МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Caff

Савельева Юлия Олеговна

### АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА

Специальность: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Лившиц Михаил Юрьевич

Самара - 2021

### оглавление

| Введение  |
|---|
| 1 Анализ проблемы управления температурным состоянием автономного         |
| объекта13   |
| 1.1 Основные сведения об автономных объектах13                            |
| 1.2 Аналитический обзор современного состояния проблемы управления        |
| температурным состоянием автономного объекта14                            |
| 1.2.1 Методы математического моделирования температурного распределения в |
| несущих конструкциях14  |
| 1.2.2 Особенности математического моделирования теплообмена в системе     |
| жидкостного охлаждения несущей конструкции автономного объекта16          |
| 1.2.3 Особенности управления температурным состоянием автономного         |
| объекта17   |
| 1.2.4 Технические средства обеспечения теплового режима автономных        |
| объектов  |
| 1.3 Техническая постановка задачи диссертационного исследования           |
| 1.4 Выводы по первой главе27  |
| 2 Функционально-ориентированная математическая модель температурного      |
| состояния несущей конструкции   |
| 2.1 Функционально-ориентированная модель температурного распределения в   |
| несущей конструкции в форме теплогидравлической краевой задачи            |
| 2.2 Методика определения температурного распределения несущей             |
| конструкции   |
| 2.3 Аналитическое решение теплогидравлических краевых задач               |
| 2.3.1 Решение краевой задачи воздействия внешних теплоисточников          |
| 2.3.2 Решение краевой задачи теплообмена с окружающей средой с            |
| неоднородным начальным условием46   |
| 2.3.3 Решение краевой задачи жидкостного охлаждения                       |
| 2.4 Функционально-ориентированная модель в форме передаточных функций49   |
| 2.5 Структурная схема объекта управления69                                |
| 2.6 Постановка и решение задачи идентификации объекта управления          |
| 2.7 Выводы по второй главе  |
| 3 Разработка системы автоматического управления тепловым режимом          |
| несущей конструкции   |

3.4 Параметрический синтез локальных систем управления в точках контроля ......95

| 4.6 Выводы по четвертой главе  | 161 |
|--|-----|
| Заключение   | 163 |
| Основные сокращения  | 166 |
| Основные условные обозначения  | 167 |
| Список использованных источников                                       | 173 |
| Приложение А. Акт о внедрении результатов диссертационной работы       | 188 |
| Приложение Б. Справка об использовании результатов кандидатской        |     |
| диссертации  | 189 |
| Приложение В. Справка о внедрении результатов кандидатской диссертации | 190 |
| Приложение Г. Справка об использовании результатов кандидатской        |     |
| диссертации в учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ                         | 191 |

#### **ВВЕДЕНИЕ**

#### Актуальность темы исследования.

Автономные объекты в значительной степени определяют направление развития ведущих промышленных мировых держав. В настоящей работе, не претендуя на исчерпывающее определение, автономными объектами называются мобильные технические устройства, не имеющие на борту управляющего ими экипажа и связанные с окружающей средой не материальными, а информационными потоками. Автономные объекты используются в различных сферах: космической, научной, промышленной, военной, медицинской и многих других.

Эффективность автономного объекта в первую очередь зависит от качества работы размещенных на нем информационно-измерительной и управляющей систем. Жизнеспособность такого мобильного объекта, его ориентация в пространстве и вся собственная обеспечиваются информационножизнедеятельность также измерительными приборами, осуществляющими связь объекта с окружающей средой. Стабильность работы информационно-измерительной И точность аппаратуры автономного объекта, функционирующей в экстремальных условиях, зависит от многих факторов: температуры, уровня электромагнитного излучения, погодных условий, химического состава окружающей среды и т.д.

Большую долю в общую погрешность информационно-измерительных систем автономных объектов вносят температурные возмущения. Их влияние проявляется в нескольких направлениях:

Во-первых, все информационно-измерительные приборы сертифицированы для работы в определенном температурном диапазоне и за пределами этого диапазона не только увеличивается их погрешность, но и не гарантируется работоспособность.

Во-вторых, в силу кривизны поверхности зеркал и линз оптической контрольноизмерительной аппаратуры, отклонение средней температуры от регламентируемой в отсеках ее расположения приводит к аберрации оптической системы из-за неравномерной термодеформации этих поверхностей.

В-третьих, существенную составляющую общей погрешности измерений составляет термодеформационная погрешность оптических измерений, причиной которой служит термодеформация несущих конструкций информационно-

измерительных систем из-за нестабильного и неравномерного температурного распределения в них. Температурные поля несущих конструкций неравномерны и нестабильны из-за нестационарных тепловыделений информационно-измерительных приборов, из-за неравномерного воздействия на конструкцию внешней среды, например, излучения планет и звезд через соответствующие люки космических аппаратов и т.п. Малые угловые термодеформации несущих конструкций при больших расстояниях до сканируемого оптической системой объекта приводят к большим линейным отклонениям оптических лучей.

Влияние температурных возмущений приводит не только к недопустимому искажению полезной информации, но и, зачастую, к аварии, утрате автономного объекта или даже к катастрофе, например, из-за ошибки в ориентации. Наиболее тяжелые последствия вызывают искажения оптической информации автономных объектов ракетно-космической и авиационной техники, беспилотных подводных аппаратов, дронов, компонентов систем зондирования земли и планет и т.п.

