

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № _____

МАТВЕЕВ Сергей Витальевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов - 2001

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре "Информационные процессы и управление"

- Научный руководитель:** доктор технических наук,
профессор
Матвейкин Валерий Григорьевич
- Научный консультант:** доктор технических наук,
профессор
Громов Юрий Юрьевич
- Официальные оппоненты:** Заслуженный деятель науки и техники РФ
доктор технических наук,
профессор
Муромцев Юрий Леонидович
доктор технических наук,
профессор
Никитаев Сергей Павлович
- Ведущая организация:** Центральное конструкторское бюро
морской техники "Рубин",

г. Санкт-Петербург

Защита состоится 25 октября 2001 г. в _____ часов _____ минут на заседании диссертационного совета Д212.260.01 в Тамбовском государственном техническом университете по адресу: 392620, г. Тамбов, ул. Советская, 106, большой зал.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТГТУ.

Автореферат разослан " ____ " сентября 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. А. Чуриков

ЛР № 020851 от 13.01.99 П_пр № 020079 от 28.04.97

Подписано в печать 20.09.2001

Гарнитура Times. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Объем: 0,93 усл. печ. л.; 1,0 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С 621.

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие научно-технического прогресса, интенсификация исследований в средах, оказывающих негативное влияние на организм человека, обуславливают высокий интерес к проектированию и применению средств защиты (СЗ) людей от воздействий всех или некоторых параметров вышеупомянутых сред. В зависимости от требований, предъявляемых к СЗ, можно выделить два активно развивающихся направления их разработки и применения: средства индивидуальной и коллективной защиты (СИЗ и СКЗ). СКЗ характеризуются тесными функциональными связями между человеком и техникой, имели и находят активное применение.

Совокупность совместного рассмотрения человека и технических средств приводит к необходимости рассмотрения системы - биотехнического комплекса (БТК), состоящего из биологической и технической подсистем (БП и ТП). В структуру ТП входят система жизнеобеспечения (СЖО), частично или герметично замкнутый объем (ГЗО), в котором находятся элементы БП, технологическое оборудование и др.

В зависимости от целей и задач, наложенных на БТК, к СЖО предъявляются соответствующие требования. Основной функцией СЖО является создание и поддержание физиологически обоснованных (нормальных) условий жизнедеятельности БП, важнейшими из которых являются газовый состав атмосферы ГЗО и ТВР в нем.

Анализ эксплуатации БТК показывает на наличие различных режимов функционирования (РеФ), классифицируемых как штатные и нештатные. Природа нештатной ситуации обусловлена действиями элементов БП, сбоями и авариями в работе ТП, внешними воздействиями и т.п.

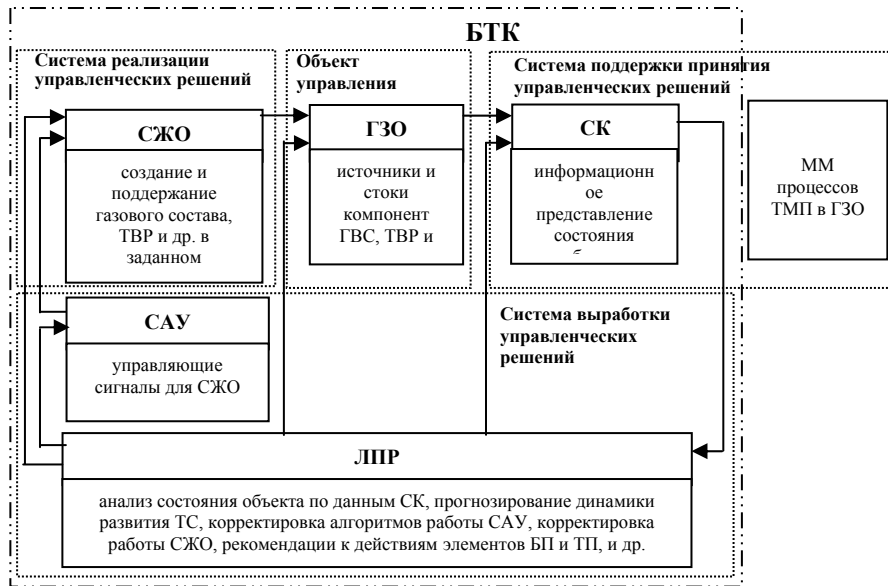


Рис. 1 Структура системы принятия управленческих решений в ходе функционирования БТК

Задачей лица, принимающего решение (ЛПР), и системы автоматического управления (САУ), осуществляющих управление объектом (см. рис. 1), является недопустимость перехода из штатного в нештатный РеФ. Для оперативного управления необходима идентификация состояния объекта по анализу информации, поступающей от системы поддержки принятия управленческих решений СППР.

В настоящее время при описании ГЗО используется гипотеза об идеальности процессов в ГЗО, т.е. состояние объекта оценивается в предположении об однозначности параметров ГВС в любой точке пространства ГЗО. Между тем существуют БТК, в ГЗО которых скорости потоков ГВС малы и при наличии сложной геометрии ГЗО возникают неоднородные поля параметров ГВС. В этих случаях оперативная идентификация состояния объекта должна осуществляться с учетом наличия пространственной неоднородности параметров ГВС в ГЗО.

Всеобъемлющая информация о состоянии объекта в указанных выше условиях требует наличия неограниченного числа средств контроля (СК). Наличие технико-экономических ограничений на число СК с одной стороны и необходимость максимально полного представления о состоянии объекта с другой обуславливает актуальность создания СППР с учетом пространственной неоднородности параметров ГВС в ГЗО.

