

На правах рукописи



БОРОДКИН Станислав Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ПЕРЕНОСА В СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ
НА ОСНОВЕ СЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Батаронов Игорь Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Постников Евгений Борисович**, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», профессор кафедры физики и нанотехнологий, заведующий отделом теоретической физики конденсированного состояния

Солдатов Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, ОКБ Сухого ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация», ведущий конструктор научно-исследовательского центра суперкомпьютерных технологий

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится 23 декабря 2022 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.286.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г.Воронеж, Московский просп., 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте www.cchgeu.ru

Автореферат разослан «28» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:



Гусев Константин Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задачи переноса являются важными содержательными компонентами математических моделей физических процессов в различных отраслях производства, таких как энергетика, металлургия, машиностроение, авиация, ракетно-космическая техника, атомная и химическая промышленность и др., а также в рамках многочисленных естественно-научных приложений. В связи с этим в настоящее время разработано и исследовано большое число моделей переноса и алгоритмов их численной реализации применительно к специфике различных научных и технических приложений.

Следует отметить, что одной из наиболее сложных и мало исследованных является задача моделирования процесса тепломассопереноса в потоках сред со специальными свойствами, таких как сверхкритические флюиды (СКФ). Это обусловлено несколькими причинами.

Так, СКФ в псевдокритической области претерпевает превращение, которое можно интерпретировать как размытый фазовый переход без образования границы, что приводит к существенному немонокотонному изменению свойств среды по сечению потока и, соответственно, требует формулировки адекватной математической модели переноса подобной уравнениям газовой динамики.

Затем, в силу указанных причин кинетические соотношения для одномерного уравнения переноса в СКФ не удастся сформулировать в общем виде, и для их получения для конкретного вида СКФ и условий переноса требуется привлечение конечно-элементного моделирования, которое, тем самым, становится компонентом разрабатываемой математической модели.

Наконец, теплообмен с СКФ происходит в широком интервале температур и сопровождается кристаллизацией теплоносителя с образованием свободной границы раздела, что приводит к необходимости включать в рассмотрение также и задачу Стефана для моделирования обмена между потоками. Сопряженность задач переноса в двух обменивающихся потоках и задачи Стефана для свободной границы обмена требует разработки и исследования соответствующих алгоритмов численной реализации такой модели, как в нестационарном, так и в квазистационарном режимах.

Формируемая при этом модель тепломассопереноса не может полностью учитывать всех конструктивных особенностей конкретной установки, поэтому должна включать в себя средства идентификации, а следовательно, необходима разработка средств параметрической идентификации модели, позволяющей осуществлять эту процедуру по имеющимся в штатном исполнении контролируемым параметрам процесса.

Моделированию задачи переноса, в том числе в газодинамической постановке, посвящено большое число работ отечественных и зарубежных авторов (С.К.Годунов, А.А.Самарский, Г.И.Марчук, К.М.Магомедов, А.С.Холодов, Н.Н.Яненко, Л.А.Чудов, Т.Р.Курант, П.Д.Лакс, Б.Вендорф, Дж.П.Борис, Ф.Х.Харлоу и другие). Основы теории теплопереноса в сверхкритических потоках заложены в трудах С.С. Кутателадзе, Б.С. Петухова, В.Н. Попова, Е.А. Краснощекова, В.С. Протопопова, Н.Е. Петрова, Дж. Д. Джексона и других. Большое внимание также уделяется численным методам решения задачи Стефана (А.А.Самарский, Б.М.Будак, П.Н.Вабишевич, В.П.Маслов, Н.А.Рубцов, А.Фридман и другие). Однако совместное моделирование задач сопряженного переноса с обменом на свободной границе с участием сверхкритических потоков практически не исследовалось. Имеющиеся модели являются упрощенными и сформулированы в стационарном варианте с аппроксимацией лишь первого порядка точности, их сходимость не исследовалась и алгоритмы решения не разработаны.

Таким образом, актуальность тематики диссертационного исследования продиктована необходимостью дальнейшего развития средств математического моделирования и анализа процессов тепломассопереноса с обменом в нескольких потоках, учитывающих особенности теплопередачи в сверхкритических флюидах, обеспечивающих высокое качество расчета и повышение эффективности функционирования теплообменных устройств в соответствии с требуемыми теплоэнергетическими характеристиками.

Диссертационная работа выполнена в рамках одного из основных научных направлений Воронежского государственного технического университета: «Теоретическая и прикладная теплотехника»

Цель диссертационного исследования заключается в разработке математических моделей и алгоритмов их численной реализации применительно к условиям процессов тепломассообмена в сверхкритических теплообменных установках, а также создание на их основе алгоритмов расчета выходных и управляющих параметров теплообменных установок закрытого типа.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Анализ проблематики математического моделирования процессов тепломассопереноса с теплообменом в условиях неоднородности распределения свойств носителей и обледенения обменной поверхности.

2. Разработка средств формального описания комплекса задач переноса с обменом в условиях неоднородности распределения свойств носителей и обледенения обменной поверхности.

3. Разработка алгоритмов конечно-разностного решения комплекса задач переноса и задачи Стефана, а также конечно-элементного моделирования кинетических коэффициентов обмена.

4. Разработка и экспериментальная апробация алгоритмов параметрической идентификации на основе данных наблюдений контролируемых параметров работы установки в штатном исполнении и расчета теплообменных сверхкритических установок закрытого типа в различных режимах работы.

5. Создание программного комплекса, реализующего разработанные вычислительные алгоритмы моделирования и расчета сверхкритических теплообменных установок закрытого типа.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы методы математического моделирования тепломассопереноса в потоке с переменными свойствами, математического моделирования квазистационарной задачи Стефана, аппроксимации эмпирических зависимостей, законы явлений переноса в неоднородных потоках, методы конечно-элементного моделирования турбулентного тепломассопереноса, методы параметрической идентификации, статистические методы обработки экспериментальных данных.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: 2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей 3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

В работе получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

- формальные средства математического моделирования процесса переноса в двух потоках, обменивающихся через свободную границу, отличающиеся использованием комбинации конечно-элементного моделирования, бигиперболической аппроксимации табличных данных и задачи тепломассопереноса в сверхкритическом потоке и позволяющие описывать процесс в различных схемах потоков и режимах переноса.

- алгоритмы численного решения комплекса задач тепломассопереноса с обменом на свободной границе, отличающиеся реализацией методов сквозного счета повышенной точности и метода сглаживания особенности для свободной границы.

- алгоритм параметрической идентификации модели сверхкритического теплообменника, отличающийся использованием модифицированного метода стрельбы по экспериментам с предельными значениями управляющих параметров с последующей верификацией по промежуточным экспериментам на основе данных опорных экспериментов на штатном оборудовании установки.

- алгоритмы определения рабочей области управляющих параметров для заданного диапазона выходных характеристик, отличающиеся использованием многомерной параболической аппроксимации функции отклика дифференциальной системы и позволяющие осуществлять расчет рабочей области для стационарного и нестационарного режима функционирования.

- структура программного комплекса моделирования процессов тепломассопереноса в сверхкритическом теплообменнике, отличающаяся реализацией механизмов организации полного цикла расчетов, включающего моделирование процесса тепломассопереноса в различных режимах и схемах переноса, параметрическую идентификацию модели, расчет входных и управляющих параметров установки.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели переноса в двух потоках, обменивающихся через свободную границу, использующие комбинацию конечноэлементного моделирования, бигиперболической аппроксимации табличных данных и задачи переноса в сверхкритическом потоке, позволяют моделировать процесс сверхкритического тепломассопереноса в различных схемах потоков и режимах переноса.

2. Алгоритмы решения системы задач переноса с обменом на свободной границе с использованием метода сглаживания особенности обеспечивают решение системы методами сквозного счета.

3. Алгоритм параметрической идентификации модели сверхкритического теплообменника с использованием модифицированного метода стрельбы обеспечивает идентификацию на основе данных опорных экспериментов на штатном оборудовании установки.

