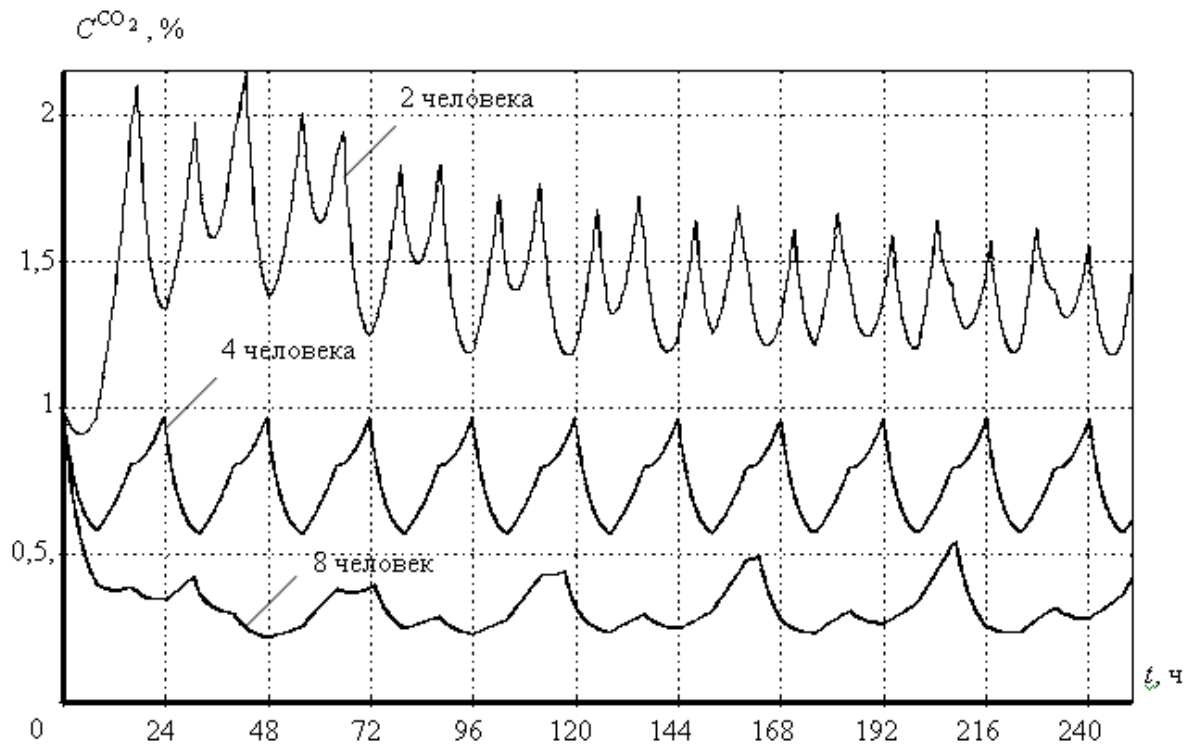


Рис. 3.18. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме

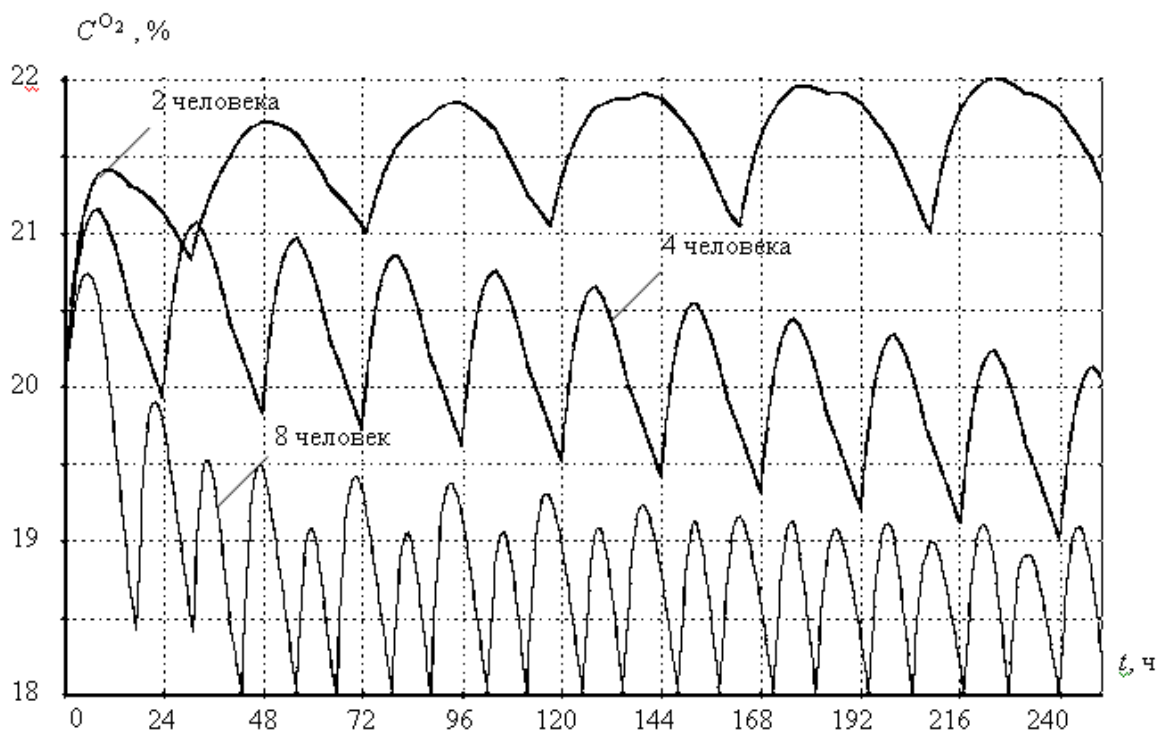


Рис. 3.19. Изменение концентрации кислорода в объеме

Э10. Изменение количества человек, нагрузка постоянная, одновременно функционируют регенеративный и поглотительный реакторы.

При одновременном применении регенеративного и поглотительного реакторов картина, отражающая изменение концентраций кислорода и диоксида углерода в ГЗО, меняется кардинально (рис. 3.20, 3.21).

Работа поглотительного реактора в паре с регенеративным приводит к более качественной очистке воздушной смеси от диоксида углерода, но в то же время наблюдается ощутимое падение концентрации кислорода в объеме. При достижении концентрации кислорода предельно допустимой величины (18 %) происходит замена регенеративного реактора, при этом новый реактор не способен восстановить первоначальный уровень концентрации кислорода в объеме и меняется уже через менее длительный промежуток времени.

Анализ расчетных данных показывает, что в момент замены ресурс регенеративного реактора выработан не полностью. Объяснением служит недостаточная величина концентрации диоксида углерода в объеме, которая не позволяет выделить в полной мере содержащийся в химическом продукте кислород. Подтверждением этому являются графики на рис. 3.1, 3.2 и 3.5, 3.6, а также зависимость (2.8), показывающие влияние входной концентрации диоксида углерода на количество выделяемого кислорода.

Э11. Изменение количества человек в ГЗО, нагрузка переменная, одновременно функционируют регенеративный и поглотительный реакторы.

Рис. 3.22, 3.23 подтверждают приведенные выше рассуждения. Увеличение объемов потребляемого персоналом кислорода и выделяемого диоксида углерода вследствие изменения нагрузки приводит к «разгону» регенеративного реактора, который при достаточной концентрации CO_2 насыщает воздушную смесь кислородом.

Э12. Изменение расхода, нагрузка постоянная, одновременно функционируют регенеративный и поглотительный реакторы.

Интересная ситуация складывается в случае установления не равных расходов воздушной смеси для поглотительного и регенеративного реакторов. Наиболее эффективным здесь является вариант, когда скорость воздушного потока в поглотительном реакторе ниже, чем в регенеративном. В этом случае происходит более тщательное, чем при обратном соотношении расходов, поглощение диоксида углерода, притом что регенеративный реактор успевает восстановить большее количество кислорода. Установка равных значений расхода воздушной смеси на поглотительном и регенеративном реакторах приводит к лучшим показателям по диоксиду углерода, но заметно снижает объемы выделяемого кислорода.

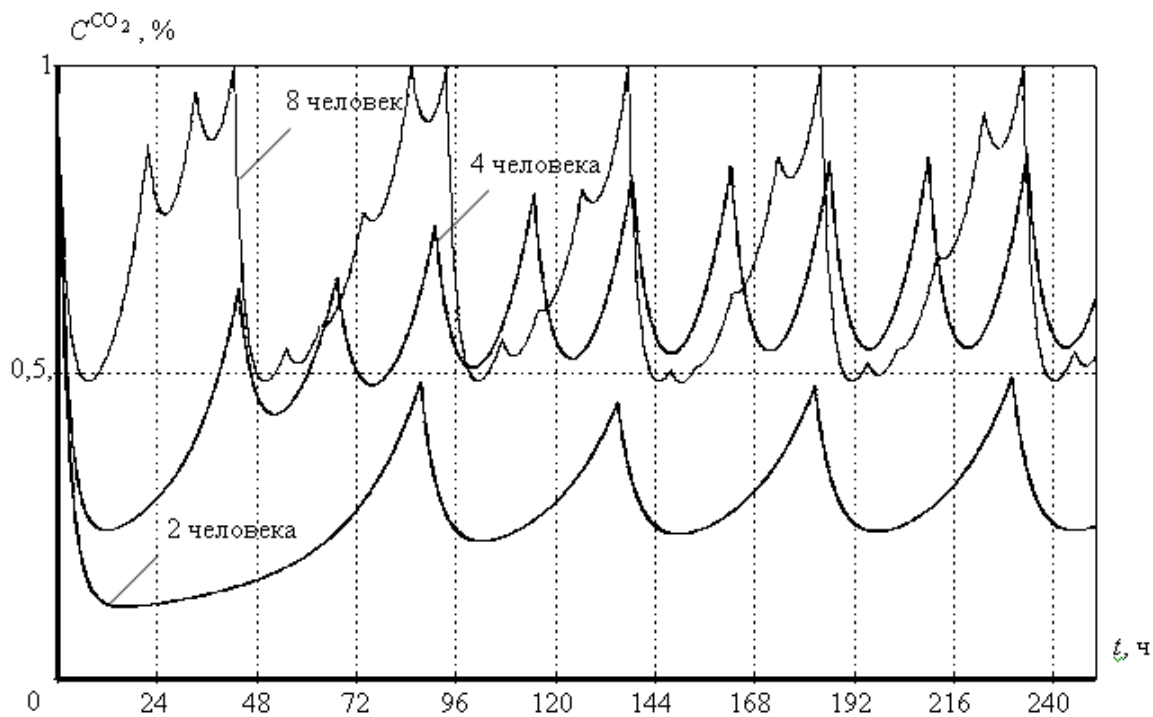


Рис. 3.20. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме

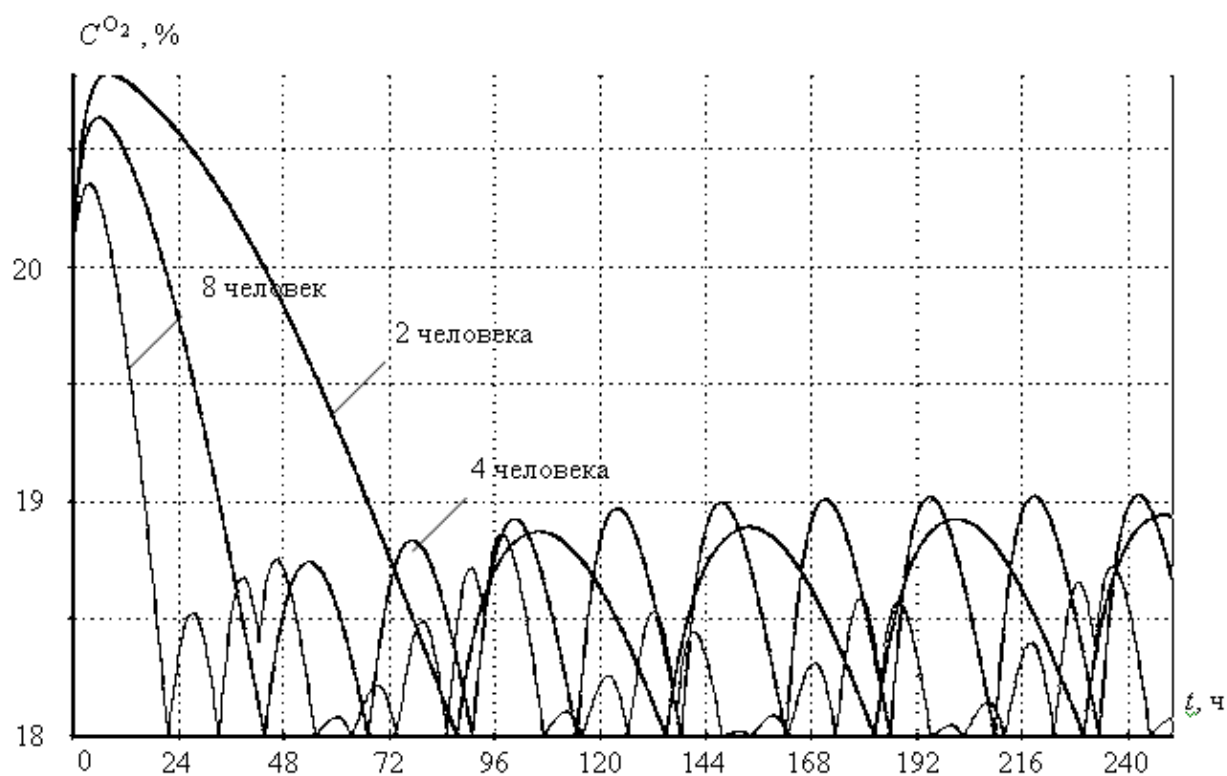


Рис. 3.21. Изменение концентрации кислорода в объеме

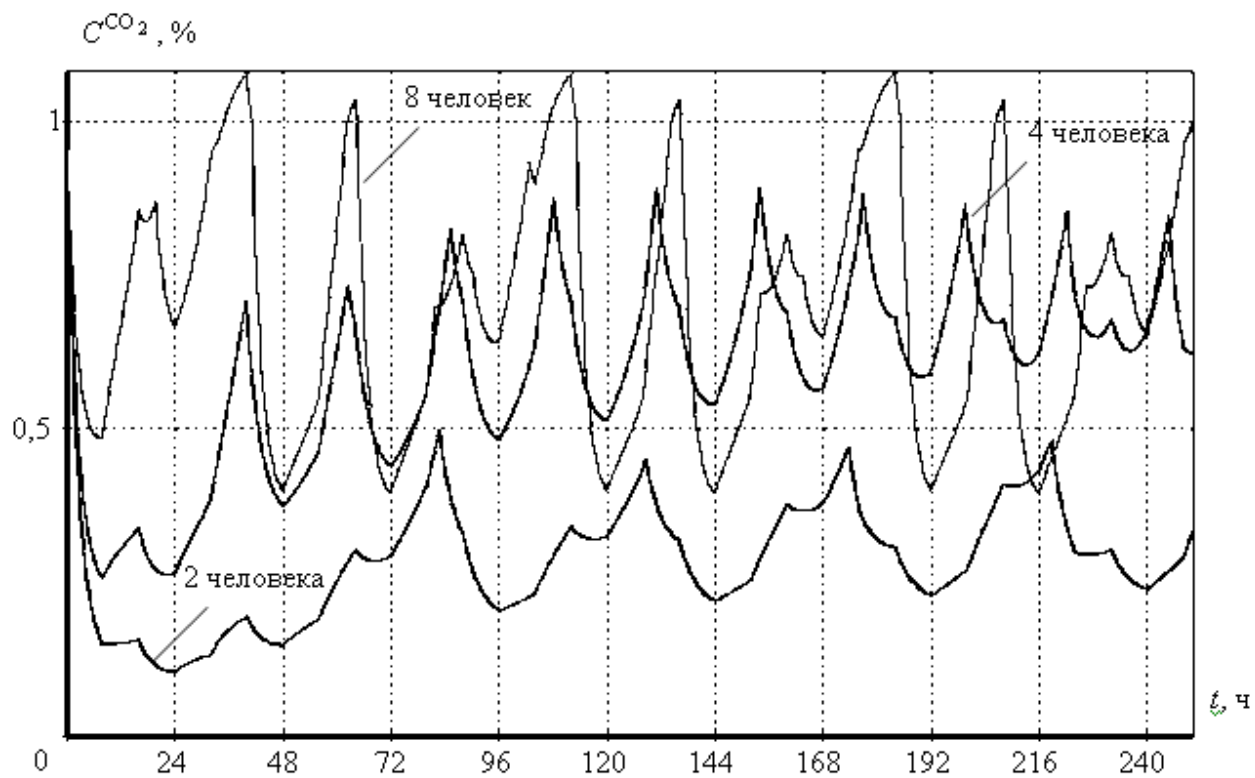


Рис. 3.22. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме

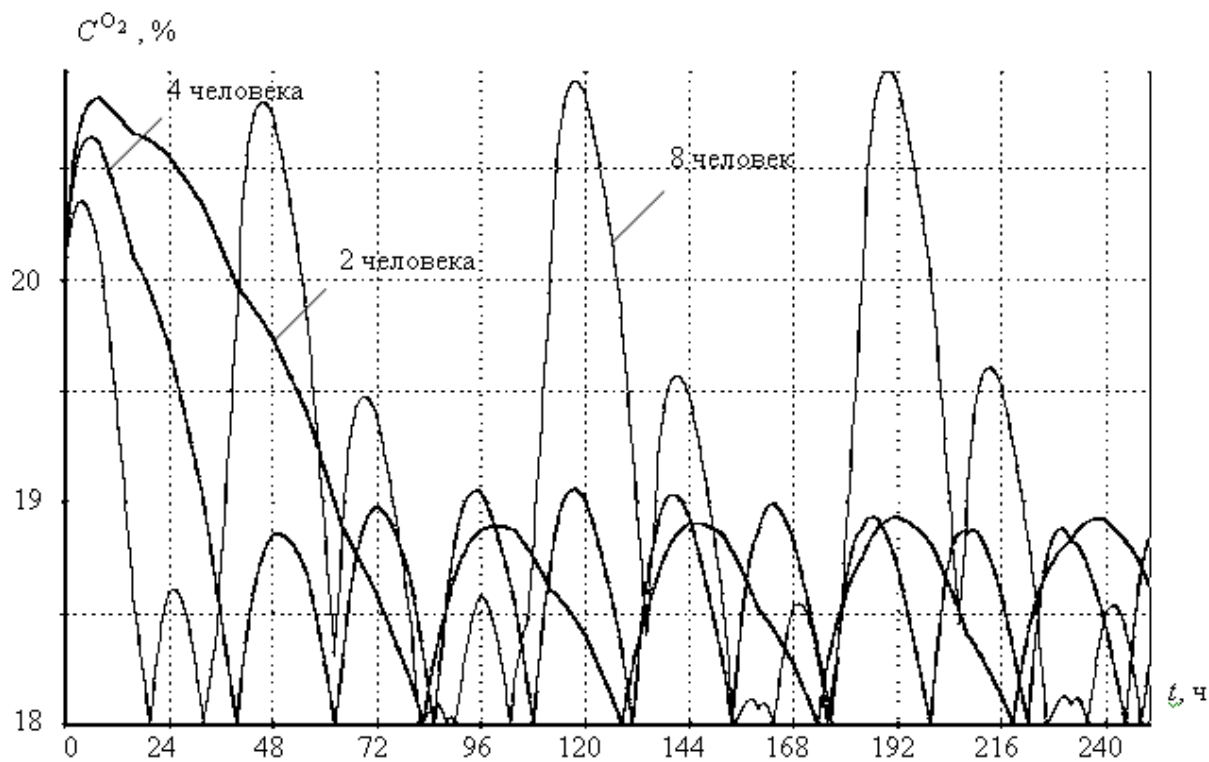


Рис. 3.23. Изменение концентрации кислорода в объеме

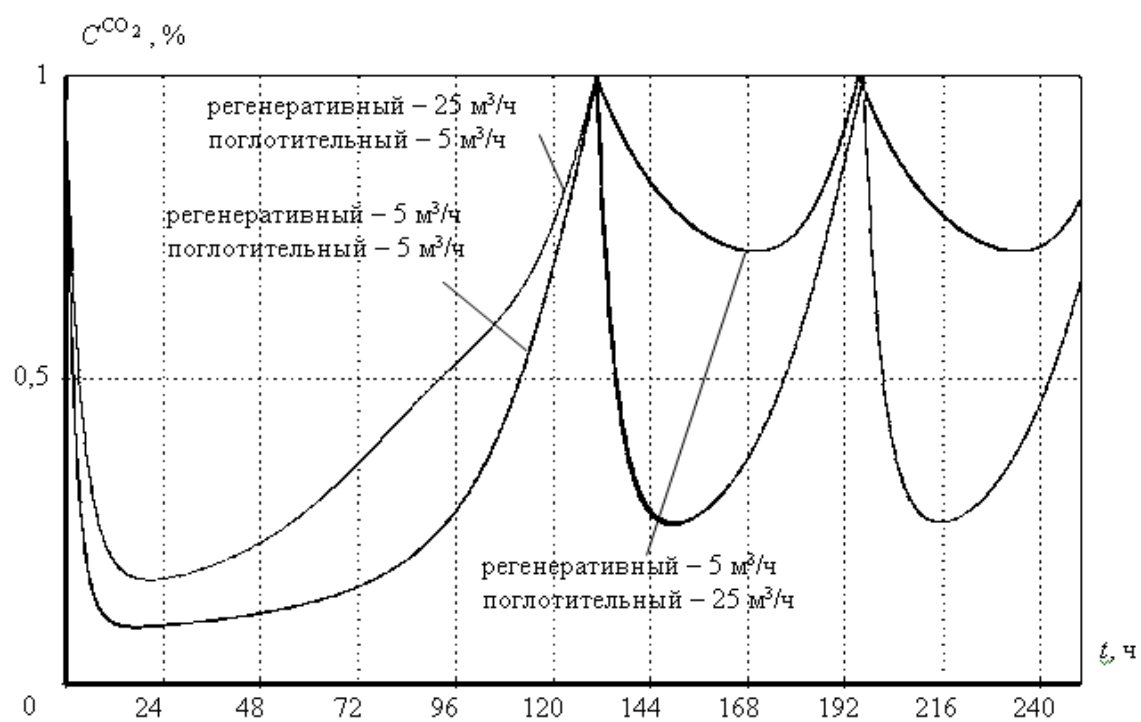


Рис. 3.24. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме

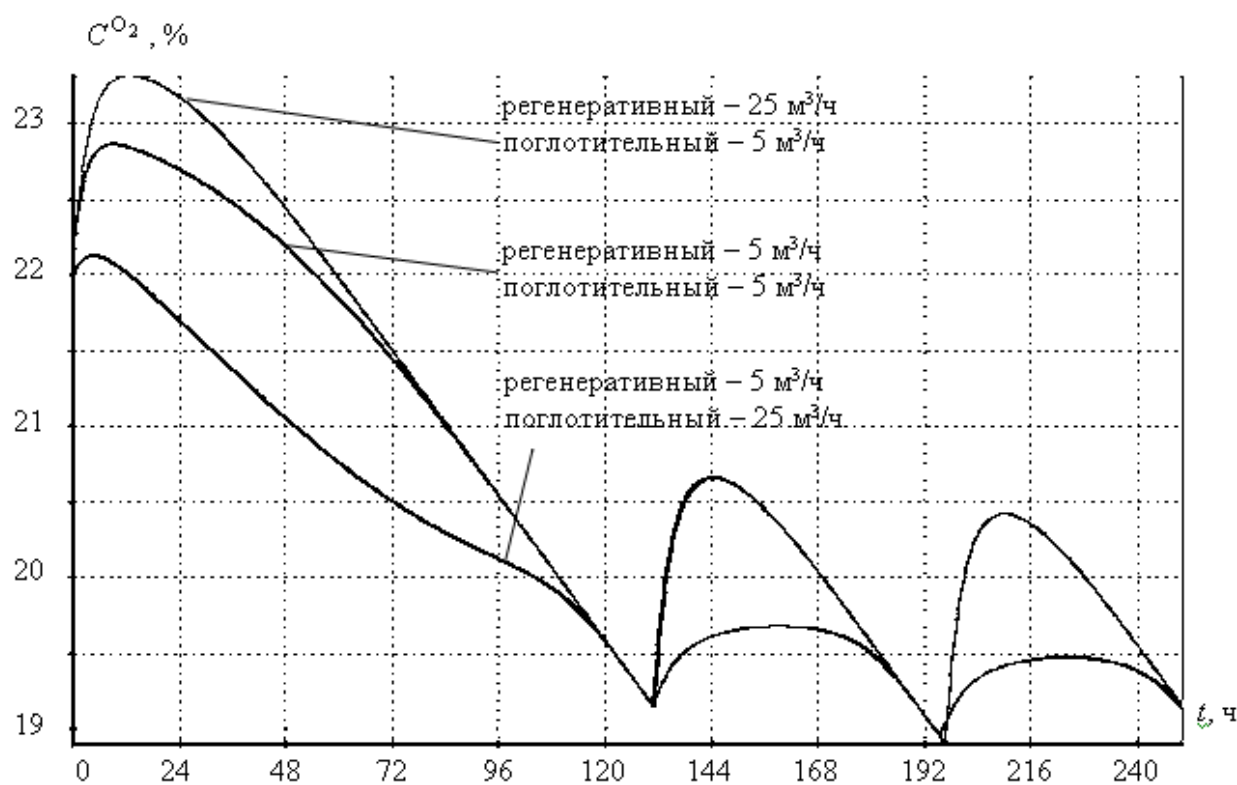


Рис. 3.25. Изменение концентрации кислорода в объеме

Вариант с высокой скоростью воздушного потока в поглотительном реакторе практически неприемлем, поскольку ускоренное поглощение CO₂ не позволяет регенеративному реактору реализовать свои ресурсы.

Таким образом, на основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- важнейшими факторами, влияющими на качество регенеративных процессов в СКЗ, являются количество сорбента (хемосорбента), что определяется геометрией реакторов и конфигурацией СКЗ, а также совокупная величина объемного расхода воздушной смеси. Следует отметить, что конструктивные параметры закладываются на стадии разработки и не могут варьироваться в процессе функционирования регенеративного оборудования, что не позволяет рассматривать их в качестве управляющих воздействий. Напротив, объемный расход воздушной смеси оказывает непосредственное влияние на характер протекания ПРВ и представляет собой одно из наиболее потенциальных «управлений»;
- анализ поведения концентраций основных компонентов воздушной среды ГЗО на длительных интервалах времени выявил существенную зависимость ПРВ от переключения реакторов по мере исчерпания ресурсов, что также позволяет отнести их в разряд возможных управляющих воздействий;
- жизнедеятельность персонала и функционирование нерегенеративного оборудования вызывают значительные изменения негативного характера в газовом составе воздушной среды ГЗО. При этом эффективность ПРВ на всем периоде автономии будет определяться выбранными на стадии разработки режимами работы СКЗ, что зависит от объема и качества априорных сведений обо всех элементах БТК;
- особый интерес представляет совместное функционирование реакторов различных типов, поскольку в определенных сочетаниях потенциально можно достигнуть наиболее оптимального протекания процесса регенерации воздуха, но это требует значительной экспериментальной подготовки.

3.3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Процесс регенерации воздуха, как было отмечено в главе 1, заключается в поддержании концентраций основных компонентов воздушной среды на заданном уровне (в заданных пределах) посредством хемосорбционных процессов, протекающих в реакторах СКЗ. Следовательно, в качестве объекта управления фактически выступает газовый состав воздушной среды ГЗО или, другими словами, концентрации диоксида углерода и кислорода (рис. 3.26).