Прогнозирование развития состояний невозможно без исследований процессов, протекающих в ГЗО. Эксперименты на физических моделях весьма дорогостоящи, а натурные эксперименты на действующих БТК в ряде случаев вообще невозможны по техническим соображениям. Кроме того, моделирование аварийных ситуаций в присутствии элементов БП не гарантирует обеспечения безопасности.

Исходя из вышесказанного, актуальной является задача создания СППР по управлению процессами, протекающими в ГЗО на интервале функционирования БТК при наличии ограничений на число СК и с этой целью разработка математических моделей (ММ) и проведение имитационных исследований процессов тепло- и массопереноса (ТМП).

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с единым наряд-заказом Минобразования РФ ТГТУ в 1996 - 2000 гг., госбюджетная тема № 1Г/96 - Г/2000; научно-технической программой Миннауки РФ "Черноземье" в 1996 - 1998 гг., хозяйственная тема № 30/96 - 30/98; Планом ОК и НИР на 1998 - 1999 гг., утвержденным Министерством Обороны РФ и Постановлением правительства РФ № 525-20 от 5.05.97 Программа "Г-М".

Цель научного исследования. Целью диссертационной работы является создание СППР по управлению газовым составом и ТВР в ГЗО в ходе функционирования БТК при наличии технико-экономических ограничений на число СК в условиях пространственной неоднородности параметров ГВС в ГЗО.

Для достижения указанной цели необходимо поставить и решить следующие задачи: провести анализ и классификацию РеФ БТК для получения представления о свойствах объекта управления; разработать ММ процессов ТМП, протекающих в ГЗО, с учетом распределенности параметров ГВС для получения возможности прогнозирования развития текущей технологической ситуации; провести комплекс имитационных исследований на разработанных ММ для выявления структуры течения ГВС в ГЗО; поставить и решить задачи технического обеспечения наблюдаемости объекта управления.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе были использованы: методы математического моделирования, методы численного анализа дифференциальных уравнений в частных производных, теория нечетких множеств, методы решения задач принятия решений.

Научная новизна.

- Разработаны ММ процессов ТМП, протекающих в ГЗО, для различных РеФ БТК с учетом неоднородности параметров ГВС.
- Разработаны алгоритмы решения уравнений ММ.
- Поставлены и решены по разработанным алгоритмам задачи распределения СК в характерные области течения ГВС.

Практическая ценность. Разработанные ММ процессов ТМП, протекающих в ГЗО, могут быть использованы для:

- прогнозирования развития штатных и нештатных ситуаций в ходе функционирования БТК;
- принятия обоснованных управленческих решений в ходе функционирования БТК;
- учета на стадии проектирования и модернизации БТК конструкторских особенностей ГЗО.

Поставленные задачи распределения средств контроля за параметрами ГВС в ГЗО и представленные методы их решения могут быть использованы при создании систем контроля за состоянием БТК. Доказанная оптимальность решения задач распределения позволит обеспечить заданную эффективность такой системы минимальным количеством СК.

Реализация результатов исследования. Разработанные математические модели трехмерных процессов тепло- и массопереноса, а также алгоритмы их решения использованы в ФГУП "ТамбовНИХИ" при разработке систем жизнеобеспечения условно-герметичных и герметичных объектов гражданской обороны и ВС РФ.

Предложенные в диссертационной работе подходы к максимизации наблюдаемости объектов гермозамкнутого типа реализованы специалистами ООО "Рид-Сервис" на собственной технической базе в рамках проекта "ЗОД - 2001".

Основные положения, выносимые на защиту:

- ММ процессов ТМП в ГЗО для различных РеФ БТК;
- алгоритмы решения уравнений ММ;
- постановка задач распределения СК в характерные области течения ГВС в ГЗО;
- алгоритмы решения задач распределения.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на международной конференции "Математические методы в химии и химической технологии", Новомосковск, Россия, 1997 г.; на конференции ученых ТГТУ, Тамбов, Россия, 1999 г.; на научных семинарах кафедры "Информационные процессы и управление" Тамбовского государственного технического университета.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 149 страниц машинописного текста, 18 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 133 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определяется цель диссертационной работы, перечисляются основные научные и практические результаты диссертации.

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с защитой человека от действия параметров сред, негативно влияющих на его здоровье. Приводится классификация основных областей применения средств защиты (СЗ), визуализация которой представлена на рис. 2.

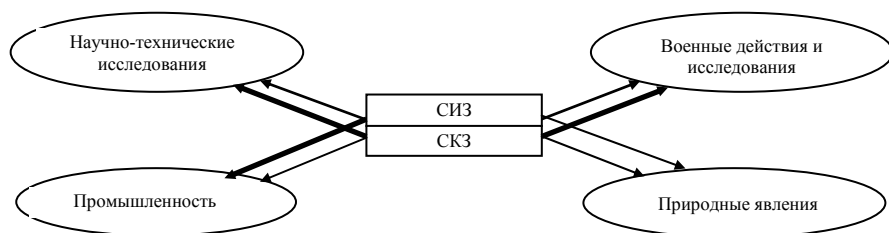


Рис. 2 Области применения СЗ

На рис. 2 в соответствии с толщиной стрелок обозначена приблизительная активность применения СЗ в перечисленных областях.

Введено понятие БТК - системы сложного взаимодействия ТП и БП.