4. Алгоритм определения рабочей области управляющих параметров для заданного диапазона выходных характеристик на основе многомерной параболической аппроксимации функции отклика дифференциальной системы обеспечивает определение рабочей области как для стационарного, так и для нестационарного режима функционирования.

Практическая значимость заключается в разработке формальных средств, позволяющих осуществлять формирование математических моделей и алгоритмов их численной реализации для сложных процессов, сопровождающихся переносом в нескольких потоках с обменом и фазовым переходом на границе обмена.

Разработанный пакет прикладных программ позволяет производить расчет, параметрическую идентификацию и моделирование теплообменных устройств закрыто-

го типа, использующих сверхкритические потоки, в различном конструктивном исполнении потоков (противоточные, скрещенные, смешанные) как в стационарном, так и в нестационарном режиме.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве инструментария в научно-исследовательских организациях, ориентированных на проектирование промышленных установок, использующих процессы переноса с обменом через свободную границу, а так же в образовательном процессе инженерных факультетов вузов, включающем в себя вопросы моделирования процессов тепломассопереноса.

Реализация и внедрение научных результатов.

1. Предложены технические решения, подтвержденные актами реализации результатов диссертационной работы, позволяющие повысить эффективность работы газификационных установок и снизить их энергопотребление.

2. Предложено техническое решение, по включению ресивера в состав специального оборудования газификатора, позволяющее повысить стабильность работы и производительность газификационной установки.

Результаты диссертационного исследования использованы в практической деятельности заводов ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ» г. Москва и АО «УКЗ» г. Екатеринбург. Программный комплекс прошел государственную регистрацию в реестре Федеральной службы по интеллектуальной собственности, получено свидетельства о государственной регистрации. Результаты используются в учебном процессе кафедры прикладной математики и механики в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» в рамках курса «Математическое моделирование процессов тепломассопереноса».

Апробация. Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на: всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств наземного обслуживания общего применения» (г. Воронеж, 2019); XXI Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов, студентов «Авиакосмические технологии» (АКТ-2020) (г. Воронеж, 2020); Международных семинарах «Физико-математическое моделирование систем» (г. Воронеж, 2019, 2020, 2021); III Международной конференции MIP: Engineering III: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации (г. Красноярск, 2021); II Международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (г. Воронеж, 2020), а также на научных семинарах кафедры высшей математики и физико-математического моделирования ВГТУ (г. Воронеж, 2019-2022гг.)

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 11 печатных работах, из них: 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 2 статьи в журналах, индексируемых в библиографической базе РИНЦ; 4 – материалы в сборниках трудов Всероссийских и Международных научно-практических конференций; получены 2 патента РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат следующие результаты: [1, 4, 10] – разработка модели и методик, [2, 6-8] – проведение численных экспериментов и обработка результатов, [11] – разработка структуры комплекса и программного кода.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 155 страницы, 83 рисунка и 2 приложения. Библиографический список содержит 123 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы. Раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации, методология и методы исследования, результаты, выносимые на защиту, проведена оценка степени достоверности, приведены результаты апробации и реализации работы.

В первой главе выполнен анализ существующих моделей для задач переноса и Стефана и алгоритмов их решения, подходов к моделированию потоков СКФ в сверхкритических теплообменниках.

К настоящему времени разработано большое число разностных схем для решения задачи переноса (Куранта-Изаксона-Риса, явно-неявная схема, Лакса, Лакса-Вендроффа, Ландау-Мейрмана-Халатникова, Карлсона, Мак-Кормака, Бима-Уорминга, схема «чехарда», Русанова, Уорминга-Кутлера-Ломакса, гибридные схемы по методу Р.П.Федоренко и другие). Для более общей системы уравнений переноса газовой динамики предложены схемы на основе методов Лакса-Вендроффа и Мак-Кормака, сеточно-характеристических методов (М.-К.М.Магомедова–А.С.Холодова), метода частиц в ячейках Харлоу (PIC-метод), метода С.К.Годунова, разностная схема И.М.Гельфанда, а также имеется ряд других подходов. Основная проблема их применения к потоку СКФ заключается в условной устойчивости явных монотонных схем, что при неопределенности числа Куранта в СКФ не обеспечивает устойчивости расчета, а также в недиссипативности неявных схем повышенной точности, что может приводить к «разболтке» решения. Указаны условия, при выполнении которых разболтка отсутствует, и обоснован выбор оптимальной для расчета потока СКФ схемы.

Другая проблема решения уравнений переноса состоит в возможности появления сильных и слабых разрывов решения. Отмечается, что применительно к задачам переноса в теплообменниках начальные и граничные условия согласованы таким образом, что разрывные решения отсутствуют.

Рассмотрены методы численного решения задачи со свободной границей (метод ловли фронта в узел сетки, метод выпрямления фронта, метод сглаживания особенности и метод преобразования зависимых переменных) применительно к ее сопряжению с задачей переноса и сделан вывод о том, что наиболее удобным является метод сглаживания особенности, который необходимо адаптировать к использованию совместно системой уравнений переноса в двух потоках.

Проведен анализ теоретических и экспериментальных исследований теплоотдачи в СКФ по поиску критериального уравнения теплообмена, необходимого для замыкания уравнения переноса. Установлено, что, полученные в результате соотношения дают сильно различающиеся результаты, существенно зависящие от условий эксперимента и природы конкретного вещества, из чего сделан вывод, что в каждом индивидуальном случае необходима формулировка своего критериального уравнения, апробированного с экспериментальными результатами. Для решения этой задачи предложено использование конечно-элементного моделирования теплообмена в СКФ-потоке, как этапа построения математической модели процесса переноса.

Проанализированы результаты применения различных моделей турбулентности для конечно-элементного расчета СКФ-потока в условиях теплообмена (модель Спаларта-Аллмареса, RNG-модель, EWT k - ε модели, низкорейнольдсовы модели Лаундера и Сарма (LS) и Чьена (CH), Realizable k - ε модель, k - ω модели, SST-модель) применительно к расчету СКФ-потока на большой длине и установлено, что оптимальной с точки зрения требуемых вычислительных ресурсов и устойчивости расчета

при сохранении хорошей точности является EWT k - ε модель, которая предлагается для использования.

На основе проведенного анализа состояния проблемы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассматривается постановка задачи математического моделирования на примере тепломассопереноса в СКФ-теплообменнике, для которого на основе уравнений RANS в приближении квазистационарности давления сформулирована совокупность уравнений, включающая:

– одномерную систему уравнений переноса с поглощением в СКФ-потоке в дивергентной форме:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(S_1 \bar{\rho} \bar{h}) + \frac{\partial}{\partial x}(M_1 h) = q \\ \frac{\partial}{\partial t}(S_1 \bar{\rho}) + \frac{\partial}{\partial x} M_1 = 0 \end{cases}, \quad 0 < t < t_p, \quad 0 < x < L, \quad (1)$$

где S_1 – площадь поперечного сечения потока СКФ, M_1 – массовый расход потока СКФ, h – среднемассовая удельная энтальпия, по которой из уравнения состояния $h = h_T(T)$ определяется среднемассовая температура T потока и его плотность $\rho(T)$, $\bar{\rho}, \bar{h}$ – средние по сечению плотность и удельная энтальпия потока, q – линейная плотность полного потока тепла через периметр стенки трубки;

– уравнение переноса с поглощением в теплоносителе, которое выбирается в зависимости от схемы потоков:

1) для противоточковой схемы в виде линейного уравнения переноса:

$$S_0 \rho_0 c_{p0} \frac{\partial T_w}{\partial t} - M_0 c_{p0} \frac{\partial T_w}{\partial x} = -(q - q_e), \quad (2.1)$$

где T_w – среднерасходная температура теплоносителя, S_0 – площадь поперечного сечения потока теплоносителя, M_0 – его массовый расход, c_{p0}, ρ_0 – удельная теплоемкость и плотность теплоносителя, q_e – линейная плотность полного потока тепла во внешнюю среду;