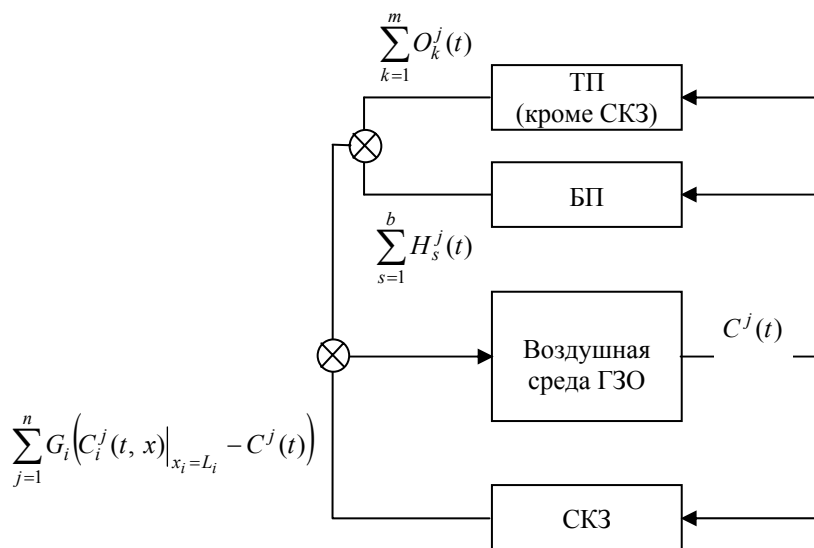


Рис. 3.26. Схема взаимодействия основных компонентов БТК

В соответствии с вышесказанным, исследование ПРВ как объекта управления заключается в изучении факторов, влияющих на состав воздушной среды ГЗО с целью определения входных и выходных переменных, выявления управляющих и возмущающих воздействий, а также в определении возможных принципов управления.

Анализ результатов проведенного вычислительного эксперимента позволил отметить зависимость характера протекания ПРВ от конструктивных параметров СКЗ в целом и каждого реактора в частности, характеристик применяемых сорбентов (хемосорбентов), расхода воздушной смеси через реакторы СКЗ, текущих концентраций диоксида углерода и кислорода в объеме, величины ГЗО, выделительно-поглотительных характеристик персонала и технологического оборудования.

Следует учесть, что конструктивные параметры СКЗ и реакторов закладываются на стадии проектирования и не могут варьироваться в процессе функционирования. Выделительно-поглотительные характеристики работающего технологического оборудования являются величинами контролируемыми, но не регулируемыми. В свою очередь БП обладает значительной физиологической инерционностью, поскольку человек не в состоянии мгновенно начать (на это требуется 10 – 15 мин) или прекратить (15 – 25 мин) выполнение тяжелой работы, уснуть (до 60 мин) и т.д., следовательно, проблема управления персоналом имеет организационный характер. Учитывая, что в реальности задача управления БП возникает крайне редко, можно исключить ее из рассмотрения в условиях данной работы.

Далее проводится классификация различных параметров БТК относительно выбранного объекта управления.

Управляемыми или выходными переменными объекта являются концентрации кислорода $C^{O_2}(t)$ и диоксида углерода $C^{CO_2}(t)$ в ГЗО.

Отклонение управляемых величин от заданных значений вызывают совокупное потребление кислорода и выделение диоксида углерода персоналом $\sum_{s=1}^b H_s^j(t)$ и технологическим оборудованием $\sum_{k=1}^m O_k^j(t)$, т.е. нагрузки по каждому веществу считаются возмущающим воздействием.

Основываясь на том, что поддержание концентраций жизненно важных компонентов воздуха осуществляется СКЗ, можно сделать вывод, что управляемыми переменными являются объемный расход воздушной смеси для каждого реактора $G_i(t)$ и выходные концентрации основных компонентов воздуха $C_i^j(t, x)|_{x_i=L_i}$.

Следует отметить, что концентрации диоксида углерода и кислорода на выходе реактора при постоянной скорости потока воздушной смеси зависят, прежде всего, от степени обработки сорбента (хемосорбента) и могут быть изменены только в результате замены самого реактора на новый.

Таким образом, проведенный анализ показал, что управление ПРВ состоит в поддержании заданного газового состава воздушной среды ГЗО и может осуществляться с использованием СКЗ на основе следующих принципов:

- варьирование расходов воздушной смеси $G_i(t)$ через реакторы СКЗ путем изменения величины питающего напряжения двигателей вентиляторов;
- переключение реакторов СКЗ, исчерпавших свой ресурс (в случае достижения предельной величины проскока), на новые – Γ_i .

3.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

В процессе исследований процесса регенерации воздуха как объекта управления были получены следующие результаты:

- по итогам проведенного вычислительного эксперимента осуществлен анализ характера и степени влияния различных параметров биотехнического комплекса на процессы газоформирования воздушной среды герметично замкнутого объема;
- показано, что управление процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме фактически заключается в поддержании заданного газового состава воздушной среды, относительно которого выполнена классификация входных и выходных координат;
- в соответствии с вышесказанным, управляемыми величинами признаны концентрации основных компонентов воздуха, при этом возмущающее на них воздействие оказывают присутствующие в биотехническом комплексе нагрузки по веществам;
- в качестве основных управляющих воздействий определены объемный расход воздушной смеси через реакторы средств коллективной защиты и порядок их переключения по мере исчерпания ресурсов.

4. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Существенные недостатки подходов, используемых в настоящее время для управления процессом регенерации воздуха в ГЗО, как было отмечено в главе 1, заключаются в применении жестко заданных алгоритмов и рассмотрении БТК в качестве квазистационарной системы с постоянными на длительных интервалах времени параметрами и состояниями функционирования. В этом случае очевидно, что разрабатываемые на основе подобных принципов системы управления практически не способны адекватно реагировать на различного рода отклонения параметров БТК и динамические изменения в характере протекания процессов газоформирования воздушной среды ГЗО.

Таким образом, вопросы разработки более гибких алгоритмов и систем управления ПРВ в ГЗО, ориентирующихся на текущее состояние функционирования биотехнического комплекса, актуальны и требуют проведения ряда исследований, в рамках которых необходимо решить задачи:

- классификации состояний функционирования БТК;
- разработки алгоритма оптимального управления ПРВ на множестве состояний функционирования БТК;
- постановки и решения задач оптимального управления для каждого состояния функционирования БТК;
- формирования структуры систем оптимального управления ПРВ в ГЗО.

4.1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Задачи, решаемые для обеспечения условий жизнедеятельности персонала, зависят от состояний (режимов) и целей функционирования БТК.

Классификацию состояний можно проводить с нескольких позиций в зависимости от принимаемой доминирующей характеристики протекающих в ГЗО процессов.

П о з и ц и я I (с точки зрения БП). Классификация состояний функционирования проводится исходя из величины диапазонов, в которых могут изменяться концентрации основных компонентов воздушной среды ГЗО. Данная классифи-

кация рассмотрена в ряде работ [55, 82, 118].

1) Идеальное состояние – концентрации компонентов воздушной среды ГЗО изменяются в окрестности среднезаданного значения.

2) Нормальное состояние – концентрации компонентов воздушной среды ГЗО изменяются в допустимых (заданных) диапазонах, т.е. $C^j \in [C_n^j, C_b^j]$, где C_n^j, C_b^j – значения нижней и верхней концентраций, соответственно.

3) Экстремальное состояние – концентрации компонентов воздушной среды ГЗО выходят за границы допустимых (заданных) диапазонов, т.е. $C^j < C_n^j \cup C^j > C_b^j$.

4) Аварийное состояние – концентрации основных компонентов воздушной среды значительно отличаются от допустимых значений, что характеризует развитие нештатной ситуации: $C^j \ll C_n^j \cup C^j \gg C_b^j$.

Основной недостаток этой классификации состоит в том, что она не отражает потребление ресурсов СКЗ при поддержании того или иного состояния. Однозначное применение ее возможно только при избытке ресурсов.

П о з и ц и я II. Классификация состояний функционирования БТК проводится с позиции эффективности расхода ресурсов системы регенерации, необходимых для поглощения CO_2 и выделения O_2 . Основной рассматриваемой при этом характеристикой является степень отработки сорбента в реакторе в зависимости от поглощения/выделения веществ, которая показывает текущую относительную емкость сорбента по веществу j .

1) Идеальное состояние – сорбент в каждом реакторе до замены обрабатывает до и более заданной емкости.

2) Нормальное состояние – в среднем сорбент обрабатывает до заданной емкости до замены реактора.

3) Экстремальное состояние – в среднем сорбент не обрабатывает до заданной емкости до замены реактора.

4) Аварийное состояние невозможно оценить с данной позиции, поскольку в этом случае применяются иные принципы организации, способы и средства защиты.

Основной недостаток заключается в том, что не учитываются состояния функционирования с позиции I.

Можно любым образом комбинировать состояния, сформулированные с позиций I и II, но и этого не будет достаточно в связи с тем, что рассмотренные критерии (диапазон изменения концентраций компонентов воздуха и степень отработки сорбента в реакторах) являются следствием основного процесса, протекающего в ГЗО. Результаты имитационных и натурных экспериментальных исследований показывают, что этим основным процессом является процесс выделения диоксида углерода и поглощения кислорода в ГЗО (нагрузка).

Для оценки состояния функционирования БТК (ПРВ в ГЗО) необходимо проанализировать величину и характер нагрузки во времени. Для этого рассмотрим два параметра: \bar{H}^j – среднезаданная нагрузка во времени, $\Delta H_{\max}^j = |H^j(t) - \bar{H}^j|$ – максимальное отклонение нагрузки от среднезаданной, компенсация которой возможна применяющимися СКЗ.

Для перехода непосредственно к классификации на основе нагрузки примем во внимание, что технические средства ПРВ, их характеристики и параметры для конкретного ГЗО рассчитываются с учетом среднезаданной нагрузки, т.е. считается, что нагрузка является стационарной, что не соответствует действительности. Последнее существенно, так как система, обеспечивающая ПРВ в ГЗО, не обладает специально заложенными в нее химико-технологическими характеристиками по отношению к виду нагрузки, а следовательно, влияние конкретной реализации системы регенерации учитываться не будет. Это замечание существенно, так как если свойства СКЗ могут меняться в соответствии с нагрузкой, ее величины и вида, то при проведении классификации требовался бы учет влияния этих изменений. В дальнейшем могут быть разработаны способы задания определенных характеристик аппаратному обеспечению ПРВ при создании новых типов (хемо)сорбентов и аппаратов, но в рамках данной работы такая цель не ставится.

П о з и ц и я III. Классификация состояний функционирования БТК относительно \bar{H}^j и ΔH_{\max}^j .

1) Идеальное состояние – текущие нагрузки равны среднезаданным: $H^j(t) = \bar{H}^j$.

2) Нормальное состояние – отклонение текущих нагрузок от среднезаданных не превышает максимально допустимую величину: $H^j(t) \in (\bar{H}^j - H_{\max}^j, \bar{H}^j + H_{\max}^j)$.

3) Экстремальное состояние – отклонение текущих нагрузок от среднезаданных превышает максимально допустимую величину: $H^j(t) < \bar{H}^j - H_{\max}^j \cup H^j(t) > \bar{H}^j + H_{\max}^j$.

4) Аварийное состояние определяется появлением значительных непредвиденных нагрузок хотя бы по одному из веществ, стремительно изменяющих состав воздушной среды ГЗО, приводя к развитию нештатной ситуации.

На основе анализа состояний и целей функционирования БТК и СКЗ можно сформулировать основные, характерные им классы задач управления, предварительно сформировав систему допущений и ограничений.

4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ДОПУЩЕНИЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим допущения, которые необходимо учитывать при постановке и решении задач управления процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме:

– принятие стационарной или квазистационарной нагрузки по компонентам воздушной среды ГЗО. Данное допущение может быть принято в большинстве состояний функционирования БТК, если величина объема значительно больше величины потребления компонентов воздуха всей БП и работа персонала распределена во времени;

– принятие периодического характера нагрузки;

– принятие функционально заданного характера нагрузки. Данное допущение принимается только в том случае, если известна зависимость выделения диоксида углерода и поглощения кислорода персоналом от нагрузки;

– принятие содержания кислорода и диоксида углерода в ГЗО на уровне начальных концентраций соответственно, т.е. в начальный момент отсутствует запас кислорода и избыток диоксида углерода, что определяет необходимость использования СКЗ (отсутствует начальная инерционность ГЗО). Все концентрации остальных компонентов воздушной

среды в ГЗО находятся внутри заданных диапазонов изменения. Данное допущение исключает влияние запасов ГЗО на характер регенерации воздуха, а все массообменные процессы, направленные на обеспечение заданного газового состава воздушной среды ГЗО, принадлежат системе регенерации. При длительном времени функционирования, значительно большем, чем время функционирования отдельного реактора, данное допущение вполне соответствует реальному процессу спустя некоторое время с момента начала функционирования ПРВ в ГЗО;

– СКЗ включает регенеративные и поглотительные реакторы с одинаковыми функционально-технологическими характеристиками;

– однотипные реакторы включаются и функционируют одновременно;

– расход воздушной смеси через реакторы осуществляется вентиляторами с одинаковыми характеристиками;

– при отработке сорбента в реакторах нестационарного типа не происходит изменения сопротивления потоку;

– отсутствуют ошибки задания и измерения.

При постановке и решении задач управления ПРВ могут быть использованы следующие ограничения:

– ограничение на суммарное время функционирования отдельного реактора, или на коэффициент использования его сорбента;

– ограничения на концентрации компонентов воздушной среды ГЗО;

– ограничение на максимальную величину нагрузки по некоторому компоненту воздушной среды ГЗО. Данное ограничение определяет максимально возможную нагрузку, которую могут компенсировать СКЗ;

– ограничение на количество одновременно функционирующих реакторов;

– ограничение на запас реакторов в ГЗО.

Количество допущений и ограничений может быть изменено в зависимости от дополнительных факторов, влияющих на газовый состав воздушной среды ГЗО или на систему контроля и управления, поэтому их анализ в каждом конкретном случае необходимо проводить индивидуально.

4.3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Разработка алгоритма оптимального управления ПРВ в ГЗО основывается на следующих аспектах, сформулированных ранее.

1. Объектом управления фактически является газовый состав воздушной среды ГЗО, на который оказываются возмущающие воздействия вследствие жизнедеятельности персонала и функционирования технологического нерегенеративного оборудования. Присутствующие в БТК СКЗ предназначены для компенсации отклонений параметров воздушной среды ГЗО, вызванных возмущающими воздействиями, т.е. оказывают управляющее воздействие. Обоснованными, по итогам имитационных исследований, принципами управления являются варьирование величины объемного расхода воздушной смеси на каждом реакторе, входящем в состав СКЗ, а также переключение исчерпавших ресурс реакторов на новые вследствие их нестационарности.

2. Определены режимы функционирования БТК: идеальный, нормальный, экстремальный и аварийный. Идеальный режим характеризуется точно заданными параметрами БТК, но в реальных условиях существуют различного рода отклонения, в связи с чем данный режим является «теоретическим». Нормальный, экстремальный и аварийный режимы являются стадиями действительного функционирования БТК и могут переходить друг в друга. Следует отметить, что к аварийному режиму слабо применимы указанные принципы управления и способы защиты, поэтому он рассматриваться не будет.

3. Наиболее распространенной и характерной задачей управления ПРВ в ГЗО является задача поддержания концентраций основных компонентов воздушной среды в заданных диапазонах: для $\forall H^j(t) \in H$ и $\forall O^j(t) \in O$ необходимо найти такие $G_i(t)$ и Γ_i , при которых

$$C^j(G_i(t), \Gamma_i) \in [C_n^j; C_v^j]$$

при уравнениях связи в виде математической модели (2.11).

4. В процессе решения принимаются принятые выше допущения и ограничения, рассматривается совмещенная схема регенерации как наиболее сложная с точки зрения определения управляющих воздействий из-за существования жестко заданного коэффициента регенерации с одинаковыми регенеративными реакторами. Начальные концентрации компонентов воздушной среды ГЗО соответствуют среднезаданным.

Условимся, что основной целью управления ПРВ в БТК для выбранной задачи является удержание концентраций диоксида углерода и кислорода в ГЗО на уровне или в окрестности среднезаданных значений – \bar{C}^j . В соответствии с этим необходимо определить такой объемный расход воздушной смеси через реакторы СКЗ, а также порядок их переключения, чтобы максимально компенсировать присутствующие в ГЗО возмущающие воздействия.

Разрабатываемый алгоритм оптимального управления ПРВ заключается в декомпозиции сформулированной задачи на три подзадачи оптимального управления для идеального, нормального и экстремального состояний функционирования БТК и их последовательном рассмотрении [119, 120].

4.3.1. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ИДЕАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Характерной чертой идеального состояния является формализованность всех технологических и функциональных параметров БТК, задаваемых техническим заданием и по итогам проектных работ. Это позволяет приступить к определению режимов функционирования регенеративного оборудования уже на стадии разработки СКЗ.

Исходя из установленной цели управления ПРВ в ГЗО – поддержание постоянного уровня концентраций диоксида углерода и кислорода на среднезаданном уровне и принимая начальные концентрации равными среднезаданным, можно сделать вывод, что задача управления в идеальном режиме заключается в минимизации изменений концентраций веществ, т.е. $\frac{dC^j(t)}{dt} \rightarrow \min$, что достигается максимальной компенсацией присутствующих в БТК нагрузок функционирующим регенеративным оборудованием.

Тогда задача управления ПРВ в идеальном режиме формулируется следующим образом [119]: необходимо найти такие $G_i(t)$, чтобы минимизировать функционал I_1

$$I_1 = \frac{1}{V} \int_0^T \sum_{j=1}^2 \left[\sum_{i=1}^n G_i(t) \left(C_i^j(t, x) \Big|_{x_i=L_i} - C^j(t) \right) \pm \sum_{k=1}^m O_k^j(t) \pm \sum_{s=1}^b H_s^j(t) \right]^2 dt \rightarrow \min$$

при уравнениях связи (2.10), $C^j \in [C_H^j; C_B^j]$.

Следует отметить, что на стадии разработки СКЗ, когда рассматривается идеальное состояние функционирования БТК, ограничения на величину объемного расхода справа не накладываются. Напротив, исходя из максимума получаемой функции $G(t)$ определяются номинальный режим работы и тип вентилятора, который обеспечит возможность управления в реальных состояниях функционирования БТК.

Принимая во внимание, что в состав СКЗ входят однотипные одновременно функционирующие реакторы, то управления $G_i(t)$ и Γ_i будут одинаковыми для всех реакторов, тогда функционал I_1 можно записать в следующем виде:

$$I_1 = \frac{n}{V} \int_0^T \sum_{j=1}^2 \left[G(t) \left(C^j(t, x) \Big|_{x=L} - C^j(t) \right) \pm \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^m O_k^j(t) + \sum_{s=1}^b H_s^j(t) \right) \right]^2 dt \rightarrow \min$$

при уравнениях связи (2.10), $C^j \in [C_H^j; C_B^j]$.

Здесь T – время работы реакторов до полного исчерпания ресурсов, которое рассчитывается исходя из совокупной емкости всех реакторов СКЗ, работающих одновременно, и суммарной нагрузки в БТК, т.е. время, за которое выделится/поглотится CO_2/O_2 персоналом и технологическим оборудованием в таком количестве, в котором способны поглотить/выделить работающие реакторы СКЗ.

Управление Γ определяет порядок переключения исчерпавших ресурс реакторов на новые через период времени T , в соответствии с чем $a_i^{\text{CO}_2}(T, x) = 0$, $a_i^{\text{O}_2}(T, x) = a_{ix0}^{\text{O}_2}$, $G(T) = G(0)$.

Сформулированная задача является задачей оптимального управления, поэтому для ее решения можно воспользоваться принципом минимума Понтрягина (использование слова «минимум» никак не влияет на суть метода, а лишь символизирует задачу минимизации функционала) [94, 96, 97, 121].

Для решения задачи управления выбранным методом введем следующие обозначения:

$$\varphi^j = \frac{n}{V} \left[G(t) \left(C^j(t, x) \Big|_{x_i=L_i} - C^j(t) \right) \pm \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^m O_k^j(t) + \sum_{s=1}^b H_s^j(t) \right) \right];$$

$$\mathbf{C}(t) = \begin{pmatrix} C^{\text{CO}_2}(t) \\ C^{\text{O}_2}(t) \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}}(t) = \begin{pmatrix} \bar{C}^{\text{CO}_2}(t) \\ \bar{C}^{\text{O}_2}(t) \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)) = \begin{pmatrix} \varphi^{\text{CO}_2}(\mathbf{C}(t), G(t)) \\ \varphi^{\text{O}_2}(\mathbf{C}(t), G(t)) \end{pmatrix}.$$

Тогда система уравнений (2.1) для одного реактора примет вид:

$$\frac{d\mathbf{C}(t)}{dt} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)), \quad (4.1)$$

а функционал I_1 :

$$I_1 = \int_0^T \langle \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)), \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)) \rangle dt$$

при уравнениях связи (2.10), $C^j \in [C_H^j; C_B^j]$.

Применяя принцип минимума Понтрягина, получаем следующую систему уравнений ($\boldsymbol{\lambda}(t)$ – дополнительный вектор):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mathbf{C}(t)}{dt} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)); \\ \frac{d\boldsymbol{\lambda}(t)}{dt} = -\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)) \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}(t)} - \boldsymbol{\lambda}(t) \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}(t)}; \\ \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)) \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}(t)} + \boldsymbol{\lambda}(t) \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial G(t)} = 0; \\ \boldsymbol{\lambda}(T) = 0; \\ \mathbf{C}(0) = \overline{\mathbf{C}}, \end{array} \right.$$

которая представляет собой нелинейную двухточечную краевую задачу, решение которой крайне сложно, если вообще возможно. В связи с этим для решения поставленной задачи управления ПРВ для идеального состояния функционирования БТК необходимо применять другие методы.

Очевидно, что искомое управление $G(t)$ представляет собой гладкую непрерывную функцию, что разрешает применение прямых методов вариационного исчисления, в том числе метода Ритца. Выбранный метод предполагает поиск функции $G(t)$ среди линейной комбинации известных функций [95, 97, 122]:

$$G(t) = \sum_{\eta=1}^{\nu} \alpha_{\eta} W_{\eta}(t),$$

где α_{η} – искомые коэффициенты; $W_{\eta}(t)$ – известные функции.

На таких линейных комбинациях функционал I_1 превращается в функцию ν переменных – $\Omega(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{\eta})$. Коэффициенты α_{η} выбираются так, чтобы функция $\Omega(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{\eta})$ достигала минимума, следовательно, они должны быть определены из системы уравнений:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \alpha_{\eta}} = 0 \quad (\eta = 1, 2, \dots, \nu).$$

В условиях данной задачи аналитическое решение получить достаточно трудно, поэтому для поиска коэффициентов α_{η} необходимо использование какого-либо стандартного метода оптимизации, поэтому в работе применялся метод Нелдера – Мида.

Следует отметить, что использование математической модели ПРВ в виде, представленном во второй главе, крайне неудобно и сложно, поскольку она включает обыкновенные дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных. В связи с этим возникает необходимость приведения системы уравнений (2.11) к однообразной форме, содержащей, например, только обыкновенные дифференциальные уравнения. Для этого, используя интерполяционный полином Лагранжа [56, 123] и выбирая по длине L_i реактора $\sigma + 1$ точку x_0, \dots, x_{σ} , представим C_i^j в виде:

$$\begin{aligned} C_i^j(t, x) &= \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_{\sigma})}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\dots(x_0-x_{\sigma})} C_i^j(t, x_0) + \dots + \\ &+ \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{\sigma-1})}{(x_{\sigma}-x_1)(x_{\sigma}-x_2)\dots(x_{\sigma}-x_{\sigma-1})} C_i^j(t, x_{\sigma}) = \\ &= f_0(x) C_i^j(t, x_0) + \dots + f_{\sigma}(x) C_i^j(t, x_{\sigma}), \end{aligned}$$

где $C_i^j(t, x_z)$, $z = \overline{0, \sigma}$ – решение в соответствующей точке x_z , зависящее только от времени t , $x_0 = 0$, $x_{\sigma} = L_i$.

Тогда система уравнений (2.11) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
V \frac{dC^j(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n G_i (C_i^j(t, x_\sigma) - C^j(t)) \pm \sum_{k=1}^m O_k^j(t) \pm \sum_{s=1}^b H_s^j(t); \\
\frac{\partial C_i^j(t, x_z)}{\partial t} = D_i \left(\frac{d^2 f_0(x_z)}{dx^2} C_i^j(t, x_0) + \dots + \frac{d^2 f_\sigma(x_z)}{dx^2} C_i^j(t, x_\delta) \right) - \\
- \omega_i(t, x) \left(\frac{df_0(x_z)}{dx} C_i^j(t, x_0) + \dots + \frac{df_\sigma(x_z)}{dx} C_i^j(t, x_\sigma) \right) - \frac{\partial a_i^j(t, x_z)}{\partial t}; \\
d(\omega_i^2) = -2 \frac{dP_i}{\rho}, \quad dP_i = \frac{RT}{F_i(x_z) dx} \sum_{j=1}^2 d\theta_i^j, \quad \theta_i^j = C_i^j \sum_{z=1}^{\xi} \theta_i^z; \\
\omega_i(t, x) = \omega_i(G_i(t), F_i(x_z), C_i^{\text{CO}_2}(t, x_z), C_i^{\text{O}_2}(t, x_z)); \\
C^j(0) = C_0^j, \quad C_i^j(0, x_z) = C_0^j(x_z), \quad C_i^j(t, x)|_{x=0} = C^j(t), \quad \left. \frac{\partial C_i^j(t, x)}{\partial x} \right|_{x=L_i} = 0; \\
\frac{\partial a_i^j(t, x_z)}{\partial t} = (-1)^{j+1} \beta_{i\chi}^j(x_z) C_i^{\text{CO}_2}(t, x_z) \Phi_{i\chi}(a_i^j(t, x_z), a_{i\chi 0}^j(x)); \\
x \in \left[L_i - \sum_{i=\chi}^{hp_i} l_{i\chi}, \sum_{i=1}^{\chi} l_{i\chi} \right], \quad a_i^{\text{CO}_2}(0, x_z) = 0, \quad a_i^{\text{O}_2}(0, x_z) = a_{i\chi 0}^{\text{O}_2}; \\
i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, 2}, \quad \chi = \overline{1, hp_i}, \quad z = \overline{0, \sigma}.
\end{array} \right.$$

Далее представлен соответствующий алгоритм поиска оптимального управления $G(t)$ для идеального состояния функционирования БТК.

Шаг 1. Задаются исходные данные:

а) параметры БТК, в том числе величина ГЗО V ; параметры воздушной среды – вектор начальных концентраций кислорода $C_0^{\text{O}_2}$ и диоксида углерода $C_0^{\text{CO}_2}$; количество источников/стоков основных компонентов воздуха, кроме регенеративного оборудования (b – источники/стоки БП, m – источники/стоки ТП); величина нагрузки для каждого источника/стока по каждому компоненту воздуха (H_s^j , $s = \overline{1, b}$ – для БП, O_k^j , $k = \overline{1, m}$ – для ТП); время автономии T_a ;

б) параметры СКЗ – количество n и типы реакторов, функционирующих одновременно;

в) геометрические параметры каждого реактора СКЗ, в том числе длина L_i и площадь сечения $F_i(x)$ реактора, $i = \overline{1, n}$; количество химических продуктов, содержащихся в i -м реакторе, hp ; толщина каждого слоя химического продукта h_{χ_i} , $\chi = \overline{1, hp}$. Далее для удобства принимается использование в одном реакторе только одного химического продукта;

г) свойства химических продуктов – массообменные и кинетические коэффициенты $a_{\chi 0}^{\text{CO}_2}$ и $\beta_{\chi}^{\text{CO}_2}$ для всех типов реакторов и $a_{\chi 0}^{\text{O}_2}$ и $\beta_{\chi}^{\text{O}_2}$ для регенеративных реакторов, а также зависимость текущей и предельной емкостей сорбента (хемосорбента) – $\Phi_{\chi}(a^j(t, x), a_{\chi 0}^j(x))$.

