

*На правах рукописи*

**Чан Ба Ле Хоанг**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ  
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

**Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации  
(технические системы)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**МОСКВА - 2020**

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук, профессор  
Нгуен Куок Ши

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Лохин Валерий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Лауреат государственной премии РФ в области науки, Лауреат премии правительства РФ в области образования. Профессор кафедры “Проблем управления”, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “МИРЭА - Российский технологический университет»

Ковалева Наталья Львовна - кандидат технических наук, старший научный сотрудник “Отдела механики машин и управления машинами”, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН).

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Ордена Трудового Красного Знамени Акционерное Общество “Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева (НИИВК)”, Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Защита состоится " " марта 2020 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 217.047.01 во ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования» по адресу: 105187, Москва, ул. Кирпичная д.39-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «Научно-исследовательский и экспериментальный Институт автомобильной электроники и электрооборудования»

Автореферат разослан " " февраля 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета Д 217.047.01



доктор технических наук, старший научный сотрудник Варламов О.О

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Термостабилизация, в самом широком контексте интерпретации, является составным элементом доминирующего числа рабочих и технологических процессов во множестве сфер деятельности человека. В этой связи, при изучении проблем термостабилизации применительно к различным областям использования выделяются различные, достаточно многообразные научные направления, и задачи, подлежащие решению в каждой их таких научно-технологических областей, при общих концептуальных основах имеют свою специфику в постановках, целях и применяемых исследовательских подходах.

При неоспоримых современных достижениях в области системного анализа широкого круга моделей процессов температурной стабилизации самого разнообразного назначения, в высокой степени актуальными остаются научные задания по совершенствованию методов исследования моделей данного типа применительно к новым высокотехнологичным сферам, в частности, техническим системам термостабилизации компонентов электронных устройств, термостабилизации поверхностей высокоскоростных движущихся объектов, техническим системам устройств термоядерной энергетики и многим другим инновационным научно-техническим направлениям. При этом к числу ведущих аспектов совершенствования расчетных алгоритмических методов, экспериментальных методик, синтеза алгоритмов оптимизации и управления для указанных современных технологических областей, относится решение проблемы учета высокой степени неопределенности исходных параметров моделирования, значительного количественного уровня разбросов экзогенных параметров в моделях процессов термостабилизации высокотемпературных поверхностей, в том числе в технологиях, связанных с применением нагнетаемых газовых и многофазных газожидкостных потоков. С учетом характера доступной при исследованиях корректной исходной информации о неопределенности экзогенных характеристик в моделях данных процессов, представляет насущный интерес дальнейшая разработка методов учета разброса параметров моделирования, альтернативно дополняющих применяемые вероятностно-стохастические методы. Решение этой задачи лежит в основе дальнейшего повышения адекватности и информативности предпроектных расчетов и прогнозирования достижимых конструктивных свойств технических систем термостабилизации высокотемпературных поверхностей для указанных научно-технических отраслей. Подобным альтернативным подходом является применение для анализа круга теоретических моделей в данной области методов теории нечетких множеств, алгоритмическая реализация этих методов и использование полученных в этом направлении результатов в экспериментальных методиках. Дополнительным мотивом в постановке задачи развития нечетко-множественного подхода к анализу моделей функционирования ответственных технических систем высокотемпературной термостабилизации является также расширяющийся позитивный опыт применения такого подхода в ряде областей современного технологического моделирования.

Представленные соображения в полной мере определяют актуальность темы данной диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** является разработка теоретических численно-аналитических нечетко-множественных методов, алгоритмов и экспериментальных методик анализа моделей функционирования и оптимизации технических систем термостабилизации высокотемпературных поверхностей с использованием нагнетаемых газожидкостных потоков и теплового экранирования при учете комплекса факторов неопределенности экзогенных параметров.

**Для достижения указанной цели в работе осуществляется решение следующих задач:**

- разработка методических приемов использования теории нечетких вычислений для учета факторов разброса исходных параметров в моделях функционирования и оптимизации технических систем термостабилизации на основе расширения областей определения расчетных соотношений детерминистических версий соответствующих моделей на аргументы различных нечетко-множественных типов путем фрагментированного поэтапного применения аппарата нечеткой арифметики, применения модифицированной альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения, использования нечетко-множественных модификаций численных методов и приемов снижения нечеткости результатов многоэтапного применения нечетко-множественных арифметических операций;

- разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей определения параметров функционирования технических систем распыления жидкостных сред при формировании дисперсных газожидкостных потоков для применения в технологических процессах термостабилизации высокотемпературных поверхностей, включая нечетко-множественные модели определения параметров функционирования центробежных и центробежно-струйных форсунок;

- разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей определения параметров функционирования технических систем распыления жидкостных сред в виде вращающихся распылителей аэрозольных генераторов, пневматических и дисковых вертикально-вращающихся распылителей для формирования дисперсных газожидкостных потоков в технологиях термостабилизации высокотемпературных поверхностей;

- разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей процессов двухфазного смесеобразования и эволюции аэрозолей;

- разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей функционирования и оптимизации процессов теплообмена при безотрывном продольном обтекании плоской высокотемпературной поверхности двухфазным тонкодисперсным ламинарным газожидкостным потоком, а также моделей теплообмена при течении двухфазного потока в цилиндрическом высокотемпературном канале;

- разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей оценивания ряда параметров процессов теплообмена в системах пористого охлаждения;

- разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей многослойных тепловых экранов;

- осуществление с учетом теоретических оценок факторов неопределенности экспериментального анализа и систематизации данных о комплексе параметров функционирования технической системы форсуночной газожидкостной термостабилизации лимитера в прототипе термоядерной энергетической установки.

**Объектом исследования** являются процессы термостабилизации высокотемпературных поверхностей технических систем.

**Предметом исследования** являются нечетко-множественные теоретические и экспериментальные модели функционирования и оптимизации технических систем термостабилизации высокотемпературных поверхностей и применением газовых и газожидкостных дисперсных потоков, а также систем температурного экранирования.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты разработки методических приемов использования теории нечетких множеств для учета факторов разброса экзогенных параметров в моделях функционирования и оптимизации технических систем высокотемпературной термостабилизации на основе расширения областей определения расчетных соотношений

детерминистических версий соответствующих моделей на аргументы различных нечетко-множественных типов путем фрагментированного поэтапного применения аппарата нечеткой арифметики, применения модифицированной альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения и приемов снижения нечеткости результатов многоэтапных нечетко-множественных вычислений.

2. Результаты разработки и алгоритмической реализации методов исследования нечетко-множественных моделей определения параметров функционирования технических систем распыления жидкостных сред при формировании дисперсных газожидкостных потоков для применения в технологических процессах термостабилизации высокотемпературных поверхностей, включая нечетко-множественные модели определения параметров функционирования центробежных и центробежно-струйных форсунок, аэрозольных генераторов с вращающимися распылителями, пневматических и вертикально-вращающихся дисковых распылителей.

3. Результаты разработки и алгоритмической реализации методов исследования нечетко-множественных моделей оценивания ряда эндогенных параметров в процессах двухфазного смесеобразования и эволюции аэрозолей, а также оценивания ряда параметров процессов теплообмена в системах пористого охлаждения.

4. Результаты разработки и алгоритмической реализации методов исследования нечетко-множественных моделей функционирования и оптимизации процессов теплообмена при безотрывном продольном обтекании плоской высокотемпературной поверхности двухфазным тонкодисперсным ламинарным газожидкостным потоком и моделей теплообмена при течении двухфазного потока в цилиндрическом высокотемпературном канале.

5. Результаты разработки и алгоритмической реализации методов исследования нечетко-множественных моделей функционирования многослойных тепловых экранов.

6. Результаты экспериментального анализа и систематизации данных о комплексе параметров функционирования технической системы форсуночной газожидкостной термостабилизации лимитера прототипа энергетической установки термоядерного синтеза.

**Методы исследования.** В работе использованы методы классического и нечетко-множественного математического моделирования и оптимизации; теоретические математические методы газовой динамики и теории тепломассопереноса; методы компьютерной реализации численно-аналитических расчетных алгоритмов; методы экспериментального анализа параметров функционирования технической системы термостабилизации лимитера термоядерных установок.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработаны новые модификации теоретических алгоритмов использования аппарата нечетких вычислений для учета факторов разброса исходных параметров в моделях функционирования и оптимизации технических систем термостабилизации высокотемпературных поверхностей на базе использования обобщенных расчетных соотношений исследуемых моделей с нечетко-множественными аргументами различных типов.