2) для скрещенных потоков и свободно-конвективного теплообмена в форме интегрального уравнения баланса энергии:

$$\begin{aligned} C_0 \frac{dT_w}{dt} &= P_w - [h_T(T_{ex}(t)) - h_T(T_{in}(t))] M_1 - Q_e, \\ P_w &= \begin{cases} 0, & T_w > T_{w,max} \\ [h_T(T_{ex}(t)) - h_T(T_{in}(t))] M_1 + Q_e, & T_w = T_{w,max} \\ P_{w,max}, & T_w < T_{w,max} \end{cases}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где T_{in}, T_{ex} – входная и выходная температуры СКФ, $T_{w,max}$ – максимальная температура нагрева теплоносителя;

3) для смешанных потоков в схеме пучка труб в форме локального уравнения баланса с запаздыванием по времени и опережением по координате:

$$\begin{aligned} T_w^{(k-1)}(2L + L_0 - x, t + t_s) &= T_w^{(k)}(x, t) - \frac{Lq^{(k)}(x, t)}{M_0 c_{p0}} - \frac{q_e}{M_0 c_{p0}}, \\ T_w^{(k)}(x, t') &= T_{w,in}, \quad 0 < t' < t_s; \quad T_w^{(K)}(x, t) = T_{w,in}, \quad 0 \leq x \leq L \end{aligned} \quad (2.3)$$

где t_s – величина запаздывания по времени, L – длина одного участка теплообмена, K – число участков, L_0 – фиксированное смещение по координате, k – номер текущего участка;

– уравнение для задачи Стефана, записанное в форме баланса потоков через тепловые сопротивления многослойной области теплообмена:

$$q = \frac{T_w - T}{R_t(T, T_w, T_{ct0}, T_{ct1}, d)} = \frac{T_{ct0} - T}{R_a(T, T_{ct0})} = \frac{T_w - T_{ct1}}{R_w(T_w, T_{ct1}, d)}, \quad \begin{cases} T_{ct1} = T_s, & d > 0 \\ d = 0, & T_{ct1} > T_s \end{cases}. \quad (3)$$

Здесь R_t – полное тепловое сопротивление между потоками, R_a – тепловое сопротивление в СКФ, R_w – тепловое сопротивление в теплоносителе, T_s – температура кристаллизации, T_{ct0} , T_{ct1} – температуры границ области обмена со стороны СКФ и теплоносителя соответственно, d – толщина кристаллизованного слоя теплоносителя, являющаяся также координатой свободной границы.

Сформулированы критерии квазистационарности задачи Стефана

$$K_1 = \frac{\pi \Lambda_s \rho_s L_s d (D_2 + d)}{t_p M_1 (h_T(T_{ex}) - h_T(T_{in}))} \ll 1, \quad K_2 = \frac{d^2 C_s}{t_p \lambda_s} \ll 1, \quad (4)$$

и задачи переноса

$$K_0 = \frac{L S_1 \rho(T)}{t_p M_1} \ll 1, \quad (5)$$

где Λ_s – теплота кристаллизации, $\rho_s, C_s, \lambda_s, L_s$ – плотность, теплоемкость, теплопроводность и длина кристаллизованной зоны, D_2 – диаметр трубки СКФ-потока. Первое условие в (4) означает возможность пренебрежения тепловым эффектом фазового превращения в балансе энергии, а второе – незначительность эффекта запаздывания температурного поля в кристаллизованном слое. При выполнении обоих условий допустимо использование квазистационарной постановки задачи Стефана, как это сделано в уравнении (3). Аналогично условие (5) позволяет пренебречь нестационарностью задачи переноса и в этом случае уравнения (1) и (2.1) переходят в единую форму

$$Mc_p \frac{dT}{dx} = q, \quad (6)$$

представляющую собой задачу Коши.

Совокупность соотношений (1–6) служит основой для составления системы уравнений конкретной модели. Начальные условия модели определяют начальное распределение температур потоков, граничное условие к уравнению (1) ставится в точке $x = 0$ и определяется работой входных узлов установки, а граничное условие к уравнению (2.1) и (2.3) задается в точке $x = L$, так что в итоге имеем двухточечную задачу в целом. Кроме того, коэффициенты уравнений параметрически зависят от давления, величина которого, а также его возможное квазистационарное изменение во времени, определяется работой выходных узлов.

Проведен теплофизический анализ условий теплообмена, на основании которого определены выражения для кинетических коэффициентов R_w, R_t , а также внешнего потока q_e . Коэффициент R_a и соотношение между переменными $\bar{\rho}, \bar{h}, \rho, h$ в уравнении (1) не могут быть установлены в общем виде и должны находиться для конкретного типа СКФ. Для этого в работе используется метод конечно-элементного моделирования СКФ-потока, которое тем самым становится элементом построения модели.

Для аппроксимации табличных данных по термодинамическим и кинетическим параметрам сред разработан метод бигиперболической аппроксимации, позволяющий явно учесть различную асимптотику зависимостей справа и слева. Такое различие непосредственно учитывается гиперболической зависимостью общего вида:

$$y(x) = \left(y_0 + \frac{k_1 + k_2}{2} (x - x_0) \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 - k_2}{2} (x - x_0) \right)^2 + \varepsilon_1} \quad (7)$$

где (y_0, x_0) – точка пересечения асимптот гипербол, (k_1, k_2) – угловые коэффициенты асимптот, ε_1 – параметр гиперболы, а знак выбирается в соответствии с требуемой ветвью гиперболы. Бигиперболическая зависимость в общем виде получается по формуле

$$y(x) = \frac{y_1(x) + y_2(x)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{y_1(x) - y_2(x)}{2} \right)^2 + \varepsilon_2} \quad (8)$$

здесь y_1, y_2 – зависимости вида (7). Схематическое изображение зависимости вида (8) показано на рис. 1. Продолжением процедуры (8) могут быть построены и полигиперболические аппроксимации. Рассмотрены также частные случаи зависимостей (7) и (8) и сформулирован алгоритм аппроксимации баро-термических зависимостей, состоящий в построении температурных изобарических зависимостей вида (8) с последующей полиномиальной аппроксимацией барической зависимости коэффициентов.

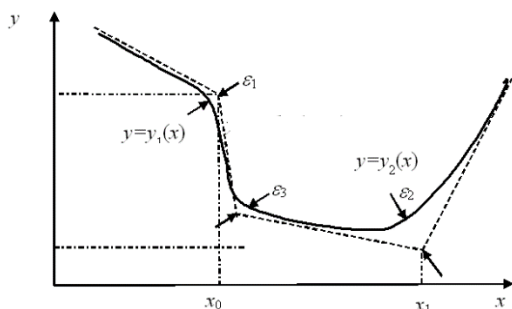


Рис. 1. Схематическое изображение бигиперболической зависимости общего вида.

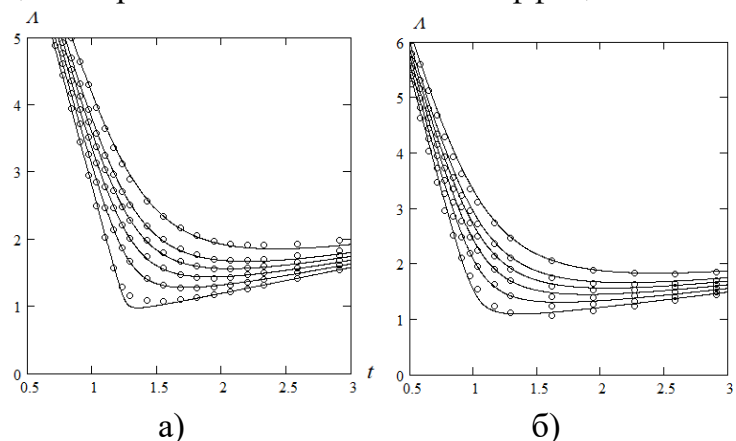


Рис. 2. Температурная зависимость а) изобарной теплоемкости кислорода при давлениях, МПа (снизу вверх): 10, 15, 20, 25, 30, 40. б) динамической вязкости СКФ-кислорода при давлениях, МПа (снизу вверх справа): 10, 15, 20, 25, 30, 40

Метод апробирован на аппроксимации коэффициентов СКФ кислорода и азота (рис. 2) и установлено, что применение данной аппроксимации позволяет получить относительную точность $0,01 \div 0,08\%$ при $8 \div 12$ коэффициентах в аппроксимирующей формуле, что до четырех раз уменьшает алгоритмическую сложность вычисления кинетических коэффициентов СКФ.