д) рассчитывается время работы реакторов до переключения – T исходя из совокупной емкости всех реакторов СКЗ, работающих одновременно, и суммарной нагрузки в БТК, т.е. время, за которое выделится/поглотится CO_2/O_2 персоналом и технологическим оборудованием в таком количестве, в котором способны поглотить/выделить работающие реакторы;

е) задается критерий останова ε ;

ж) количество членов линейной комбинации $\nu = 1$.

Шаг 2. Для текущего значения ν формируется линейная комбинация $G(t) = \sum_{\eta=1}^{\nu} \alpha_{\eta} W_{\eta}(t)$. Подставляя $G(t)$ в подынте-

гральное выражение функционала I_1 получаем функцию ν переменных – $\Omega(\alpha_1, \dots, \alpha_{\nu})$.

Шаг 3. Используя метод Нелдера – Мида, находим неизвестные коэффициенты α_{η} , минимизирующие функцию Ω .

Шаг 4. Подставляя сформированную функцию $G(t)$ с найденными коэффициентами α_{η} в функционал I_1 , численно находим его значение.

Шаг 5. Полученное значение функционала сравнивается с текущим минимальным значением. Если вычисленное значение больше текущего или разница между ними меньше заданной величины ε , то алгоритм поиска завершается, а коэффициенты α_{η} принимаются равными найденным на предыдущей итерации; иначе полученное значение функционала принимается за минимальное, устанавливаются вычисленные коэффициенты α_{η} , количество членов линейной комбинации ν увеличивается на единицу и происходит переход к шагу 2.

На рис. 4.1 представлена упрощенная блок-схема алгоритма.

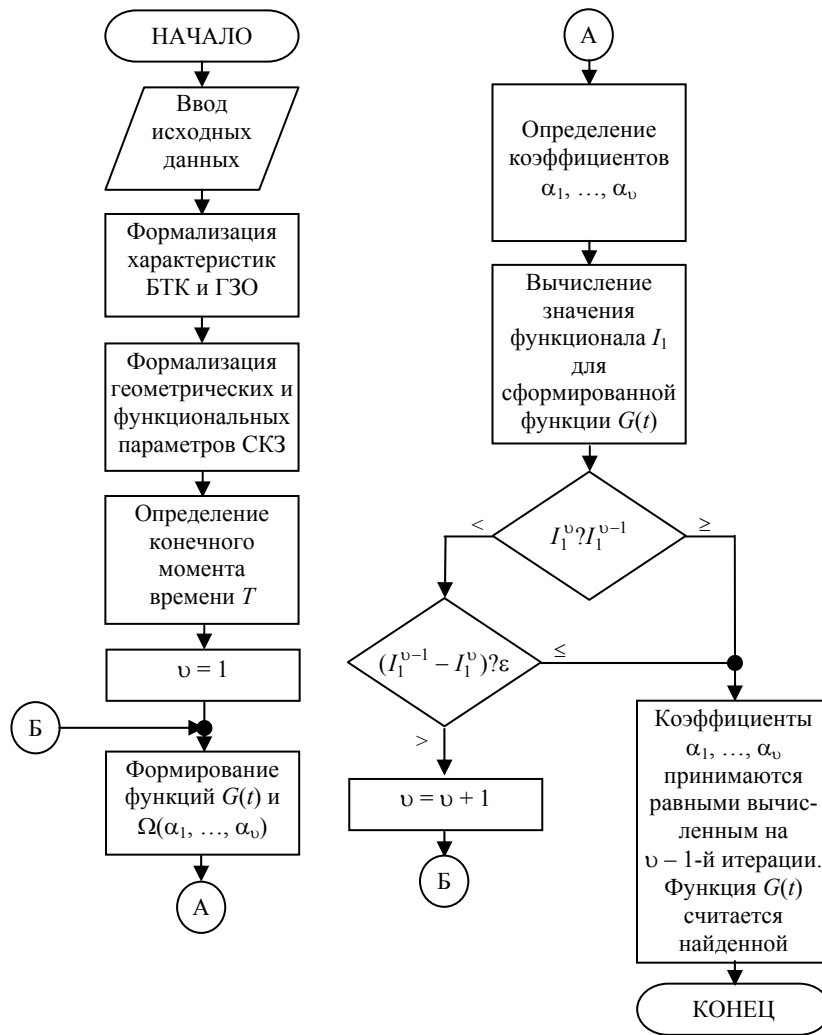


Рис. 4.1. Блок-схема алгоритма поиска оптимального управления $G(t)$ для идеального состояния функционирования БТК

Практическая реализация представленного алгоритма позволила получить функцию изменения объемного расхода на интервале времени $[0, T]$ для параметров биотехнического комплекса, приведенных в главе 3 (рис. 4.2).

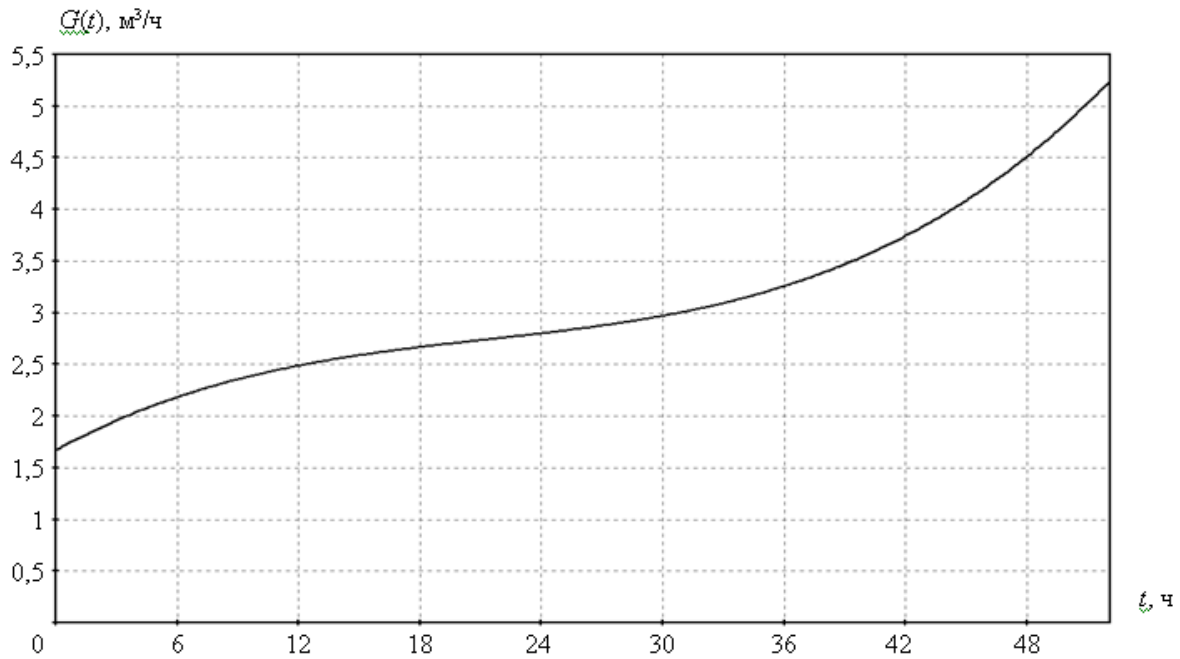


Рис. 4.2. Решение задачи оптимального управления для идеального состояния функционирования биотехнического комплекса

На рис. 4.3 – 4.6 представлены сравнительные результаты математического моделирования процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме на интервале времени $[0, T]$ при различных значениях объемного расхода воздушной смеси через реакторы СКЗ ($G = \text{const}$) и рассчитанной функциональной зависимости $G(t)$. Следует отметить, что время T для каждого случая означает момент полного исчерпания ресурсов реактора.

Анализ графиков на представленных рисунках показывает, что выбор больших значений объемного расхода приводит к существенным, хотя и допустимым отклонениям концентраций диоксида углерода и кислорода от начальных уровней, что нежелательно с точки зрения комфортности условий жизнедеятельности персонала и пожаробезопасности в ГЗО.

Снижение величины объемного расхода приводит к уменьшению отклонений концентраций веществ, при этом происходит увеличение периода функционирования реактора. Вместе с тем, установка малых значений, несмотря на значительную продолжительность функционирования реактора, приводит к неспособности последнего удерживать концентрации основных компонентов воздушной среды ГЗО в заданных пределах.

По мере приближения величины объемного расхода воздушной смеси к области значений оптимальной функции $G(t)$ наблюдается тенденция стабилизации газового состава воздуха, а концентрации диоксида углерода и кислорода в объеме варьируются в окрестности начальных значений. При этом очевидно, что наилучшее распределение концентраций веществ на всем интервале времени $[0, T]$ отмечается только для оптимальной функции $G(t)$, а увеличенная продолжительность функционирования реактора позволяет сделать предположение о более эффективном использовании его ресурсов.

Следует отметить, что для выбранных условий невозможно полностью устранить отклонения концентраций диоксида углерода и кислорода от среднезаданных значений, что вызвано существованием коэффициента регенерации, устанавливающего жесткую зависимость между количеством выделяемого кислорода и количеством поглощенного диоксида углерода. Именно поэтому попытка удержать концентрацию одного из рассматриваемых веществ на заданном уровне приведет к еще большему отклонению другого.

На рис. 4.7, 4.8 рассматривается длительный интервал (10 суток) функционирования БТК, в течение которого производится переключение отработавших реакторов на новые.

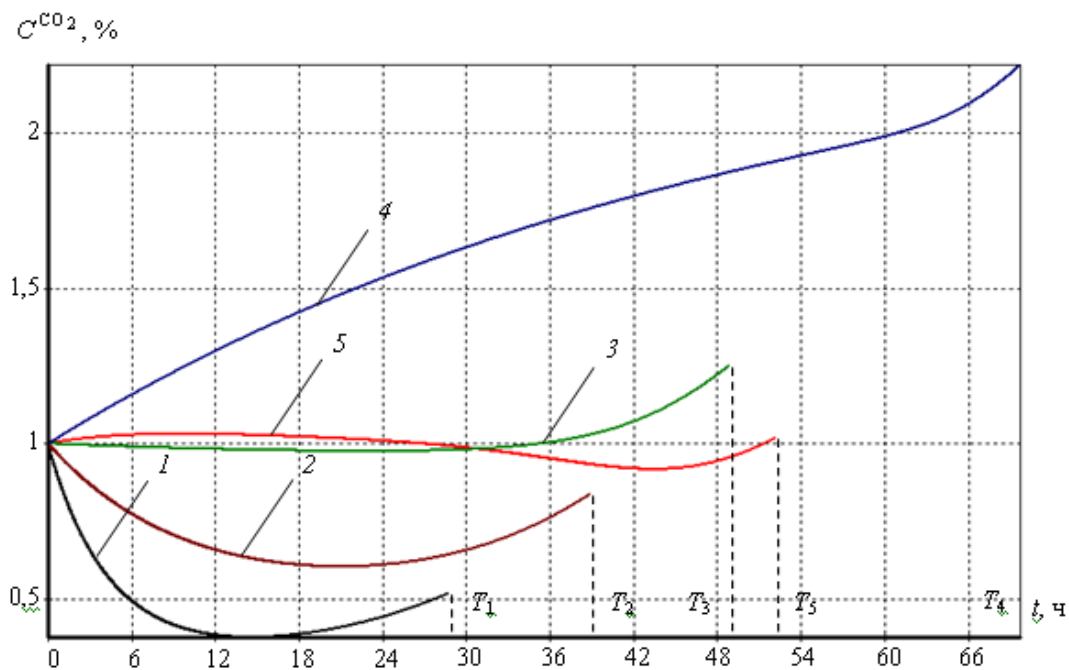


Рис. 4.3. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме:
 1 - $G = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$; 2 - $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$; 3 - $G = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$; 4 - $G = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$; 5 - $G = G(t)$

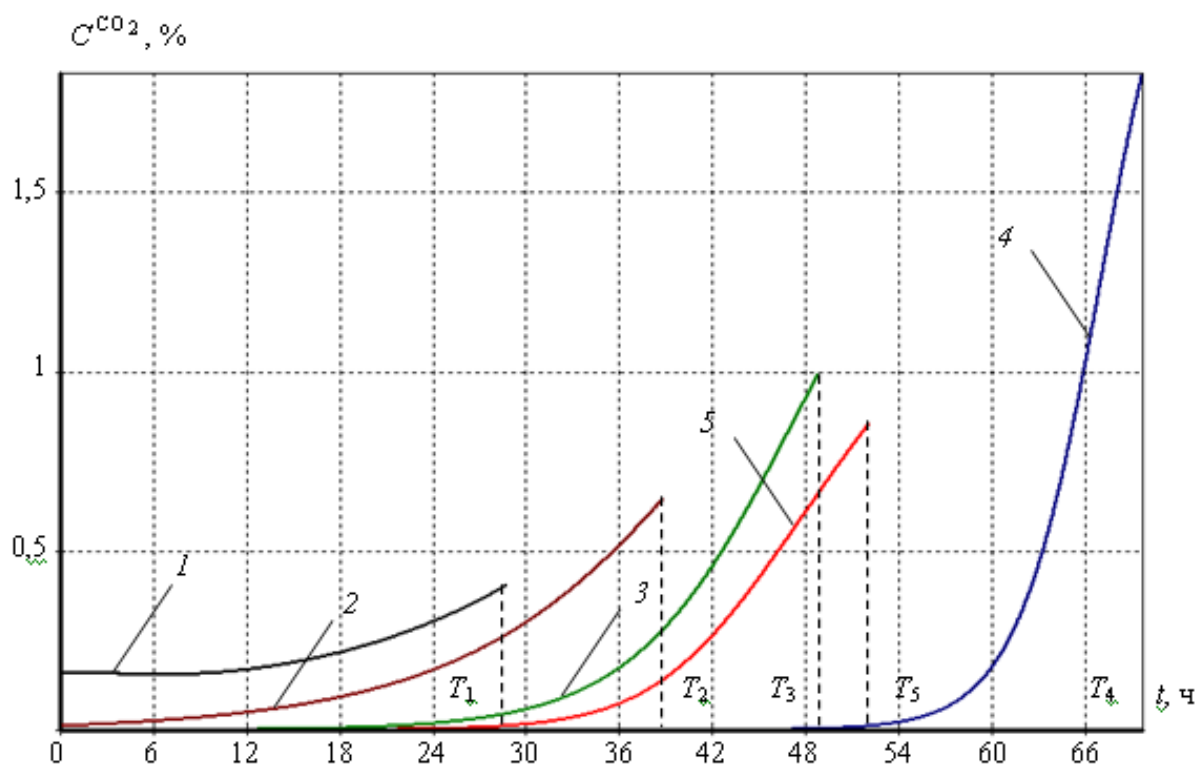


Рис. 4.4. Изменение концентрации диоксида углерода на выходе реактора:
 1 - $G = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$; 2 - $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$; 3 - $G = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$; 4 - $G = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$; 5 - $G = G(t)$

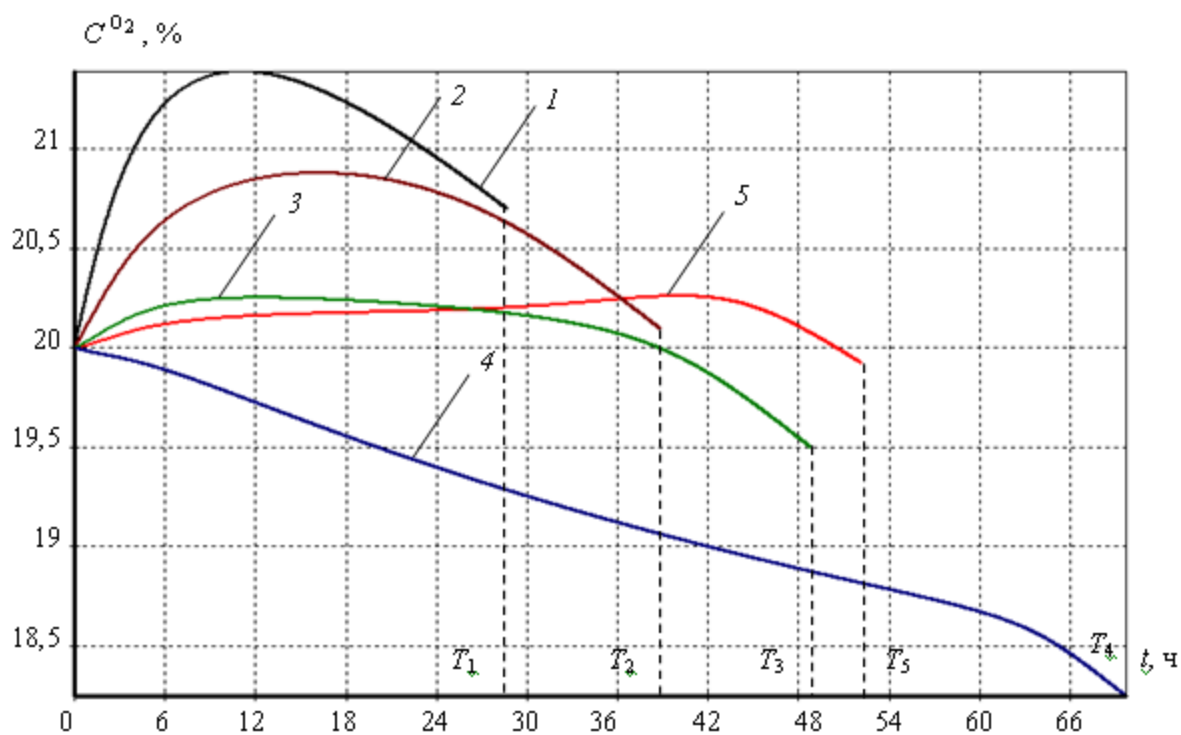


Рис. 4.5. Изменение концентрации кислорода в объеме:
 1 - $G = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$, 2 - $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, 3 - $G = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$, 4 - $G = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$, 5 - $G = G(t)$

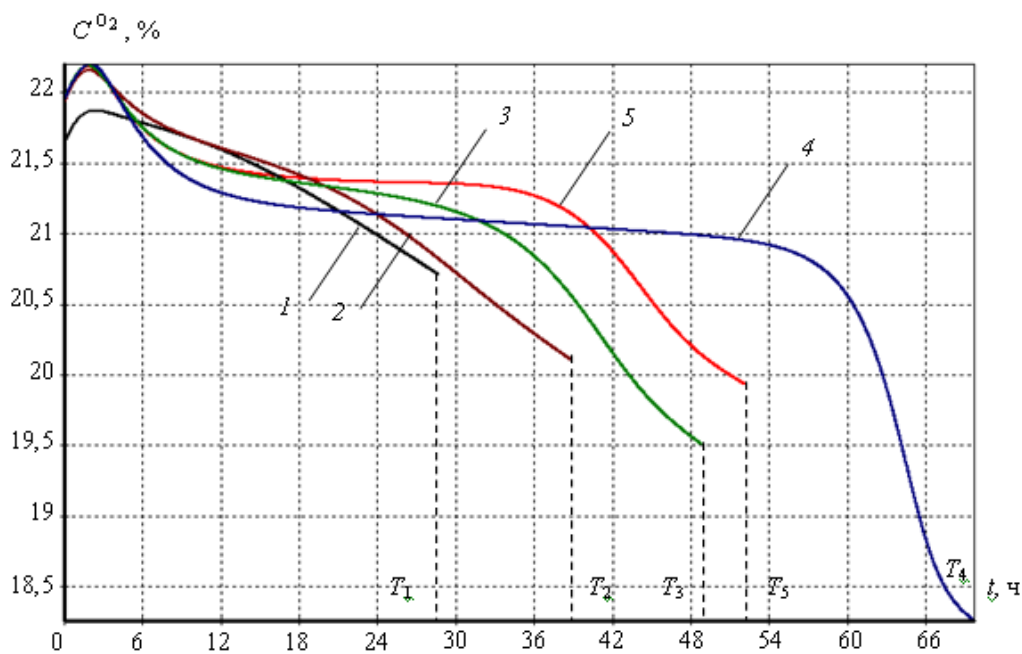


Рис. 4.6. Изменение концентрации кислорода на выходе реактора:
 1 - $G = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$, 2 - $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, 3 - $G = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$, 4 - $G = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$, 5 - $G = G(t)$

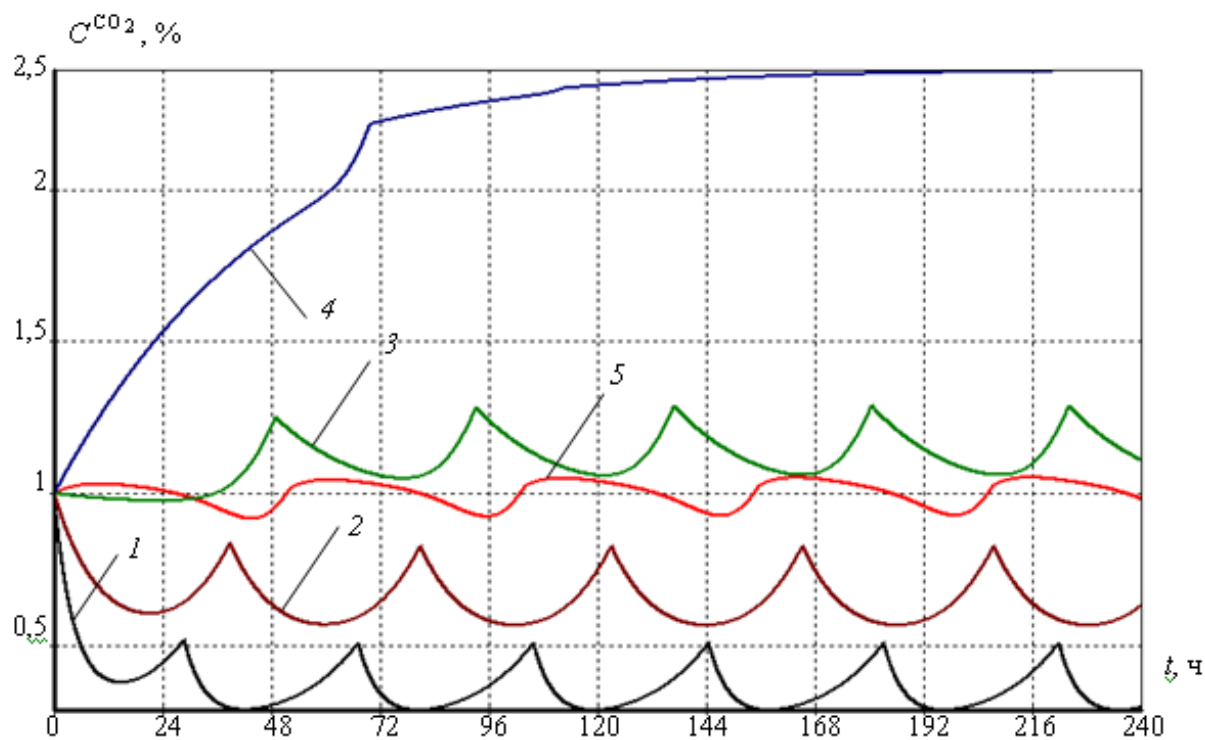


Рис. 4.7. Изменение концентрации диоксида углерода в объеме:
 1 – $G = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$, 2 – $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, 3 – $G = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$, 4 – $G = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$, 5 – $G = G(t)$

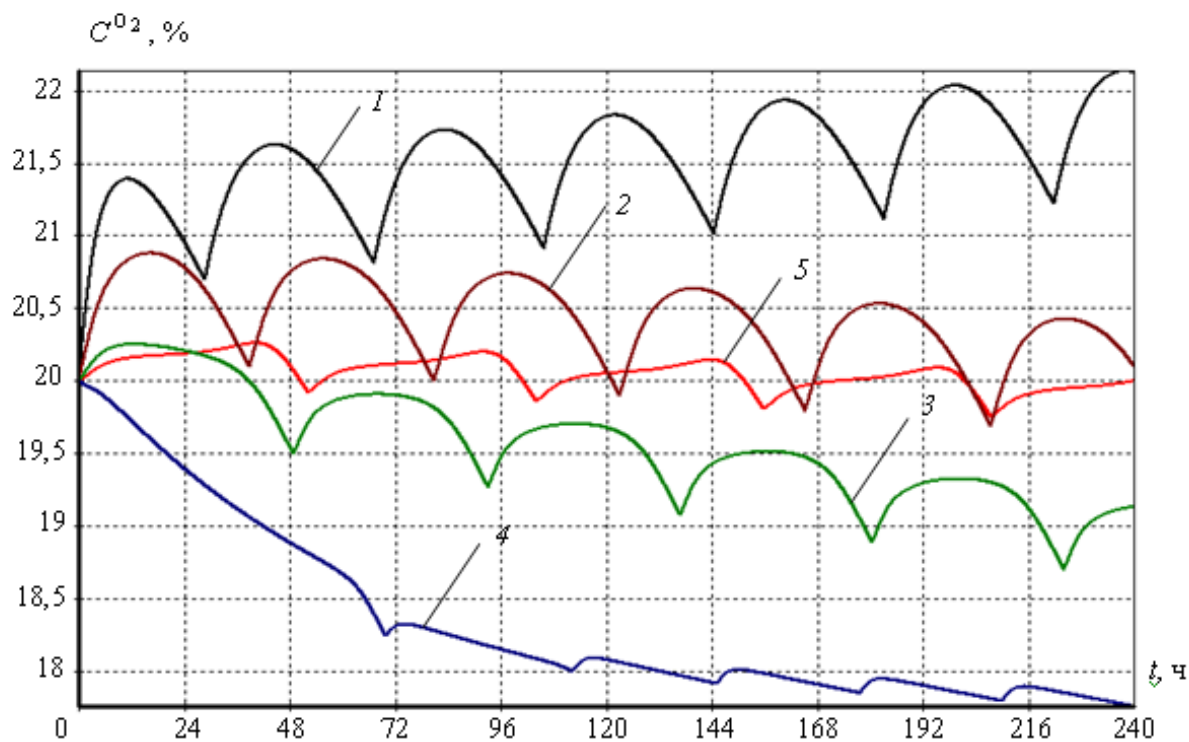


Рис. 4.8. Изменение концентрации кислорода в объеме:
 1 – $G = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$, 2 – $G = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, 3 – $G = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$, 4 – $G = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$, 5 – $G = G(t)$

Очевидно, что большие значения объемного расхода воздушной смеси через реакторы СКЗ вызывают эффект «закислораживания» ГЗО, что повышает угрозу возгорания. С другой стороны, понижение величины G не позволит максимально компенсировать присутствующие в БТК нагрузки по компонентам воздушной среды. Следовательно, в реальных условиях при отсутствии в ГЗО дополнительных возмущающих воздействий неоптимальные режимы функционирования СКЗ формируют высокую вероятность перехода БТК из нормального состояния в экстремальное.

Анализ графиков при оптимальном изменении объемного расхода показывает незначительные отклонения концентраций диоксида углерода и кислорода от среднезаданных значений даже на длительных интервалах времени, при этом меньшее количество переключений реакторов свидетельствует о ресурсосберегающем режиме функционирования СКЗ

Сравнение количественных показателей оптимального и неоптимальных режимов функционирования СКЗ представлено в табл. 4.1.