Представлены классификация СКЗ в зависимости от характера воздействия окружающей среды и классификация СЖО в зависимости от степени замкнутости БТК.

На основе анализа литературных источников и научно-технических отчетов показана возможность возникновения нештатных ситуаций в ходе эксплуатации БТК, обусловленных действиями как БП, так и ТП.

Отмечено, что не всегда может быть использовано допущение об идеальном смещении в ГЗО, что требует рассмотрения ГЗО, как объема с распределенными параметрами. Исследованы подходы к получению уравнений динамики жидкости и представлены допущения, на основе которых получают уравнения ММ. Показано, что базовыми уравнениями для моделирования течения ГВС в ГЗО является система уравнений Навье-Стокса. Указывается на важность корректной постановки начальных и, в первую очередь, граничных условий. Выделены этапы численного расчета уравнений ММ. Отмечена важность оптимального расположения СК в ГЗО.

Во второй главе проведен анализ процессов, протекающих в ГЗО. Для конкретизации дальнейшего исследования выбран вид и размеры ГЗО (см. рис. 3), которые лежат внутри пределов изменения размеров реально существующих ГЗО. Определены источники и стоки материальных потоков в ГЗО (компоненты ГВС), а также источники и стоки тепла. Предложена классификация РеФ БТК в зависимости от значений параметров ГВС, согласно которой существуют три РеФ: нормальный, переходный и аварийный. Последние два РеФ БТК относятся к нештатным РеФ. Для рассматриваемого ГЗО предложены

предельные значения учитываемых параметров ГВС для каждого из РеФ БТК. Показаны возможные переходы между РеФ БТК в течение времени функционирования последнего.

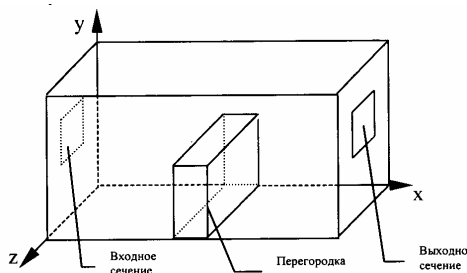


Рис. 3 Вид ГЗО

Анализ подходов к моделированию процессов показал, что в нашем случае целесообразно применение структурного подхода, заключающегося в раздельном математическом описании процессов ТМП в ГЗО, объединенных впоследствии в систему уравнений. Вследствие того, что процессы ТМП, протекающие в ГЗО подобны, структура уравнений ММ для различных РеФ одинакова.

Базовыми уравнениями для каждого из РеФ является система уравнений Навье-Стокса, в состав которых входят уравнения:

- неразрывности $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0$;
- движения $\rho \frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{X} + \frac{\partial \chi}{\partial \vec{r}} + \left(\frac{\partial \tau_{xr}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yr}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} \right)$;
- сохранения компонент ГВС $\rho \frac{dc_i}{dt} + \frac{\partial J_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial J_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial J_{iz}}{\partial z} = W_i, i = \overline{1, Nk}$;
- энергии $\rho \frac{dh}{dt} - \frac{dp}{dt} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + \Phi$.

В приведенных уравнениях $\frac{d}{dt}$ - субстанциональная производная.

Для замыкания представленной системы уравнений используется уравнение связи между термодинамическими величинами, которым в большинстве практических случаев является уравнение состояния $p = \rho R T \sum_{i=1}^{Nk} \frac{c_i}{m_i}$.

Конкретизируя уравнения ММ процессов ТМП для каждого из РеФ, вводится система допущений, среди которых существуют общие и частные допущения, представленные на рис. 4.



Рис. 4 Системы допущений для различных РеФ БТК

Уравнения ММ для каждого из РеФ, полученные на основе сделанных допущений, могут быть представлены одним векторным уравнением

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} + \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

где представленные векторы содержат переменные, входящие в уравнения ММ.

Для нормального, переходного и аварийного РеФ векторы, входящие в уравнение (1), имеют вид, представленный в табл. 1 и 2.

При аварийном РеФ БТК векторы уравнения (1) имеют такой же вид, что и для переходного РеФ и отличаются видом коэффициентов, входящих в уравнения.

При постановке граничных условий учитываются три типа границ: входное сечение, выходное сечение и твердая стенка. Вид граничных условий для различных РеФ БТК представлен в табл. 3.

В третьей главе проводится численный анализ уравнений ММ процессов ТМП при различных РеФ БТК. Численное решение уравнений ММ проходит в соответствии со следующими этапами: выбор метода расчета уравнений математической модели; представление уравнений математической модели в виде, пригодном для использования выбранного метода; программирование выбранного метода; расчет; анализ полученных результатов.

Метод численного расчета уравнений ММ обоснованно предложено выбирать из класса методов конечных разностей, применимых для консервативной формы записи уравнений. В рассматриваемом классе методов выделяются явные и неявные, имеющие свои преимущества и недостатки.

Перед численным расчетом уравнения ММ, а также начальные и граничные условия к ним, приводятся к безразмерному виду, что обусловлено некоторыми преимуществами такой формы записи.