2. Впервые разработаны и алгоритмически реализованы методы исследования учитывающих факторы разброса исходных параметров нечетко-множественных версий моделей функционирования центробежных и центробежно-струйных форсунок, вращающегося распылителя аэрозольного генератора, пневматических и вертикально-вращающихся дисковых распылителей жидкости в процессах формировании дисперсных газожидкостных потоков для применения в технологических процессах термостабилизации высокотемпературных поверхностей.

3. Разработаны новые модификации теоретических нечетко-множественных методов и алгоритмов исследования моделей процессов двухфазного смесеобразования и эволюции аэрозолей, а также моделей функционирования и процессов теплообмена при

безотрывном продольном обтекании плоской высокотемпературной поверхности двухфазным тонкодисперсным ламинарным газожидкостным потоком и течении двухфазного потока в цилиндрическом высокотемпературном канале.

4. Впервые исследованы нечетко-множественные версии расчетных моделей для ряда параметров процессов теплообмена в системах пористого охлаждения.

5. Впервые разработаны и алгоритмически реализованы методы исследования моделей функционирования многослойных тепловых экранов.

6. Впервые реализованы экспериментальный анализ и систематизация данных о комплексе параметров функционирования технической системы форсуночной газожидкостной термостабилизации лимитера прототипа энергетической установки термоядерного синтеза.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается: использованием апробированных математических методов теории нечетких множеств и параметрической оптимизации; применением методов математической физики к верифицированным моделям физико-механических процессов в газовой динамике и теории тепломассопереноса; анализом результатов, получаемых на разных стадиях апробации разрабатываемых моделей и алгоритмов, в том числе расчетных результатов компьютерного моделирования; отдельными данными экспериментальных исследований; согласованностью результатов, полученных для предельных частных случаев задания параметров в рассматриваемых моделях, с представленными в научной литературе результатами других исследований и опытными данными; теоретико-экспериментальными данными, полученными при внедрении и практическом использовании результатов.

**Практическая ценность работы.** Практическая ценность результатов выполненной работы заключается в том, что разработанные в диссертации методы, теоретические и расчетные компьютерные алгоритмы определения параметров функционирования технических систем термостабилизации на основе методов теории нечетких множеств, полученные в результате их применения закономерности и выводы, а также результаты проведенных стендовых экспериментальных исследований, являются основой повышения информативности и адекватности предпроектных расчетов и прогнозирования достижимых конструктивных свойств технических систем термостабилизации высокотемпературных поверхностей для обширного ряда научно-технических отраслей. В частности, они являются элементом научной базы при разработке инновационных проектно-конструкторских технических решений, обеспечивающих, в перспективе, эффективное функционирование энергетических установок термоядерного синтеза.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- на ряде научных и научно-технических конференций, семинаров и совещаний, в том числе: на научно-технических семинарах в Научно-исследовательском и экспериментальном институте автомобильной электроники и электрооборудования Министерства промышленности и торговли РФ (г. Москва, 2018 - 2019 гг.);

- на научно-практических конференциях в ВинИТ Институте технологии (г. Ханой, Вьетнам, 2018 – 2019 гг.);

- на Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (22–26 мая 2017 г., Санкт-Петербург).

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы получили применение и внедрены на практике в ряде предприятий и институтов различных стран. Основные теоретические положения проведенных исследований подтверждены при

использовании в практической деятельности ряда проектных и технических организаций Вьетнама. В частности, созданные математические модели, методы их исследования и алгоритмы реализации, представленные расчетными методиками и комплексами прикладных программ, использовались:

- в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах ВинИТ Института технологии Вьетнама;

- в опытно-конструкторских работах научно-производственных компаний технологического сектора Вьетнама.

Полученные в диссертационной работе результаты, разработанные математические модели и алгоритмы рекомендуется использовать при дальнейшем проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в индустриально-энергетическом секторе Вьетнама.

Кроме того, рекомендуется использование результатов диссертационной работы в учебном процессе при изложении лекционного материала учебных курсов «Системное проектирование» в университетах СРВ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано одиннадцать научных работ, в числе которых две статьи в рекомендованных ВАК России ведущих научно-технических журналах и две статьи в научном журнале по профилю диссертационного исследования, включенном в одну из ведущих наукометрических баз MathSciNet; одна монография; пять статей в других рецензируемых периодических научных изданиях; одна публикация в сборнике материалов Международной научной конференции

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения с основными выводами и результатами по работе, списка литературы и приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности рассматриваемой проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена характеристика основных научных положений и результатов работы, а также их практической ценности и данных апробации.

**В первой главе работы** рассматривается современное состояние и подходы к исследованию проблем моделирования и разработки алгоритмов анализа технических систем высокотемпературной термостабилизации, теплообмена, охлаждения и тепловой защиты высокотемпературных поверхностей. В рамках анализа специфики современных задач в данной области применительно к потребностям ряда инновационных научно-технических отраслей, а также с учетом характера доступной при исследованиях корректной исходной информации о неопределенности экзогенных характеристик, дана оценка методов теории нечетких множеств как эффективного, альтернативного применяемым методам вероятностно-стохастического анализа инструмента исследования моделей высокотемпературной термостабилизации при наличии разбросов значений исходных физико-механических, геометрических и технологических параметров моделирования. Представлена концепция исследования рассматриваемых моделей на основе расширения областей определения расчетных соотношений в их детерминистических версиях на аргументы различных нечетко-множественных типов путем фрагментированного поэтапного применения аппарата нечеткой арифметики, применения модифицированной альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения, использования нечетко-множественных модификаций отдельных численных методов и приемов снижения нечеткости результатов многоэтапного применения нечетко-множественных вычислений. Дан обзор ряда методических приемов теории нечетко-множественного анализа, включая описание различных вариантов нечетко-множественного представления обладающих разбросами экзогенных параметров

моделирования; характеристику модифицированных форм применения эвристического принципа обобщения (принципа расширения), включая альфа – уровневые модификации; методы нечетко-интервальной арифметики; описание методов сравнения нечетких трапецидальных интервалов.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена разработке нечетко-множественных методов и алгоритмов анализа моделей функционирования устройств распыления охлаждающих субстанций в технических системах высокотемпературной термостабилизации.

В рамках реализуемых исследований разработан метод получения нечетко-множественных оценок рабочих параметров центробежных форсунок в рамках гипотезы описания неопределенных экзогенных параметров рассматриваемых моделей двумя видами нечетких множеств – нечеткими трапецидальными интервалами и нормальными нечеткими множествами, функции принадлежности которых соответствуют по форме функциям плотности для нормальных статистических распределений.

В рамках применения данного подхода для моделей распыления идеальной жидкости и жидкости малой вязкости в центробежных форсунках с нечеткими экзогенными параметрами плеча закручивания  $R_b$ , радиуса сопла  $r_c$ , числа  $n_b$  входных каналов с одинаковыми площадями поперечных сечений  $F_b$ , радиуса входных каналов  $r_b$ , угла наклона  $\gamma$  осей входных каналов к оси сопла форсунки, коэффициент деформации  $\varepsilon_d$  струи на входе в камеру закручивания, условного коэффициента трения  $\lambda$ , связываемый эмпирической зависимостью  $\lambda \approx 1,05/(R_e^{0,3})$  с числом Рейнольдса, соответствующим течению жидкости по фиктивному отверстию с площадью, равной суммарной площади всех входных каналов, получены нечетко-множественные оценки основных эндогенных характеристик – геометрического параметра  $A$  и обобщенного эквивалентного геометрического параметра  $A_v$ , коэффициента расхода  $\mu$  распыляемой идеальной жидкости либо жидкой субстанции малой вязкости, коэффициента  $\varphi$  заполнения сопла, угла факела распыла (конусности потока распыляемой жидкости)  $\beta$  а также параметра скорости  $V_{fc}$  истечения потока распыла из сопла. Аналогичные нечетко-множественные представления получены также применительно к модели функционирования центробежно-струйных форсунок с дополнительным экзогенным параметром радиуса центрального канала.