4.1. Показатели различных режимов функционирования СКЗ

Показатель	$G = G(t)$	$G = 25,$ м ³ /ч	$G = 10,$ м ³ /ч	$G = 5,$ м ³ /ч	$G = 2,$ м ³ /ч
Максимальное отклонение концентрации диоксида углерода в объеме на интервале времени $[0, T]$, %	0,09	0,62	0,39	0,24	1,21
Отклонение концентрации диоксида углерода в объеме в момент времени T , %	0,002	0,49	0,17	0,24	1,21
Максимальное отклонение концентрации кислорода в объеме на интервале времени $[0, T]$, %	0,25	1,38	0,8	0,5	1,75
Отклонение концентрации кислорода в объеме в момент времени T , %	0,08	0,71	0,09	0,5	1,75
Продолжительность T функционирования реактора СКЗ, мин	3128	1722	2329	2930	4183
Количество переключений реакторов СКЗ на длительных интервалах времени (10 суток)	4	6	5	5	5

Практическая ценность решения задачи управления для идеального функционирования состояния БТК заключается в том, что найденное оптимальное управление $G(t)$ вполне отвечает поставленной цели и может считаться номинальным ($\bar{G}(t)$) в дальнейших рассуждениях для нормального и экстремального состояний. При этом формируется возможность выбора типа и мощности подающего вентилятора исходя из анализа функции $\bar{G}(t)$, что с позиций энергосбережения представляет собой дополнительное преимущество оптимальных режимов функционирования СКЗ.

В отличие от идеального режима нормальный и экстремальный являются реальными режимами функционирования БТК, что характеризуется колебаниями различных параметров. Вследствие этого управление ПРВ в ГЗО должно производиться исходя из текущего состояния воздушной среды.

4.3.2. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В НОРМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В нормальном состоянии функционирования БТК различные параметры имеют допустимые отклонения от заданных значений, что в любом случае дестабилизирует газовый состав воздушной среды. В принципе, до некоторых пор его (газового состава) состояние будет удовлетворять основной задаче управления ПРВ – поддержанию концентраций в заданных интервалах. В дальнейшем это приведет к переходу БТК в экстремальное состояние и, возможно, к развитию нештатной ситуации. Исключение подобного сценария возможно посредством своевременного внесения управляющих воздействий для удержания концентраций на среднезаданном уровне.

Таким образом, задача управления ПРВ в нормальном состоянии функционирования БТК заключается в определении оптимального управления $G(t)$, устраняющего возникающие отклонения концентраций диоксида углерода и кислорода от среднезаданных, и формулируется следующим образом [119]: необходимо найти функцию $G(t)$, минимизирующую функционал I_2

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left(q_1 (C^{\text{CO}_2}(t) - \bar{C}^{\text{CO}_2})^2 + q_2 (C^{\text{O}_2}(t) - \bar{C}^{\text{O}_2})^2 + r (G(t) - \bar{G}(t))^2 \right) dt \rightarrow \min,$$

или в векторной форме

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left[\langle (C(t) - \bar{C}), Q(C(t) - \bar{C}) \rangle + r (G(t) - \bar{G}(t))^2 \right] dt \rightarrow \min,$$

при уравнениях связи (2.11), $C^j \in [C_H^j; C_B^j]$, $G(t) \in [0; G_{\max}]$, где $\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{pmatrix}$ – постоянная положительно полуопределенная матрица, q_1, q_2, r – заданные положительные параметры.

Определим векторы отклонений, приняв

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{C}(t) - \bar{\mathbf{C}}, \\ u(t) &= G(t) - \bar{G}(t). \end{aligned}$$

Тогда

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \frac{d\mathbf{C}(t)}{dt} - \frac{d\bar{\mathbf{C}}}{dt} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)) - \boldsymbol{\varphi}(\bar{\mathbf{C}}, \bar{G}(t)).$$

Применяя разложение по формуле Тейлора, получим:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t)) - \boldsymbol{\varphi}(\bar{\mathbf{C}}, \bar{G}(t)) &= \boldsymbol{\varphi}(\bar{\mathbf{C}}, \bar{G}(t)) + \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}(t)} (\mathbf{C}(t) - \bar{\mathbf{C}}) + \\ &+ \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial G(t)} (G(t) - \bar{G}(t)) + \mathbf{E}((\mathbf{C}(t) - \bar{\mathbf{C}}), (G(t) - \bar{G}(t))) - \boldsymbol{\varphi}(\bar{\mathbf{C}}, \bar{G}(t)) = \\ &= \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}(t)} (\mathbf{C}(t) - \bar{\mathbf{C}}) + \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial G(t)} (G(t) - \bar{G}(t)) + \\ &+ \mathbf{E}((\mathbf{C}(t) - \bar{\mathbf{C}}), (G(t) - \bar{G}(t))), \end{aligned}$$

где $\mathbf{E}((\mathbf{C}(t) - \bar{\mathbf{C}}), (G(t) - \bar{G}(t)))$ – нелинейный член, включающий производные высшего порядка. Им можно пренебречь в условиях задачи управления в нормальном состоянии функционирования БТК, поскольку ошибка $\mathbf{x}(t)$ и управление $u(t)$, очевидно, будут достаточно малыми.

Для упрощения обозначим:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(t) &= \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}(t)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{\text{CO}_2}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}^{\text{CO}_2}(t)} & \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{\text{CO}_2}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}^{\text{O}_2}(t)} \\ \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{\text{O}_2}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}^{\text{CO}_2}(t)} & \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{\text{O}_2}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial \mathbf{C}^{\text{O}_2}(t)} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{B}(t) &= \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial G(t)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{\text{CO}_2}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial G(t)} \\ \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{\text{O}_2}(\mathbf{C}(t), G(t))}{\partial G(t)} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Таким образом, система (4.1) примет следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)u(t).$$

Принимая во внимание, что управление ПРВ в нормальном состоянии функционирования БТК заключается в поддержании концентраций на среднезаданном уровне, т.е. $\frac{dC^j(t)}{dt} \rightarrow 0$, то можно говорить о стационарности газового состава воздушной среды ГЗО, вследствие чего матрицы $\mathbf{A}(t)$ и $\mathbf{B}(t)$ являются постоянными.

В итоге, задача управления ПРВ в нормальном состоянии функционирования БТК формулируется следующим образом: для заданной линейной системы

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t)$$

необходимо найти оптимальное управление $u(t)$, минимизирующее функционал I_2

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\langle \mathbf{x}(t), \mathbf{Q}\mathbf{x}(t) \rangle + ru^2(t)] dt.$$

Следует заметить, что $\mathbf{x}(0) = 0$, $u(0) = 0$.

Таким образом, получена задача оптимального управления линейной системой по квадратичному критерию, относящаяся к классу задач о регуляторе состояния [121]. Целью решения поставленной задачи будет определение такого минимального управления $u(t)$, чтобы ошибка $\mathbf{x}(t)$ была также минимальна.

Рассмотрим каждый член функционала и установим их физический смысл. Первый член $L_x = \frac{1}{2} \langle \mathbf{x}(t), \mathbf{Q}\mathbf{x}(t) \rangle$ неотрицателен при любых отклонениях $\mathbf{x}(t)$ и равен нулю если $\mathbf{x}(t) = 0$. Если отклонение $\mathbf{x}(t)$ мало, то и интеграл от L_x будет мал,

т.е. L_x оценивает большие отклонения значительно «дороже», чем малые, поэтому и система «штрафуется» за большие отклонения дороже, чем за малые. Второй член $L_u = \frac{1}{2}ru^2(t)$ оценивает прикладываемые управления и соответственно «наказывает» систему за большие управления гораздо дороже, чем за малые.

В соответствии с [121] оптимальное управление существует, единственно и определяется уравнением

$$u^*(t) = -\frac{1}{r} \mathbf{B}' \tilde{\mathbf{K}} \mathbf{x}^*(t),$$

где $\tilde{\mathbf{K}}$ – постоянная положительно определенная матрица, являющаяся решением нелинейного матричного алгебраического уравнения

$$-\tilde{\mathbf{K}}\mathbf{A} - \mathbf{A}'\tilde{\mathbf{K}} + \frac{1}{r}\tilde{\mathbf{K}}\mathbf{B}\mathbf{B}'\tilde{\mathbf{K}} - \mathbf{Q} = 0.$$

При этом оптимальная траектория является решением линейной однородной системы

$$\frac{d\mathbf{x}^*(t)}{dt} = \left(\mathbf{A} - \frac{1}{r}\mathbf{B}\mathbf{B}'\tilde{\mathbf{K}} \right) \mathbf{x}^*(t), \quad \mathbf{x}^*(0) = 0, \quad u^*(0) = 0.$$

Таким образом, получен закон оптимального управления ПРВ в нормальном состоянии функционирования БТК. На рис. 4.9 представлена структура соответствующей системы оптимального управления с явно выраженной отрицательной обратной связью. Данная система является линейной с не зависящими от времени параметрами. Поскольку параметр r и матрица \mathbf{B} – известны, а матрица $\tilde{\mathbf{K}}$ – постоянна и может быть вычислена предварительно, то поведение системы управления определяется только состоянием газового состава воздушной среды ГЗО.

Реализованная в соответствии с данной структурой система управления определяет в текущий момент времени оптимальную величину объемного расхода воздушной смеси, позволяющую компенсировать возникающие отклонения концентраций диоксида углерода и кислорода от среднезаданных значений. Это позволяет успешно решать основную задачу управления ПРВ в ГЗО – поддержание концентраций в заданных интервалах для нормального состояния функционирования БТК.

Алгоритм управления – Г заключается в переключении реакторов на новые по мере исчерпания ресурсов, о чем свидетельствует подсистема газового анализа и контроля, включаемая в состав системы управления ПРВ.

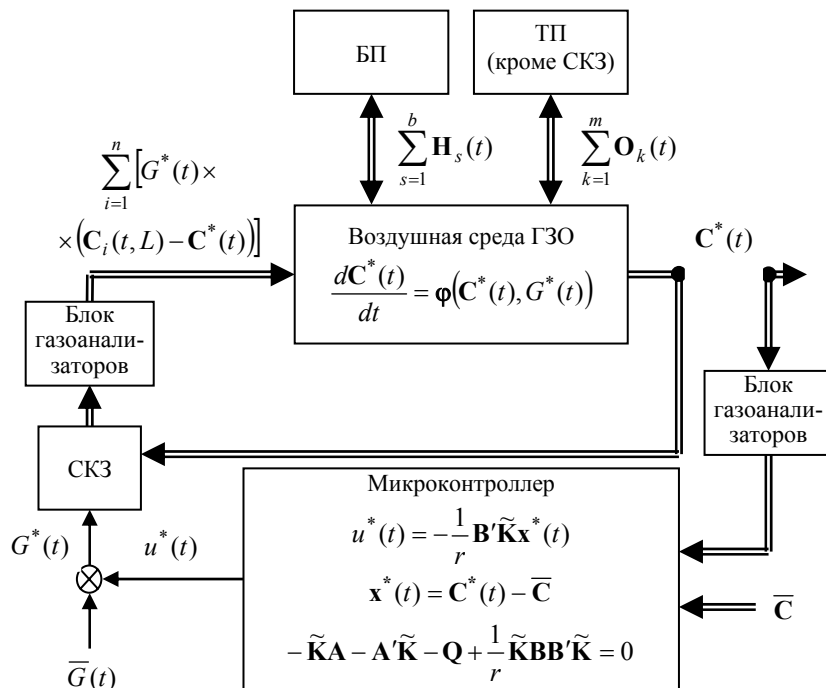


Рис. 4.9. Схема системы оптимального управления ПРВ с обратной связью для нормального состояния функционирования БТК: двойные каналы означают, что по ним передаются векторные сигналы

4.3.3. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В случае резкого изменения газового состава воздушной среды ГЗО, когда одна из концентраций достигает верхней или нижней границы допустимого интервала, БТК переходит в экстремальное состояние функционирования, обусловленное возникновением непредвиденных видов нагрузок по веществам.

Целью управления ПРВ в экстремальном состоянии функционирования БТК является осуществление максимально быстрого перевода газового состава к заданным характеристикам. Другими словами, необходимо установить среднезаданные значения концентраций диоксида углерода и кислорода за минимальное время.

Подобная задача оптимального управления относится к классу задач о быстродействии и формулируется следую-

щим образом [119].

Необходимо найти функцию $G(t)$, минимизирующую функционал I

$$I = \int_{t_n}^{t_k} dt \rightarrow \min ,$$

при уравнениях связи (2.10), $C^j \in [C_n^j; C_b^j]$, $G(t) \in [0; G_{\max}]$.

В [85, 86, 94, 121] показано, что решение задач, оптимальных по быстродействию в указанной постановке, приводит к релейному управлению, что неприемлемо в условиях данного химико-технологического процесса. Объяснением этому служит тот факт, что установление максимального значения объемного расхода воздушной смеси приводит к резкому возрастанию величины «проскока», а это значительно снижает качество регенеративных процессов и эффективность расходования ресурсов реактора.

Для получения оптимального управления в виде гладкой непрерывной функции воспользуемся методом, предложенным в [124], который заключается в разложении задачи управления по квадратичному критерию в последовательность задач с изменяющимся конечным временем.

В этом случае критерий выглядит следующим образом [119]:

$$I_3 = \frac{1}{2} \left(p_1 (C^{\text{CO}_2}(T) - \bar{C}^{\text{CO}_2})^2 + p_2 (C^{\text{O}_2}(T) - \bar{C}^{\text{O}_2})^2 \right) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T r (G(t) - \bar{G}(t))^2 dt \rightarrow \min$$

или в векторной форме

$$I_3 = \frac{1}{2} \langle (C(T) - \bar{C}), \mathbf{P}(C(T) - \bar{C}) \rangle + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T r (G(t) - \bar{G}(t))^2 dt \rightarrow \min ,$$

где T – выбранное конечное время перехода; $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{pmatrix}$ – постоянная положительно полуопределенная матрица; p_1, p_2 ,

r – заданные положительные параметры.

Применяя обозначения и рассуждения, использованные выше, получим нелинейную систему уравнений:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)u(t) + \mathbf{E}(\mathbf{x}(t), u(t)), \quad (4.2)$$

где нелинейным членом $\mathbf{E}(\mathbf{x}(t), u(t))$ уже нельзя пренебречь в силу значительности величин отклонения $\mathbf{x}(t)$ и управления $u(t)$. Заметим, что в экстремальном режиме $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0$, $u(t_0) = u^0$.

Задача управления в экстремальном режиме заключается в поиске оптимального управления, минимизирующего функционал I_3 :

$$I_3 = \frac{1}{2} \langle \mathbf{x}(T), \mathbf{P}\mathbf{x}(T) \rangle + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T r u^2(t) dt . \quad (4.3)$$

Целью решения поставленной задачи будет определение такого оптимального управления $u(t)$, которое позволит за минимальное время $T - t_0$ привести систему (4.2) к заданному состоянию, чтобы ошибка $\mathbf{x}(T)$ была минимальной.

Следует отметить, что физический смысл первого члена функционала $L_T = \frac{1}{2} \langle \mathbf{x}(T), \mathbf{P}\mathbf{x}(T) \rangle$, состоит в том, что система «штрафуется» за большие отклонения в конечный момент времени T дороже, чем за малые; а второго – аналогичный, как и для функционала I_2 .

Легко видеть, что непосредственное применение принципа минимума Понтрягина к рассматриваемой задаче приводит к достаточно сложной краевой задаче, поэтому воспользуемся подходом, предложенным в [125].

В общем случае для получения оценок решения задач подобного класса применяют различные методы, которые в той или иной форме используют линеаризацию и последовательные приближения, позволяющие свести ее (задачу) к некоторой последовательности линейно-квадратичных задач слежения [125].

Для получения решения задачи (4.2), (4.3) в виде закона управления с обратной связью используется некая процедура, являющаяся модификацией методов последовательных приближений и заключающаяся в создании некоторой специальным образом генерируемой последовательности вспомогательных линейно-квадратичных задач слежения [94].

Следуя [126, 127], рассмотрим задачу о минимизации функционала

$$I_3 = \frac{1}{2} \langle \mathbf{x}(T), \mathbf{P}\mathbf{x}(T) \rangle + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T r u^2(t) dt \quad (4.4)$$

с ограничением

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)u(t) + \mathbf{E}(\mathbf{x}(t), u(t)), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0 . \quad (4.5)$$

Пусть $u_N(t)$, $\mathbf{x}_N(t)$ – некоторое N -е приближение к оптимальному управлению и состоянию в задаче (4.2), (4.3). Тогда $(N+1)$ -е приближение $u_{N+1}(t)$, $\mathbf{x}_{N+1}(t)$ может быть получено как решение вспомогательной задачи о минимизации функционала

$$I_{N+1} = \frac{1}{2} \langle \mathbf{x}(T), \mathbf{P}\mathbf{x}(T) \rangle + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T r u^2(t) dt$$

с ограничением

$$\frac{d\mathbf{x}_{N+1}(t)}{dt} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}_{N+1}(t) + \mathbf{B}(t)u_{N+1}(t) + \mathbf{E}(\mathbf{x}_N(t), u_N(t)), \quad \mathbf{x}_N(t_0) = \mathbf{x}^0.$$

Согласно [125], для заданных функций $\mathbf{x}_N(t)$ и $u_N(t)$ оптимальное управление $u_{N+1}(t)$ в задаче (4.4), (4.5) дается законом управления с обратной связью

$$u_{N+1}(t) = -\frac{1}{r} \mathbf{B}'(t)(\mathbf{K}(t)\mathbf{x}_{N+1}(t) - h_{N+1}(t)), \quad (4.6)$$

в котором $\mathbf{x}_{N+1}(t)$ – решение векторного уравнения (4.5), соответствующее $u_{N+1}(t)$ и удовлетворяющее начальному условию

$$\mathbf{x}_{N+1}(t_0) = \mathbf{x}^0,$$

$\mathbf{K}(t)$ – решение матричного дифференциального уравнения Риккати

$$\frac{d\mathbf{K}(t)}{dt} = -\mathbf{K}(t)\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}'(t)\mathbf{K}(t) + \frac{1}{r} \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{B}'(t)\mathbf{K}(t) \quad (4.7)$$

с граничным условием

$$\mathbf{K}(T) = \mathbf{P}, \quad (4.8)$$

а $h_{N+1}(t)$ – решение линейного дифференциального уравнения

$$\frac{dh_{N+1}(t)}{dt} = -\left[\mathbf{A}(t) - \frac{1}{r} \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{B}'(t) \right]' h_{N+1}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{E}(t)(\mathbf{x}_N(t), u_N(t)) \quad (4.9)$$

с граничным условием

$$h_{N+1}(T) = 0. \quad (4.10)$$

Таким образом, если начальное приближение $\mathbf{x}_0(t)$, $u_0(t)$ задано, то соотношения (4.6) – (4.10) определяют схему последовательных приближений, которая при всех достаточно малых значениях T позволяет решить задачу (4.2), (4.3).

Следуя [125], начальное приближение определим соотношениями

$$\mathbf{x}_0(t) \equiv \mathbf{x}^0 \quad \text{и} \quad u_0(t) = -\frac{1}{r} \mathbf{B}'(t)\mathbf{K}(t)\mathbf{x}^0.$$

В соответствии с теоремой, приведенной в [125], для всех $t \in [t_0, T]$ задача (4.2), (4.3) имеет оптимальное решение $u^*(t)$, $\mathbf{x}^*(t)$, причем

$$u^*(t) = -\frac{1}{r} \mathbf{B}'(t)(\mathbf{K}(t)\mathbf{x}^*(t) - h^*(t)),$$

где $h^*(t)$ – решение дифференциального уравнения

$$\frac{dh^*(t)}{dt} = -\left[\mathbf{A}(t) - \frac{1}{r} \mathbf{K}(t)\mathbf{B}(t)\mathbf{B}'(t) \right]' h^*(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{E}(\mathbf{x}^*(t), u^*(t))$$

с граничным условием

$$h^*(T) = 0.$$

Таким образом, получен закон оптимального управления ПРВ для экстремального состояния функционирования БТК. На рис. 4.10 представлена структура соответствующей системы оптимального управления с явно выраженной отрицательной обратной связью. Данная система является нелинейной с зависящими от времени параметрами. Поскольку параметр r и матрица \mathbf{B} – известны, то поведение системы управления определяется матрицами $\mathbf{K}(t)$ и $h^*(t)$. При этом матрица $\mathbf{K}(t)$ не зависит от состояния, в связи с чем ее можно вычислить предварительно.

Соответствующая система управления определяет в текущий момент времени оптимальную величину объемного расхода воздушной смеси, позволяющую максимально быстро привести газовый состав воздушной среды ГЗО к среднезаданному значению без приложения «больших» управлений.

Алгоритм управления Γ также заключается в переключении реакторов на новые по мере исчерпания ресурсов, о чем

свидетельствует подсистема газового анализа и контроля, включаемая в состав системы управления ПРВ.

Таким образом, реализация представленных на рис. 4.9, 4.10 структур позволит создавать самонастраивающиеся системы автоматического оптимального управления ПРВ в ГЗО, обеспечивающих

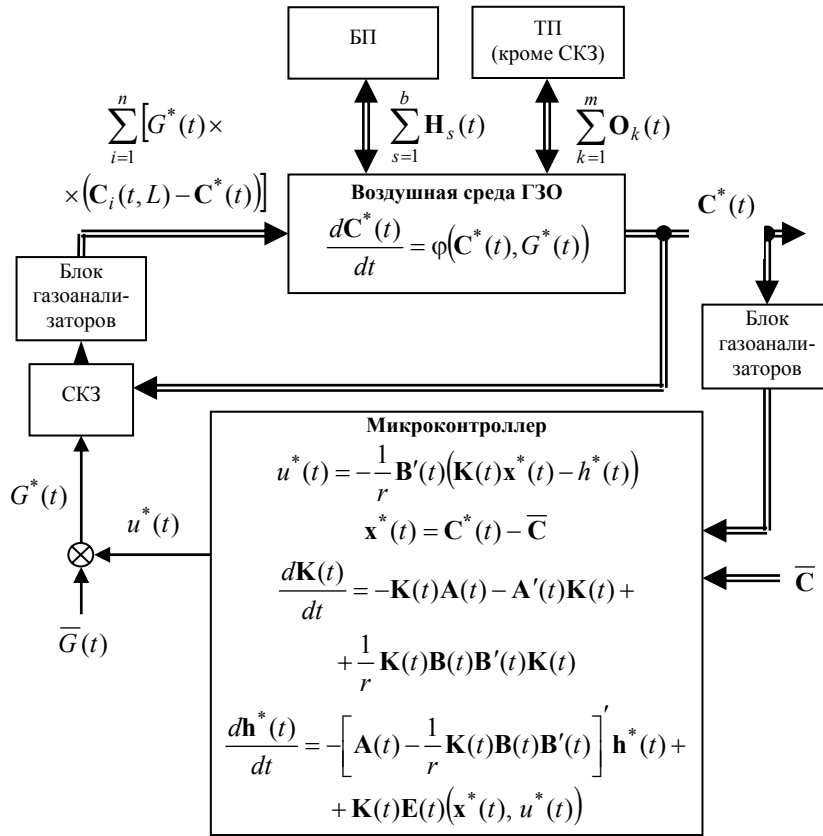


Рис. 4.10. Схема системы оптимального управления ПРВ с обратной связью для экстремального состояния функционирования БТК

наиболее комфортные условия жизнедеятельности в БТК на длительных интервалах времени, вплоть до возникновения нештатных аварийных ситуаций, в которых применяются альтернативные средства и способы защиты.

Следует отметить, что численное решение задач оптимального управления для нормального и экстремального состояний функционирования биотехнического комплекса, а также реализация сопутствующих мероприятий, связанных с математическим моделированием и вычислительным экспериментом, должны сопровождаться комплексом предварительных исследований с целью изучения соответствующих функционалов, выбора численных методов и разработки алгоритмов решения, определения типа предполагаемого к использованию микроконтроллера, оценки необходимых вычислительных ресурсов и др. При этом, некоторые из перечисленных мероприятий необходимо осуществлять индивидуально для каждого БТК в совокупности с дорогостоящими натурными экспериментами. Таким образом, затронутые вопросы являются предметом дальнейших исследований в области оптимального управления процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме.

4.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В процессе исследования вопросов управления ПРВ в ГЗО на множестве состояний функционирования БТК были решены следующие задачи:

- классифицированы состояния функционирования биотехнического комплекса;
- разработан алгоритм управления процессом регенерации воздуха на множестве состояний функционирования биотехнического комплекса;
- осуществлена постановка задач оптимального управления для каждого состояния функционирования биотехнического комплекса, предложены алгоритмы их решения;
- разработаны структуры системы оптимального управления процессом регенерации воздуха с обратной связью для нормального и экстремального состояний функционирования биотехнического комплекса.

5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ

Проведенный в главе 1 анализ позволил обозначить актуальность осуществления комплексных работ в сфере автоматизации научно-исследовательских и проектных работ. Отмечено, что наиболее эффективным является внедрение комплексных программно-технических средств, максимально автоматизирующих процесс создания СКЗ, начиная с поступления технического задания и заканчивая подготовкой проектной документации. Причем формирование структуры комплекса, его компонентов, алгоритма функционирования должны производиться в соответствии с требованиями современных мировых стандартов в области жизненного цикла изделия – CALS.

Проведенный анализ соответствующего сегмента рынка программных продуктов выявил широкий спектр мощных универсальных программных средств, реализующих перспективные тенденции в сфере автоматизации, важнейшими недостатками которых являются слабое соответствие данной предметной области, отсутствие в подавляющем большинстве случаев достаточно развитого математического аппарата, при этом вопросы управления технологическими процессами не затрагиваются вовсе.

Приведенные факты служат обоснованием созданию узкоспециализированного программно-технического комплекса автоматизации научных исследований и разработки максимально учитывающего особенности СКЗ и реакторов СКЗ, реализующего задачи математического моделирования и поиска оптимальных управлений ПРВ.

5.1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ И СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА

Основной функцией комплекса является автоматизация процессов разработки конфигурации СКЗ и конструкции входящих в их состав реакторов, а также исследования ПРВ. В соответствии с этим общая схема комплекса представлена на рис. 5.1.

Из рис. 5.1 следует, что рассматриваемый комплекс включает в свой состав две автономные автоматизированные системы, взаимодействующие между собой через единое информационное пространство, управляющее всеми данными об изделиях и процессах проектирования; и средства организации электронного документооборота, отвечающие за формирование, хранение и управление документами.

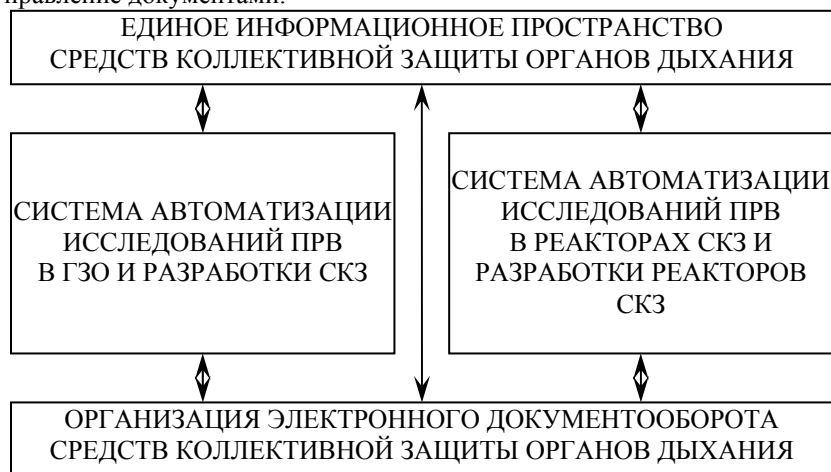


Рис. 5.1. Схематичное представление комплекса

Составными структурными частями автоматизированных систем являются подсистемы, в которых при помощи специализированной совокупности программно-технических средств решается функционально законченная последовательность задач [128, 129]. Исходя из этого определения в предлагаемом комплексе выделяются следующие подсистемы (рис. 5.2):

- подсистема управления данными и документами;
- подсистема управления комплексом и автоматизированными процессами;
- подсистема разработки конфигурации СКЗ;
- подсистема математического моделирования и исследований ПРВ в ГЗО;
- подсистема синтеза оптимальных режимов функционирования СКЗ;
- подсистема конструктивно-геометрической разработки реакторов СКЗ;
- подсистема математического моделирования и исследований ПРВ в реакторах СКЗ.