1 Векторы уравнения (1) для нормального, переходного и аварийного РеФ

E	F	B
Нормальный РеФ		
$\begin{bmatrix} u \\ u^2 + \frac{1}{\rho} p - \tau_{xx} \\ uv - \tau_{xy} \\ uw - \tau_{xz} \\ uc_i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} v \\ uv - \tau_{xy} \\ v^2 + \frac{1}{\rho} p - \tau_{yy} \\ vw - \tau_{yz} \\ vc_i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -g_x \\ -g_y \\ -g_z \\ \frac{1}{\rho} W_i \end{bmatrix}$
Переходный и аварийный РеФ		
$\begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho uw - \tau_{xz} \\ \rho uh - \rho p + u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \\ \rho uc_i + J_{ix} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{xy} \\ \rho v^2 + p - \tau_{yy} \\ \rho vw - \tau_{yz} \\ \rho vh - \rho p + u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \\ \rho vc_i + J_{iy} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -\rho g_x \\ -\rho g_y \\ -\rho g_z \\ 0 \\ W_i \end{bmatrix}$

2 Векторы уравнения (1) для нормального, переходного и аварийного РеФ

	U	G
Нормальный РеФ	$\begin{bmatrix} 0 \\ u \\ v \\ w \\ c_i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} w \\ uw - \tau_{xz} \\ vw - \tau_{yz} \\ w^2 + \frac{1}{\rho} p - \tau_{zz} \\ wc_i \end{bmatrix}$
Переходный и аварийный РеФ	$\begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho h - p \\ \rho c_i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw - \tau_{xz} \\ \rho vw - \tau_{yz} \\ \rho w^2 + p - \tau_{zz} \\ \rho wh - \rho p + u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz} - q_z \\ \rho wc_i + J_{iz} \end{bmatrix}$

3 Граничные условия для РеФ БТК на различных типах граници

РеФ граница	Нормальный	Переходный	Аварийный
Входное сечение	$v = w = 0, \\ u = \frac{G_{\text{вх}}}{F}, \\ \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \\ c_i = (c_i)_{\text{вх}}, \\ i = \overline{1, Nk}$	$v = w = 0, u = \frac{G_{\text{вх}}}{F}, \\ \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \\ T = T_{\text{вх}}, c_i = (c_i)_{\text{вх}}, \\ i = \overline{1, Nk}.$	$v = w = 0, u = \frac{G_{\text{вх}}}{F}, \\ \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0, T = T_{\text{вх}}, \\ c_i = (c_i)_{\text{вх}}, i = \overline{1, Nk}$
Выходное сечение	$\frac{\partial c_i}{\partial \mathbf{n}} = 0, i = \overline{1, Nk}.$	$\frac{\partial c_i}{\partial \mathbf{n}} = 0, i = \overline{1, Nk}.$	$\frac{\partial c_i}{\partial \mathbf{n}} = 0, i = \overline{1, Nk}.$
Твердая стенка	$u = v = w = 0, \\ \frac{\partial c_i}{\partial \mathbf{n}} = 0, i = \overline{1, Nk},$	$u = v = w = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0, \frac{\partial c_i}{\partial \mathbf{n}} = 0, \\ i = \overline{1, Nk}$	$u = v = w = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0, \frac{\partial c_i}{\partial \mathbf{n}} = 0, \\ i = \overline{1, Nk},$

	$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0.$	$T = T_{ст}$ или $\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = Nu.$	$T = T_{ст}$ или $\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = Nu.$
--	---	--	---

Система уравнений, описывающая процессы ТМП при нормальном РеФ БТК, не содержит уравнения состояния, так как давление в указанном режиме носит чисто динамический характер. Остальные уравнения делятся на две подсистемы: уравнение неразрывности совместно с уравнениями переноса импульса и уравнения сохранения для концентраций компонент ГВС. Отсутствие производной по времени в уравнении неразрывности осложняет совместный расчет его с другими уравнениями первой подсистемы. Не эффективными признаны и методы установления, т.е. введения "псевдвремени" в рассматриваемое уравнение. Предлагается исключить уравнения неразрывности за счет перекрестного дифференцирования уравнений движения с последующим их суммированием. В результате получается уравнение Пуассона, методы решения которого хорошо изучены.

Для увеличения точности дискретизации предложено аппроксимировать исходные уравнения на разнесенной, так называемой, МАС - сетке, а для расчета уравнений использовать частично-явный конечно-разностный метод.

При получении решения по уравнениям ММ процессов ТМП при переходном РеФ возникают трудности, обусловленные двумя свойствами течений рассматриваемого типа:

- значительным различием характерного времени конвекции и характерного времени распространения акустических возмущений;
- малые относительные изменения давления, вследствие чего расчет градиентов давления, определяющих динамику дозвуковых потоков, содержит операцию вычисления малых разностей, что приводит к ухудшению точности разностных схем.

В связи с этим представляется целесообразным, сохранив в силе допущения о малости квадрата числа Маха и параметра гидростатической сжимаемости, записать ММ с учетом конечных изменений параметров, отражающих степень неоднородности температуры, концентраций и плотности.

Для расчета видоизмененных уравнений ММ предложено использовать тот же метод, что и для расчета уравнений ММ процессов ТМП при нормальном РеФ с соответствующими дополнениями.

Уравнения ММ процессов ТМП при аварийном РеФ БТК представляют собой наиболее общий вид системы уравнений Навье-Стокса. Учитывая то обстоятельство, что рассматриваемые уравнения имеют тот же вид, что и уравнения ММ процессов ТМП при переходном РеФ и отличаются лишь определением коэффициентов, все сказанное относительно последнего режима применительно и к рассматриваемому.

Для получения результатов конкретизированы начальные и граничные условия, а также значения коэффициентов, входящих в уравнения ММ. В ходе численного эксперимента в используемый метод расчета введены некоторые полезные дополнения, направленные на ускорение сходимости итерационных процессов.