Кроме того, приведена общая структура математического моделирования СКФ-установок и проведена апробация одномерной модели по экспериментальным данным газификации СКФ-азота.

В третьей главе представлены алгоритмы численной реализации предложенной математической модели.

В первом разделе приведен алгоритм конечно-элементного моделирования для определения критериальных уравнений СКФ. Основные положения конечно-элементной модели:

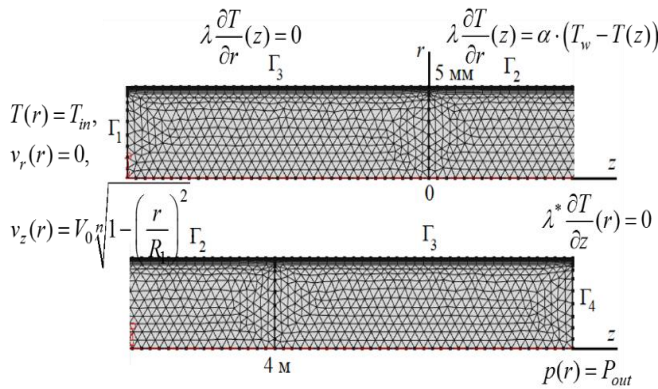


Рис. 3. Буферные зоны в начале и в конце потока и приграничная структура сетки.

- k -е модель с расширенной пристеночной обработкой (EWT);
- использование буферных зон для термостабилизации потока;
- использование приграничной сетки;
- аксиально-симметричная постановка задачи;
- теплообмен с теплоносителем по закону Ньютона-Рихмана;
- автомодельное распределение скорости во входящем потоке.

Граничные условия и особенности расчетной сетки показаны на рис. 3.

Построенная сетка содержала около 200000 конечных элементов, число степеней свободы – около 820000, время решения одной задачи на 6-ядерном процессоре с частотой 3,6 ГГц составило 25 мин.

На основе конечно-элементного решения вычисляются локальный коэффициент теплоотдачи и число Нуссельта:

$$\alpha_1(z) = \alpha \frac{T_w - T_{ct}(z)}{T_{ct}(z) - T(z)}, \quad Nu_1 = \frac{D_t \alpha_1}{\lambda_1(T)}. \quad (9)$$

Расчеты повторяются при варьировании параметров модели P , α , после чего полученный массив значений числа Нуссельта аппроксимируется критериальным уравнением. Для его получения была использована мультипликативная модель, в которую были включены все обычно используемые факторы, а также возможная зависимость коэффициентов от давления. Коэффициенты находились регрессионным анализом линеаризованной модели с последующим анализом значимости коэффициентов.

Апробация алгоритма проведена на примере СКФ-кислорода и азота. Анализ показал, что два коэффициента оказались сильно коррелированы, а другие два оказались существенно незначимыми, что позволило сократить регрессионную модель до вида:

$$Nu(T, P)_{O_2} = 0,0393 \overline{Pr}^{0,487} Re^{0,749} \left(\frac{\rho}{\rho_{ct}} \right)^{0,438} \left(\frac{\bar{c}_P}{c_P} \right)^{0,233 \frac{P}{P_c} - 1,407}, \quad (10)$$

$$Nu(T, P)_{N_2} = 0,0292 \overline{Pr}^{0,542} Re^{0,773} \left(\frac{\rho_{1,ct}}{\rho_1} \right)^{0,464} \left(\frac{\bar{c}_P}{c_P} \right)^{0,663} \left(\frac{c_P}{c_{P,ct}} \right)^{0,357}.$$

Данные уравнения показали хорошую корреляцию около 1%, а также независимость от модельного коэффициента теплоотдачи.

В рамках этого же конечно-элементного расчета находились средние плотность и удельная энтальпия:

$$\bar{\rho} = \frac{2}{R_1^2} \int_0^{R_1} \rho|_{z=z_i} r dr, \quad \Delta \bar{h} = \frac{2}{\bar{\rho} R_1^2} \int_0^{R_1} (\rho h)|_{z=z_i} r dr - h_0, \quad (11)$$

анализом которых были установлены критериальные соотношения $\bar{\rho} = \rho$, $\bar{h} = h$, выполняющиеся с точностью 1%, которые были использованы при решении уравнения (1).

Во втором разделе главы разрабатывается модифицированный метод сглаживания для решения задачи Стефана (3). Для этого вводится координата изотермической поверхности с температурой, равной температуре кристаллизации:

$$z_d = \frac{D_2}{2} \left(\frac{T_{\text{cr}0} - T}{T_w - T_s} \frac{R_w(T_w, \overline{T_{\text{cr}1}}, 0)}{R_a(T, T_{\text{cr}0})} - 1 \right), \quad (12)$$

с использованием которой производится сглаживание профиля слоя обледенения с помощью сигмной функции:

$$d = z_d \sigma(z_d), \quad \sigma(z_d) = \frac{1}{1 + e^{-z_d/\delta}}. \quad (13)$$

В результате задача (3) принимает вид, не содержащий условия переключения и связанной с ним координаты:

$$\begin{cases} \frac{T_w - T}{R_t(T, T_w, T_{\text{cr}0}, T_{\text{cr}1}, P, z_d \sigma(z_d))} = \frac{T_{\text{cr}0} - T}{R_a(T, T_{\text{cr}0}, P)} = \frac{T_w - T_{\text{cr}1}}{R_w(T_w, T_{\text{cr}1}, z_d \sigma(z_d))} \\ \frac{T_{\text{cr}0} - T}{R_a(T, T_{\text{cr}0}, P)} = \frac{T_w - T_s}{R_w(T_w, T_{\text{cr}1}, z_d)} \end{cases}. \quad (14)$$

Для решения нелинейной задачи (14) использован метод Ньютона и вычислительным экспериментом показана устойчивая сходимость алгоритма решения за 3÷5 итераций. Исследована ошибка, вносимая сглаживанием, и установлено, что при оптимальном значении ширины размытия $\delta = 1$ мм ошибка определения температуры составляет 0,08 К.

В третьем разделе рассмотрены и исследованы алгоритмы решения задач переноса и модели в целом в нестационарном и квазистационарном режимах.

Поскольку число Куранта Cur в задаче (1) изначально не определено, то для построения устойчивой разностной схемы использован шаблон «квадрат», на котором по методу баланса из дивергентной формы (1) квазилинейного уравнения переноса получена разностная схема второго порядка точности:

$$\begin{cases} Q_2 \hat{h}_{n+1} - \frac{\tau}{2S_1} \frac{T_{w,n+1} - h_t^{-1}(\hat{h}_{n+1})}{R_t(h_t^{-1}(\hat{h}_{n+1}), \hat{M}_{1,n+1})} = Q_1 \\ \rho(\hat{h}_{n+1}) + \frac{\tau}{\xi S_1} \hat{M}_{1,n+1} = Q_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$Q_1 = \frac{\tau}{\xi S_1} \left(\hat{M}_{1,n} \hat{h}_n + M_{1,n} h_n - M_{1,n+1} h_{n+1} \right) + \frac{\tau}{2S_1} \left(\frac{T_{w,n} - T_n}{R_{t,n}} + \frac{T_{w,n} - \hat{T}_n}{\hat{R}_{t,n}} + \frac{T_{w,n+1} - T_{n+1}}{R_{t,n+1}} \right) +$$

$$+ \rho(h_{n+1}) h_{n+1} + \rho(h_n) h_n - \rho(\hat{h}_n) \hat{h}_n,$$

$$Q_2 = \rho(h_{n+1}) + \rho(h_n) - \rho(\hat{h}_n) + \frac{\tau}{\xi S_1} \left(\hat{M}_{1,n} + M_{1,n} - M_{1,n+1} \right),$$

решаемая по методу бегущего счета. Схема алгоритма итерационного решения нелинейной задачи (15) на каждом шаге приведена на рис. 4, а ее численное исследование показало, что алгоритм устойчиво сходится за 3 итерации в широком диапазоне чисел Куранта.