Среди CALS-технологий интеграции данных об изделии ключевой является технология управления данными об изделии [104, 105]. Она предназначена для управления всеми данными об изделии и информационными процессами, создающими и использующими эти данные. В соответствии с этим была разработана подсистема управления данными, основным назначением которой является осуществление



Рис. 5.2. Детализированная структура автоматизированного комплекса

взаимодействия комплекса с единым информационным пространством СКЗ. Функциями подсистемы являются управление и хранение проектных данных и документов в электронном виде, обеспечивая их целостность, доступ к ним в соответствии с правами доступа и поиск по заданным критериям. Следует отметить, что данная подсистема осуществляет управление информационными процессами, что представляет собой поддержку различных процедур, создающих и использующих данные об изделии, т.е. фактически поддержку электронного документооборота.

Главными задачами подсистемы управления комплексом и автоматизированными процессами являются интеграция всех указанных подсистем в единое целое, организация процессов разработки СКЗ и реакторов СКЗ, управление информационными потоками между автоматизированными системами и подсистемой управления данными и документами. Она предоставляет разработчику набор инструментов, необходимый для проведения исследовательских и проектных работ, а также организует взаимодействие между всеми категориями пользователей.

Далее рассматриваются входящие в состав комплекса автоматизированные системы.

В состав системы автоматизации исследований ПРВ в ГЗО и разработки СКЗ входят подсистемы разработки конфигурации СКЗ, математического моделирования и исследований ПРВ в ГЗО, синтеза оптимальных режимов функционирования СКЗ.

Основной функцией подсистемы разработки конфигурации СКЗ является определение схемы регенерации, качественного и количественного состава СКЗ. Данная подсистема обладает набором средств, позволяющих оперативно варьировать характеристики разрабатываемых СКЗ, изменяя количество и вид одновременно функционирующих реакторов, порядок соединения реакторов между собой.

Назначение следующей подсистемы непосредственно отражено в ее названии – подсистема математического моделирования и исследований ПРВ в ГЗО. В соответствии с характеристиками БТК, указанными в техническом задании, и параметрами разработанных СКЗ производится решение математической модели ПРВ в ГЗО с визуальным представлением получаемых результатов в виде интерактивных графиков по каждому из основных компонентов воздушной среды ГЗО. Подсистема предоставляет ряд возможностей в целях детального изучения получаемых результатов, осуществления сравнительного анализа различных конфигураций СКЗ, исследования поведения ПРВ при варьировании различными характеристиками БТК и СКЗ.

Подсистема синтеза оптимальных режимов функционирования СКЗ сопровождает решение задачи поиска оптимальных управляющих воздействий (объемный расход воздуха на каждом реакторе и порядок переключения) для идеального состояния функционирования БТК в соответствии с разработанным в главе 3 алгоритмом.

В состав системы автоматизации исследований ПРВ в реакторах СКЗ и разработки реакторов СКЗ входят подсистемы конструктивно-геометрической разработки реакторов СКЗ, математического моделирования и исследований ПРВ в реакторах СКЗ [130].

Подсистема конструктивно-геометрической разработки реакторов СКЗ предоставляет возможности визуального эскизного проектирования реактора с последующим укомплектованием содержащимися в ЕИП элементами (химическими продуктами и сборочными единицами). В подсистеме реализована специализированная интерактивная графическая среда, позволяющая разработчику достаточно просто и быстро формировать и изменять конструктивные и геометрические параметры реактора.

Основные функции подсистемы математического моделирования и исследований ПРВ в реакторах СКЗ непосредственно следуют из ее названия. Как и в предыдущем случае, результаты решения математической модели представляются в виде интерактивных графиков по каждому из веществ. Наряду с этим данная подсистема также предоставляет ряд возможностей для детальных исследований и сравнительного анализа протекания ПРВ при варьировании различных параметров реактора. Следует отметить, что возможность расчета математической модели возникает еще до окончательного

формирования состава реактора, другими словами, она появляется по мере определения типа, геометрических характеристик реактора и выбора используемых сорбентов (хемосорбентов), т.е. когда определены функционально-технологические параметры.

Вместе с тем в комплексе реализован алгоритм автоматического синтеза конфигурации СКЗ, который на основе показателей технического задания (ТЗ) на разработку СКЗ и некоторой экспертной информации предлагает разработчику готовый вариант СКЗ, включающий уже существующие реакторы или реакторы с вновь рассчитанными геометрическими характеристиками. При этом обязательным условием является самостоятельный выбор разработчиком используемого сорбента (хемосорбента), соответствующего условиям и ограничениям ТЗ.

Таким образом, практическая реализация всех перечисленных подсистем позволит построить единый комплекс автоматизации научных исследований и разработки СКЗ, обеспечивающий максимальную поддержку процессов создания СКЗ с момента поступления технического задания до формирования пакета проектной документации.

5.2. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА

Автоматизированная разработка СКЗ и реакторов СКЗ с последующим исследованием ПРВ представляется достаточно сложным и трудоемким процессом, включающим в себя выполнение большого числа разнообразных процедур, проведение различных математических расчетов и подробного анализа получаемых результатов, подготовку проектной документации и др. Очевидно, что это требует от разработчика не только знаний предметной области, профессиональных навыков работы с современной вычислительной техникой и программным обеспечением, но и понимания алгоритма работы предлагаемого программно-технического комплекса, а также порядка взаимодействия с ним, чему уделяется внимание в данном разделе.

Далее приведен пошаговый алгоритм функционирования комплекса, отражающий весь цикл разработки СКЗ. Следует отметить, что на предварительном этапе пользователь обязан ознакомиться с комплексом, подробно изучить необходимые инструкции и руководства, а также пройти процедуру регистрации, получив реквизиты авторизации.

1. Приступая к работе с комплексом, пользователь проходит процедуру идентификации, после чего запускаются подсистемы управления комплексом и управления данными и документами, организуя взаимодействие с ЕИП СКЗ (рис. М.1).

2. Рассматривая весь цикл разработки, условимся, что работы начинаются с поступления нового ТЗ на разработку СКЗ, в связи с чем пользователю предоставляется список всех имеющихся ТЗ, из которых выбирается необходимое. На основе выбранного ТЗ задаются различные параметры БТК, такие как величина ГЗО, присутствующие нагрузки, условия и ограничения и др.

3. Далее запускается подсистема разработки конфигурации СКЗ, «разворачивая» ряд специализированных визуальных средств. Одновременно подсистема управления данными и документами выстраивает и отображает информацию о СКЗ и реакторах СКЗ, содержащуюся в ЕИП. На этом этапе разработчик определяет необходимость создания новых СКЗ или выбирает уже готовый вариант с внесением некоторых изменений, переходя к п. 5.

4. Разработка новой конфигурации СКЗ производится в специализированной интерактивной графической среде (рис. М.2), в которой пользователь задает требуемое количество реакторов, порядок их соединения, определяет их тип и сопоставляет с существующими экземплярами. В случае, если ни один из реакторов, информация о которых содержится в ЕИП, не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то проектировщик может выполнить разработку нового реактора (п. 8). Следует отметить, что пользователю предоставляется возможность автоматического синтеза конфигурации СКЗ в соответствии с реализованным в комплексе алгоритмом.

5. Завершение формирования конфигурации СКЗ, по сути, означает определение всех необходимых параметров, что в совокупности с известными характеристиками БТК разрешает работу подсистемы математического моделирования и исследований ПРВ в ГЗО. Данная подсистема допускает переключение к подсистеме разработки конфигурации СКЗ и обратно, позволяя оперативно вносить какие-либо изменения в структуру и состав СКЗ или прорабатывать другие варианты, что удобно при проведении сравнительного анализа протекания ПРВ в ГЗО. Результаты математического моделирования отображаются в виде графиков (для кислорода и диоксида углерода отдельно) с возможностью подробного анализа поведения процесса на различных отрезках времени (рис. М.3).

6. Располагая готовым вариантом СКЗ, для которого значения всех параметров считаются заданными, а также необходимыми сведениями о БТК, разработчик может осуществить поиск оптимального режима функционирования СКЗ, фактически заключающийся в решении задачи оптимального управления ПРВ для идеального состояния функционирования БТК с целью определения номинального управления $\bar{G}(t)$.

7. По мере завершения проектных и исследовательских работ подсистема управления данными и документами предоставляет разработчику возможность автоматизированного формирования пакета проектной документации и сохранения всей информации в ЕИП.

8. Разработка нового реактора СКЗ производится с использованием автоматизированной системы разработки реакторов СКЗ и исследования ПРВ в реакторах СКЗ. Порядок создания реактора аналогичен процессу построения СКЗ, что упрощает работу с комплексом. Требования к разрабатываемому реактору определяются из соответствующего ТЗ, содержащегося в ЕИП.

9. Далее запускается подсистема конструктивно-геометрической разработки реакторов СКЗ, «разворачивая» специализированные визуальные средства. Одновременно подсистема управления данными и документами выстраивает и отображает информацию о реакторах СКЗ и всех компонентах, входящих в состав реактора (химические продукты, сборочные единицы), содержащуюся в ЕИП.

10. Разработка реактора производится в специализированной интерактивной графической среде, ориентированной на эскизное проектирование реактора (рис. М.4). Для выполнения проектных работ предусмотрено четыре режима:

- режим проектирования, в котором создание реактора проводится «с нуля»;
- режим редактирования, в котором в готовый эскиз реактора вносятся какие-либо конструктивные изменения;
- режим расчета геометрических параметров в составе алгоритма автоматического синтеза конфигурации СКЗ;
- режим компоновки – осуществляет в активном диалоге с пользователем укомплектование реактора сорбентами (хемосорбентами) и сборочными единицами, выбираемыми из ЕИП.

11. Проведение математического моделирования и исследований ПРВ в разработанном реакторе становится возможным с момента определения геометрических и функциональных параметров, фигурирующих в математической модели. Результаты расчетов, аналогично моделированию ПРВ в ГЗО, представляются в виде графиков по каждому веществу с возможностью детального анализа (рис. М.5). Указанные процедуры осуществляет подсистема математического моделирования и исследований ПРВ в реакторах СКЗ, которая предусматривает возврат к интерактивной среде с целью внесения каких-либо изменений, разработки альтернативного варианта или выбора уже содержащегося в ЕИП реактора СКЗ с последующими математическими расчетами и сравнительным анализом протекания ПРВ.

12. По мере завершения проектных и исследовательских работ подсистема управления данными и документами предоставляет пользователю возможность автоматизированного формирования пакета проектной документации и сохранения всей информации о реакторе в ЕИП с последующим возвратом к разработке СКЗ (если это требуется).

Упрощенная блок-схема представленного алгоритма приведена на рис. Н.1.

Следует отметить, что в целях обеспечения гибкости и простоты комплекса аналогичные подсистемы строились и реализовывались на одинаковых принципах, позволяя разработчику достаточно быстро и без особых трудностей освоить принципы взаимодействия с комплексом.

Таким образом, последовательное исполнение приведенного алгоритма неизбежно приведет к созданию СКЗ и реакторов СКЗ, отвечающих требованиям ТЗ и разработчика.

5.3. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОНФИГУРАЦИИ СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ

Анализ процессов разработки СКЗ, структуры БТК, построенной математической модели и результатов вычислительного эксперимента, а также некоторой экспертной информации позволил заключить, что конфигурация СКЗ, а также конструкция и геометрия входящих в их состав реакторов в большинстве случаев будет зависеть от накладываемых условий и ограничений. В этом случае искомое решение будет практически всегда находиться на границах допустимых диапазонов варьирования массогабаритных характеристик реакторов СКЗ в силу того, что оптимальным вариантом является конфигурация СКЗ с минимальным количеством переключений реакторов.

Логичным следствием из вышесказанного является возможность разработки и программной реализации некоей последовательности шагов, которая, опираясь на устанавливаемые условия и ограничения для массогабаритных характеристик, позволит определить возможную конфигурацию СКЗ и геометрические характеристики реакторов для заданных параметров БТК.

Далее приводится разработанный в процессе проводимых исследований алгоритм, реализующий упомянутую последовательность шагов.

Шаг 1. Формируется вектор исходных данных для расчета, включающий время автономии – T_a , величину ГЗО – V , величины нагрузок БП – H_s^j и ТП (исключая регенеративное оборудование) – O_k^j по каждому веществу, количество человек в ГЗО – b , а также условия и ограничения ТЗ, анализ которых позволяет проектировщику определить допустимый для использования сорбент (хемосорбент) с его функциональными характеристиками – α_i^j и β_i^j .

Шаг 2. Вычисляется суммарная нагрузка по каждому веществу (диоксид углерода и кислород) – H_Σ^j и совокупный объем веществ, выделенных/поглощенных в ГЗО в процессе жизнедеятельности БП и функционирования нерегенеративного технологического оборудования за весь период автономии – V_Σ^j .

Шаг 3. Используя полученные значения объемов выделенных/поглощенных веществ и соответствующие емкостные характеристики сорбента (хемосорбента), определяется необходимая масса химического продукта (выбирается максимальное из двух значений) – M_Σ .

Шаг 4. Из найденной необходимой массы и насыпной массы химического продукта – m_n вычисляется совокупный объем – V_Σ .

Шаг 5. Вычисляется совокупный объемный расход воздушной смеси через СКЗ, используя уравнение вентиляции:

$$G_\Sigma = \frac{H_\Sigma \cdot 1,2}{C_V - C_{СКЗ}},$$

где 1,2 – коэффициент запаса; C_V – концентрация вещества в ГЗО; $C_{СКЗ}$ – концентрация вещества на выходе СКЗ.

Определение совокупного объемного расхода удобнее проводить относительно диоксида углерода, поскольку его значение $C_{СКЗ}$ стремится к 0.

Шаг 6. Экспериментальным путем было установлено, что оптимальная линейная скорость потока воздушной смеси через реактор, при которой хемосорбционные процессы наиболее эффективны, составляет $\omega^* = 0,15 \pm 0,05$ м/с = 540 ± 180 м/ч. Тогда, зная совокупный объемный расход воздушной смеси и оптимальную линейную скорость потока, можно получить совокупную площадь сечения реактора (реакторов). Следует учесть, что это значение складывается из непосредственной площади сечения слоя химического продукта и совокупной площади пустот для насыпного зернового продукта или площади каналов для

блокового продукта. Таким образом, площадь реактора $F_{\Sigma} = \frac{G_{\Sigma}}{\omega} \frac{1}{\nu}$, где ν – порозность – доля не занятого зернистыми элементами объема слоя, а в соответствии с принципом Кавальери–Акера, не занятой площади слоя [131]. Для блокового продукта ν является совокупной площадью сечений каналов на единицу площади сечения слоя самого продукта.

Шаг 7. Используя найденные совокупный объем химического продукта V_{Σ} и общую площадь сечения реактора F_{Σ} , вычисляется его длина L . Следует отметить, что длина реактора СКЗ обычно составляет 0,1 – 0,5 м, поэтому необходимо проверить принадлежность вычисленного значения указанному диапазону. Если вычисленное значение длины реактора находится левее заданного диапазона, то принимается минимально возможное значение, а для сохранения объема химического продукта в ректоре изменяется площадь сечения. Если вычисленное значение длины реактора находится правее заданного диапазона, то возможны варианты:

- при незначительном превышении значение длины устанавливается равной правой границе и изменяется площадь сечения;
- при значительном превышении совокупный объем делится на n равных частей с прежней площадью и пересчитанной длиной. В этом случае реакторы переключаются через равные промежутки времени (в нормальном режиме функционирования) по мере исчерпания ресурсов.

Стоит отметить, что ТЗ может содержать ограничения на массогабаритные характеристики реакторов. В этом случае полученные значения проверяются на удовлетворение этим ограничениям, и в случае отрицательного результата полученные на шагах 3 – 7 величины объемного расхода, массы, объема, площади и длины реактора считаются суммарными значениями группы одинаковых одновременно функционирующих реакторов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям.

Следует учесть такое немаловажное понятие, как металлоемкость, которая должна учитываться при наличии массогабаритных ограничений, сужая диапазон допустимых значений.

Таким образом, пошаговая реализация предложенного алгоритма неизбежно приведет к формированию варианта конфигурации СКЗ с расчетом геометрических параметров реактора (реакторов), удовлетворяющих показателям ТЗ. При этом принятие решения об использовании режима автоматического синтеза конфигурации СКЗ возлагается на разработчика.

На рис. 5.3 представлена упрощенная блок-схема предложенного алгоритма.

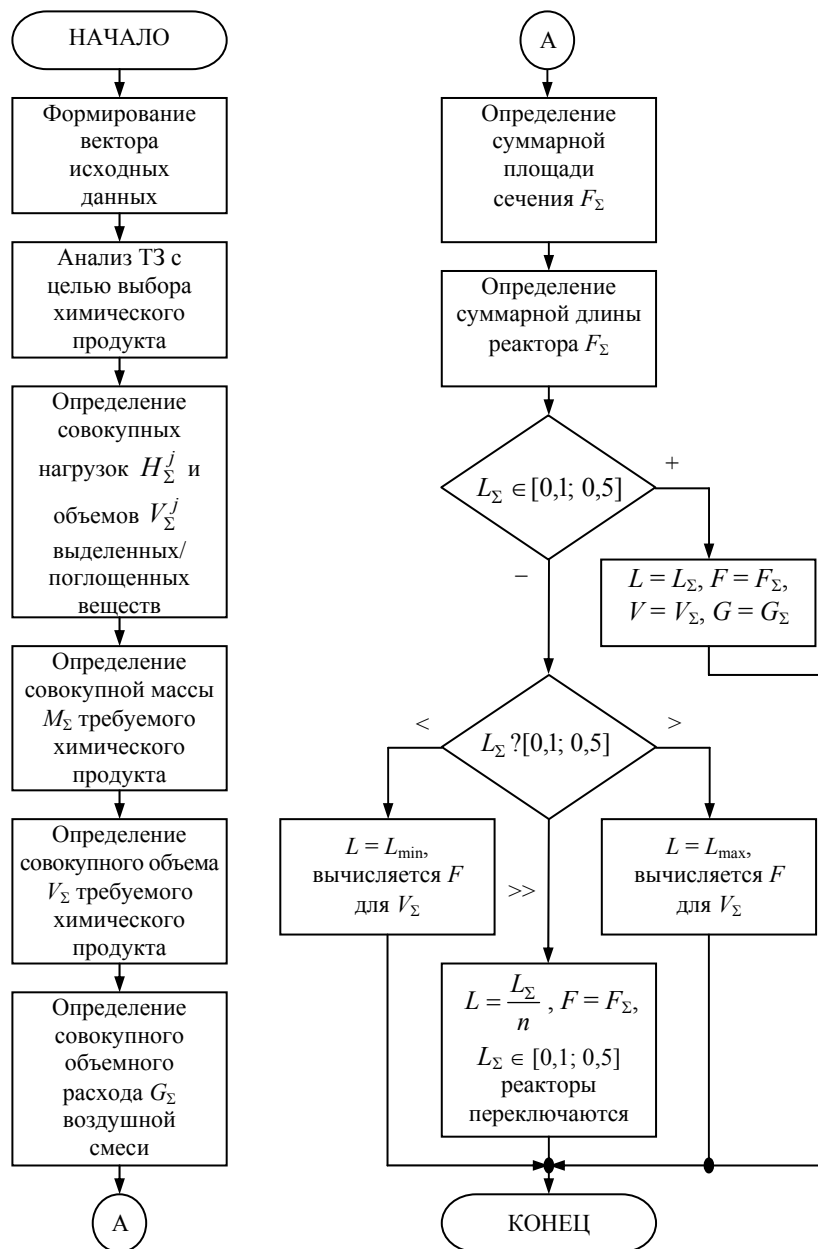


Рис. 5.3. Блок-схема алгоритма автоматического синтеза конфигурации СКЗ и расчета геометрических параметров реактора

5.4. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА

Информационное обеспечение – это совокупность единой системы классификации и кодирования, системы показателей и информационных языков, унифицированных систем документации и массивов информации, совокупность первичных и производных данных, а также совокупность правил и методов организации, представления, накопления, хранения, обновления и контроля информации, обеспечивающих эффективное использование информации в автоматизированных системах [129, 132]. Данный вид обеспечения предназначен для организации, использования (получения), хранения и поддержания в актуальном и корректном состоянии всех сведений (данных), необходимых для процесса проектирования. Его основной функцией является представление всем категориям пользователей и приложений необходимой информации в требуемых количествах, формах и сроках.

При разработке информационного обеспечения необходимо учитывать следующие требования [128, 133]:

- полноту обеспеченности данными всех разработчиков, использующих автоматизированный комплекс, в соответствии с их целями, задачами, выполняемыми функциями;
- доступность использования данных для всех разработчиков с учетом их приоритета, наличия соответствующих прав на пользование данными;
- минимизацию времени обращения разработчиков к системе и их входа в систему, времени обработки, обмена и выдачи данных из системы;
- однократность ввода данных в систему, исключающую ошибки ввода и искажения данных;
- возможность корректировки и дополнения данных.

Основу информационного обеспечения, в соответствии с CALS, составляет единое информационное пространство (ЕИП), являющееся специальным образом организованным хранилищем информации, интегрирующим все данные в логически единую модель и представляющим собой совокупность программных, технических, языковых, организационно-

методических средств, предназначенных для централизованного накопления и коллективного многоцелевого использования данных. Целью создания ЕИП является повышение эффективности управления информацией за счет повышения доступности данных об изделии.

ЕИП должно обладать следующими свойствами [104, 105]:

- вся информация представлена в электронном виде;
- ЕИП охватывает всю информацию, созданную об изделии;
- ЕИП является единственным источником данных об изделии;
- для создания ЕИП используются уже применяемые программно-аппаратные средства;
- ЕИП постоянно развивается.

Основными преимуществами ЕИП являются [104, 105]:

- обеспечение целостности и сокращение избыточности данных;
- возможность организации и разграничения доступа к данным, в том числе географически удаленных пользователей;
- отсутствие потерь данных при переходе между этапами жизненного цикла (ЖЦ) изделия;
- изменения данных доступны сразу всем участникам ЖЦ изделия;
- повышение скорости поиска данных и доступа к ним по сравнению с бумажной документацией;
- возможность использования различных компьютерных систем для работы с данными.

В соответствии с вышеизложенным был проведен анализ существующих процессов разработки СКЗ, который не выявил каких-либо признаков ЕИП, отвечающего предъявляемым требованиям. Данный факт определяет необходимость первоначального формирования единого информационного пространства СКЗ в рамках создания автоматизированного комплекса.

Создание ЕИП СКЗ включает следующие этапы:

- составление максимально полного перечня данных и документов, используемых на стадии проектирования;
- построение логической модели данных;
- разработка баз данных в соответствии с моделью данных;
- конвертирование и накопление проектной информации в электронном виде.

Изучение процессов разработки СКЗ и реакторов СКЗ позволило определить и обобщить минимальный объем сведений ЕИП, включающий информацию о существующих и разрабатываемых СКЗ; данные функционального и технического характера о реакторах, входящих в состав СКЗ; параметры химических продуктов и сборочных единиц, входящих в состав реакторов; показатели, условия и ограничения ТЗ на разработку, а также информацию о пользователях и состоянии выполняемых разработок.

Следующим шагом в разработке информационного обеспечения комплекса является построение логической модели данных, представляющей собой формализованное описание, отражающее состав и типы данных, а также взаимосвязи между ними. По способам отражения связей между данными различают иерархическую, сетевую и реляционную модели. Вследствие простой формы представления данных, организованных в виде таблиц, и развитому теоретическому аппарату, позволяющему легко описывать различные преобразования над ними была выбрана реляционная модель. На рис. П.1 представлена построенная логическая модель данных.

В соответствии с построенной логической моделью были разработаны следующие базы данных (БД):

- база данных СКЗ;
- база данных реакторов СКЗ;
- база данных химических продуктов;
- база данных сборочных единиц реакторов;
- база данных технических заданий;
- база данных пользователей и состояния текущих проектов.

Физическая реализация сформированной логической модели данных возможна с использованием системы управления базами данных (СУБД). Исходя из требований CALS об использовании уже применяющихся программно-аппаратных средств, в качестве СУБД для разрабатываемого комплекса был выбран Microsoft SQL Server [130].

СУБД Microsoft SQL Server является одной из наиболее мощных и перспективных программных средств своего класса и основана на технологии клиент-сервер, заключающейся в распределении задач обработки данных, обеспечивая параллельность, минимальный сетевой трафик и улучшенную производительность. Данная СУБД максимально реализует:

- управление базами данных, с которыми совместно работают множество пользователей;
- распределение прав доступа к базам данных и организацию защиты данных;
- обеспечение сохранности информации в базах данных с помощью средств архивации/восстановления и создания резервных (зеркальных) копий;
- централизованное задание для всех клиентских приложений правил глобальной целостности данных.

Таким образом, в рамках создания автоматизированного комплекса был разработан необходимый состав информационного обеспечения, в том числе сформировано ЕИП СКЗ, построена логическая структура модели данных, на основании которой создана СУБД, разработаны и реализованы соответствующие базы данных. Следует отметить, что в соответствии с требованиями CALS сформированное ЕИП СКЗ обладает возможностью расширения по мере автоматизации остальных стадий ЖЦ.

5.5. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА

Программное обеспечение – совокупность программ, представленных в заданной форме, вместе с необходимой программной документацией, автоматизирующая процесс решения задач разработки

на заданных (выбранных) технических средствах [102, 131, 132]. От свойств программного обеспечения в значительной мере зависят возможности и показатели эффективности автоматизированного комплекса.

Программное обеспечение САПР делится на системное и прикладное.

К системному программному обеспечению относятся языки, трансляторы, стандартные программы, операционные системы, которые, в принципе, не являются объектом разработки при создании автоматизированного комплекса.

Прикладное программное обеспечение предназначено для решения определенных проектных задач. Его состав всегда индивидуален и зависит от объекта проектирования, специфики и объема решаемых задач.

Следуя вышеуказанным принципам, был определен состав программного обеспечения создаваемого комплекса. Причем выбор тех или иных программных средств основывается на требованиях CALS о применении уже используемых.

Таким образом, системное программное обеспечение автоматизированного комплекса включает следующие элементы:

- операционные системы Microsoft Windows 2000 Advanced Server, функционирующая на сервере и Microsoft Windows 2000 Professional, установленная на рабочих станциях. Операционные системы семейства Windows NT являются в настоящий момент наиболее распространенными среди программных продуктов данного класса и обладают мощными инструментами управления и администрирования программно-аппаратных, в том числе сетевых, средств, реализованных в удобном визуальном представлении;
- пакет визуального программирования Borland Delphi 5.0, основанный на идее объектно-ориентированного программирования и предоставляющий широкий набор средств быстрой и удобной разработки прикладных программ;
- систему управления базами данных Microsoft SQL Server 7.0, являющуюся одним из наиболее мощных и перспективных программных продуктов своего класса. Данная СУБД обладает развитым аппаратом управления и обработки информации, содержащейся в ЕИП;
- пакет разработки конструкторской документации Autodesk AutoCAD 2000, являющийся одним из наиболее используемых и простых в эксплуатации;
- текстовый редактор Microsoft Word 2000, входящий в состав офисного пакета Microsoft Office 2000 и предназначенный для формирования и обработки проектной документации.