Так, для случая исследования нечетко-множественной модели функционирования центробежно-струйной форсунки при введении описаний для неопределенных экзогенных параметров  $S_0, S_c, S_{jb}, R_b, R_c, \gamma, P_f, \rho_f$  нормальными трапецидальными нечеткими интервалами  $\tilde{S}_0, \tilde{S}_c, \tilde{S}_{jb}, \tilde{R}_b, \tilde{R}_c, \tilde{\gamma}, \tilde{P}_f, \tilde{\rho}_f$  с кортежами реперных точек  $\tilde{S}_0 = (S_{10}, S_{20}, S_{30}, S_{40}), \tilde{S}_c = (S_{1c}, S_{2c}, S_{3c}, S_{4c}), \dots, \tilde{\rho}_f = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4)$ , представляемых разложениями по множествам  $\alpha$  - срезов в форме

$$\tilde{S}_0 = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{S}_{0\alpha}, \overline{S}_{0\alpha}], \quad \underline{S}_{0\alpha} = (1-\alpha)S_{10} + \alpha S_{20}, \quad \overline{S}_{0\alpha} = \alpha S_{30} + (1-\alpha)S_{40}; \dots,$$

$$\tilde{\rho}_f = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\rho}_{f\alpha}, \overline{\rho}_{f\alpha}], \quad \underline{\rho}_{f\alpha} = (1-\alpha)\rho_1 + \alpha\rho_2, \quad \overline{\rho}_{f\alpha} = \alpha\rho_3 + (1-\alpha)\rho_4,$$

а также в случае задания функций принадлежности для нечетко-множественных экзогенных параметров в форме функций плотности для нормальных статистических распределений

$$\mu_{\tilde{S}_0}(S_0) = \exp(-(S_0 - m_{*S_0})^2 / (2\sigma_{*S_0}^2)), \quad \mu_{\tilde{S}_c}(S_c) = \exp(-(S_c - m_{*S_c})^2 / (2\sigma_{*S_c}^2)), \dots,$$

с параметрами средних значений  $m_{*S_0}, m_{*S_c}, \dots, m_{*\rho_f}$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma_{*S_0}, \sigma_{*S_c}, \dots, \sigma_{*\rho_f}$ , когда



$$\underline{S}_{0\alpha} = m_{*S_0} - \sigma_{*S_0} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{S}_{0\alpha} = m_{*S_0} + \sigma_{*S_0} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \dots,$$

$$\underline{\rho}_{f\alpha} = m_{*\rho_f} - \sigma_{*\rho_f} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}, \quad \bar{\rho}_{f\alpha} = m_{*\rho_f} + \sigma_{*\rho_f} (\ln \alpha^{-2})^{1/2}.$$

для эндогенных нечетко-множественных характеристик  $\tilde{A}^*$ ,  $\tilde{\varphi}$ ,  $\tilde{\mu}$ ,  $\tilde{\beta}$ ,  $\tilde{V}_{fc}$  в рамках предлагаемой методики получены представления

$$\tilde{A}^* = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{A}_\alpha^*, \bar{A}_\alpha^*], \quad \tilde{\varphi} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\varphi}_\alpha, \bar{\varphi}_\alpha], \quad \tilde{\mu} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\mu}_\alpha, \bar{\mu}_\alpha], \quad \tilde{\beta} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\beta}_\alpha, \bar{\beta}_\alpha], \quad \tilde{V}_{fc} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{V}_{fc\alpha}, \bar{V}_{fc\alpha}],$$

где в частности

$$\underline{A}_\alpha^* = F_{A^*}(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_\alpha), \quad \bar{A}_\alpha^* = F_{A^*}(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_\alpha);$$

$$\underline{\varphi}_\alpha = F_\varphi(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_\alpha), \quad \bar{\varphi}_\alpha = F_\varphi(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_\alpha);$$

$$\underline{\mu}_\alpha = F_\mu(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_\alpha), \quad \bar{\mu}_\alpha = F_\mu(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_\alpha);$$

$$\underline{\beta}_\alpha = F_\beta(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_\alpha), \quad \bar{\beta}_\alpha = F_\beta(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_\alpha);$$

$$\underline{V}_{fc\alpha} = F_f(\underline{S}_{0\alpha}, \underline{S}_{c\alpha}, \underline{S}_{jb\alpha}, \underline{R}_{b\alpha}, \underline{R}_{c\alpha}, \underline{\gamma}_\alpha, \underline{P}_{f\alpha}, \underline{\rho}_{f\alpha}),$$

$$\bar{V}_{fc\alpha} = F_f(\bar{S}_{0\alpha}, \bar{S}_{c\alpha}, \bar{S}_{jb\alpha}, \bar{R}_{b\alpha}, \bar{R}_{c\alpha}, \bar{\gamma}_\alpha, \bar{P}_{f\alpha}, \bar{\rho}_{f\alpha}).$$

На основе охарактеризованных разработанных методов нечетко-множественного анализа моделей функционирования центробежных и центробежно-струйных форсунок в технических системах высокотемпературной термостабилизации созданы алгоритмы их числовой реализации. В частности, применительно к модели центробежно-струйной форсунки с нечеткими экзогенными параметрами  $\tilde{d}_0 = (4.81l_*, 4.95l_*, 5.03l_*, 5.5l_*)$ ;  $\tilde{d}_c = (3.78l_*, 3.97l_*, 4.03l_*, 4.16l_*)$ ;  $\tilde{d}_b = (2.91l_*, 2.98l_*, 3.02l_*, 3.08l_*)$ ;  $R_b = (14.96l_*, 14.98l_*, 15.01l_*, 15.07l_*)$ ;  $\tilde{\gamma} = (0.99\gamma_*, 1.05\gamma_*, 1.08\gamma_*, 1.15\gamma_*)$ ;  $\tilde{P}_f = (3.55P_*, 4.05P_*, 4.46P_*, 5.67P_*)$ ;  $\tilde{\rho}_f = (0.98\rho_*, 1.0\rho_*, 1.04\rho_*, 1.1\rho_*)$  и  $m_{*S_0} = 19.56l_*^2$ ,  $m_{*S_c} = 12.57l_*^2$ ,  $m_{*S_{jb}} = 7.07l_*^2$ ,  $m_{*R_b} = 15.0l_*$ ,  $m_{*R_c} = 2.0l_*$ ,  $m_{*\gamma} = 1.07\gamma_*$ ,  $m_{*P_f} = 4.26P_*$ ,  $m_{*\rho_f} = 1.02\rho_*$ ,  $\sigma_{*S_0} = 3.912l_*^2$ ,  $\sigma_{*S_c} = 2.514l_*^2$ ,  $\sigma_{*S_{jb}} = 1.414l_*^2$ ,  $\sigma_{*R_b} = 3.0l_*$ ,  $\sigma_{*R_c} = 0.4l_*$ ,  $\sigma_{*\gamma} = 0.214\gamma_*$ ,  $\sigma_{*P_f} = 0.852P_*$ ,  $\omega_{*\rho_f} = 0.204\rho_*$ , некоторые формы функций принадлежности для нечетких исходных параметров и эндогенных нечетко-множественных расчетных характеристик представлены на рис.

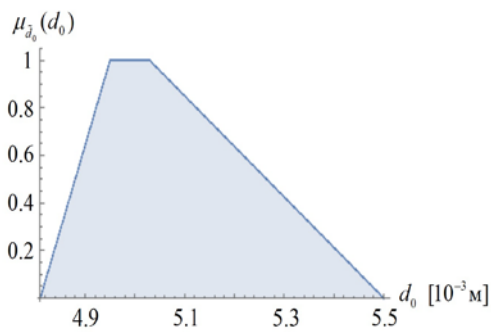


Рис. 1. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{d}_0}(d_0)$ .

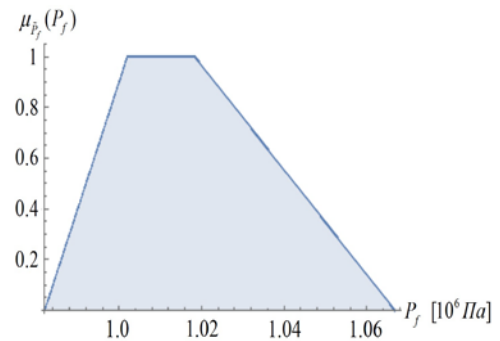


Рис. 2. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{P}_f}(P_f)$ .

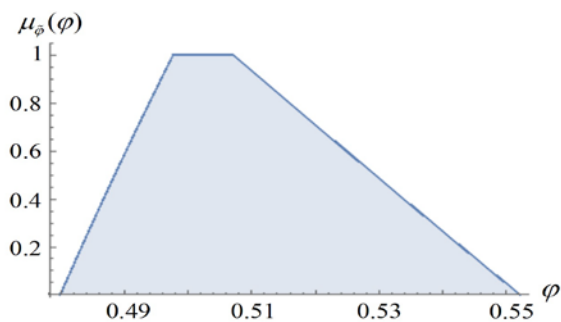


Рис. 3. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{\varphi}}(\varphi)$ .