Для исключения разболтки и появления разрывов при решении по разностной схеме (15) были использованы гладкие начальные и граничные условия, согласованные между собой и с условием отсутствия разрывов.

Численным исследованием схемы (15) было установлено, что хорошо устойчивый расчет наблюдается при выполнении условия

$$\text{Cur}_{0,\max} < 3. \quad (16)$$

Исследование точности и скорости сходимости схемы (15) проводилось по методу Рунге-Ромберга в трех нормах. Установлена квадратичная точность решения по шагам по времени и координате при использовании метода сглаживания для задачи Стефана и найдено, что ошибки решения от дискретизации по времени и координате сравниваются при условии

$$\frac{\tau}{t_{st}} \approx \frac{\xi}{L}, \quad t_{st} = \frac{S_1 L \rho_{\max}}{M_{1,\text{in}}}, \quad (17)$$

где t_{st} – время выхода на стационарное решение. Условие (17) фактически соответствует требованию, чтобы минимальное число Куранта было близко к единице. Условия (16) и (17) определяют оптимальное соотношение шагов для решения задачи (3) по схеме (15).

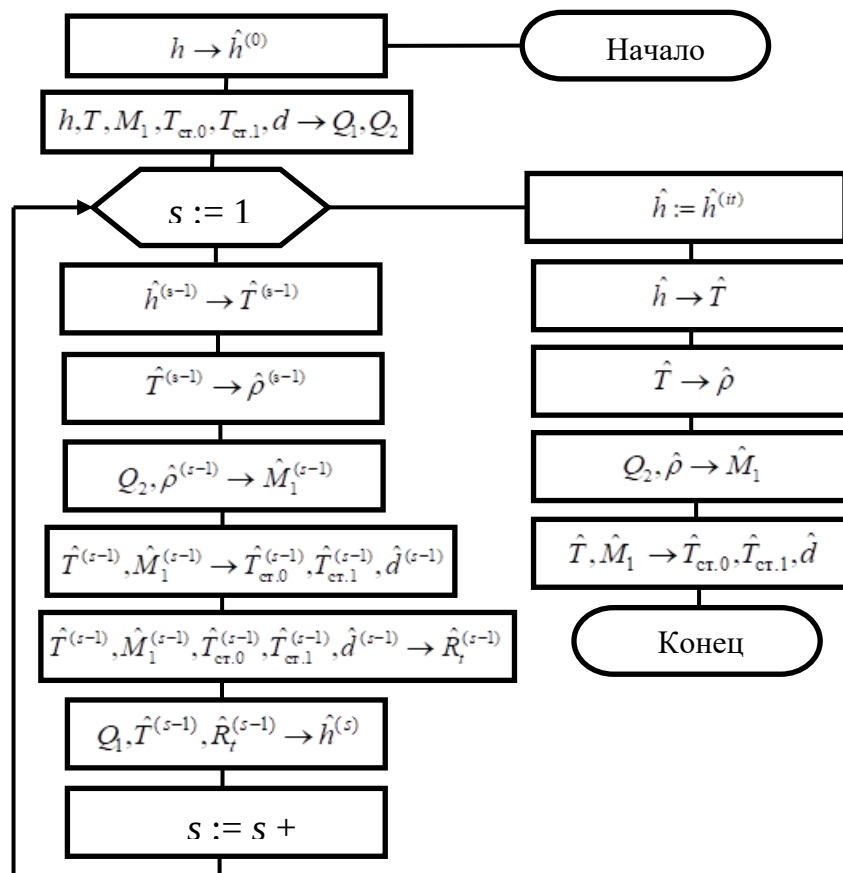


Рис. 4. Структурная схема итерационного алгоритма решения уравнения (15).

Аналогичные результаты получены для решения задачи переноса (2.1). В общей задаче уравнения (1) и (2.1) решаются на одной сетке, поэтому необходимо сформулировать критерии ее выбора. Как показало численное исследование, проведенное до чисел Куранта $\text{Cur}_0 = 20$, схема для решения уравнения (2.1) характеризуется устойчивым счетом без разболтки, то есть нечувствительна к параметрам сетки. Таким образом, при выборе общей сетки остаются только рекомендации (16) и (17).

Квазистационарное уравнение (6) представляет собой задачу Коши, поэтому при использовании сглаживания хорошо решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка, модифицированным путем включения на каждом промежуточном шаге решения задачи Стефана (14). Численное исследование показало, что при этом сохраняется четвертый порядок точности решения. При этом даже на самой грубой сетке из

10 узлов величина ошибки составила сотые доли градуса, что достигалось в нестационарной задаче лишь на самой мелкой сетке.

Для использования разработанных алгоритмов в решении математической модели в целом был применен универсальный обобщенный алгоритм последовательного повторного решения задач переноса, нагруженных задачами Стефана, укрупненная схема которого приведена на рис. 5.

Численное исследование показало, что и в этом алгоритме для задач (1), (2.1-2) сохраняется второй порядок точности для нестационарного режима и четвертый порядок – для квазистационарного. Более сложная ситуация имеет место для задачи (1), (2.3) вследствие разрывов, обусловленных характером теплообмена между потоками.



Рис. 5. Укрупненная схема обобщенного алгоритма.

В четвертом разделе главы рассмотрен алгоритм параметрической идентификации модели по опорным измерениям на штатном оборудовании на примере установки СГУ-7КМ-У.

Параметрическая идентификация модели проводилась методом смешанной стратегии. В активных экспериментах определены параметры установки M_1 , C_0 , P_w , и коэффициент обмена с окружающей средой k_d . Для установления значений корректирующих коэффициентов k_w , k_a в тепловых сопротивлениях СКФ и теплоносителя использовались пассивные эксперименты, представленные на рис. 7.

Для получения устойчивого алгоритма определения параметров, достаточного при ограниченном наборе опытных данных, был использован метод стрельбы по данным с предельными значениями производительности (рис. 6, линии 1 и 3) с последующей верификацией по промежуточному эксперименту (рис. 6, линия 2). Поскольку стрельба сразу по двум параметрам в нелинейной дифференциальной задаче достаточно сложна, то предлагается метод пристрелки в два этапа.

1) На первом этапе для ряда значений параметра k_a производится пристрелка параметра k_w к выходному значению температуры стационарного режима (рис. 6, линия 1) путем решения задачи (2.2), (6). По полученным результатам строилась регрессионная зависимость $k_a(k_w)$. Обычно достаточно простой линейной модели:

$$k_a = b - ak_w, \quad (18)$$

пример которой, полученный в использованном эксперименте, приведен на рис. 7. Тогда значения коэффициентов b , b/a будут равны наибольшим возможным значениям параметров k_a, k_w для данной установки.

2) На следующем этапе с использованием полученной зависимости пристреливался коэффициент k_w к выходной температуре в эксперименте с максимальной производительностью (рис. 6, линия 3), по полученному значению параметра k_w рассчитывался коэффициент k_a . При этом применение жесткой связи параметров (18) стабилизирует модель и делает расчет устойчивым.

3) Полученная в итоге модель проверялась на соответствие результатам промежуточного эксперимента рис. 6, линия 2.