Прикладное программное обеспечение комплекса состоит из совокупности программ и программных модулей, реализующих работу всех подсистем. К ним относятся:

- программный модуль управления комплексом и автоматизированными процессами, организующий взаимодействие всех пользователей и подсистем, распределяя информационные потоки между ними;
- программный модуль управления данными и документами, организующий взаимодействие комплекса с ЕИП, а также выполняющий управление и обеспечение комплекса требуемым объемом информации;
- программные модули разработки конфигурации СКЗ и конструктивно-геометрической разработки реакторов СКЗ, непосредственно предназначенные для проектирования СКЗ и реакторов СКЗ, соответственно;
- программные модули математического моделирования и исследования ПРВ в ГЗО и в реакторах СКЗ, реализующие выбранные методы и разработанные в главе 2 алгоритмы решения математических моделей;
- программный модуль синтеза оптимальных режимов функционирования СКЗ, реализующий решение задачи оптимального управления ПРВ для идеального состояния функционирования БТК в соответствии с алгоритмом, представленным в главе 3;
- программный модуль подготовки проектной документации, предназначенный для автоматизированного формирования РКД с минимальным участием разработчика;
- вспомогательные программные модули, обеспечивающие работу различных подсистем, выполняя узкоспециализированные функции.

Таким образом, в рамках создания комплекса сформирован необходимый состав программного обеспечения, в том числе определен перечень системных программных средств, уже применяемых при разработке СКЗ, и практически реализован ряд программных модулей, организующих работу всех подсистем, определяя состав прикладного программного обеспечения.

5.6. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА

Техническое обеспечение представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для осуществления автоматизированных исследований и разработок [129, 134]. Основу технического обеспечения составляют устройства, системы, а также их сочетания, создаваемые на базе средств вычислительной, организационной, измерительной техники и передачи данных. К ним относят ЭВМ различного типа, разнообразное периферийное оборудование, в том числе внешние запоминающие устройства, устройства ввода-вывода информации, технические средства машинной графики, коммуникационные средства и некоторые другие виды устройств.

В соответствии с вышеизложенным, а также с учетом уже упомянутого требования CALS об используемых программно-аппаратных средствах был определен состав технического обеспечения автоматизированного комплекса.

Основу технического обеспечения комплекса составляют два и более автоматизированных рабочих мест, организованных по технологии клиент-сервер. Подобная структура позволяет перераспределить выполнение ресурсоемких задач,

связанных с обработкой больших массивов информации, возложив основную часть операций на более производительную ЭВМ – сервер и разгрузив менее мощные клиентские станции.

В соответствии с предложенным подходом в качестве ЭВМ-сервера выбран уже использующийся сервер, обладающий достаточными вычислительными ресурсами для оперативной обработки одновременно поступающих запросов, обеспечивая непрерывное взаимодействие комплекса с проектировщиком. Данная ЭВМ построена на специальной серверной платформе с центральным процессором Intel Xeon 2,0 ГГц и оперативной памятью стандарта DDR, поддерживающей режим параллельного чтения/записи с коррекцией ошибок, объемом 1 Гб. Сервер включает четыре накопителя на жестких магнитных дисках стандарта SATA объемом 80 Гб каждый, функционирующих в режиме зеркального копирования в целях повышения отказоустойчивости, а также устройство чтения/записи оптических дисков – DVD–RW, выполняющее функцию резервирования информации. К остальным компонентам сервера особых требований не предъявляется, поэтому используется видеоадаптер стандарта AGP с объемом видеопамяти 32Мб, стандартный накопитель на гибких магнитных дисках 3,5" (1,44 Мб), ЭЛТ монитор с диагональю 17", клавиатура (101/102 клавиши) и оптический манипулятор типа «мышь».

«Клиентские» ЭВМ располагают меньшими вычислительными ресурсами, чем сервер, но достаточными для уверенного и стабильного функционирования разработанного программного обеспечения: центральный процессор Intel Celeron/Pentium IV 1 – 2,8 ГГц, объем оперативной памяти 128 – 512 Мб, PCI/AGP-видеоадаптеры с объемом видеопамяти 64 – 512 Мб, накопители на жестких магнитных дисках 20 – 160 Гб, накопители на гибких магнитных дисках 3,5" (1,44 Мб), в некоторых случаях устройства для работы с оптическими дисками, ЖК или ЭЛТ мониторы с диагональю 15 – 19", стандартные устройства ввода информации (клавиатура, манипулятор «мышь»).

Все ЭВМ объединены в локальную вычислительную сеть по топологии «звезда» со скоростью передачи данных до 100 Мбит/с. Для вывода проектной документации на бумагу в техническое обеспечение комплекса входят лазерные принтер с высокой скоростью и разрешением печати (например, HP LaserJet 1100 или 1200, Canon LaserShot LBP-1120 или др.) и плоттер, обеспечивающий работу с листами формата А1 (HP DesignJet 430).

Следует отметить, что приведенный перечень технических средств нельзя строго зафиксировать, он предназначен для первоначального развертывания автоматизированного комплекса, в связи с чем количественный и качественный состав всей вычислительной техники в дальнейшем может быть подвергнут пересмотру.

Таким образом, в рамках создания комплекса сформирован необходимый состав технического обеспечения на основе уже используемых при разработке СКЗ технических средств.

5.5. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

В главе проведена разработка программно-технического комплекса автоматизации научных исследований и разработки СКЗ, при этом были решены следующие задачи:

- разработана структура комплекса, в соответствии с выполняемыми функциями определены необходимые подсистемы;
- сформирован алгоритм функционирования комплекса, обеспечивающий весь цикл разработки и исследований СКЗ, начиная с поступления технического задания и заканчивая подготовкой проектной документации;
- разработан алгоритм автоматического синтеза конфигурации СКЗ и нахождения геометрических параметров реакторов СКЗ;
- сформировано информационное обеспечение, включая построение и реализацию необходимого сегмента единого информационного пространства;
- разработано необходимое программное обеспечение, реализующее работу всех подсистем комплекса, сформирован состав общесистемного программного обеспечения;
- определен состав технического обеспечения на основе совокупности уже используемых технических средств.

Физическая реализация программно-технического комплекса автоматизации научных исследований и разработки средств коллективной защиты органов дыхания после опытной эксплуатации принята к использованию и внедрена в отделе коллективных средств защиты ОАО «Корпорация «Росхимзащита» для создания новых и усовершенствования существующих СКЗ, определения оптимальных режимов их функционирования, а также исследования процесса регенерации воздуха.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе проведения научных исследований вопросов оптимального управления процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме были решены задачи:

- математического моделирования процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме, осуществляемого в реакторах средств коллективной защиты;
- анализа процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме как объекта управления на основе результатов вычислительного эксперимента, реализованного с использованием построенной математической модели процесса регенерации воздуха;
- разработки алгоритма и системы оптимального управления процессом регенерации воздуха на множестве возможных состояний функционирования биотехнического комплекса, постановки и решения соответствующих задач оптимального управления;
- разработки программно-технического комплекса автоматизации научных исследований и разработки средств коллективной защиты органов дыхания с использованием результатов исследований вопросов математического моделирования и управления процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме.

Для решения поставленных задач были использованы методы: математического моделирования, математической статистики, математической физики, проектирования средств автоматизации, теории оптимального управления, теории процессов и аппаратов химической технологии.

При решении поставленных задач были получены следующие основные результаты:

- осуществленное в работе математическое моделирование процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме позволило получить модифицированную математическую модель, обеспечивающую проведение инженерных расчетов для средств коллективной защиты, включающих как уже существующие реакторы, так и реакторы с новыми конструктивными решениями (многослойная загрузка шихты, сложная геометрия);
- с использованием результатов вычислительного эксперимента, проведенного в целях исследования процессов газоформирования воздушной среды герметично замкнутого объема, осуществлен анализ процесса регенерации воздуха как объекта управления с последующей классификацией состояний функционирования биотехнического комплекса;
- разработан алгоритм оптимального управления процессом регенерации воздуха, обеспечивающий поддержание наиболее комфортных условий жизнедеятельности в герметично замкнутом объеме на любых интервалах времени, обеспечивая при этом энерго- и ресурсосберегающие режимы функционирования средств коллективной защиты;
- сформулированы и решены задачи оптимального управления процессом регенерации воздуха для каждого состояния функционирования биотехнического комплекса, допускающие определение оптимальных режимов функционирования средств коллективной защиты на стадии их разработки с дальнейшей корректировкой управляющих воздействий в соответствии с полученными законами управления;
- самонастраивающаяся система автоматического оптимального управления процессом регенерации воздуха, реализованная в соответствии с предложенными структурами, позволит формировать в каждый момент времени наиболее адекватные текущему состоянию воздушной среды управляющие воздействия;
- разработанный программно-технический комплекс автоматизации научных исследований и разработки средств коллективной защиты позволяет осуществлять комплекс мероприятий по созданию СКЗ, определению оптимальных режимов их функционирования, а также исследованию процессов регенерации воздуха и газоформирования воздушной среды герметично замкнутого объема.

Полученные в процессе проведенных исследований результаты позволяют осуществлять математическое моделирование и имитационные исследования процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме и реакторах средств коллективной защиты органов дыхания, определять оптимальные режимы функционирования регенеративного оборудования, разрабатывать эффективные системы оптимального управления газовым составом воздушной среды на множестве состояний функционирования биотехнического комплекса, осуществлять автоматизированные исследования и разработку средств коллективной защиты органов дыхания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко, Г. Биобезопасность – проявление планетарного кризиса / Г. Онищенко // Гражданская защита. – 2003. – № 4. – С. 18 – 21.
2. Владимиров, В. О теории гражданской защиты / В. Владимиров // Гражданская защита. – 2000. – № 5. – С. 20 – 23.
3. Шойгу, С. Исторические аспекты развития системы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций / С. Шойгу // Гражданская защита. – 2002. – № 10. – С. 5 – 15.
4. Воробьев, Ю. XXI век – стратегические аспекты деятельности РСЧС и гражданской обороны / Ю. Воробьев // Гражданская защита. – 2001. – № 1. – С. 11 – 19.
5. Атаманюк, В.Г. Гражданская оборона / В.Г. Атаманюк, Л.Г. Ширшев, Н.И. Акимов. – М. : Высшая школа, 1986. – 207 с.
6. Основные принципы защиты населения в экстремальных условиях // Гражданская оборона. – 1990. – № 6. – С. 11 – 18.
7. Каммерер, Ю.Ю. Защитные сооружения гражданской обороны / Ю.Ю. Каммерер, А.К. Кутырев, А.Е. Харкевич. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
8. Убежища ГО. Конструкции и расчет / В.А. Котмяревский и др. – М. : Стройиздат, 1989. – 606 с.
9. Разработка РТД комплектующих установку регенерации воздуха убежищ ГО: Тема I С – 88 – 81 / Предприятие п/я В-8433, рук. темы В.Н. Невская. – Свердловск, 1982. – 20 с.
10. Новые технические правила по подземным коллективным убежищам многоцелевого назначения // Гражданская оборона. – 1980. – № 4. – С. 17.
11. Елохин, А.Н. К вопросу определения критериев приемлемости риска / А.Н. Елохин // Проблемы, возникающие при ЧС. – 1994. – Вып. 8. – 12 с.
12. Маршалл, В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. – М. : Мир, 1989. – 672 с.
13. Бесчастнов, М.В. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения / М.В. Бесчастнов, В.М. Соколов, М.И. Кац. – М. : Химия, 1976. – 386 с.
14. Новосельцев, В.Н. Организм в мире техники / В.Н. Новосельцев. – М. : Наука, 1989. – 125 с.
15. Воронин, Н.Г. Кондиционирование воздуха на летательных аппаратах / В.Н. Воронин, М.И. Верба. – М. : Машиностроение, 1965. – 482 с.
16. Нефедов, Ю.Г. Обитаемость и жизнедеятельность / Ю.Г. Нефедов, В.А. Адамович // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1988. – Т. 22, № 6. – С. 23.
17. Обитаемость атомных подводных лодок и технические направления ее улучшения в ВМС зарубежных стран : техн. отчет / отв. исполн. Б. Ракитин. – Л., 1971. – 164 с.
18. Кононов, А.Н. Средства регенерации, очистки и газового контроля воздуха / А.Н. Кононов. – Баку : КВВМУ им. С.М. Кирова, 1981. – 495 с.
19. Breeze, W.E. Space vehicle environmental control requirements based on equipment and physiological criteria / W.E. Breeze // ASD Technical Report 61 – 161. – 1961. – P. I. – NA 61 – 489.
20. Физиология человека / Е.Б. Бабский и др. – М. : Медицина, 1966. – 656 с.
21. Зими́на, Н.В. Физиология человека / Н.В. Зими́на. – М. : Физкультура и спорт, 1970. – 534 с.
22. Яздовский, В.И. Космическая биология и медицина. Медико-биологические проблемы космических исследований / В.И. Яздовский. – М. : Наука, 1966. – 406 с.
23. Вредное пространство или функциональный резерв организма / Э. Булич и др. // Спортсмен-подводник. – 1988. – № 80. – С. 19.
24. Куполевский, Г.М. Основы спортивной медицины / Г.М. Куполевский, Н.Д. Граевская. – М. : Медицина, 1971. – 368 с.
25. Реакции организма человека на взаимодействие химических веществ в условиях гермообмена / В.П. Савина и др. // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1988. – Т. 22, № 5. – С. 76.
26. Konessi, B. Space ecological systems / B. Konessi // Bioastronautics. – New-York – London, Macmillan Ltd., 1964. – 274 с.
27. Использование газовых смесей с повышенным содержанием кислорода и CO₂ для нормализации функции внешнего дыхания и кислотно-основного состояния крови при мышечном утомлении / Н.А. Агаджанян и др. // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1986. – Т. 20, № 4. – С. 32.
28. Влияние умеренной высотной гипоксии на функциональное состояние и работоспособность человека в зависимости от температуры окружающей среды / Ю.В. Бутов и др. // Физиология человека. – 1987. – Т. 13, № 2. – С. 284.
29. Чувствительность аппарата регуляции дыхания к CO₂ в моделируемых условиях космического полета / Л.Р. Исаев и др. // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1988. – Т. 22, № 2. – С. 16.
30. Формирование функционального состояния систем дыхания и терморегуляции при работе в атмосфере с повышенным содержанием диоксида углерода / С.В. Ливинский и др. // Физиология человека. – 1990. – Т. 16, № 1. – С. 133.
31. Кислотно-основное состояние организма человека при дыхании воздуха с примесью различных концентраций двуоксида углерода / И.А. Санов и др. // Физиология человека. – 1990. – Т. 16, № 1. – С. 127.
32. Воронин, Г.И. Жизнеобеспечение экипажей космических кораблей / Г.И. Воронин, А.И. Поливода. – М. : Машиностроение, 1967. – 211 с.
33. Тенденции развития систем обеспечения газового состава в некоторых перспективных гермообъектах США : аналитический обзор / отв. исполнитель И.П. Сапожников. – Тамбов : ТНИХИ, 1981. – 52 с.

34. Средства обеспечения газового состава космических станций «Скайлэб» и их эффективность : обзор по материалам иностранной печати // ГОНТИ-4. – 1981. – 144 с.
35. Дель Дюка, М. Дальнейшее развитие систем жизнеобеспечения / М. Дель Дюка // Системы жизнеобеспечения космических кораблей и скафандров : сборник переводов. – М. : Министерство здравоохранения СССР, Институт медико-биологических проблем, 1967. – С. 62.
36. Иванов, Д.И. Системы жизнеобеспечения человека при высотных и космических полетах / Д.И. Иванов, А.И. Хромушкин. – М. : Машиностроение, 1968. – 410 с.
37. Разработка средств регенерации воздуха по оборудованию убежищ для населения на 100 – 150 человек / ГК хим. и нефт. пром. при Госплане СССР ; Первое упр. Тамб. фил. Предприятие п/я № 11 ; Н.Е. Копейкин. – Тамбов, 1964. – 51 с.
38. Ильин, А.Н. Обзор вопросов по процессам регенерации воздуха / А.Н. Ильин, С.Б. Путин. – М., 2003. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ, 2003, № 2103-В2003.
39. Изучение установки регенерации воздуха французской фирмы «Fenzy» / рук. темы А.А. Кримштейн. – Тамбов : ТНИХИ, 1980. – 20 с.
40. Новые кислородосодержащие вещества в качестве компонентов регенеративного продукта : отчет по теме 114 – 69 ; отв. исполн. С.Ф. Гребенников. – Тамбов : ТНИХИ, 1969. – 28 с.
41. Разработка методик определения микроколичеств вредных веществ в воздухе. Рекомендации по безопасной работе и контролю за вредными выбросами в нефтехимическом производстве : заключительный отчет / исполн. Е.Г. Журавлёв. – Л., 1977. – С. 23.
42. Страусс, В. Промышленная очистка газов / В. Страусс. – М. : Химия, 1981. – 616 с.
43. Маршак, М.Е. Физиологическое значение углекислоты / М.Е. Маршак. – М. : Медицина, 1969. – 144 с.
44. Взаимодействие химических веществ, загрязняющих газовую среду герметизированных помещений / К.Н. Микос и др. // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1988. – Т. 22, № 3. – С. 67.
45. Очистка технологических газов / под ред. Т.А. Семеновой, И.Л. Лейтеса. – М. : Химия, 1977. – 490 с.
46. Системы жизнеобеспечения космических кораблей и станций : реферативный сборник за 1989 г. / отв. исполнитель З.С. Козлова. – Тамбов : ТНИХИ, 1990. – 88 с.
47. Смайли, Р. Космические системы жизнеобеспечения / Р. Смайли, Р. Реймонт ; Мин-во здравоохранения СССР, Институт медико-биологических проблем // Системы жизнеобеспечения космических кораблей и скафандров : сборник переводов. – М., 1967. – С. 6.
48. Мельников А.С. Основы хемосорбции / А.С. Мельников. – М. : Наука, 1978. – 135 с.
49. Дейч, М.Е. Газодинамика двухфазных сред / М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов. – М. : Энергия, 1968. – 424 с.
50. Серпионова, Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров / Е.Н. Серпионова. – М. : Высшая школа, 1969. – 41 с.
51. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. – М. : Химия, 1984. – 592 с.
52. Михаил, Р. Реакторы в химической промышленности / Р. Михаил, К. Кырлоганц. – Л. : Химия, 1968. – 388 с.
53. Оптимизация систем с управлением прилагаемыми в конечные моменты времени / А.П. Афанасьев и др. – Тамбов : ТГУ им. Г.Р. Державина, 1997. – 25 с.
54. Афанасьев, А.П. Об одной задаче квазистационарной оптимизации с дискретными управлениями / А.П. Афанасьев, С.М. Дзюба, А.А. Кримштейн // Известия АН. Теория и системы управления. – 1998. – № 3. – С. 73.
55. Громов, Ю.Ю. Моделирование и управление процессом регенерации воздуха в герметически замкнутом объеме / Ю.Ю. Громов, В.Г. Матвейкин, Б.В. Путин // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 3, № 6. – С. 638 – 648.
56. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М. : Наука, 1971. – 586 с.
57. Берд, Р. Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайфут. – М. : Химия, 1974. – 688 с.
58. Закгейм, А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А.Ю. Закгейм. – М. : Химия, 1982. – 287 с.
59. Кафаров, В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М. : Химия, 1991. – 432 с.
60. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Е.П. Марков. – М. : Наука, 1986. – 345 с.
61. Колин, В.Л. Синтез и исследование математических моделей типовых ХТП / В.Л. Колин, А.В. Колбанцев, И.Н. Таганов. – Л. : ЛТИ, 1980. – 93 с.
62. Тимофеев, Д.П. Кинематика адсорбции / Д.П. Тимофеев. – М. : АН СССР, 1962. – 122 с.
63. Фрэнкс, Р. Математическое моделирование в химической технологии / Р. Фрэнкс. – М. : Химия, 1971. – 272 с.
64. Батунер, Л.Н. Математические методы в химической технике / Л.Н. Батунер, М.Е. Позин. – Л. : Химия, 1963. – 320 с.
65. Математическое моделирование сорбционных процессов с обратными связями в системах, содержащих несколько аппаратов / А.В. Колбанцев и др. – М., 1983 – 35 с. – Деп. в ВИНТИ, 1983, № 4228-83.
66. Моделирование работы изолирующих аппаратов на химически связанном кислороде / А.А. Кримштейн и др. // Прикладная химия. – 1992. – Т. 65. – С. 2473.
67. К расчету индивидуальных дыхательных сорбционных аппаратов с круговой схемой движения воздуха / А.А. Кримштейн и др. // Прикладная химия. – 1993. – Т. 66. – С. 1982.
68. К вопросу моделирования процесса регенерации воздуха в замкнутом объеме / Ю.Ю. Громов и др. – М., 1996. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ, 1996, № 1957-В96.
69. Численное решение математической формализации процесса регенерации воздуха в герметически замкнутом объеме / Ю.Ю. Громов и др. – М., 1996. – 32 с. – Деп. в ВИНТИ, 1996, № 1956-В96.
70. Громов, Ю.Ю. Математическая формализация процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме в

условиях неопределенности / Ю.Ю. Громов, С.В. Матвеев, С.Б. Путин // Системы управления и информационные технологии. – 1997. – С. 53.

71. Путин, С.Б. Математическое моделирование, алгоритмы и системы управления процессом регенерации воздуха в биотехническом комплексе : дис. ... канд. техн. наук. – Тамбов, 1999. – 199 с.

72. Грег, С. Адсорбция. Удельная поверхность. Пористость / С. Грег, К. Синг. – М. : Мир, 1970. – 408 с.

73. Обоснование выбора формально-кинетического уравнения хемосорбции (применительно к частице сферической формы) / А.М. Кудрявцев и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1995. – Т. 1. – С. 98.

74. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М. : Химия, 1980. – 143 с.

75. Рамм, В.М. Адсорбция газов / В.М. Рамм. – М. : Химия, 1976. – 656 с.

76. Левеншпиль, О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1969. – 622 с.

77. Тодес, О.М. К вопросу о динамике сорбции на реальном зернистом адсорбенте / О.М. Тодес, Я.М. Биксон // Доклады АН СССР. – 1950. – Т. 75, № 5. – С. 727.

78. Радужкевич, Л.В. Связь теории динамики адсорбции с термодинамикой неравновесных процессов / Л.В. Радужкевич // Труды 3-й Всесоюзной конференции по теоретическим вопросам адсорбции. – М. : Наука, 1973. – С. 73.

79. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М. : Наука, 1967. – 327 с.

80. Родионов, А.М. Обобщение методов возмущений для уравнений с запаздыванием и применение его для расчета переходных процессов в системах автоматического регулирования / А.М. Родионов, В.С. Торопцов // Дифференциальные уравнения. – 1972. – Т. 8, № 3. – С. 459.

81. Торопцов, В.С. Аналитический метод построения переходных процессов в системах регулирования с запаздыванием / В.С. Торопцов // Автоматизация химических производств. – 1974. – № 2. – С. 3.

82. К вопросу об управлении процессом регенерации воздуха в замкнутом объеме / Ю.Ю. Громов и др. – М., 1996. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ, 1996, № 1958-В96.

83. Насонов, А.С. Программное управление автотрофным звеном в замкнутой по газообмену экологической системе / А.С. Насонов, В.С. Торопцов // Медицина, космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1979. – № 6. – С. 63.

84. Насонов, А.С. Построение программы управления автотрофным звеном в замкнутой по газообмену экологической системе / А.С. Насонов, В.С. Торопцов // Медицина, космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1980. – № 1. – С. 60.

85. Рей, У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. – М. : Мир, 1983. – 386 с.

86. Лионс, Ж.Л. Оптимальное управление системами, описываемыми дифференциальными уравнениями в частных производных / Ж.Л. Лионс. – М. : Мир, 1975. – 349 с.

87. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М. : Мир, 1984. – 542 с.

88. Ключев, А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов / А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.

89. Месарович, М. Общая теория систем / М. Месарович, Я. Такаха. – М. : Мир, 1978. – 314 с.

90. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – Л. : Энергия, 1969. – 376 с.

91. Бодров, В.И. Об имитационном исследовании и выборе систем автоматической стабилизации химико-технологических процессов / В.И. Бодров, В.Г. Матвейкин // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – С. 712.

92. Матвейкин, В.Г. Методы, алгоритмы и системы гарантированного оптимального управления химико-технологическими процессами : дис. ... д-ра техн. наук / В.Г. Матвейкин. – М., 1991. – 535 с.

93. Артемова, С.В. Применение экспертной системы для анализа и синтеза оптимального управления технологическими процессами / С.В. Артемова, Ю.Л. Муромцев, С.Б. Ушанев // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 1997. – № 1. – С. 12 – 15.

94. Бояринов, А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1969. – 564 с.

95. Варга, Дж. Оптимальное управление дифференциальными и функциональными уравнениями / Дж. Варга. – М. : Наука, 1977. – 622 с.

96. Квакернаак, Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М. : Мир, 1977. – 656 с.

97. Янг, Л. Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления / Л. Янг. – М. : Мир, 1974. – 490 с.

98. Вентцель, Е.С. Теория вероятности / Е.С. Вентцель. – М. : Физматлит., 1962. – 564 с.

99. Возможности информационных технологий по управлению жизненным циклом разработки и изготовления наукоемкого изделия в машиностроении : электронный ресурс / В. Митрофанов и др. // Режим доступа : <http://www.tehnopro.com/default.aspx?page=670> (08.01.2005).

100. Обзор вопросов автоматизированного проектирования, системы автоматизированного проектирования / А.Н. Ильин, С.В. Матвеев, И.В. Милованов, С.Б. Путин // Составляющие научно-технического прогресса : тез. докл. междунар. конф. – Тамбов, 2006. – Секция 6. – С. 113.

101. Роль современных информационных технологий в производстве наукоемких изделий / А.Н. Ильин, С.В. Матвеев, И.В. Милованов, С.Б. Путин // Информационные технологии в науке, образовании и производстве : тез. докл. междунар. конф. – Орел, 2006. – Т. 2. – С. 67.

102. Грувер, М. САПР и автоматизация производства / М. Грувер, Э. Зиммерс. – М. : Мир, 1987. – 528 с.

103. Проектирование систем автоматизации технологических процессов / А.С. Ключев и др. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.