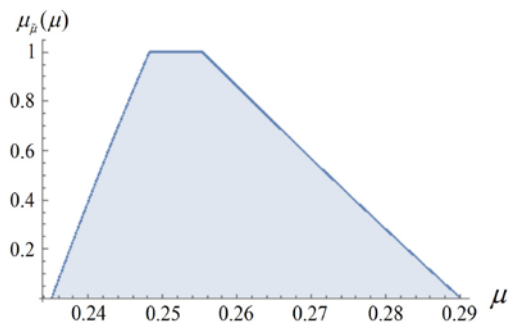


Рис. 4. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{\mu}}(\mu)$ .

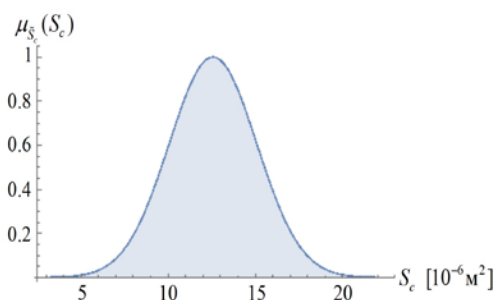


Рис. 5. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{S}_c}(S_c)$ .

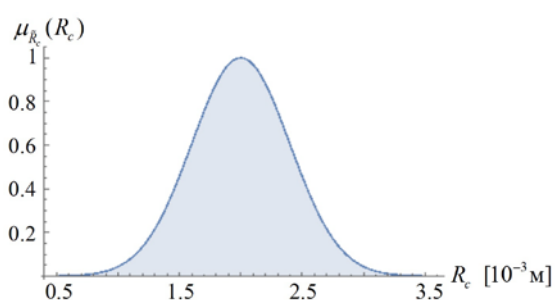


Рис. 6. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{R}_c}(R_c)$ .

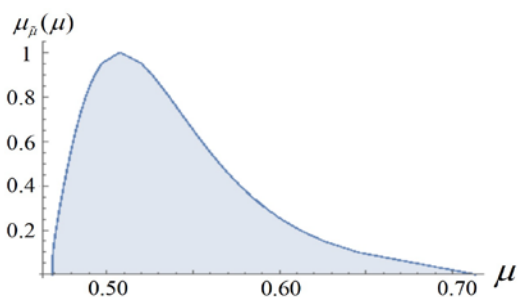


Рис. 7. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{\mu}}(\mu)$ .

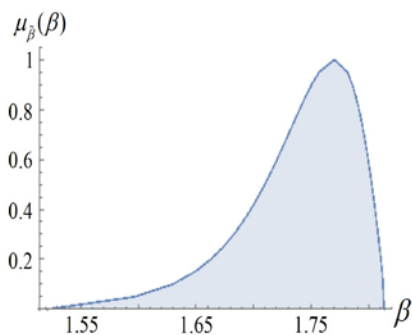


Рис. 8. Функция принадлежности  $\mu_{\tilde{\beta}}(\beta)$ .

Далее во втором разделе работы дана разработка нечетко-множественного метода учета неопределенности экзогенных параметров при моделировании процессов распада струи жидкости в пневматических распылителях.

Разработана методика получения нечетко-множественных оценок в модели движения капель жидкости с поверхности вертикально вращающегося дискового распылителя.

В заключительном подразделе главы представлены исследования по разработке нечетко-множественного метода учета факторов неопределенности при моделировании параметров вращающегося распылителя аэрозольного генератора

Применительно к моделям пневматических распылителей, вертикально вращающегося дискового распылителя и модели вращающегося распылителя аэрозольного генератора разработаны и для отдельных рассматриваемых случаев реализованы вычислительные алгоритмы получения количественных характеристик анализируемых нечетко-множественных оценок для характеристик функционирования технических систем распыления и параметров распыленных потоков.

**Третья глава работы** посвящена проблемам анализа нечетких моделей теплообмена высокотемпературных поверхностей с двухфазными потоками.

В рамках осуществленных исследований получены нечетко-множественные, учитывающие разбросы в значениях экзогенных параметров оценки показателей неопределенности некоторых параметров моделирования процессов двухфазного смесеобразования. В частности, с учетом разбросов экзогенных параметров получено нечетко-интервальное представление  $\tilde{u}_p$  начальной осевой скорости основных капель в формируемом при помощи форсуночного распыления двухфазном газожидкостном потоке, имеющее структуру

$$\begin{aligned} \tilde{u}_p = (u_{p1}, u_{p2}, u_{p3}, u_{p4}) = & ((4/\pi)m_{ж1}/(\mu_{ф4}\rho_{ж4}d_{ф4}^2), (4/\pi)m_{ж2}/(\mu_{ф3}\rho_{ж3}d_{ф3}^2), \\ & (4/\pi)m_{ж3}/(\mu_{ф2}\rho_{ж2}d_{ф2}^2), (4/\pi)m_{ж4}/(\mu_{ф1}\rho_{ж1}d_{ф1}^2)); \\ \tilde{d}_\phi = (d_{\phi1}, d_{\phi2}, d_{\phi3}, d_{\phi4}), \tilde{m}_ж = & (m_{ж1}, m_{ж2}, m_{ж3}, m_{ж4}), \tilde{\mu}_\phi = (\mu_{\phi1}, \mu_{\phi2}, \mu_{\phi3}, \mu_{\phi4}), \\ \tilde{\rho}_ж = & (\rho_{ж1}, \rho_{ж2}, \rho_{ж3}, \rho_{ж4}). \end{aligned} \quad (3.15)$$

Получены нечетко-множественные оценки параметров объемно-поверхностного диаметра капель в распыляемой двухфазной газо-жидкостной смеси, имеющие в рассматриваемых случаях при учете свойств знакоопределенности частных производных по аргументам детерминистических функциональных отображений альтернативный вид

$$\tilde{d}_p = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{d}_{p\alpha}, \bar{d}_{p\alpha}] \quad \text{с} \quad \underline{d}_{p\alpha} = 31500 \underline{\mu}_{ж\alpha}^{0,2} (\bar{\rho}_{ж\alpha} \bar{u}_{p\alpha})^{-1}, \bar{d}_{p\alpha} = 31500 \bar{\mu}_{ж\alpha}^{-0,2} (\underline{\rho}_{ж\alpha} \underline{u}_{p\alpha})^{-1};$$

$$\text{либо} \quad \underline{d}_{p\alpha} = 4,4 \underline{\sigma}_\alpha^{0,6} \underline{\mu}_{ж\alpha}^{0,16} \underline{m}_{ж\alpha}^{0,22} (\bar{\rho}_{ж\alpha} \Delta p_{\phi\alpha})^{-0,16} (\bar{\rho}_{ж\alpha} \Delta p_{\phi\alpha})^{-0,22})^{-1}, \bar{d}_{p\alpha} = 4,4 \bar{\sigma}_\alpha^{0,6} \bar{\mu}_{ж\alpha}^{-0,16} (\underline{\rho}_{ж\alpha} \Delta p_{\phi\alpha})^{0,16} (\underline{\rho}_{ж\alpha} \Delta p_{\phi\alpha})^{0,22})^{-1}.$$

Осуществлен синтез нечетких математических моделей термостабилизации за счет эффектов теплообмена при внешнем продольном безотрывном обтекании плоской высокотемпературной поверхности ламинарным тонкодисперсным двухфазным газочапельным потоком, а также реализована разработка алгоритмов исследования этих моделей. Разработанные методики также базируются на результатах работ, в которых указанные теплообменные процессы рассматриваются в рамках соответствующих детерминистических моделей. В частности, с использованием представления коэффициента теплоотдачи к жидкостной капельной фазе двухфазного потока в форме  $\alpha_k = F_\alpha(b, \lambda_r, \delta_n) = \lambda_r b (1 + \delta_n b)^{-1}$  и с учетом свойств  $\partial \alpha_k / \partial \lambda_r > 0$ ,  $\partial \alpha_k / \partial \delta_n < 0$ , сформирована нечетко-множественная оценка  $\tilde{\alpha}_k$  со структурой

$$\tilde{\alpha}_k = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\alpha}_{k\alpha}, \bar{\alpha}_{k\alpha}], \quad \underline{\alpha}_{k\alpha} = \inf_{b \in [\underline{b}_\alpha, \bar{b}_\alpha]} F_\alpha(b, \underline{\lambda}_{r\alpha}, \bar{\delta}_{n\alpha}), \quad \bar{\alpha}_{k\alpha} = \sup_{b \in [\underline{b}_\alpha, \bar{b}_\alpha]} F_\alpha(b, \bar{\lambda}_{r\alpha}, \underline{\delta}_{n\alpha}),$$

$$\underline{\lambda}_{r\alpha} = (1 - \alpha)\lambda_{r1} + \alpha\lambda_{r2}, \quad \bar{\lambda}_{r\alpha} = \alpha\lambda_{r3} + (1 - \alpha)\lambda_{r4};$$

$$\tilde{b} = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{b}_\alpha, \bar{b}_\alpha], \quad \underline{b}_\alpha = 3.46 \bar{d}_{k\alpha}^{-1} (\underline{\rho}_{g\alpha} \underline{d}_\alpha / \bar{\rho}_{k\alpha})^{1/2}, \quad \bar{b}_\alpha = 3.46 \underline{d}_{k\alpha}^{-1} (\bar{\rho}_{g\alpha} \bar{d}_\alpha / \underline{\rho}_{k\alpha})^{1/2}.$$