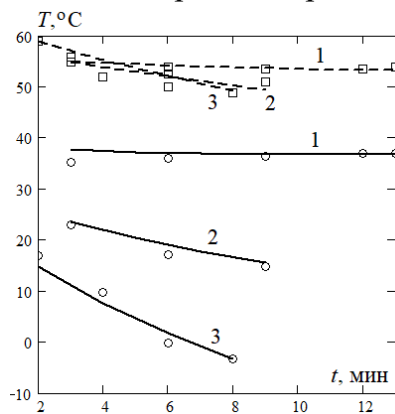


Рис. 6. Данные измерений (точки) и результаты расчета по идентифицированной модели (линии) для минимальной (1), средней (2) и максимальной (3) производительности: выходная температура СКФ (кружки, сплошные линии) и температура теплоносителя (квадраты, штриховые линии)

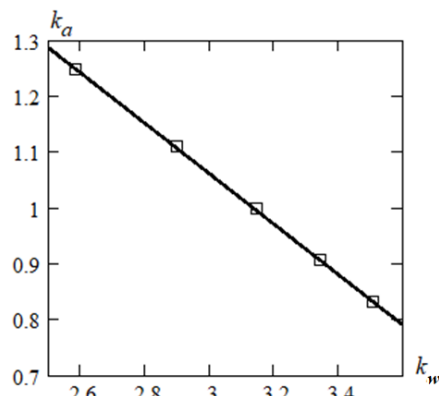


Рис. 7. Регрессионная зависимость (18) между идентифицируемыми коэффициентами

Верификация модели для средней производительности, а также для промежуточных значений моментов времени показывает хорошее соответствие измеренным значениям в пределах погрешности измерений и точности модели.

В пятом разделе главы разрабатываются методики расчета функционирования теплообменной установки на основе идентифицированной модели в стационарном и нестационарном режимах.

Достаточно легко управляемыми являются только два параметра установки:

- давление СКФ P ,
- массовый расход СКФ M_1 .

Методика определения диапазона рабочих режимов работы установки в стационарном режиме.

1. Задаем значения настраиваемых параметров $P_{w,max}$, $T_{w,max}$.
2. Для предварительно заданного набора значений (P_i, M_{1j}) давления и массового расхода СКФ по идентифицированной модели рассчитываем таблицы значений $(T_{ex,i,j})$. Расчеты проводим дважды:
 - 1) для фиксированной температуры теплоносителя $T_{w,max}$ с определением мощности $(P_{w,i,j})$,
 - 2) для фиксированной мощности $P_{w,max}$ с расчетом температуры $(T_{w,i,j})$.

Обычно достаточно трех значений каждой переменной. Диапазон давлений устанавливаем по предельно допустимым значениям, диапазон расходов – на основе предварительного оценочного расчета.

3. По полученным данным строим множественные параболические регрессии $M_1(P, T_{ex})$ и $M_1^*(P, P_w)$.

4. Определяем границы допустимой области параметров уравнениями

$$M_{\min} = M_1(P, T_{\text{опт. max}}), \quad M_{\max} = M_1(P, T_{\text{опт. min}}). \quad (19)$$

5. Определяем границу «сшивки» режимов:

$$M_{\Pi} = M_1^*(P, P_{w, \max}). \quad (20)$$

6. Формируем область рабочих условий функционирования в стационарном режиме.

Пример расчета по предлагаемой методике в рамках полученной выше идентифицированной модели приведен на рис. 8.

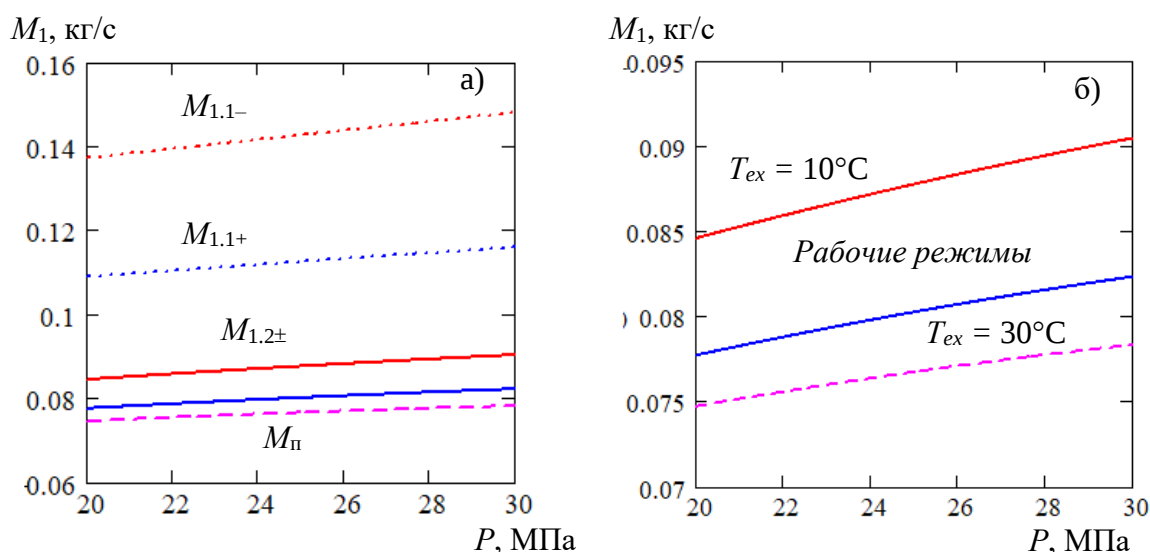


Рис. 8. Выбор рабочих стационарных режимов работы установки

Методика определения диапазона рабочих режимов работы установки в нестационарном режиме.

1. Для предварительно заданного набора значений (P_i, M_{1j}) давления и массового расхода СКФ по идентифицированной модели рассчитываем таблицы значений $(T_{ex, \text{нач. } i, j})$, $(T_{ex, \text{кон. } i, j})$. Диапазон давлений устанавливаем по предельно допустимым значениям, диапазон расхода – по паспортным данным насоса и на основе предварительного оценочного расчета. Время расчета определяем по формуле $t = G/M_1$, где G – требуемая масса закачки. Отметим, что время расчета здесь будет переменной величиной.

2. По полученным данным строим множественные параболические регрессии $M(P, T_{ex, \text{нач}})$, $M(P, T_{ex, \text{кон}})$.

3. Определяем границы допустимой области параметров уравнениями

$$M_- = M(P, T_{ex, \text{кон. min}}), \quad M_+ = M(P, T_{ex, \text{нач. max}}). \quad (21)$$

4. Формируем область рабочих условий функционирования в нестационарном режиме.

В четвертой главе приводится описание разработанного на основе изложенных алгоритмов комплекса программ для моделирования процесса тепломассопереноса с обменом на свободной границе и расчета сверхкритических теплообменников.

Разработанные модели переноса и алгоритмы их решения были реализованы в форме комплекса программ SCFHeatEx на базе интегрированной среды программирования Delphi. Структура комплекса была составлена в соответствии со структурой модели и представлена на рисунке 9. Так как во всех методах комплекса используются общие алгоритмы решения задачи переноса, то интерфейс комплекса был размещен на одной форме со всплывающими окнами для каждого метода.

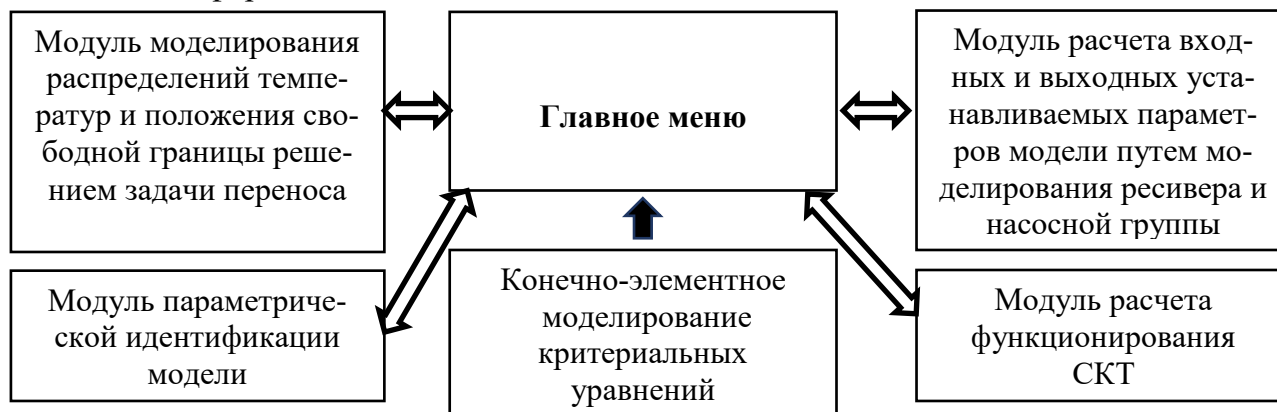


Рис. 9. Общая структура программного комплекса

Главное меню включает в себя:

- выбор типа СКФ, ввод коэффициентов критериального уравнения теплообмена в СКФ (в том числе, полученного при МКЭ-расчете) и загрузку табличных данных по теплофизическим свойствам СКФ. Для двух типов СКФ – кислорода и азота – предусмотрены встроенные критериальные уравнения и бигиперболические аппроксимации свойств.