Для минимизации отклонений результатов расчета от истинных значений, существующих вследствие принятой системы допущений, точности расчета и т.п., была поставлена задача параметрической идентификации уравнений ММ.

В качестве параметра оптимизации выбран коэффициент динамической вязкости, а в качестве критерия - максимальное среднеквадратичное отклонение расчетных значений концентраций компонент ГВС от экспериментальных значений, усредненных по четырем опытам:

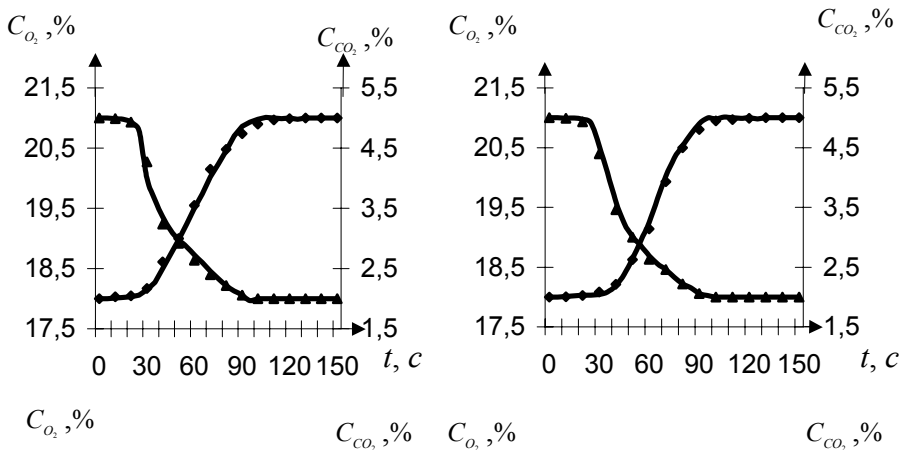
$$\left(\bar{C}_{ji}^a \right)_l = \left(\frac{\sum_{k=1}^4 (C_{ji}^a)_k}{4} \right)_l, \quad \sigma_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\bar{C}_{ji}^a - C_{ji}^p \right)_l^2, \quad \Psi(\mu) = \max_l \sigma_l, \quad J = \min_{\mu} \Psi(\mu), \quad \mu \geq 0.$$

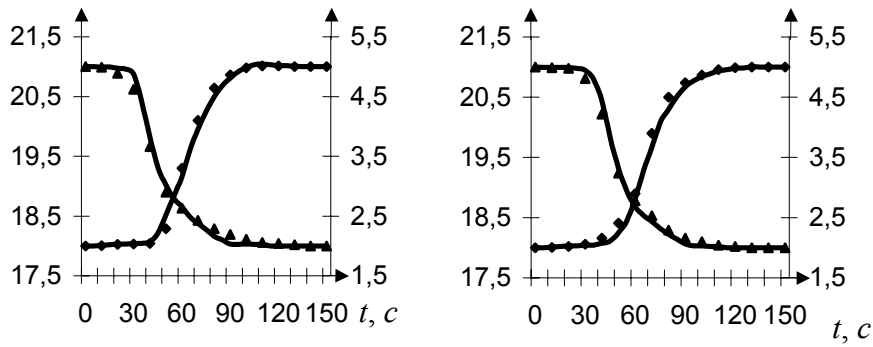
Результаты расчета по идентифицированным уравнениям ММ процессов ТМП при нормальном РеФ и результаты экспериментальных исследований в четырех точках ГЗО представлены на рис. 5.

Расчет уравнений ММ проводился для различных скоростей потока ГВС во входном сечении. Показано, что при нормальном РеФ с течением времени поток ГВС в ГЗО становится стационарным.

На рис. 6, в качестве примера, представлено одно из сечений в ГЗО, а на рис. 7 и 8 - распределение концентраций в нем.

В четвертой главе рассматриваются задачи распределения СК в ГЗО. На основе результатов, полученных в главе 3, и оценкам экспертов в ГЗО выделяются характерные области течения ГВС, представленные на рис. 9.





◆ - экспериментальные значения концентраций кислорода; — численный расчет;
 ▲ - экспериментальные значения концентраций диоксида углерода.

Рис. 5 Результаты исследований

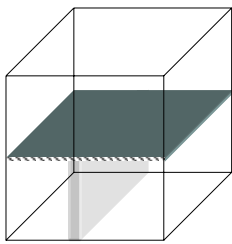


Рис. 6 Сечение в ГЗО

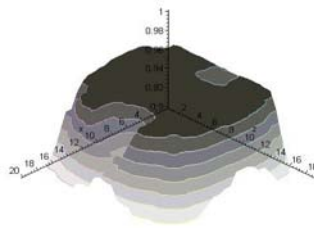


Рис. 7 Распределение концентраций кислорода в сечении

Представленные области течения определены по стационарному течению ГВС. В ГЗО могут присутствовать воздействия стационарного и динамического характера, которые для геометрических параметров указанных областей являются возмущающими воздействиями.