104. Судов, Е.В. Информационная поддержка жизненного цикла продукта / Е.В. Судов // PC WEEK/RE. – 1998. – № 45. – С. 15.
105. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / Е.В. Судов и др. // НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика». – 2002. – 129 с.
106. Курочкин, С. Возможные пути внедрения CALS-технологий / С. Курочкин // САПР и графика. – 2001. – № 8. – С. 58 – 60.
107. Тихонов, В.А. Разработка концепции применения ИПИ (PLM) – технологии и межведомственной программы первоочередных мероприятий по ее реализации в промышленности Нижегородской области : электронный ресурс / В.А.Тихонов, Р.М. Сидорук, Л.И. Райкин // Проблемы подготовки специалистов в технических университетах : материалы VII Всерос. науч.-метод. конф. по проблемам науки и высшей школы. 18 – 19 ноября 2003 г. ; режим доступа : http://www.nntu.sci-nnov.ru/RUS/NEWS/probl_nayk/plenar3.rtf (23.02.2005).
108. Технологии информационной поддержки жизненного цикла изделия (CALS) – основа современных ИТ-систем эффективного управления наукоемким производством / А.Н. Ильин, С.В. Матвеев, И.В. Милованов, С.Б. Путин // Вопросы современной науки и практики. – Тамбов, 2006. – С. 201.
109. Mathematische beschreibung des luftregenerationsprozesses mittels der isolierenden kollektivschutzausrüstungen / А.Ильин, S. Matweew, I. Milowanow, S. Putin // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 3А. – С. 731 – 744.
110. Трепнел, Б. Хемосорбция / Б. Трепнел. – М. : Химия, 1958. – 528 с.
111. Мельников, А.С. Основы хемосорбции / А.С. Мельников. – М. : Наука, 1978. – 135 с.
112. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М. : Высшая школа, 1991. – 400 с.
113. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратное оформление / Н.Ф. Гладышев, Т.В. Гладышева, С.И. Дворецкий, С.Б. Путин и др. – М. : Издательство Машиностроение-1, 2007.
114. Самарский, А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А.А. Самарский, Ю.П. Попов. – М. : Наука, 1992. – 424 с.
115. Беллман, Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел. – М. : Мир, 1974. – 208 с.
116. Ильин, А.Н. Математическое моделирование процессов регенерации воздуха / А.Н. Ильин, С.Б. Путин. – М., 2003. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ, 2003, № 2105-B2003.
117. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М. : Радио и связь, 1988. – 229 с.
118. Путин, С.Б. Вопросы математического моделирования и управления процессом регенерации воздуха / С.Б. Путин // Математические методы в химии и химической технологии : тез. докл. междунар. конф. – Новомосковск, 1997. – Т. 2. – Секция 1. – С. 87.
119. К вопросу построения систем оптимального управления процессом регенерации воздуха на множестве состояний биотехнического комплекса / А.Н. Ильин, С.В. Матвеев, И.В. Милованов, С.Б. Путин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4А. – С. 1038 – 1050.
120. Ильин, А.Н. Оптимальное управление процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме / А.Н. Ильин, С.В. Матвеев, И.В. Милованов, С.Б. Путин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 1. – С. 6 – 12.
121. Атанс, М. Оптимальное управление / М. Атанс, П. Фалб. – М. : Машиностроение, 1968. – 764 с.
122. Эльсгольц, Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М. : Наука, 1965. – 424 с.
123. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – 720 с.
124. Афанасьев, А.П. Продолжение траекторий в оптимальном управлении / А.П. Афанасьев // Труды ИСА РАН. – М. : КомКнига, 2005. – Т. 17. – 208 с.
125. On a suboptimal control of nonlinear systems via quadratic criteria / А.Р. Afanas'ev, S.M. Dzyuba, S.M. Lobanov, A.V. Tyutyunnik // Appl. Comp. Math. – 2004. – V. 3, No. 2. – P. 158 – 169.
126. Беллман, Р. Процессы регулирования с адаптацией / Р. Беллман. – М. : Наука, 1964. – 360 с.
127. Беллман, Р. Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи / Р. Беллман, Р. Калаба. – М. : Мир, 1968. – 183 с.
128. Скурихин, В.И. Справочник по САПР / В.И. Скурихин. – Киев : Техника, 1988. – 375 с.
129. Норенков, Н.П. САПР. Принципы создания и структура / Н.П. Норенков. – Минск : Высшая школа, 1987. – Кн. 1. – 123 с.
130. Ильин, А.Н. Система автоматизированного проектирования элементов коллективных средств защиты / А.Н. Ильин, И.В. Милованов, С.Б. Путин. – М., 2003. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ, 2003, № 2104-B2003.
131. Аэров, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. – Л. : Химия, 1979. – 176 с.
132. Петров, А.В. Разработка САПР. Проблемы и принципы создания САПР / А.В. Петров, В.М. Черненький – М. : Высшая школа, 1990. – Кн. 1. – 144 с.
133. Жук, К.Д. Построение современных систем автоматизированного проектирования / К.Д. Жук, А.А. Тимченко, А.А. Родионов. – Киев : Техника, 1983. – 248 с.
134. Михалев, С.Б. Средства вычислительной техники для применения в САПР / С.Б. Михалев, А.Н. Захарский, В.В. Кондратьев. – Минск : Высшая школа, 1989. – 160 с.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

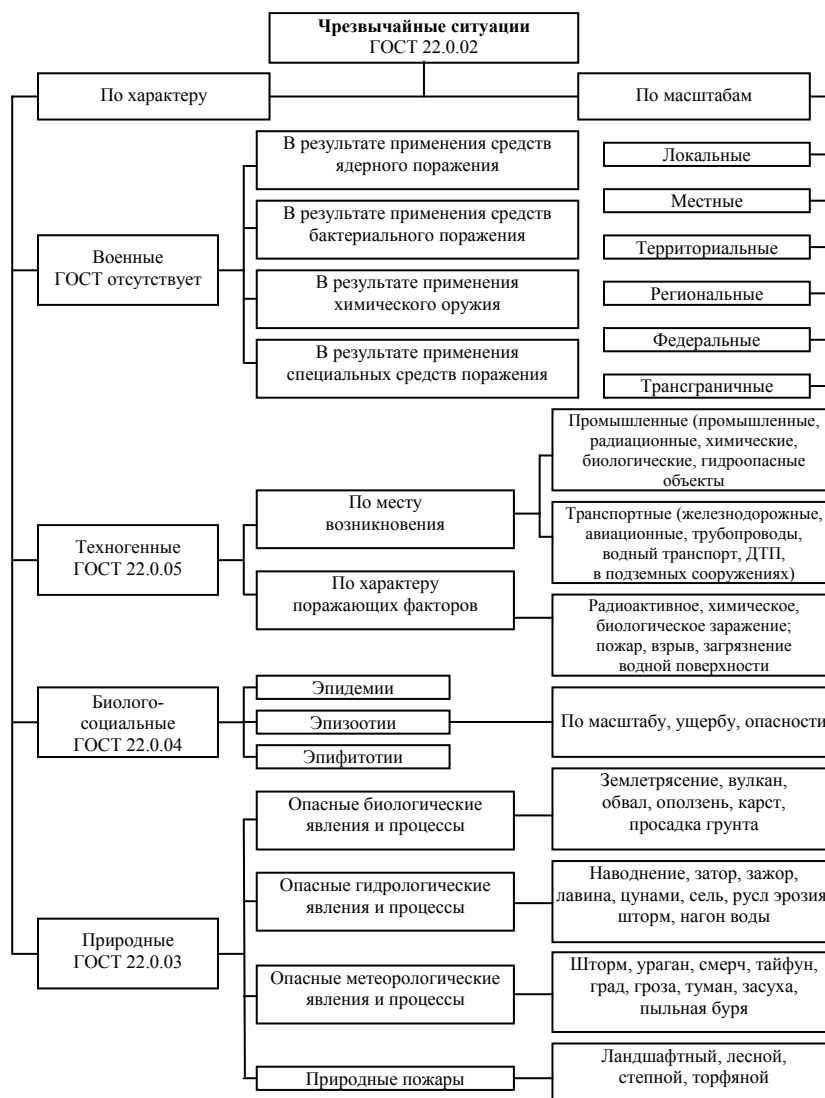


Рис. А.1. Классификация чрезвычайных ситуаций

СОСТАВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Таблица Б.1

Газ	Процентное содержание, % (объемные)	ПРИМЕЧАНИЕ
Азот (N)	78,09	Без учета водяных паров
Кислород (O ₂)	20,93	
Аргон (Ar)	0,94	
Углекислота (CO ₂)	0,03	
Водород (H ₂)	0,01	
Неон (Ne)	0,0012	
Гелий (He)	0,0004	
Криптон (Kr)	0,0001	
Озон (O ₃)	0,000002	На высотах 30 – 80 км до 2 – 3 %
Ксенон (X)	0,000008	

Таблица Б.2

Газы и пары (части на 1 млн. частей воздуха)			
Азотная кислота (дымящаяся)	5	Пропиловый спирт	400
Амиллацетат	200	Сернистый ангидрид	5
Амиловый спирт	100	Сероводород	20
Аммиак безводный	100	Сероуглерод	20
Анилин	5	Скипидар	100

Ацетон	1000	Соляная кислота	10
Бензин	500	Тетрахлорметан	25
Бензол	25	Тетрахлорэтан	10
Бромистый метил	30	Тетрахлорэтилен	200
Бромистый этил	1700	Толуол	200
Бутанол	50	Треххлористый фосфор	1
Бутилацетат	20	Формальдегид	20
Диоксид углерода	5000	Фосген	1
Дихлорбензол	50	Фтор	0,1
Дихлорэтиловый эфир	15	Фтороводород	3
Каменноугольная смола	200	Хлор	1
Ксилол	100	Хлорбензол	75
Метиловый спирт	200	Хлористый метил	500
Нефть	500	Хлористый этил	70
Нитробензол	5	Хлороводород	5
Озон	0,1	Хлороформ	100
Окись углерода	100	Этиловый спирт	1000
Перекись водорода	1	Эфир	400

Приложение В
(справочное)

**СОДЕРЖАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ
ВО ВДЫХАЕМОМ ВОЗДУХЕ**

Таблица В.1

Вещество	Количество, мг/м ³	Вещество	Количество, мг/м ³
Ацетальдегид	0,1	Формальдегид	до 0,1
Ацетон	0,35	Пропионовый альдегид	до 0,1
Этанол	0,86	Метанол	0,19
Пропанол	0,1	Аммиак	0,51
Диметиламин	до 0,1	Метан	1,24
Этан	до 0,1	Пропан	до 0,1
Изопропанол	до 0,1	Окись углерода у некурящих	4,9
Окись углерода у курящих	14,3		

МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВ, ПАРОВ И Т.Д. ВО ВДЫХАЕМОМ ВОЗДУХЕ

Таблица В.2

Пыль (млн. частиц на м ³)			
Асбест	150	Слюда, менее 5 % свободного SiO ₂	500
Карбид кремния	1500	Стеорит, то же	600
Кирпичная пыль	120	Тальк	600
Кремнезем:		Пыль, раздражающая дыхательные пути	1500
> 50 % свободного SiO ₂	150		
5 – 50 % свободного SiO ₂	600		
< 5 % свободного SiO ₂	1500		
Органические частицы	1500	Цемент	450
Портланд – цемент	1500	Шифер	450
Загрязненность атмосферы микроорганизмами не более 1000 кол. на м ³			

Таблица В.3

Металлическая пыль и дым (мг/м ³)			
Дифенилхлорид	1	Кадмий	0,1
Марганец	6	Окись алюминия	50
Окись цинка	15	Ртуть	0,1
Свинец	0,15	Хромовая кислота	0,1
Табачный дым – загрязнение воздуха 40 % (т.е. сквозь дым проходит около 60 % света)			

**СОДЕРЖАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ, ВЫДЫХАЕМЫХ
ЧЕЛОВЕКОМ В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ
ЗА ОДИН ЧАС, И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ**

Таблица Г.1

Вещество	Содержание, мг	Распределение	
		Воздух	Конденсат
Аммиак	12,5 ± 6,5	21,5	78,5
Альдегиды	0,02 ± 0,01	–	100
Кетоны	9,7 ± 5,6	40	60
Сероводород и меркаптаны	0,21 ± 0,05	–	100
Жирные кислоты	3,72 ± 0,48	25,7	74,3
Окись углерода:			
у курящих	11,6 ± 6,68	100	–
у некурящих	17,4 ± 5,79	100	–

**ТОКСИЧНОСТЬ CO₂ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ СОДЕРЖАНИЯ ЕГО ВО ВДЫХАЕМОМ ВОЗДУХЕ**

Таблица Г.2

Продолжительность дыхания и эффект действия CO ₂	Содержание CO ₂		P _{CO₂} , мм. рт. ст.
	Объемное, %	г/м ³	
30 мин – 1 час смертельный исход	5 – 7	90 – 120	38 – 53
30 мин – 1 час опасно для жизни	3,5 – 4,5	60 – 80	27 – 36
30 мин – 1 час без вредных последствий	3,0 – 4,0	60 – 70	22 – 30
Минимально действующая концентрация при дыхании более 1 часа без вредных последствий	1 – 2	20 – 30	7,5 – 15
В течение 6 часов без видимых нарушений	0,5	10	3,8

СХЕМЫ СИСТЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ КИСЛОРОДА

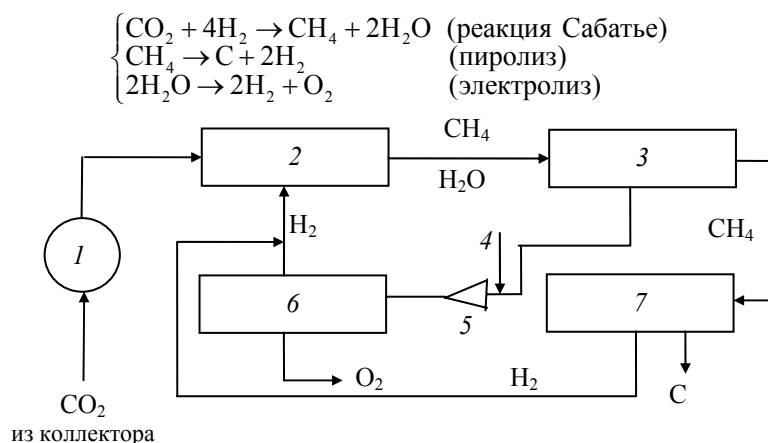


Рис. Д.1. Схема системы регенерации, основанная на реакции Сабатье:
1 – аккумулятор CO₂; 2 – регенератор; 3 – сепаратор и конденсатор воды;
4 – добавление воды; 5 – насос; 6 – электролитический элемент;
7 – реактор для разложения метана

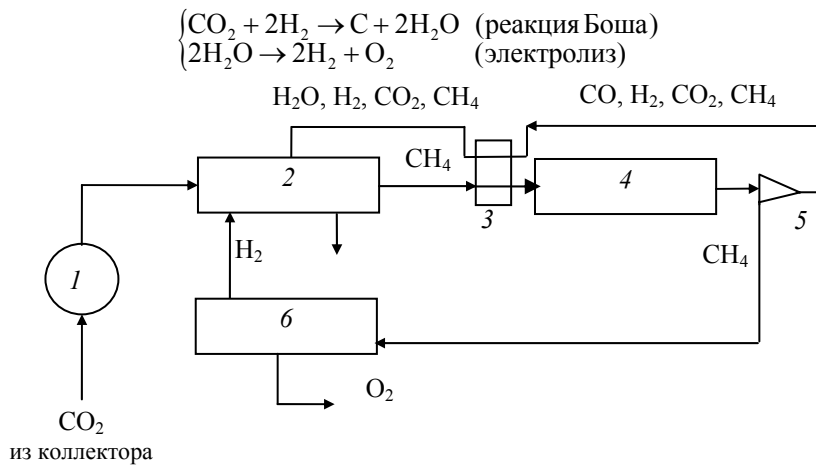


Рис. Д.2. Схема системы регенерации, основанная на реакции Босха:
 1 – аккумулятор CO_2 ; 2 – регенератор; 3 – рекуперативный теплообменник;
 4 – конденсатор воды; 5 – насос-сепаратор; 6 – электролитический элемент

Приложение Е
(рекомендуемое)

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ

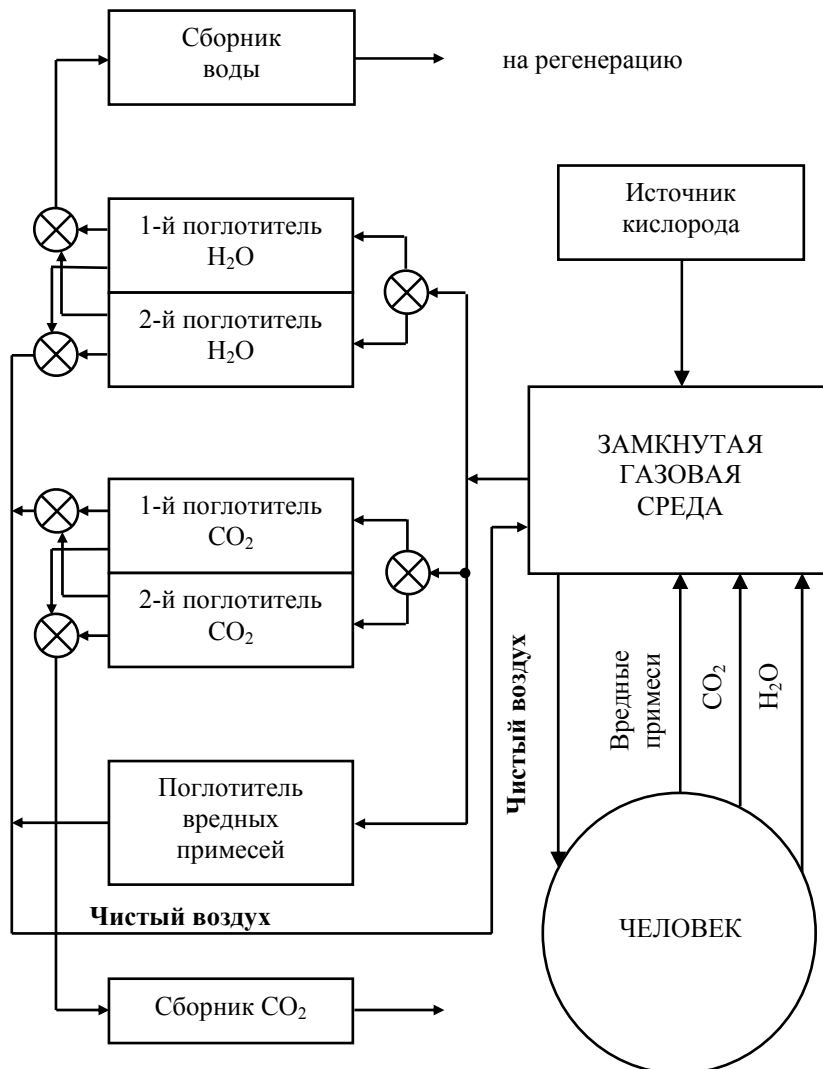


Рис. Е.1. Схема разомкнутой системы регенерации воздуха с запасами кислорода и нерегенерируемыми поглотителями CO_2 , H_2O и вредных примесей

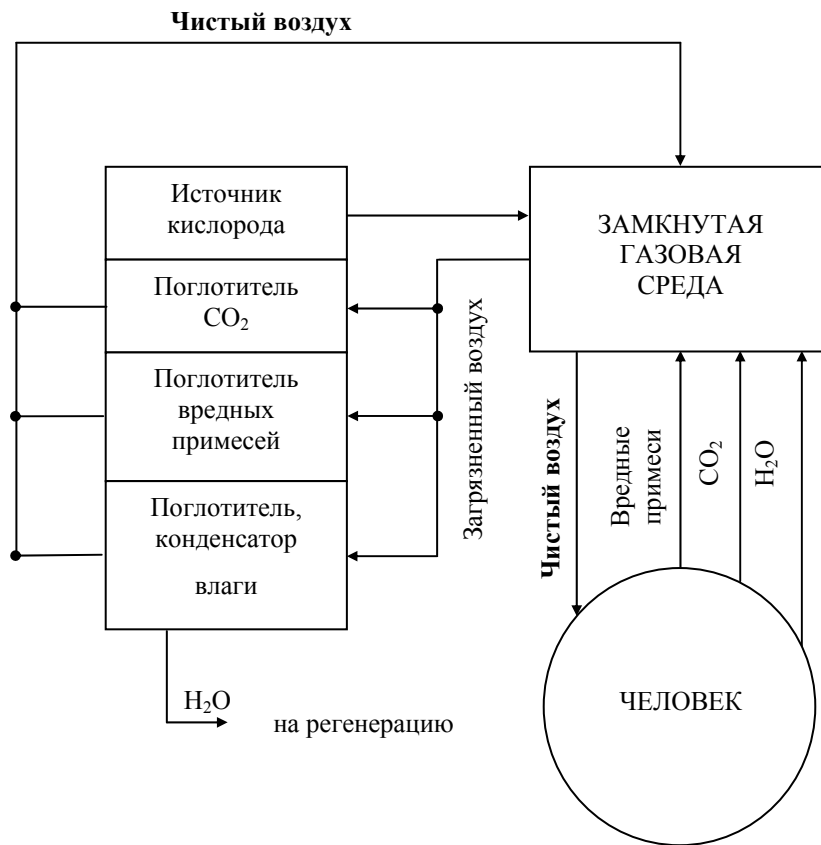


Рис. Е.2. Схема разомкнутой системы регенерации воздуха с запасами и регенерируемыми поглотителями CO_2 , H_2O и вредных примесей

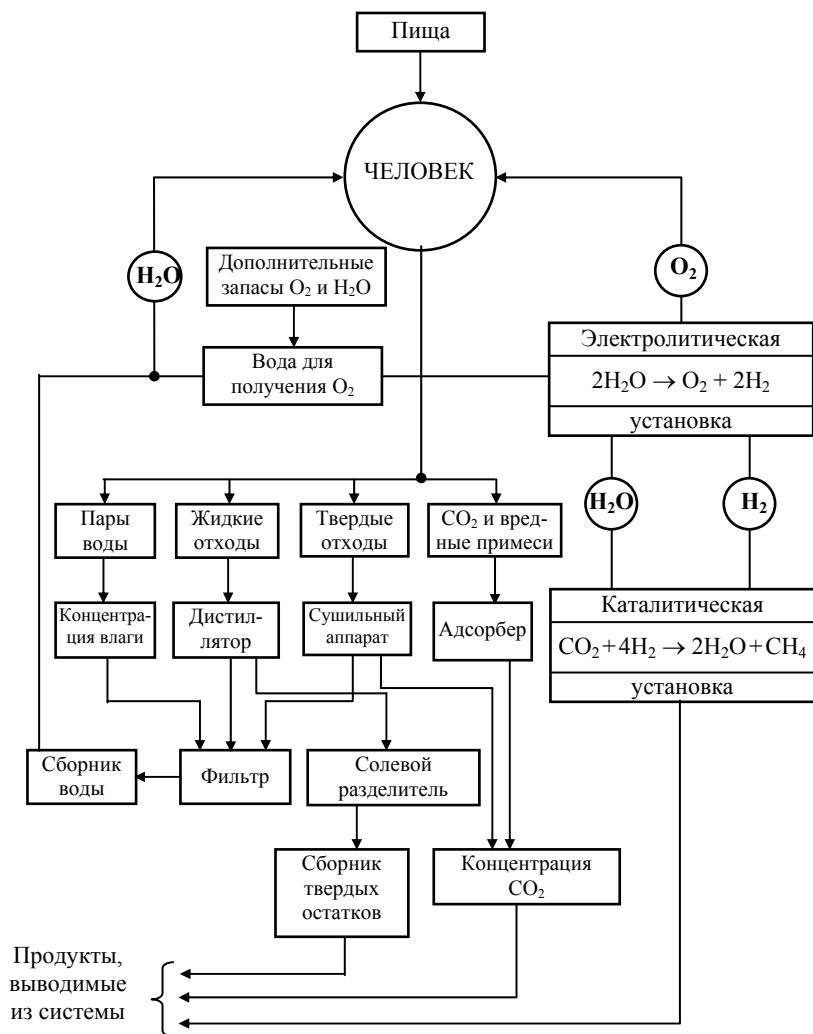


Рис. Е.3. Схема частично замкнутой системы регенерации воздуха

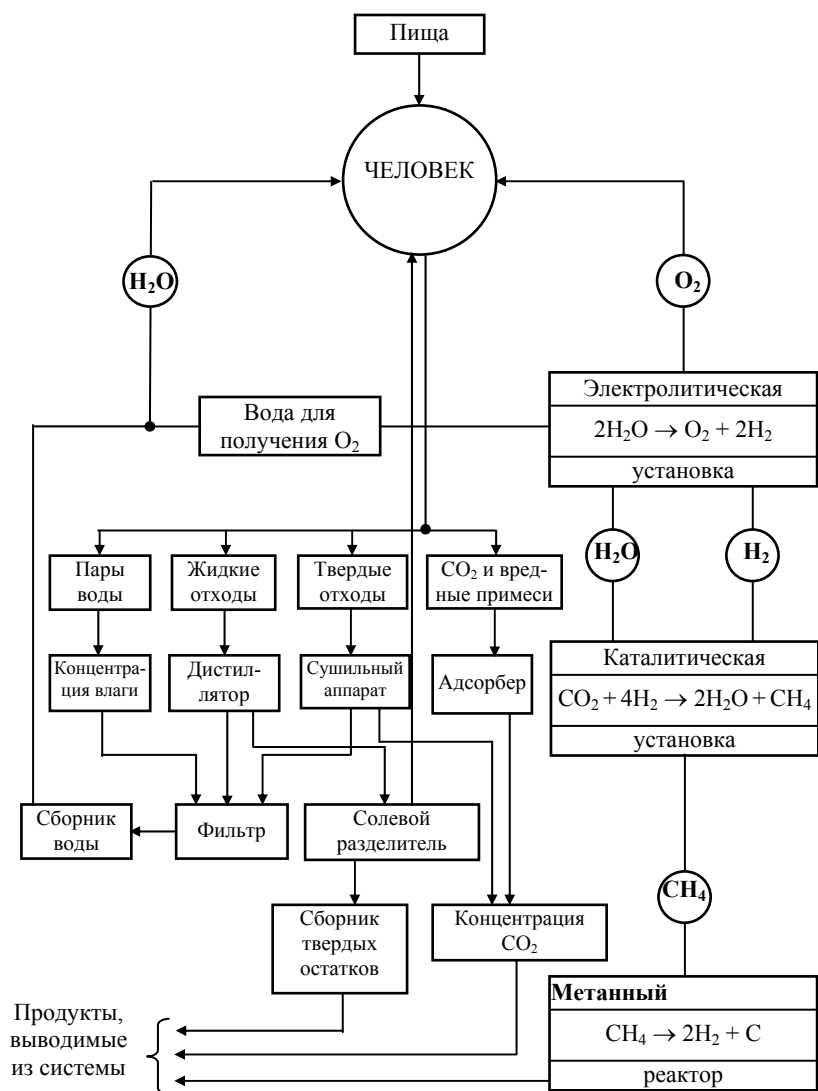


Рис. Е.4. Схема замкнутой системы регенерации воздуха

Приложение Ж
(справочное)

ХАРАКТЕРИСТИКИ КИСЛОРОДОСОДЕРЖАЩИХ
СОЕДИНЕНИЙ

Таблица Ж.1

Сравниваемые параметры	KO ₂	NaO ₂	NaO ₃	LiNO ₃	LiClO ₄	H ₂ O ₂	NaClO ₃
Высвобождаемый кислород (кг) на 1 кг соединения	0,388	0,436	0,563	0,232	0,601	0,471	0,451
Плотность, г/см ³	0,656	–	–	2,383	2,480	1,425	2,255
Тепловая энергия при реакции, ккал/кг кислорода	–955	–1090	–	+1165	+133	–1460	+880

+ означает эндотермическую реакцию, – означает экзотермическую реакцию.