- ввод данных теплоносителя, вида потоков (скрещенные, противоточковые) типа теплообмена (свободно-конвективный, вынужденная конвекция), а также тип критериального уравнения теплообмена в теплоносителе.

- ввод данных окружающей среды и ее критериального уравнения.

- ввод конструкционных параметров СКТ, влияющих на теплоперенос и теплообмен.

- отображение параметров идентификации модели.

- ввод параметров численного решателя уравнений модели.

- расчет критериальных отношений, определяющих тип модели и тип критериальных уравнений.

- запись в файл и чтение из файла Config.txt всех данных и установок Главного меню. В комплексе предусмотрен запуск без файла Config.txt с предустановленными параметрами Главного меню.

- выбор модуля моделирования.

Общий вид Главного меню показан на рис. 10.

Комплекс программ включает следующие модули моделирования:

- модуль параметрической идентификации модели.

- модуль моделирования распределений температур и положения свободной границы решением задачи переноса.

- модуль расчета функционирования СКТ.

- модуль расчета входных и выходных устанавливаемых параметров модели путем моделирования ресивера и насосной группы.

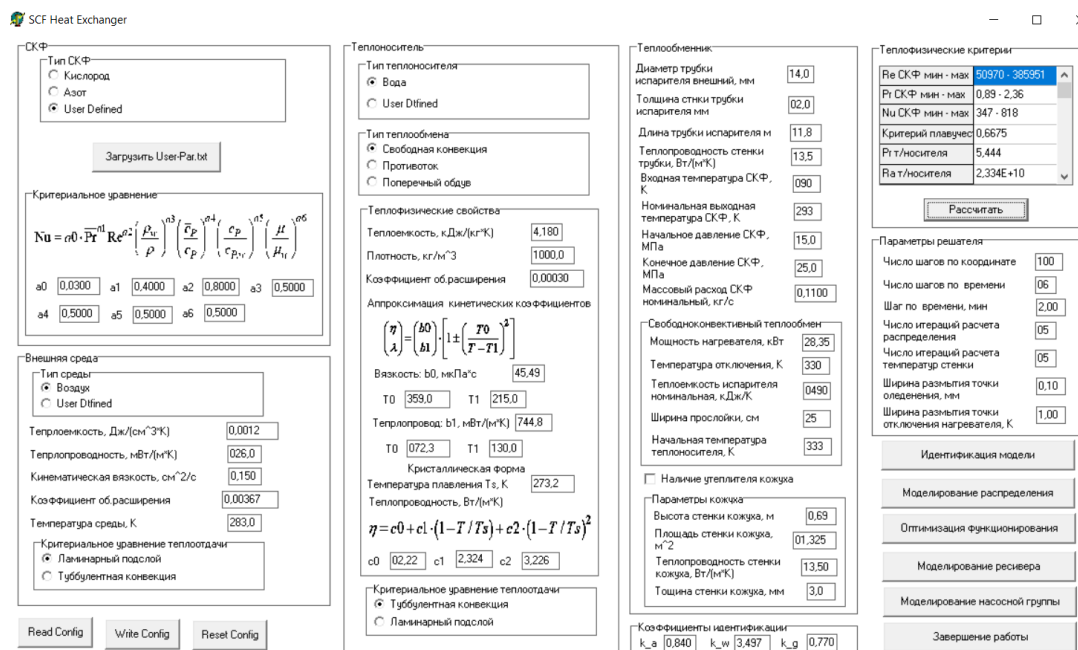


Рис. 10. Вид Главного меню комплекса программ.

При выборе модуля моделирования появляется всплывающее окно модуля с элементами управления и вывода результатов моделирования. Эти элементы динамически изменяются в зависимости от выбранного типа теплообмена и по мере выполнения модуля. Из каждого модуля имеется прямой доступ к разделу Главного меню с установками СКТ и параметров решателя без закрытия окна модуля, что позволяет динамически изменять параметры моделирования непосредственно в каждом модуле. Для этого все переменные из Главного меню определены как глобальные и используются в процедурах модулей как установочные или рассчитываемые параметры, чем обеспечивается информационное взаимодействие модулей.

На рисунке 11 представлен пример решения комплекса задач переноса для нестационарного режима (схема (15)), выполненный в программном комплексе SCFHeatEx. Пример решения задачи в квазистационарном режиме (схема (3)) приведен на рис. 12, решения, представленные на рисунках 6-8, так же были получены с применением программного комплекса. Полученные результаты согласуются с имеющимися опытными данными.

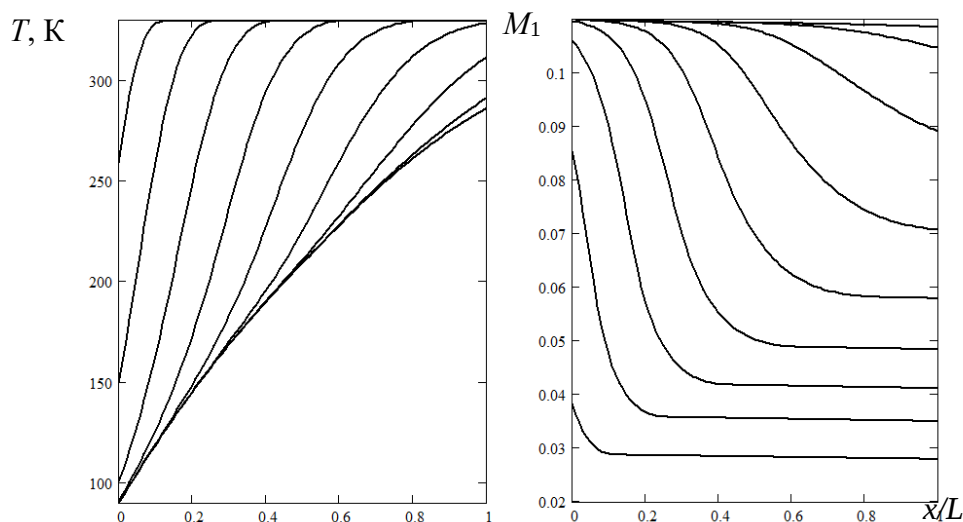


Рис. 11. Результаты решения задачи тепломассопереноса в схеме 15 в нестационарном режиме.