Получена также нечетко-множественная оценка для определяемого в детерминистической версии модели соотношением

$$\delta_n = b^{-1} [(2\lambda_n \mathcal{G}_0 b^2 \tau r^{-1} d^{-1} \rho_n^{-1} + 1)^{1/2} - 1],$$

параметра толщины  $\delta_n$  газопарового однофазного подслоя у обтекаемой высокотемпературной поверхности, имеющая структуру

$$\tilde{\delta}_n = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\delta}_{n\alpha}, \bar{\delta}_{n\alpha}],$$

$$\underline{\delta}_{n\alpha} = \inf_{b \in [\underline{b}_\alpha, \bar{b}_\alpha]} F_\delta(b, \underline{\lambda}_{n\alpha}, \underline{\mathcal{G}}_{0\alpha}, \underline{\tau}_\alpha, \bar{r}_\alpha, \bar{d}_\alpha, \bar{\rho}_{n\alpha}), \quad \bar{\delta}_{n\alpha} = \sup_{b \in [\underline{b}_\alpha, \bar{b}_\alpha]} F_\delta(b, \bar{\lambda}_{n\alpha}, \bar{\mathcal{G}}_{0\alpha}, \bar{\tau}_\alpha, \bar{r}_\alpha, \underline{d}_\alpha, \underline{\rho}_{n\alpha});$$

$$\underline{\lambda}_{n\alpha} = (1 - \alpha)\lambda_{n1} + \alpha\lambda_{n2}, \quad \bar{\lambda}_{n\alpha} = \alpha\lambda_{n3} + (1 - \alpha)\lambda_{n4}; \dots \underline{\rho}_{n\alpha} = (1 - \alpha)\rho_{n1} + \alpha\rho_{n2}, \quad \bar{\rho}_{n\alpha} = \alpha\rho_{n3} + (1 - \alpha)\rho_{n4},$$

а также для целого ряда других характеристик рассматриваемого процесса.

В заключительном подразделе третьей главы осуществляется исследование нечетко-множественной модели теплообмена при течении двухфазных потоков в цилиндрических высокотемпературных каналах. В частности, наряду с другими полученными нечетко-множественными оценками, для описываемого в детерминистической версии модели распределения температур  $\theta(R)$  в двухфазном потоке вдоль радиуса  $R$  сечения канала

$$\theta(R) = F_\theta(R, \theta_r, b, R_*) = \theta_r [J_0(ibR) / J_0(ibR_*)],$$

построено параметрическое нечетко-множественное описание, имеющее форму

$$\tilde{\theta}(R) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\theta}(R)_\alpha, \overline{\theta}(R)_\alpha], \quad \underline{\theta}(R)_\alpha = \inf_{\substack{R_* \in [R_{*\alpha}, \overline{R}_{*\alpha}] \\ b \in [b_\alpha, \overline{b}_\alpha]}} F_\theta(R, \underline{\theta}_{r\alpha}, b, R_*), \quad \overline{\theta}(R)_\alpha = \sup_{\substack{R_* \in [R_{*\alpha}, \overline{R}_{*\alpha}] \\ b \in [b_\alpha, \overline{b}_\alpha]}} F_\theta(R, \overline{\theta}_{r\alpha}, b, R_*);$$

$$\tilde{\theta}_r = (\theta_{r1}, \theta_{r2}, \theta_{r3}, \theta_{r4}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\theta}_{r\alpha}, \overline{\theta}_{r\alpha}], \quad \underline{\theta}_{r\alpha} = (1-\alpha)\theta_{r1} + \alpha\theta_{r2}, \quad \overline{\theta}_{r\alpha} = \alpha\theta_{r3} + (1-\alpha)\theta_{r4};$$

$$\tilde{R}_* = (R_{*1}, R_{*2}, R_{*3}, R_{*4}) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [R_{*\alpha}, \overline{R}_{*\alpha}], \quad R_{*\alpha} = (1-\alpha)R_{*1} + \alpha R_{*2}, \quad \overline{R}_{*\alpha} = \alpha R_{*3} + (1-\alpha)R_{*4}.$$

Разработаны и для отдельных рассматриваемых случаев реализованы вычислительные алгоритмы получения количественных характеристик анализируемых нечетко-множественных оценок процессов теплообмена.

**В четвертой главе работы** представлены результаты разработки нечетко-множественных методов и алгоритмов исследования задач учета факторов неопределенности в некоторых моделях активной и пассивной тепловой защиты.

Так, разработаны нечетко-множественные алгоритмы анализа расчетных соотношений в прикладных моделях тепломассобмена технических систем пористого охлаждения, включающие, в частности, в рамках применяемой общей концепции описания обладающих разбросами значений экзогенных параметров динамической вязкости  $\mu$ , плотности  $\rho$ , давлений  $P_k, P_e$  и скоростей  $V_1, V_2$  обтекающего и вдуваемого через пористый каркас потоков газа трапециевидальными нечеткими интервалами  $\tilde{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4)$ ,  $\tilde{\rho} = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4), \dots, \tilde{P}_{e1} = (P_{e11}, P_{e12}, P_{e13}, P_{e14}), \dots, \tilde{V}_1 = (V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{14}), \tilde{V}_2 = (V_{21}, V_{22}, V_{23}, V_{24})$ , получение в случае  $V_1 > V_2$  представлений для нечетко-множественного вязкостного  $\tilde{\alpha}$  и инерционного  $\tilde{\beta}$  коэффициентов движения газа через пористый фильтрующий каркас в виде  $\tilde{\alpha} = \bigcup_{\alpha_m \in \Xi_\alpha} [\underline{\alpha}_\alpha, \overline{\alpha}_\alpha], \tilde{\beta} = \bigcup_{\alpha_m \in \Xi_\alpha} [\underline{\beta}_\alpha, \overline{\beta}_\alpha]$ , где

$$\underline{\alpha}_\alpha = \inf_{\substack{\zeta \in [\underline{\zeta}_\alpha, \overline{\zeta}_\alpha] \\ V_1 \in [V_{1\alpha}, \overline{V}_{1\alpha}] \\ V_2 \in [V_{2\alpha}, \overline{V}_{2\alpha}]}} \zeta [\underline{\tau}_{2\alpha} V_1^2 - \overline{\tau}_{1\alpha} V_2^2] [V_1 V_2 (V_1 - V_2)]^{-1}, \quad \overline{\alpha}_\alpha = \sup_{\substack{\zeta \in [\underline{\zeta}_\alpha, \overline{\zeta}_\alpha] \\ V_1 \in [V_{1\alpha}, \overline{V}_{1\alpha}] \\ V_2 \in [V_{2\alpha}, \overline{V}_{2\alpha}]}} \zeta [\overline{\tau}_{2\alpha} V_1^2 - \underline{\tau}_{1\alpha} V_2^2] [V_1 V_2 (V_1 - V_2)]^{-1},$$

$$\underline{\beta}_\alpha = \inf_{\substack{\zeta \in [\underline{\zeta}_\alpha, \overline{\zeta}_\alpha] \\ V_1 \in [V_{1\alpha}, \overline{V}_{1\alpha}] \\ V_2 \in [V_{2\alpha}, \overline{V}_{2\alpha}]}} \xi [\underline{\tau}_{2\alpha} V_1 - \overline{\tau}_{1\alpha} V_2] [V_1 V_2 (V_1 - V_2)]^{-1}, \quad \overline{\beta}_\alpha = \sup_{\substack{\zeta \in [\underline{\zeta}_\alpha, \overline{\zeta}_\alpha] \\ V_1 \in [V_{1\alpha}, \overline{V}_{1\alpha}] \\ V_2 \in [V_{2\alpha}, \overline{V}_{2\alpha}]}} \xi [\overline{\tau}_{2\alpha} V_1 - \underline{\tau}_{1\alpha} V_2] [V_1 V_2 (V_1 - V_2)]^{-1};$$