В работе проведен анализ чувствительности выявленных областей к такому роду возмущений. Невозможность знания полной (т.е. в каждой точке ГЗО) информации из-за технико-экономических ограничений на число СК, приводит к необходимости рассматривать идентификацию текущего РеФ, как некую вероятностную оценку. В связи с этим вводятся следующие понятия, необходимые для постановки задачи распределения

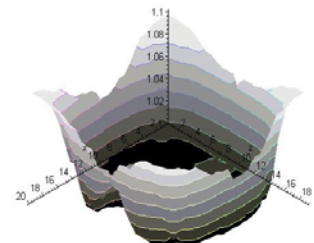


Рис. 8 Распределение концентраций диоксида углерода в сечении

СК: вес области, степень влияния и степень достаточности. Под весом области понимается числовое значение важности (значимости) области, а также потенциальной опасности возникновения в ней нештатной ситуации. Степень влияния или степень взаимосвязи показывает вероятность переноса из одной области в другую информации о параметрах потока ГВС. В зависимости от степени влияния области могут быть взаимозависимыми и взаимонезависимыми. Степень достаточности отражает уверенность в том, что назначение единицы СК в какую-либо область будет давать полное представление о параметрах ГВС в ней.

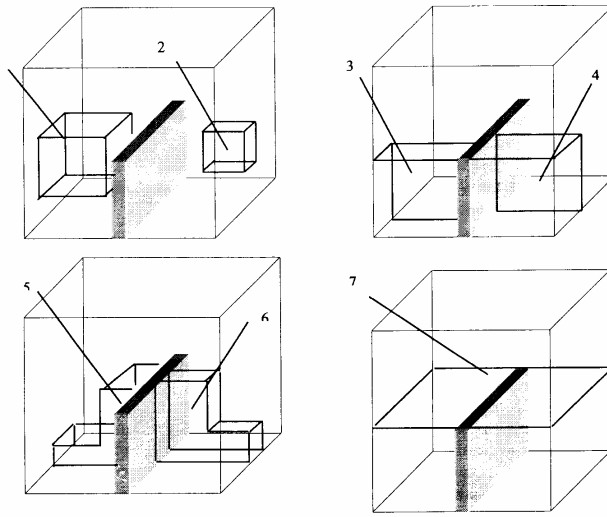


Рис. 9 Характерные области ГЗО

Вследствие того, что задачи распределения СК относятся к классу задач распределения ресурсов, предложено СК (датчик) называть единицей ресурса. Отмечается, что возможно наличие в исходных данных для задач распределения однородных (по техническим характеристикам) и неоднородных единиц ресурса.

Получение значений весов областей, степени взаимосвязи и степени достаточности базируется на результатах имитационных исследований с одной стороны и на оценке экспертной информации - с другой. На рис. 10 отображена структура определения веса области. Переход от исходных данных для определения веса области к конечному, детерминированному числовому значению подразумевает использование пригодного для работы с таким видом информации математического аппарата. В качестве такого аппарата предложено использовать теорию нечетких множеств.

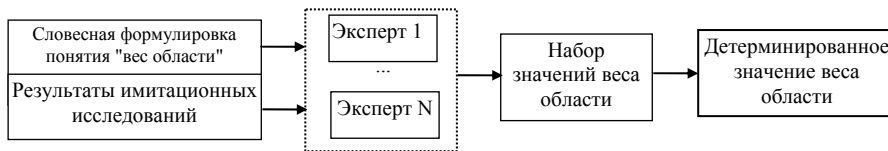


Рис. 10 Структура определения веса области

Математически значение веса области определяется следующим образом. Строится нечеткое число: $\langle \text{"Вес области"}, \overline{0,1}, C \rangle$, где "Вес области" - нечеткое понятие, $[0,1]$ - интервал, в котором находятся значения веса области; C - набор нечетких отношений:

$$C = \left\{ \frac{\Xi_i}{A_i} \right\}, \quad i = \overline{0, n}.$$

Здесь n - количество разбиений интервала $\overline{0,1}$; $A_i = \frac{i}{n}$ - значение веса области; Ξ_i - степень уверенности экспертов в том, что вес рассматриваемой области имеет значение A_i (дискретная функция принадлежности). Значение веса области определяется по моде функции принадлежности. Указанные функции принадлежности строятся для каждой из характерных областей.

Аналогично определяются значения степени влияния и степени достаточности. Этапы распределения единиц ресурса показаны на рис. 11.

С учетом различия или однородности единиц ресурса по свойствам и характерных областей по зависимости формулируются четыре задачи распределения единиц ресурса: однородных - во взаимнезависимых областях; однородных - во взаимозависимых областях; неоднородных - во взаимнезависимых областях и неоднородных - во взаимозависимых областях.

Постановка перечисленных задач формулируется таким образом, что строится некая функция, названная функцией эффекта, зависящая от перечисленных выше величин. Требуется в ходе решения задачи определить максимум этой функции.