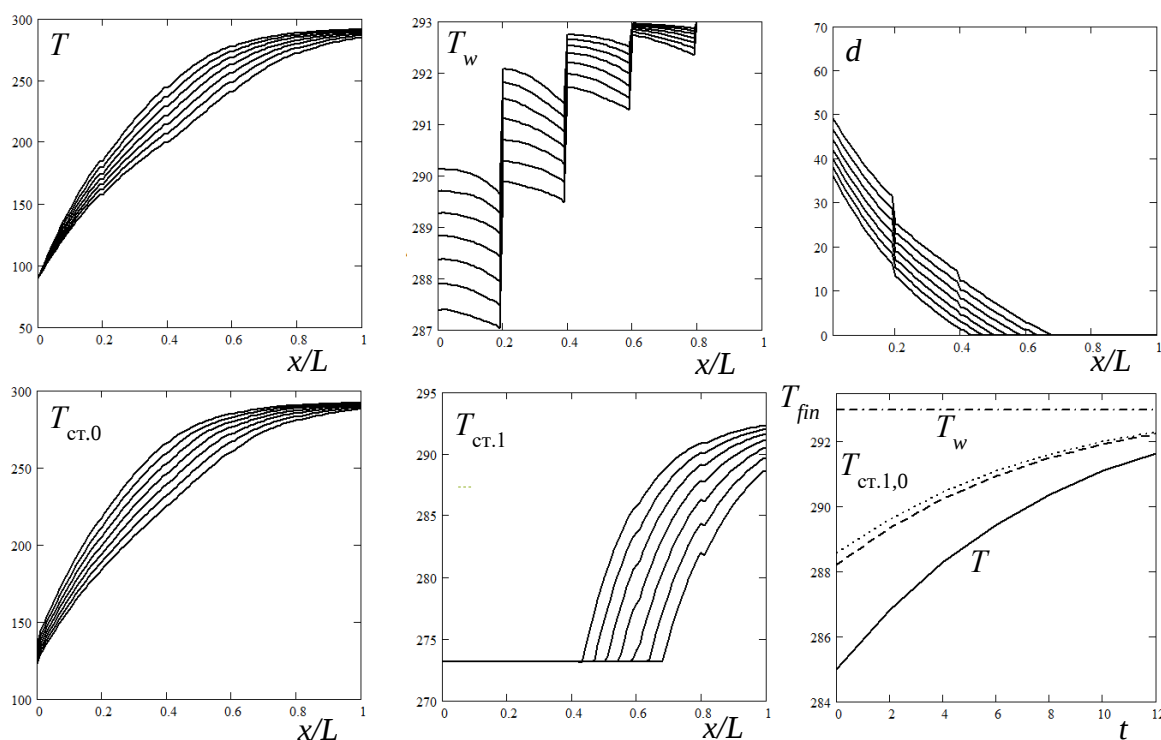


Рис. 12. Результаты решения задачи тепломассопереноса в схеме 3 в квазистационарном режиме.

В последующих разделах главы осуществляется моделирование входных и выходных узлов установки, определяющих входные и выходные параметры модели, а также разработка на основе модели технических решений по повышению стабильности работы установки и ее ТТХ.

На основе моделирования работы насосной группы получено уравнение для производительности насоса, определяющее массовый расход СКФ:

$$M_{1.in}(P) = M_{10} \left(1 - \frac{P}{P_{max}} \right), \quad (22)$$

а также выработаны решения по снижению условий блокировки насосной группы.

Для расчета параметров выходного узла – ресивера, определяющего рабочее давление в системе, был проведен анализ перекачки в изотермических и адиабатических условиях без докачки и с докачкой и построены уравнения и диаграммы для определения рабочего давления в зависимости от параметров ресивера, потребителя и производительности установки.

Предложенные технические решения, полученные на основе разработанной идентифицированной модели, использованы в практической деятельности заводов ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ» г. Москва и АО «УКЗ» г. Екатеринбург.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований в работе получены следующие основные результаты:

1. На основе уравнений RANS в терминах массового расхода и среднемассовой энтальпии получена совокупность уравнений тепломассопереноса, включающие нестационарную и квазистационарную задачи переноса в СКФ-потоке и теплоносителе и задачу Стефана на границе между потоками, в различных схемах движения потоков и механизмах обмена. Сформулированы критерии квазистационарности для задач переноса и задачи Стефана, позволяющие обоснованно выбирать тип уравнений для

конкретных условий расчета.

2. Разработан метод бигиперболической аппроксимации табличных зависимостей с различным лево- и право-сторонним асимптотическим поведением, с помощью которого удастся снизить до четырех раз алгоритмическую сложность вычисления кинетических коэффициентов СКФ в закритической области давлений при относительной точности $0,01 \div 0,08\%$.

3. В рамках метода конечных элементов и EWT- k - ε модели турбулентности разработан алгоритм расчета критериальных уравнений для СКФ-потока в закритической области, имеющих корреляцию с фактическими данными в пределах 1%.

4. На основе модифицированного метода сглаживания особенности для свободной границы разработаны алгоритмы решения системы задач переноса с обменом на свободной границе, использующие методы сквозного счета повышенной точности – второго порядка для нестационарной задачи и четвертого порядка для квазистационарной задачи, позволяющие в 10 и более раз снизить число степеней свободы численной модели. На основе вычислительного эксперимента в терминах обобщенного числа Куранта установлены условия оптимальности для формирования расчетной сетки.

5. Разработан алгоритм параметрической идентификации модели сверхкритического теплообменника, использующий идентификацию модифицированным методом стрельбы по экспериментам с предельными значениями управляющих параметров с последующей верификацией по промежуточным экспериментам на основе опорных экспериментов на штатном оборудовании установки. Апробация алгоритма по опытным данным, полученным на установке СГУ-7КМ-У, показала хорошую устойчивость и точность идентификации.

6. Разработаны алгоритмы определения рабочей области управляющих параметров на основе идентифицированной математической модели для заданного диапазона выходных характеристик, использующие многомерную параболическую аппроксимацию функции отклика дифференциальной системы и позволяющие определять рабочую область как для стационарного, так и для нестационарного режима функционирования.

7. Проведено математическое моделирование работы внешних узлов установки для определения входных и выходных управляющих параметров системы задач переноса, с использованием которого в рамках идентифицированной математической модели предложены технические решения для обеспечения стабильности работы установки и повышения ее ТТХ, в частности, повышение производительности до 20% и снижение энергозатрат на пусковом этапе до 25%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Бородкин, С.В. Модель тепломассопереноса в криогенных газификаторах закрытого типа / С.В. Бородкин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Ряжских // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – Т. 14, №6. – С. 714–730.

2. Бородкин, С.В. Параметрическая идентификация дифференциальной модели теплообмена в газификаторе / С.В. Бородкин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Ряжских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 6. – С. 34–42.

3. Бородкин, С.В. Анализ методик расчета теплопередачи в системах термоэлектрического охлаждения теплонапряженных элементов / С.В. Бородкин, А.В. Ива-

нов, И.Л. Батаронов, А.В. Кретинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 1. – С. 21-31.

Статьи и материалы конференций

4. Бородин, С.В. Моделирование и оптимизация теплообмена в криогенных газификаторах на примере газификационной установки СГУ-7КМ-У / С.В. Бородин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Ряжских // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, №3. – С. 24–30.

5. Чернухо, И.И. Перспективные направления развития средств наземного обслуживания общего применения авиации в системе аэродромно-технического обеспечения на аэродромах оперативного базирования / И.И. Чернухо, С.А. Гаршин, С.В. Бородин, Е.В. Федорова // ВКС. Теория и практика. – 2021. – № 17. – С. 117–127.

6. Бородин, С.В. Аппроксимация теплофизических параметров закритических азота и кислорода / С.В. Бородин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов // Физико-математическое моделирование систем: материалы XXII Междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2021. – 2021 – С. 60-69.

7. Borodkin, S.V. Simulation of heat transfer in a flow of over-critical nitrogen and oxygen in a horizontal circular tube / S.V. Borodkin, I.L. Bataronov, A.V. Ivanov, V.I. Ryazhskikh // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – V. 1155. – P. 012011.

8. Бородин, С.В., Моделирование тепломассопереноса в потоке закритических азота и кислорода в трубе методом конечных элементов / С.В. Бородин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Ряжских // Физико-математическое моделирование систем: материалы XXII Междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2021. – 2021 – С. 70-86.

9. Бородин, С.В. Перспективы развития мобильных газификационных установок / С.В. Бородин, А.В. Иванов // Материалы докладов IV всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств наземного обслуживания общего применения». 2020. – С. 5–7.

10. Бородин С.В. Оптимизация работы испарителя в условиях возможных фазовых переходов. // «Авиакосмические технологии» (АКТ-2020): Материалы XXI Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Воронеж 22-23 октября 2020). Воронеж ООО «Элист», 2020.– С. 310-316.

Свидетельства о регистрации программных продуктов

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617655. Программный комплекс для моделирования и оптимизации теплообменных аппаратов и узлов газификационных установок. / С.В. Бородин, И.Л. Батаронов, А.В. Иванов, В.И. Ряжских; заявл. 12.04.22; опубл. 25.04.22.

Подписано в печать «19» октября 2022
Формат 60×84/16. Формат для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № ____
ФГКВОУ ВО ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А