$$\tilde{\zeta} = (\Pi_1 / (2R\mu_4 h_4 \rho_4), \Pi_2 / (2R\mu_3 h_3 \rho_3), \Pi_3 / (2R\mu_2 h_2 \rho_2), \Pi_4 / (2R\mu_1 h_1 \rho_1)) = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4),$$

$$\tilde{\tau}_1 = (P_{k11}^2 - P_{e11}^2, P_{k12}^2 - P_{e12}^2, P_{k13}^2 - P_{e13}^2, P_{k14}^2 - P_{e14}^2) = (\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{14}),$$

$$\tilde{\tau}_2 = (P_{k21}^2 - P_{e21}^2, P_{k22}^2 - P_{e22}^2, P_{k23}^2 - P_{e23}^2, P_{k24}^2 - P_{e24}^2) = (\tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{23}, \tau_{24}),$$

$$\begin{aligned}\tilde{\zeta} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\zeta}_\alpha, \bar{\zeta}_\alpha], \quad \underline{\zeta}_\alpha = (1-\alpha)\zeta_1 + \alpha\zeta_2, \quad \bar{\zeta}_\alpha = \alpha\zeta_3 + (1-\alpha)\zeta_4, \\ \tilde{\xi} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\xi}_\alpha, \bar{\xi}_\alpha], \quad \underline{\xi}_\alpha = (1-\alpha)\xi_1 + \alpha\xi_2, \quad \bar{\xi}_\alpha = \alpha\xi_3 + (1-\alpha)\xi_4, \\ \tilde{\tau}_1 &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\tau}_{1\alpha}, \bar{\tau}_{1\alpha}], \quad \underline{\tau}_{1\alpha} = (1-\alpha)\tau_{11} + \alpha\tau_{12}, \quad \bar{\tau}_{1\alpha} = \alpha\tau_{13} + (1-\alpha)\tau_{14}, \\ \tilde{\tau}_2 &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\tau}_{2\alpha}, \bar{\tau}_{2\alpha}], \quad \underline{\tau}_{2\alpha} = (1-\alpha)\tau_{21} + \alpha\tau_{22}, \quad \bar{\tau}_{2\alpha} = \alpha\tau_{23} + (1-\alpha)\tau_{24}.\end{aligned}$$

Также получены нечетко-множественные описания для критического значения параметра  $B^*$  вдувания через пористую поверхность и нечетко-интервальные версии аппроксимационных соотношений теплового обмена в рассматриваемых процессах вида

$$\tilde{\Psi} = \bigcup_{\alpha_m \in \Xi_\alpha} [1 - 0,19(\bar{M}_{e\alpha} / \underline{M}_{w\alpha})^{0,35} \bar{B}_\alpha, 1 - 0,19(\underline{M}_{e\alpha} / \bar{M}_{w\alpha})^{0,35} \underline{B}_\alpha], \dots,$$

$$\tilde{\Psi} = \bigcup_{\alpha_m \in \Xi_\alpha} [\exp[-0,37(\bar{M}_{e\alpha} / \underline{M}_{w\alpha})^{-0,7} \bar{B}_\alpha], \exp[-0,37(\underline{M}_{e\alpha} / \bar{M}_{w\alpha})^{-0,7} \underline{B}_\alpha]],$$

в предположении об обеспечивающей достаточную полноту получаемых оценок замене континуального множества  $\alpha \in [0, 1]$  дискретным подмножеством  $\{\alpha_m\}_{m=1}^{M_\alpha} = \Xi_\alpha$ ,  $\Xi_\alpha \subset [0, 1]$ .

Получены нечетко-множественные оценки характеристик теплообмена пульсирующего потока с вибрирующей перфорированной стенкой при учете вдувания газа-охлаждителя.

В двух последующих разделах главы рассматриваются нечетко-множественные подходы к учету факторов неопределенности в расчетах тепловых экранов из произвольного числа однотипных теплоотражающих слоев и нечетко-множественный анализ модели двухслойных экранов с теплоотражающими и теплоизолирующими слоями. В рамках данных исследований, в частности, получены нечетко-множественные представления для характеристик эффективности защитных качеств тепловых экранов в виде показателя степени экранирования  $\mu$ , показателя кратность ослабления теплового потока  $m$ , коэффициента эффективности экранирования  $\eta$ , модели расчета которых содержат описываемые в условиях наличия разбросов исходных значений нечеткими трапецеидальными интервалами экзогенные параметры температуры излучающей поверхности  $T_1$ ; температуры экрана  $T_2$ ;  $\varepsilon_{1,2}$  приведенного показателя степени черноты в системе «поверхность источника излучения 1 со степенью черноты  $\varepsilon_1$  – поверхность приемника излучения 2 со степенью черноты  $\varepsilon_2$ » и имеют в детерминистической версии модели для многослойного экрана вид

$$\begin{aligned}\mu &= F_\mu(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}, T_1, T_2) = T_1(T_1^4 - (T_1^4 - T_2^4)(\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_{3n}^{-1} + 2\sum_{j=1}^{n-1} \varepsilon_{3j}^{-1} - n) \cdot \\ &\cdot (\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} + 2\sum_{i=1}^n \varepsilon_{3i}^{-1} - (n+1))^{-1/4}, \quad m = F_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) = 1 + (2\sum_{j=1}^n \varepsilon_{3j}^{-1} - n)(\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1)^{-1}, \\ \eta &= F_\eta(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) = (2\sum_{j=1}^n \varepsilon_{3j}^{-1} - n)(\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} + 2\sum_{i=1}^n \varepsilon_{3i}^{-1} - (n+1))^{-1}.\end{aligned}$$

В частности, с учетом с учетом получаемых для всей области определения аргументов  $F_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i})$ ,  $F_\eta(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i})$  свойств

$$\begin{aligned} \partial F_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) / \partial \varepsilon_1 > 0, \quad \partial F_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) / \partial \varepsilon_2 > 0, \quad \partial F_m(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) / \partial \varepsilon_{3i} < 0; \\ \partial F_\eta(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) / \partial \varepsilon_1 > 0, \quad \partial F_\eta(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) / \partial \varepsilon_2 > 0, \quad \partial F_\eta(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{3i}) / \partial \varepsilon_{3i} < 0; \end{aligned}$$

искомые нечетко-множественные оценки имеют структуру

$$\begin{aligned} \tilde{m} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [F_{m\alpha}, \bar{F}_{m\alpha}], \quad F_{m\alpha} = F_m(\underline{\varepsilon}_{1\alpha}, \underline{\varepsilon}_{2\alpha}, \bar{\varepsilon}_{3i\alpha}), \quad \bar{F}_{m\alpha} = F_m(\bar{\varepsilon}_{1\alpha}, \bar{\varepsilon}_{2\alpha}, \underline{\varepsilon}_{3i\alpha}); \\ \tilde{\eta} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [F_{\eta\alpha}, \bar{F}_{\eta\alpha}], \quad F_{\eta\alpha} = F_\eta(\underline{\varepsilon}_{1\alpha}, \bar{\varepsilon}_{2\alpha}, \bar{\varepsilon}_{3i\alpha}), \quad \bar{F}_{\eta\alpha} = F_\eta(\bar{\varepsilon}_{1\alpha}, \bar{\varepsilon}_{2\alpha}, \underline{\varepsilon}_{3i\alpha}). \\ \tilde{\varepsilon}_{\alpha j} &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\varepsilon}_{\alpha j}, \bar{\varepsilon}_{\alpha j}], \quad \underline{\varepsilon}_{\alpha j} = (1 - \alpha)\varepsilon_{j1} + \alpha\varepsilon_{j2}, \quad \bar{\varepsilon}_{\alpha j} = \alpha\varepsilon_{j3} + (1 - \alpha)\varepsilon_{j4}; \\ \tilde{\varepsilon}_j &= \bigcup_{\alpha \in [0,1]} [\underline{\varepsilon}_{j\alpha}, \bar{\varepsilon}_{j\alpha}], \quad \underline{\varepsilon}_{j\alpha} = (1 - \alpha)\varepsilon_{j1} + \alpha\varepsilon_{j2}, \quad \bar{\varepsilon}_{j\alpha} = \alpha\varepsilon_{j3} + (1 - \alpha)\varepsilon_{j4}. \end{aligned}$$

Разработаны и для отдельных рассматриваемых случаев реализованы вычислительные алгоритмы получения количественных характеристик анализируемых нечетко-множественных оценок показателей эффективности теплового экранирования от влияния высокотемпературных поверхностей.