Таблица Ж.2

Вещество	Количество активного кислорода		Поглотительная способность по углекислому газу, л/кг
	%	л/кг	
Перекись лития Li_2O_2	34,7	242	487
Перекись натрия NaO_2	20,5	143	287
Надперекись натрия NaO_2	43,6	305	203
Надперекись калия KO_2	33,8	236	158

Приложение И
(справочное)

ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ

Таблица И.1

Наименование установки	Схема регенерации	Количество людей	Время автономии	Значение концентрации O_2 в ГЗО	Значение концентрации CO_2 в ГЗО
ПЛ. БЕН-ФРАНКЛИН	Раздельная	10	42 сут	19,5 – 22	до 1,5
СЖО Apollo	Раздельная	3	8 сут	–	–
DSPV ВМС США	Раздельная	2	12 ч	18,5 – 24	–
ПА. ПАЙСИСЗ	Раздельная	336 человек/ч	–	–	–
Английский ПА	Раздельная	5	7 сут	–	–
Английский ПА	Совмещенная	3	14 ч	19,6 – 21,6	до 2
Салют	Полусовмещенная	–	–	16,6 – 37	до 1,2
РДУ	Совмещенная	2 – 4	20 – 40 ч	19 – 25	0,8 – 1,3
РУ 150/6	Совмещенная	150	6 ч	Более 18	Более 2
РП-100	Раздельная	–	6 – 12 ч	–	2 – 3
У-3	Раздельная	500	96 ч	21	1 – 2
У-1-59	Растворение	500	72 ч	21	0,1 – 0,5
К1000-Ж	Растворение	300 – 1000	72 ч	19	1 – 2
УЖМ-20	Растворение	20 000	–	29	0,1 – 0,5
РУФ-25	Совмещенная	150	6 ч	20 – 25	0,8
РУ-1А	Совмещенная	1 – 20	2 ч	19 – 25	2,6
РУК-1А	Совмещенная конвективная	3	90 ч	19 – 25	1,3
АУРО-II	Полусовмещенная	11	–	–	–
Колос	Полусовмещенная	1000	72 ч	19 – 25	0,1 – 0,5
У-1	Раздельная	500	96 ч	19 – 23	1 – 2
УРЖ-10	Раздельная	1000	96 ч	19	2 – 3
У-5	Раздельное растворение	500	96 ч	19 – 23	1 – 2
У-6	Раздельное растворение	1000	96 ч	19 – 23	1 – 2
У-7	Раздельное растворение	3000	96 ч	19 – 23	1 – 2
У-2-59	Раздельное растворение	1000	72 ч	21	0,1 – 0,5

ПОТРЕБЛЕНИЕ КИСЛОРОДА И ВЫДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

Таблица К.1

Режим работы	q_{O_2} , л/ч	q_{CO_2} , л/ч	Потребление кислорода	Выделение диоксида углерода
Покой	20	16	3,15	2,54
Ходьба	40	34	4,10	3,44
Быстрая ходьба	71	63	4,08	3,64
Бег	96	83	4,28	3,75
Быстрый бег	153	143	4,18	3,92

Таблица К.2

Режим работы	Потребление кислорода, л/ч	Выделение диоксида углерода, л/ч	Тепловыделение, ккал/ч
Легкий	От 20	От 15	100
Средний	От 40	От 35	250 – 350
Тяжелый	От 70	От 60	500

Таблица К.3

Условия	Потребление кислорода на уровне моря, м ³ /ч	Скорость вентиляции, необходимая для сохранения у человека концентрации CO ₂ ниже 0,5 %, м ³ /ч			
		Уровень моря	1500 м	3000 м	5000 м
Отдых	0,01	2,4	2,7	3	3,6
Умеренная нагрузка	0,05	7,2	7,2	12	12,6
Высокая нагрузка	0,1	16,2	18	21,6	26,4

**МАКСИМАЛЬНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ КИСЛОРОДА (МПК)
У ЗДОРОВЫХ ЛИЦ РАЗЛИЧНОГО ВОЗРАСТА**

Таблица Л.1

Возраст, годы	По данным J. Astrand 1960		По данным L. Hermansen 1973	
	МПК, л/мин	МПК/кг, мл/мин	МПК, л/мин	МПК/кг, мл/мин
Мужчины				
20 – 29	4,19 ± 0,6	52 ± 7,5	3,96 ± 0,47	54,1 ± 6,7
30 – 39	3,01 ± 0,54	39,8 ± 7,3	3,16 ± 0,39	41,8 ± 5
40 – 49	2,99 ± 0,32	39,2 ± 5,5	2,93 ± 0,34	39,3 ± 4
50 – 59	2,54 ± 0,36	33,1 ± 4,9	2,58 ± 0,41	36,1 ± 4,3
Женщины				
20 – 29	2,23 ± 0,23	39,9 ± 4,7	2,41 ± 0,27	37,9 ± 2,8

30 – 39	$2,13 \pm 0,28$	$37,3 \pm 5,2$	$2,09 \pm 0,25$	$33,2 \pm 3,9$
40 – 49	$2 \pm 0,19$	$32,5 \pm 2,7$	$1,95 \pm 0,26$	$32,9 \pm 4,5$
50 – 59	$1,85 \pm 0,25$	$28,4 \pm 2,7$	$1,81 \pm 0,27$	$28,5 \pm 4,7$

Приложение М
(обязательное)

**ПОДСИСТЕМЫ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЗАЦИИ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ СКЗ**

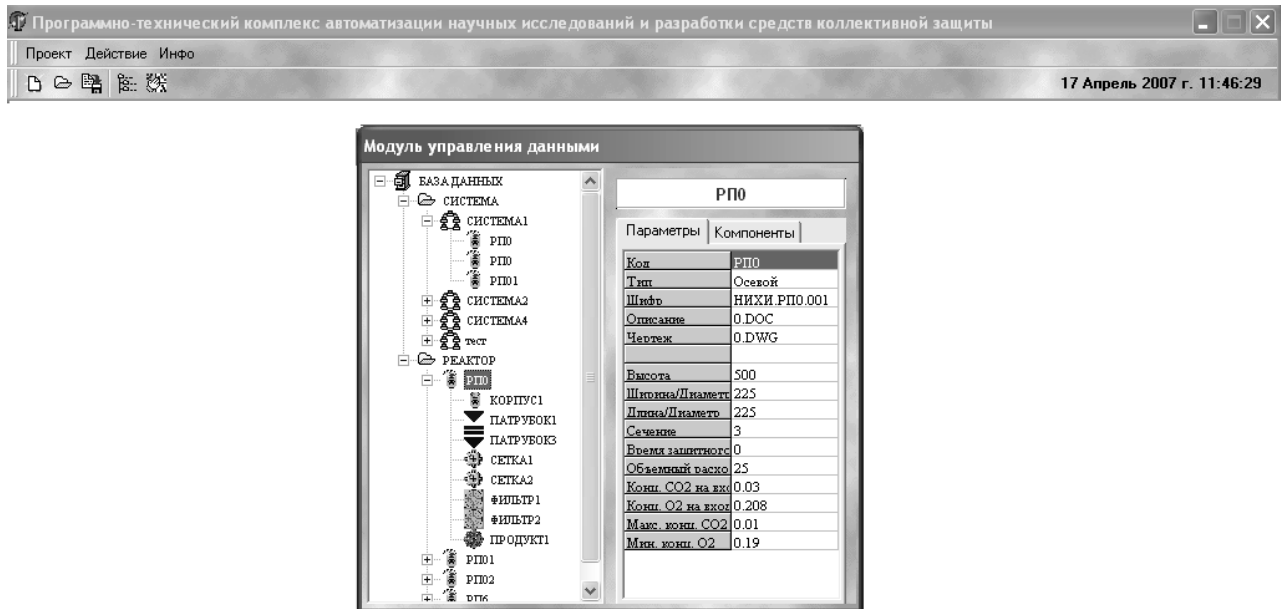


Рис. М.1. Визуальное представление подсистем управления комплексом и управления данными и документами

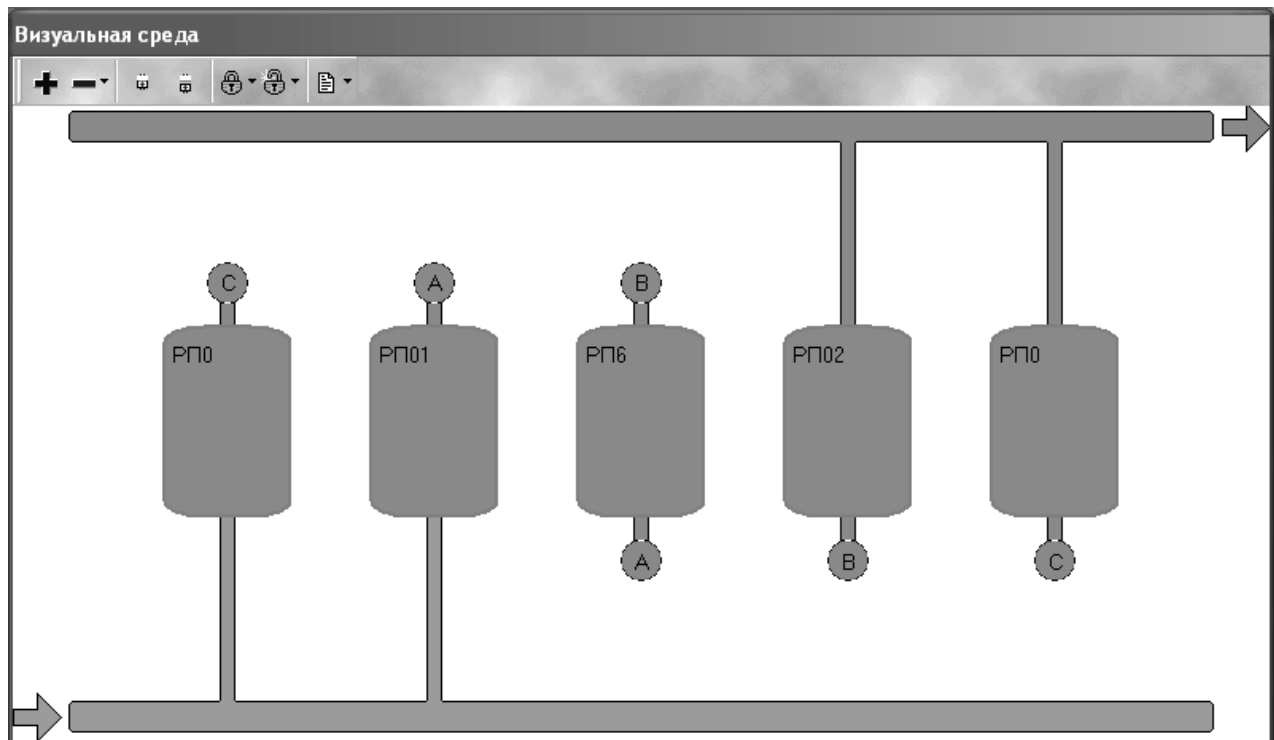


Рис. М.2. Специализированная интерактивная графическая среда разработки конфигурации СКЗ (подсистема разработки конфигурации СКЗ)

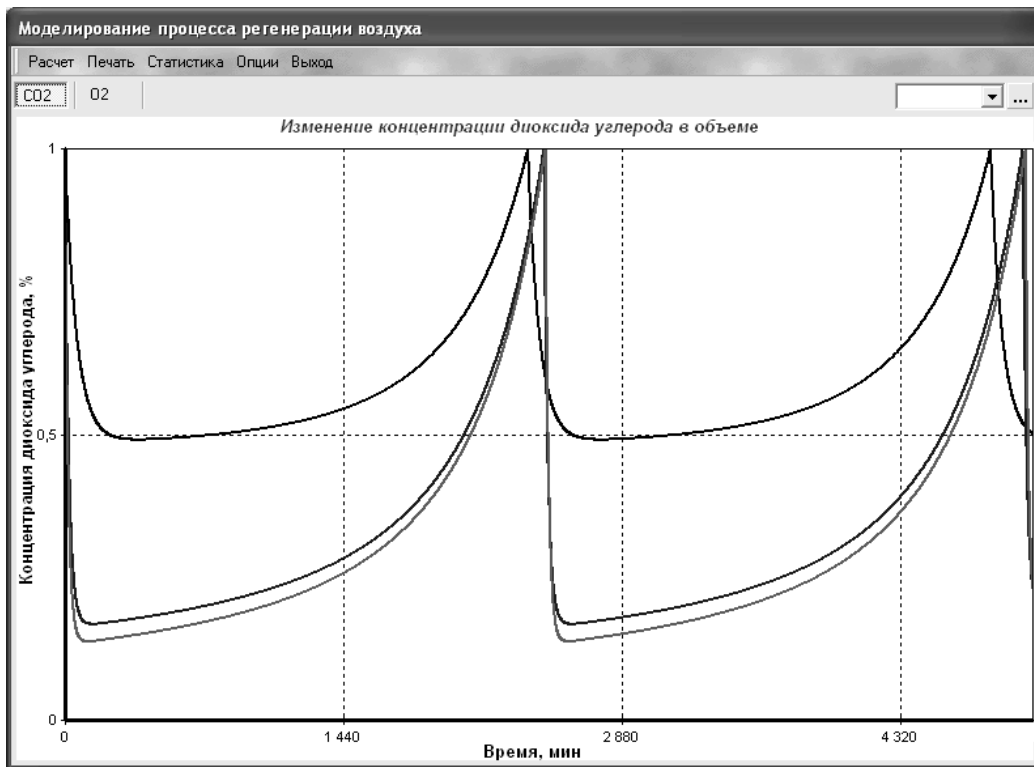


Рис. М.3. Внешнее представление подсистемы математического моделирования ПРВ в ГЗО

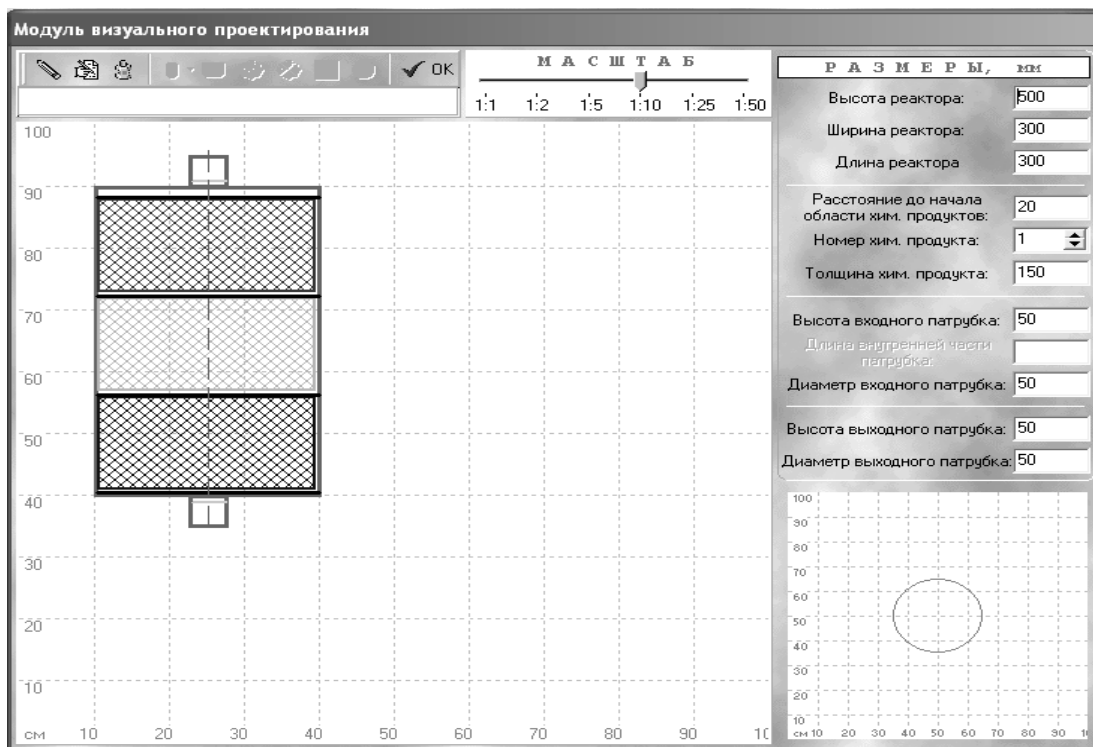


Рис. М.4. Специализированная интерактивная графическая среда разработки реакторов СКЗ (подсистема конструктивно-геометрической разработки реакторов СКЗ)

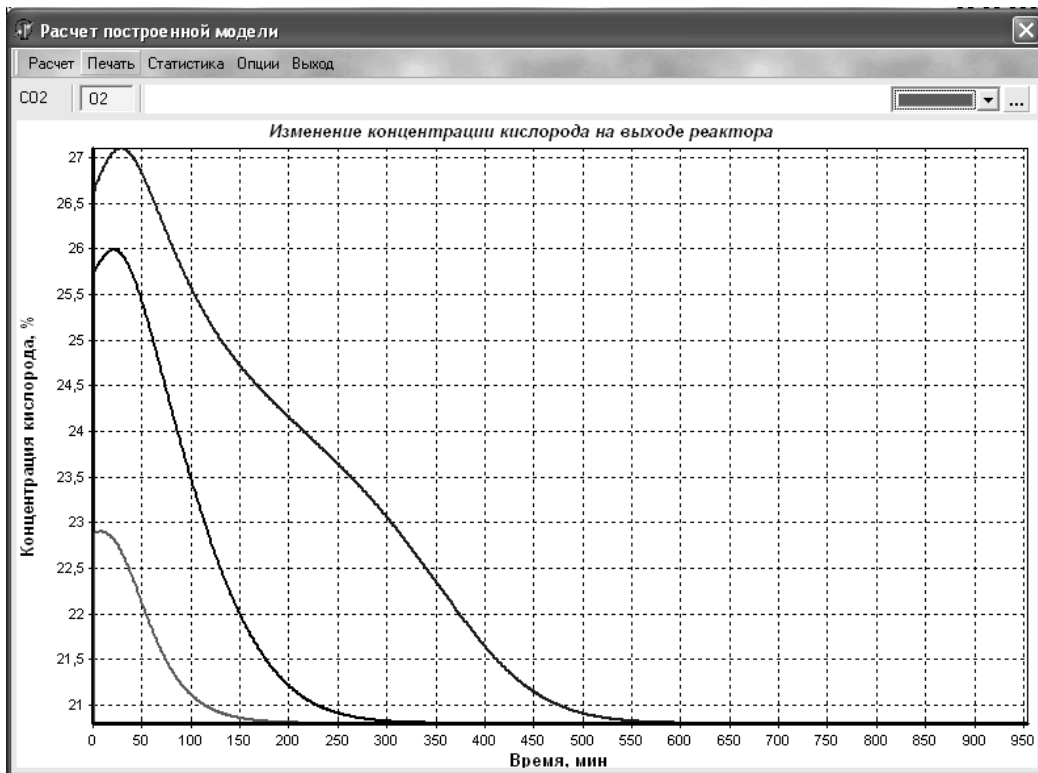


Рис. М.5. Внешнее представление подсистемы математического моделирования ПРВ в реакторе СКЗ

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

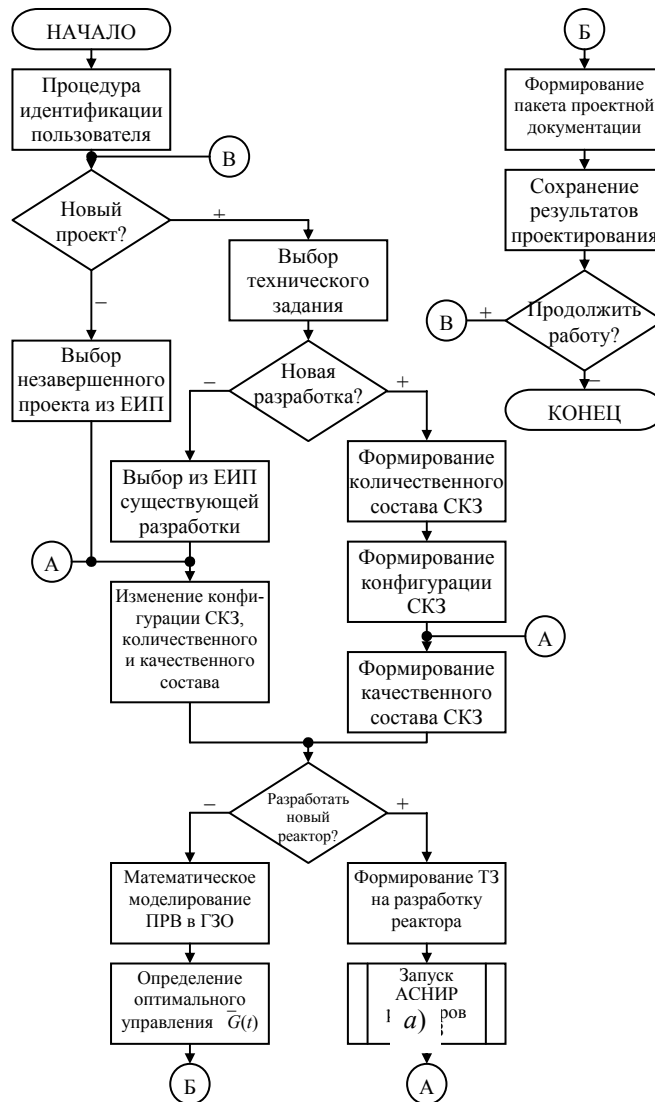


Рис. Н.1. Блок-схема алгоритма функционирования:
а – АСНИР СКЗ; б – АСНИР реакторов СКЗ

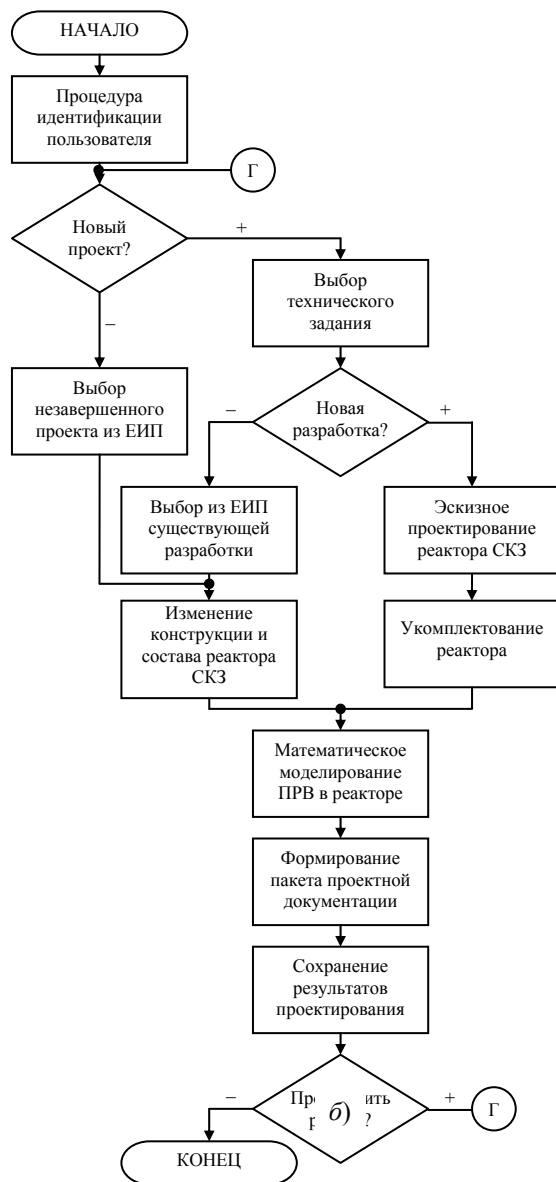


Рис. Н.1. Окончание

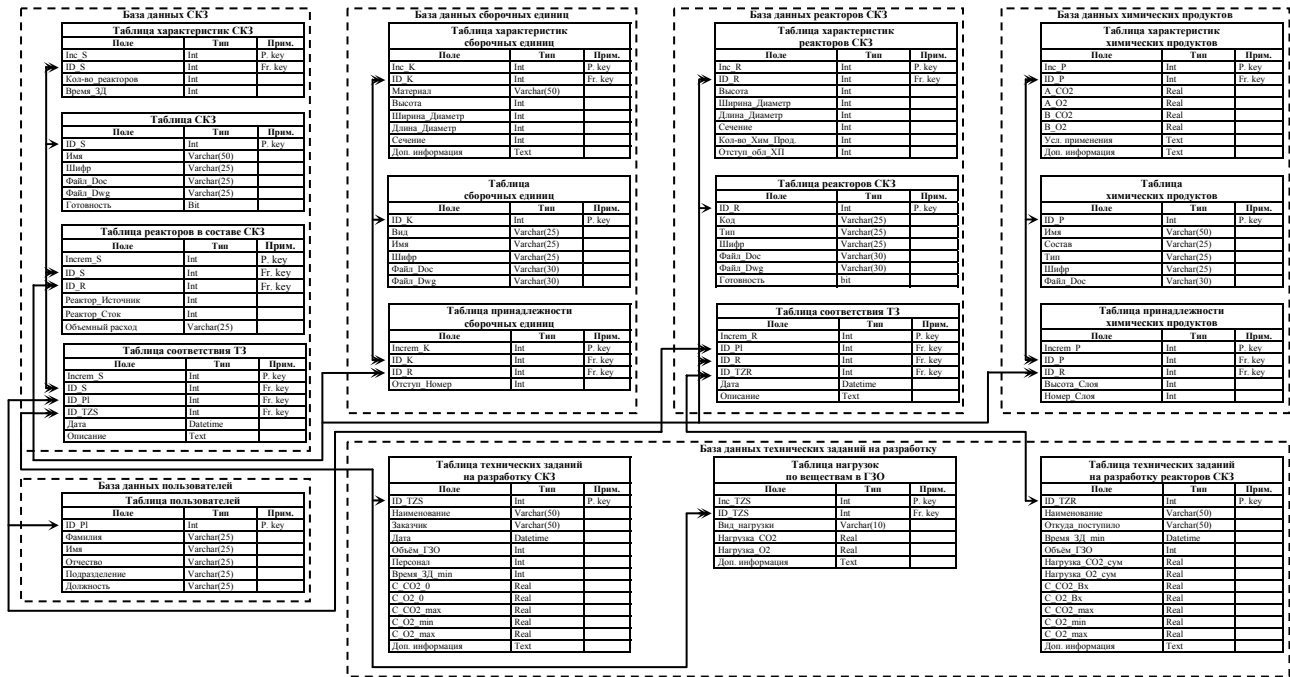


Рис. П.1. Схематическое представление логической модели данных, образующих ЕИП СКЗ

ОГЛАВЛЕНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И АББРЕВИАТУРЫ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
1.1. Анализ средств коллективной защиты органов дыхания человека	8
1.2. Современное состояние в области математического моделирования процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме	15
1.3. Управление процессом регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме	23
1.4. Автоматизация научных исследований и разработки средств коллективной защиты органов дыхания	29
1.5. Постановка задач исследования	32
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ	35
2.1. Структурная идентификация математической модели	35
2.1.1. Структурно-функциональное описание биотехнического ком- плекса	35
2.1.2. Составление уравнений материального баланса процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме	37
2.1.3. Математическое описание выделительно-погложительных процес- сов, протекающих в герметично замкнутом объеме	38
2.2. Разработка алгоритма решения уравнений математической модели процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме	45
2.3. Параметрическая идентификация и проверка адекватности математической модели процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме	50
2.4. Выводы по главе 2	52
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ	53
3.1. Определение целей и постановка задачи проведения вычислительного эксперимента	53
3.2. Компьютерное моделирование процесса регенерации воздуха ...	55
3.3. Анализ результатов исследования процесса регенерации воздуха как объекта управления	85
3.4. Выводы по главе 3	88
4. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ	89
4.1. Анализ состояний функционирования биотехнического комплекса	89
4.2. Классификация допущений и ограничений в задачах управления	92
4.3. Разработка алгоритма оптимального управления процессом регенерации воздуха на множестве состояний функционирования биотехнического комплекса	93
4.3.1. Оптимальное управление процессом регенерации воздуха в идеальном состоянии функционирования биотехнического комплекса	94
4.3.2. Оптимальное управление процессом регенерации воздуха в нормальном состоянии функционирования биотехнического комплекса	110
4.3.3. Оптимальное управление процессом регенерации воздуха в экстремальном состоянии функционирования биотехнического комплекса	114
4.4. Выводы по главе 4	120

5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ	121
5.1. Общее описание и структура комплекса	121
5.2. Описание алгоритма функционирования комплекса	125
5.3. Алгоритм автоматического синтеза конфигурации средств коллективной защиты	128
5.4. Разработка информационного обеспечения комплекса	132
5.5. Разработка программного обеспечения комплекса	135
5.6. Разработка технического обеспечения комплекса	137
5.7. Выводы по главе 5	138
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	142
ПРИЛОЖЕНИЯ	152