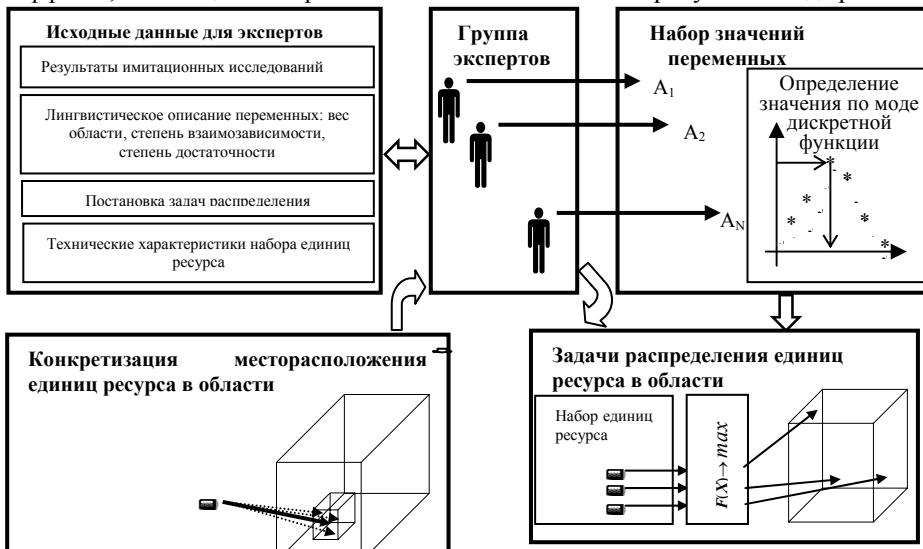


Рис. 11 Этапы распределения единиц ресурса

4 Постановки задач распределения единиц ресурса

Однородные единицы ресурса	
Взаимозависимые области	Взаимонезависимые области
<p>Требуется найти оптимальный вектор $X_0 = \{x_i^0\}_S$, доставляющий максимум функцию эффекта</p> $F = \sum_{i=1}^S A_i \times \left\{ 1 - \prod_{j=1}^S [1 - \alpha_{ji} (1 - \varepsilon_j^{x_i})] \right\}$ <p>при ограничениях: $\sum_{i=1}^S x_i \leq N$,</p> <p>и дополнительных условиях:</p> $\left. \begin{aligned} x_i &\in \{0, 1, \dots, N\} \\ 0 &\leq \varepsilon_i \leq 1 \\ 0 &\leq \alpha_{ji} \leq 1 \\ \alpha_{jj} &= 1 \\ A_i &\geq 0 \end{aligned} \right\}, i = 1, \dots, S$	<p>Требуется найти оптимальное распределение единиц ресурса $X_0 = \{x_i^0\}_S$, при котором суммарный эффект будет наибольшим $F = \sum_{i=1}^S A_i (1 - \varepsilon_i^{x_i})$</p> <p>при линейном ограничении на его компоненты $\sum_{i=1}^S x_i \leq N$</p> <p>и при дополнительных условиях</p> $\left. \begin{aligned} x_i &\in \{0, 1, \dots, N\} \\ 0 &\leq \varepsilon_i \leq 1 \\ A_i &> 0 \end{aligned} \right\}, i = 1, \dots, S.$

Продолжение табл. 4

Неоднородные единицы ресурса	
<p>Требуется найти оптимальную матрицу назначений $\delta_0 = \ \delta_{ji}^0\ _{NS}$, доставляющую максимум функцию эффекта</p> $F = \sum_{i=1}^S A_i \times \left\{ 1 - \prod_{j=1}^S \left[1 - \alpha_{ji} \left(1 - \prod_{v=1}^N \varepsilon_{vj}^{\delta_{vj}} \right) \right] \right\}$ <p>при ограничениях на переменные:</p> $\sum_{j=1}^S \delta_{vj} = 1, v = 1, \dots, N,$ <p>и дополнительных условиях:</p> $\left. \begin{aligned} \delta_{vj} &\in \{0, 1\}, \\ 0 &\leq \varepsilon_{vj} \leq 1, \\ 0 &\leq \alpha_{ji} \leq 1, \\ \alpha_{jj} &= 1, \\ A_i &\geq 0, \end{aligned} \right\} i, j = 1, \dots, S, v = 1, \dots, N$	<p>Требуется найти оптимальную матрицу назначений $\delta_0 = \ \delta_{ji}^0\ _{NS}$, доставляющую максимум функцию эффекта</p> $F = \sum_{i=1}^S A_i \left(1 - \prod_{j=1}^N \varepsilon_{ji}^{\delta_{ji}} \right),$ <p>при ограничениях на переменные:</p> $\sum_{i=1}^S \delta_{ji} = 1, j = 1, \dots, N$ <p>и при дополнительных условиях:</p> $\left. \begin{aligned} \delta_{ji} &\in \{1; 0\} \\ 1 &\geq \varepsilon_{ji} \geq 0 \\ A_i &> 0 \end{aligned} \right\}, j = 1, \dots, N, i = 1, \dots, S.$

Функция эффекта, для каждой из представленных в табл. 4, задач зависит от исходных данных (весов областей, степеней взаимозависимости и степеней достаточности) и представляет собой аналог мультипликативной формы записи полной вероятности. Для каждой из поставленных задач распределения предложен алгоритм решения, показана эффективность алгоритмов и приведено решение тестовых примеров.

Для рассматриваемого в работе ГЗО сделан вывод о том, что области в нем являются взаимозависимыми. Указанным выше способом определены веса выделенных областей, степени взаимосвязи между ними и степени достаточности. Веса областей, степени взаимосвязи α и степени достаточности ω представлены ниже.

	1	2	3	4	5	6	7
A	0,9	0,1	0,3	0,7	0,1	1	0,2
ω	1	1	0,8	0,8	0,9	0,8	0,2
	α						
j	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0,6	0,2	0,9	0,7	0,8
2	0	1	0	0,6	0	0,4	0,1
3	0,8	0	1	0,6	0,8	0,4	0,8
4	0,1	0,8	0,2	1	0,2	0,9	0,6
5	0,9	0	0,8	0,7	1	0,8	0,6

6	0	0,9	0	0,8	0	1	0,6
7	0,1	0,5	0,1	0,7	0,1	0,7	1

Результатом решения задачи распределения семи однородных единиц ресурса в характерные области является следующий ряд:

$$1 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 0, 3 \rightarrow 0, 4 \rightarrow 1, 5 \rightarrow 0, 6 \rightarrow 2, 7 \rightarrow 3,$$

где первая цифра означает номер области, а вторая - количество единиц ресурса, назначаемых в данную область.