**Пятая глава работы** содержит результаты экспериментального анализа параметров функционирования технической системы термостабилизации высоконагруженных элементов термоядерных энергетических систем с использованием устройств жидкостно-капельного охлаждения на базе разработанной методики и при учете факторов неопределенности в планировании эксперимента.

В первом подразделе главы проанализированы современные научно-технические решения, касающиеся возможностей применения в качестве материалов обращенных к плазме реактора конструктивных PFC-компонентов капиллярно-пористых структур, насыщенных жидким литием и имеющих свойство самовосстанавливаться в ходе длительной эксплуатации вплоть до стационарного режима работы, и в качестве таких подлежащих охлаждению компонентов рассматривается лимитер токамака. В качестве учитывающего специфику функционирования лимитера инновационного подхода к решению проблемы его охлаждения предложено использование мелкодисперсных смесей воды и газа с низкими значениями давления в системе охлаждения, что позволяет за счет испарения мельчайших капель воды из струи спрея, омывающего высоконагретую поверхность, понижать ее температуру до приемлемой величины ( $2500^0$  С). При использовании данного подхода в принципе обеспечиваются требования функционирования системы при низком давлении с регулируемым удельным объемным содержанием воды в спрее, не превышающем 10% и конструктивная простота системы, изготавливаемой из обычных нержавеющей сталей аустенитного класса типа X18H10T. Указанные соображения определили содержание экспериментальных исследований процесса охлаждения с моделированием одностороннего нагрева лимитера рабочего участка на базе использования диспергированного потока газа и дистиллированной воды, включающих изучение характеристик факела распыла газовой среды; оценку общей оценки эффективности данного метода термостабилизации для рассматриваемой модели лимитера. В процессе анализа оценивались индикативные показатели степени влияния разбросов экспериментальных значений исходных параметров на основные рабочие характеристики термостабилизации с применением предложенных методов нечетко-множественного моделирования.

Далее представлены описание экспериментальной установки, рабочих участков и методика проведения экспериментов применительно к конструкции с описываемой на рис. 9 конфигурацией и при использовании созданного макета газового распылителя (рис. 10).

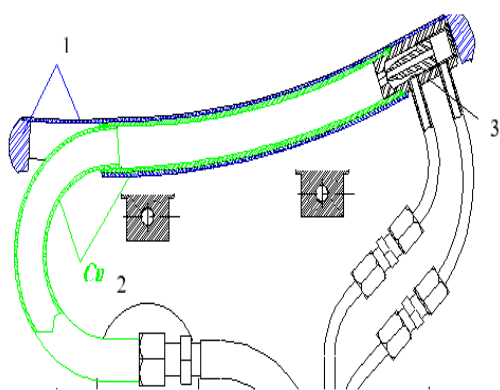


Рис.9. Схема приемного элемента лимитера  
(1 - принимающая поверхность;  
2 - канал охлаждения;  
3 - генератор газ-водяного спрея).



Рис. 10. Макет генератора  
газо-водяного спрея.

Установкой для реализации исследований являлся экспериментальный теплофизический стенд кафедры общей физики и ядерного синтеза ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» по исследованию гидродинамики и теплообмена недогретого потока теплоносителя, в основу схемы функционирования которого положено моделирование условий нагрева и теплообмена, имеющих место в теплосъемных элементах приемников мощных пучков энергии в инжекторах быстрых нейтральных атомов термоядерных реакторов и установок. Дана характеристика функционального назначения и ведущих рабочих параметров пяти основных узлов стенда, к числу которых относятся система вакуумной откачки для обеспечения давления устойчивой работы электронной пушки; система нагрева рабочего участка на базе электронно-лучевого агрегата ЭЛА 60/15Т; гидравлический контур, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя и позволяющий устанавливать и регулировать заданные гидравлические и температурные параметры теплоносителя на входе в рабочий участок; система сбора и обработки информации, обеспечивающая преобразование сигналов, визуальное изображение параметров эксперимента в режиме реального времени, оперативную обработку основных режимных параметров гидродинамических и тепловых процессов, включая необходимые параметры циркулирующей через рабочий участок жидкости – давление и расход. При проведении экспериментальных исследований режимными параметрами по гидравлическому контуру являлись давление теплоносителя в контуре, давление на входе и выходе из рабочего участка, расход жидкости, её температура на входе и выходе из рабочего участка. Разница температуры теплоносителя между выходом и входом гидравлического контура измеряется также многоспайной дифференциальной термобатареей. Основным элементом генератора спрея является инжектор – форсунка, на которую по патрубкам подаются под определенным давлением воздух и дистиллированная вода с возможностью в зависимости от геометрии форсунки и объемного расхода поступающих на вход компонентов в широких пределах регулировать параметры получаемого потока (факела).

На основе предложенной детализированной методики проведения эксперимента на рабочем участке с медной мишенью осуществлен ряд учитывающих специфику областей задания рабочих параметров серий опытов. В результате экспериментальных исследований установлено типичное радиальное распределение температуры в медной стенке мишени, которое в сечении «лобовой» точки близко к линейному. Описаны зависимость температуры мишени как функции расхода воздуха при двух значениях расхода воды и одном значении подводимой мощности (рис. 11), а также распределение температуры стенки мишени как функции расхода воздуха (рис. 12). Экспериментально

установлено, что для любого расхода воды и подводимой мощности с ростом расхода воздуха температура мишени уменьшается на 100 и более градусов. Для всех исследованных режимов при предельном значении расхода воздуха равного  $G_{возд} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  зависимость  $T(G_{возд})$  выходит на «плато», т.е. при  $G_{возд} > G_{воды}$  температура мишени не изменяется при неизменных  $G_{воды}$  и подводимой мощности.

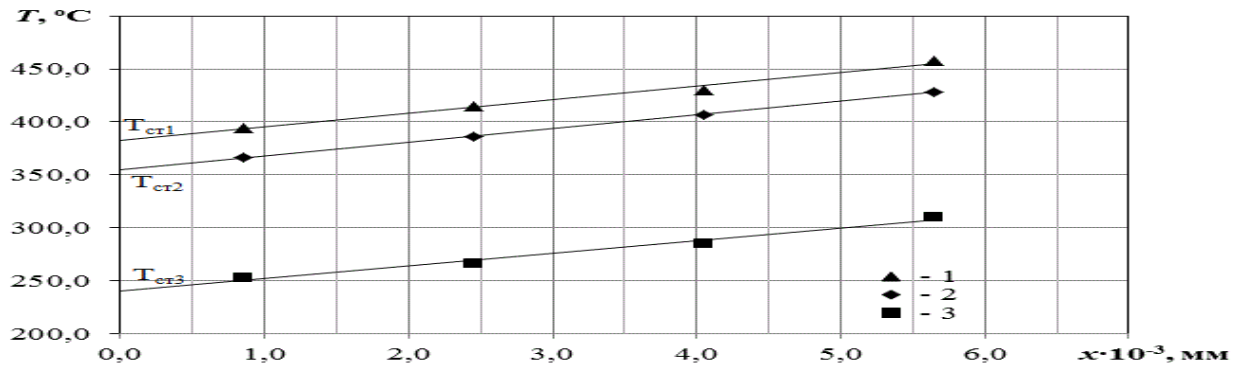


Рис. 11. Распределение температуры стенки по толщине рабочего участка в различных режимах охлаждения ( $p_{воды} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $p_{возд} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ): 1 –  $g=0$ ; 2 –  $g=0,027$ ; 3 –  $g=0,037$ .

Описано состояние системы, которое характеризуется наиболее интенсивным теплосъемом. Получены экспериментальные данные о зависимости коэффициента теплоотдачи от удельного расхода газа в диспергированном газожидкостном факеле распыла при фиксированном расходе воды.

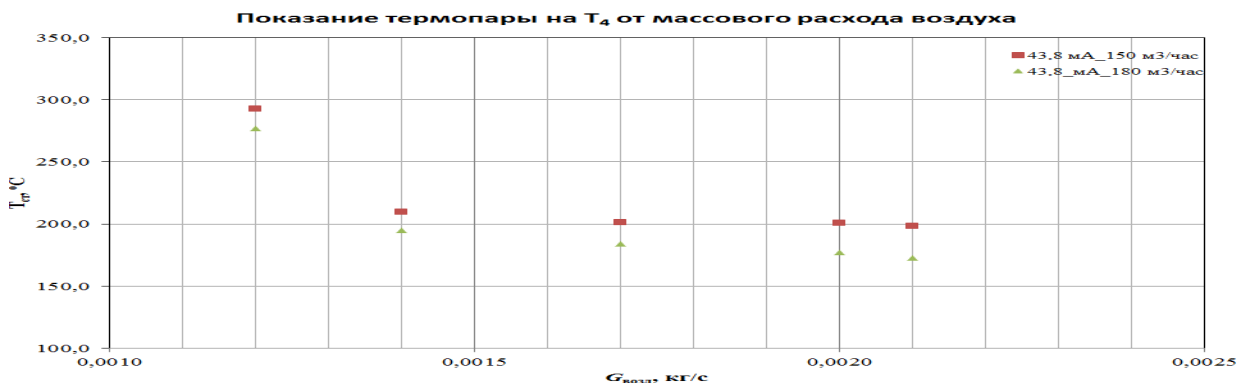


Рис. 12. Распределение температуры стенки мишени как функция расхода воздуха при различных значениях расхода воды.

Таким образом, экспериментально показано, что установление постоянного значения –  $T_{стаб}$  осуществляется при этом же расходе воздуха для всех заданных в экспериментах расходах воды и тепловых нагрузок. Однако с увеличением расхода воды температура стенки мишени  $T_{стаб}$  снижается, а при увеличении подводимой мощности повышается. Анализ полученных результатов показал эффективность данного метода охлаждения и, вместе с тем, обозначил целесообразность продолжения подобных детальных экспериментальных исследований с расширением диапазона плотности теплового потока до  $10 \text{ МВт/м}^2$ ; дальнейшей вариацией расходных характеристик воды и воздуха; исследованием эффективности теплосъема газовой средой, где используется газ, существенно отличающийся по свойствам от воздуха (гелий).



## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В итоге выполненных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований получен ряд важных в научном и прикладном отношении результатов, которые в совокупности являются вкладом в решение актуальной проблемы разработки и применения численно-аналитических нечетко-множественных методов и алгоритмов анализа моделей функционирования технических систем термостабилизации высокотемпературных поверхностей с использованием нагнетаемых газожидкостных потоков и теплового экранирования при учете комплекса факторов неопределенности экзогенных параметров.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. В рамках анализа специфики современных задач в области моделирования технических систем высокотемпературной термостабилизации для ряда инновационных научно-технических отраслей дана характеристика методов теории нечетких множеств как эффективного инструмента их решения при наличии разбросов значений исходных физико-механических, геометрических и технологических параметров моделирования. Представлена концепция исследования рассматриваемых моделей на основе расширения областей определения расчетных соотношений в их детерминистических версиях на аргументы различных нечетко-множественных типов путем фрагментированного поэтапного применения аппарата нечеткой арифметики, применения модифицированной альфа-уровневой версии эвристического принципа обобщения, использования нечетко-множественных модификаций отдельных численных методов и приемов снижения нечеткости результатов многоэтапного применения нечетко-множественных вычислений.

2. Осуществлена разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей определения параметров функционирования технических систем распыления жидкостных сред при формировании дисперсных газожидкостных потоков для применения в технологических процессах термостабилизации высокотемпературных поверхностей, включая нечетко-множественные модели определения параметров функционирования центробежных и центробежно-струйных форсунок, аэрозольных генераторов с вращающимися распылителями, пневматических и вертикально-вращающихся дисковых распылителей.

3. Осуществлена разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей процессов двухфазного смесеобразования и эволюции аэрозолей.

4. Реализована разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей функционирования и оптимизации процессов теплообмена при безотрывном продольном обтекании плоской высокотемпературной поверхности двухфазным тонкодисперсным ламинарным газожидкостным потоком, а также моделей теплообмена при течении двухфазного потока в цилиндрическом высокотемпературном канале.

5. Реализована разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей оценивания ряда параметров процессов теплообмена в системах пористого охлаждения с использованием обтекающих и вдуваемых газовых потоков

6. Осуществлена разработка и алгоритмическая реализация методов исследования нечетко-множественных моделей многослойных тепловых экранов.

7. С применением методов учета факторов неопределенности при планировании опытов реализован экспериментальный анализ параметров функционирования технической системы термостабилизации элементов экспериментальных термоядерных энергетических систем с использованием устройств жидкостно-капельного охлаждения.

8. Разработанные методы и алгоритмы вносят вклад в решение проблемы повышения информативности и адекватности предпроектных расчетов и прогнозирования

достижимых конструктивных свойств технических систем термостабилизации высокотемпературных поверхностей при учете факторов неопределенности экзогенных параметров моделирования для ряда инновационных научно-технических направлений.

9. Результаты диссертационной работы получили применение и внедрены на практике в ряде предприятий и институтов различных стран, в частности в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах ВинИТ Института технологии Вьетнама, в опытно-конструкторских работах научно-производственных компаний технологического сектора Вьетнама а также рекомендованы для использования в учебном процессе при изложении лекционного материала учебных курсов «Системное проектирование» в университетах СРВ.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Сторожев С.В., Болнокин В.Е., Мутин Д.И., Зыонг Минь Хай, Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг. Нечеткие оценки для собственных частот поперечных колебаний однородных стержней // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 4(78). – С. 24-28.
2. Сторожев С.В., Болнокин В.Е., Мутин Д.И., Зыонг Минь Хай, Чан Ба Ле Хоанг. Анализ нечеткой модели концентрации механических напряжений в тонких пластинах с квадратными отверстиями неопределенной угловой кривизны // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 4(78). – С. 47-50.

### **В изданиях, включенных в НБД MathSciNet:**

3. Болнокин В.Е., Сторожев В.И., Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг Нечеткие оценки в исследованиях частот резонансных изгибных колебаний закрепленных в угловых точках прямоугольных композитных пластин // Механика твердого тела. – 2019. – Вып. 49. – С. 114-124.
4. Болнокин В.Е., Сторожев С.В., Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг, Зыонг Минь Хай Алгоритм учета факторов неопределенности экзогенных параметров в модели колебаний тонких многослойных графеновых нанопластин // Механика твердого тела. – 2019. – Вып. 49. – С. 135-143.

### **В монографии:**

5. Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг, Сторожев С.В. Исследование моделей высокотемпературной термостабилизации с нечеткими параметрами: Монография. – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2019. – 216 с.

### **В других изданиях:**

6. Прийменко С.А., Сторожев С.В., Шалдырван В.А., Чан Ба Ле Хоанг. Методика анализа факторов неопределенности в модели резонансных колебаний трехслойных композитных цилиндрических панелей // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. Естественные науки. – 2019. – № 3–4. – С. 88-94.
7. Болнокин В.Е., Пачева М.Н., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай, Чан Ба Ле Хоанг. Методика анализа модели плоского гидроакустического экрана с периодической системой внутренних туннельных цилиндрических полостей // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2018. – № 1–2 (62–63). – С. 3-15.
8. Болнокин В.Е., Пачева М.Н., Сторожев В.И., Зыонг Минь Хай, Чан Ба Ле Хоанг. Анализ модели плоского гидроакустического экрана с периодической системой внутренних туннельных радиально-неоднородных цилиндрических включений. // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2018. – № 3–4 (64–65). – С. 3-16.

9. Жарков М.Ю., Соколов Д.О., Чан Б.Л.Х., Варава А.Н., Люблинский И.Е. Инновационный способ решения проблем охлаждения и термостабилизации элементов токамаков с капиллярно-пористыми структурами // Тезисы докладов Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» и XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (22–26 мая 2017 г., Санкт-Петербург): В 2 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 183-184.
10. Сторожев С.В., Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг. Нечетко-множественная методика оценивания некоторых характеристик функционирования центробежно-струйных форсунок в технических системах термостабилизации // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2019. – № 4. – С. 42-49.
11. Сторожев С.В., Нгуен Куок Ши, Чан Ба Ле Хоанг. Учет неопределенности экзогенных параметров при моделировании процессов распада струи жидкости в пневматических распылителях // Журнал теоретической и прикладной механики. – 2019. – № 1–2 (66–67). – С. 3-10.

Печатается по решению Диссертационного Совета Д 217.047.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 10.01.2020.