Кроме поставленных ("основных") задач распределения предложены формулировки задач, вытекающих непосредственно из указанных (например, обеспечение заданного суммарного эффекта наименьшим числом единиц ресурса).

Для рассматриваемого в работе ГЗО выделены соответствующие области характерных течений ГВС. Используя вышесказанное, определены веса этих областей, степени зависимости и степени достаточности. По полученным данным определено, что области ГЗО являются взаимозависимыми.

Решена задача распределения однородных единиц ресурса в ГЗО со взаимозависимыми областями.

ВЫВОДЫ

Для создания системы поддержки принятия решений по управлению газовым составом и ТВР в ГЗО в ходе функционирования БТК при наличии технико-экономических ограничений на число средств контроля в условиях пространственной неоднородности параметров ГВС в ГЗО поставлены и решены следующие задачи:

- анализа и классификации РеФ БТК как объекта управления;
- разработки математических моделей процессов ТМП, протекающих в ГЗО, с учетом распределенности параметров ГВС с целью прогнозирования развития технологической ситуации;
- проведения комплекса имитационных исследований на разработанных математических моделях для выявления структуры течения ГВС в ГЗО;
- обеспечения достаточной информации для наблюдаемости объекта управления.

Для решения поставленных задач в работе использованы: методы математического моделирования, методы численного анализа дифференциальных уравнений в частных производных, теория нечетких множеств, методы решения задач принятия решений.

Разработанные математические модели процессов ТМП, протекающих в ГЗО, позволяют:

- прогнозировать развитие штатных и нештатных ситуаций в ходе функционирования БТК;
- принимать обоснованные управленческие решения в ходе функционирования БТК;
- учитывать, на стадии проектирования и модернизации БТК, конструкторские особенности ГЗО.

Поставленные задачи распределения средств контроля за параметрами ГВС в ГЗО и представленные методы их решения могут быть использованы при создании систем диагностирования и управления состоянием БТК. Доказанная оптимальность решения задач распределения позволяет обеспечить заданную эффективность такой системы минимальным количеством средств контроля.

Результаты исследований, проведенных в работе были использованы при разработке в ФГУП "ТамбовНИХИ" систем жизнеобеспечения условно-герметичных и герметичных объектов гражданской обороны и ВС РФ, а также реализованы специалистами ООО "Рид-Сервис" на собственной технической базе в рамках проекта "ЗОД - 2001".

Основные условные обозначения:

T - температура, К; ρ - плотность, кг/м³; μ - коэффициент динамической вязкости, кг/(м·с); p - давление, кг/(м·с²); λ - теплопроводность, Вт/(м·К); D - коэффициент массовой диффузии, м²/с; D^T - коэффициент термодиффузии, м²/с; \vec{U} - вектор скорости; u, v, w - проекции вектора скорости на оси координат, м/с; $\mathbf{U}, \mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ - векторы общего векторного уравнения; χ - среднеарифметическое нормальных напряжений, кг/(м·с²); \vec{X} - вектор объемных напряжений; τ - компоненты тензора напряжений, кг/(м·с²); \vec{r} - вектор координат; \mathbf{n} - нормаль к поверхности; x, y, z - координаты, м; c - относительная массовая концентрация, кг/кг; J - компоненты вектора плотности диффузионного потока, кг/(м²·с); W - интенсивность источников и стоков компонент ГВС, кг/(м³·с); N_k - число компонент ГВС; h - энтальпия смеси, Дж/кг; Φ - диссипативная функция, кг/(м·с²); \vec{q} - вектор теплового потока, Вт/м²; $G_{\text{вх}}$ - расход ГВС на входе в ГЗО, м³/с; F - площадь сечения, м²; $T_{\text{ст}}$ - температура стенки, К; $C^{\text{д}}$ - экспериментальные значения концентраций; $C^{\text{р}}$ - расчетные значения концентраций; σ - среднеквадратичное отклонение.

Основные результаты исследования отражены в работах:

- 1 Громов Ю. Ю., Коршунков Л. А., Матвеев С. В. и др. К вопросу об управлении процессом регенерации воздуха в замкнутом объеме // Деп. в ВИНТИ. 1996. № 1958-В96. 20 с.
- 2 Громов Ю. Ю., Коршунков Л. А., Матвеев С. В. и др. К вопросу моделирования процесса регенерации воздуха в замкнутом объеме // Деп. в ВИНТИ. 1996. № 1957-В96. 20 с.
- 3 Громов Ю. Ю., Коршунков Л. А., Матвеев С. В. и др. Численное решение математической формализации процесса регенерации воздуха в герметически замкнутом объеме // Деп. в ВИНТИ. 1996. № 1956-В96. 32 с.
- 4 Громов Ю. Ю., Матвеев С. В., Путин С. Б. Математическая формализация процесса регенерации воздуха в герметично замкнутом объеме в условиях неопределенности // Воронеж: Системы управления и информационные технологии. 1997. С. 53.
- 5 Деревуз М. М., Матвеев С. В. Постановка задач идентификации технологических ситуаций // Вестник ТГТУ. Тамбов: 1998. Вып. 2. С. 159 - 162.
- 6 Gromov Yu. Yu., Matveyev S. V., Putin S. B. The mathematical formalization of the air regeneration process in closed space in condition of indeterminacy // Вестник ТГТУ. Тамбов: 1998. Т. 4. № 1. С. 28.