Для компенсации температурных погрешностей информационно-измерительных систем в автономных объектах применяются пассивные (термоизоляция, терморегулирующее покрытие и т.п.) и активные системы терморегулирования (различного типа нагреватели, системы охлаждения).

В силу принудительного теплообмена, активные системы терморегулирования обеспечивают в широком диапазоне наиболее точную стабилизацию температурного режима автономного объекта. Универсальным путем эффективного обеспечения необходимого теплового режима автономных объектов является комбинированное использование электрических нагревателей и жидкостного охлаждения, однако этот способ требует повышенных энергетических и материальных затрат и достаточно сложной автоматизации.

Поэтому, актуальной является задача создания и математического моделирования автоматической системы обеспечения теплового режима автономного объекта, с требуемой точностью поддерживающей как заданную температуру во всех рабочих зонах автономного объекта, особенно в зонах размещения оптической контрольноизмерительной аппаратуры, так и предотвращающей недопустимую неравномерность температурного распределения температуры в сечениях несущих конструкций,

влияющих на отклонение оптической оси соответствующих приборов информационноизмерительных систем. Эти сечения в диссертации называются ответственными.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационное исследование при моделировании температурных процессов методами математической физики опирается на работы: Г. Карслоу, А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.Я. Арсенина, Г.Н. Дульнева, Г. Джеффриса, Б. Свирлса, Б.М. Будака, А.А. Самарского, А.Д. Полянина, А.В. Лыкова, В.С. Зарубина, П.Н. Вабищевича, М.М. Yovanovich, А.F. Lynch, Behrooz Abbasi Souraki, N. Assareh, M. Omidi, Antonio Campo, Salah Chikh и др.

Задачи идентификации тепловых моделей отражены в работах О.М. Алифанова, А.В. Ненарокомова, Ю.М. Мацевитого, С.В. Резника, Л.А. Коздобы, П.В. Просунцова, J.V. Beck, J. Gullum, K. Miller, N.M. Lazuchenkov, D.N. Lazuchenkov и др.

Проблемы автоматизации и оптимизации систем с распределенными параметрами исследованы в работах: А.Г. Бутковского, А.А. Фельдбаума, Т.К. Сиразетдинова, А.М. Цирлина, В.Я. Ротача, Э.Я. Рапопорта, М.Ю. Лившица, Ю.Э. Плешивцевой, Г.Н. Рогачева, Ю.В. Егорова, А.И. Егорова, В.А. Олейникова, W.H. Ray, H.O. Fattorini, М. Kim, Y. Sakawa и др.

Исследования в области тепло-гидравлических процессов представлены в работах И. Чермака, В. Петерки, И. Заворки, М.А. Михеева, Г.Н. Дульнева, Г.А. Дрейцера, Г. В. Кузнецова, В.К. Мигай, S.W. Chi, M.C. Zaghdoudi, T.W. Moss, W. J. Bowman и др.

Глубокий анализ влияния термодеформации несущей конструкции космического аппарата или ее элементов на качество оптических измерений проведен в работах Я.М. Клебанова и А.Н. Давыдова. Исследованию информационно-измерительных систем и систем автоматического управления космическими аппаратами и их тепловыми режимами посвящены работы Б.Н. Петрова, В.П. Легостаева, Е.А. Микрина, В.В. Малоземова, А.Г. Викулова, Л.В. Быкова, С.В. Цаплина, В.С. Финченко, П.К. Кузнецова, Е.Ю. Финченко, R. Schmidt, E. Gustafson, H. Tomana, O. Akira, B. Fox, L. Brewster и др.

Несмотря на большое количество исследований, проблему термоградиентной стабилизации несущих конструкций автономных объектов к настоящему времени нельзя считать эффективно решенной.

Во-первых, описание в аналитической форме математической модели непрерывно распределенного по несущей конструкции трехмерного температурного поля с дискретно распределенными управляемыми нагревателями, системой жидкостного охлаждения и возмущающими теплоисточниками, ее идентификация, верификация и представление в качестве объекта управления для синтеза соответствующей системы представляет существенную теоретическую сложность.

Во-вторых, для численного моделирования работы систем автоматического управления распределенными объектами с дискретно распределенным возмущением использование известных программных средств MATLAB, ANSYS, Flownex SE, Altair FLUX, ELCUT, FEMLAB или COMSOL Multiphysics и других наталкивается на значительные трудности.

В-третьих, проблема синтеза систем автоматического управления с распределенными параметрами для автономных объектов, функционирующих в условиях весогабаритных, энергетических и других ресурсных ограничений, к настоящему времени эффективно не решена.

Целью диссертационной работы является повышение качества выполнения автономными объектами функциональных задач в условиях воздействия неравномерных и нестационарных тепловых нагрузок путем снижения термоградиентной составляющей погрешности информационно-измерительной аппаратуры с помощью системы автоматического управления температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции.

Для обеспечения размерной термостабильности несущей конструкции автономного объекта и снижения возможной термодеформации, обеспечения управления температурой несущей конструкции в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка аналитической функционально-ориентированной на применение в системах автоматического управления математической модели температурного распределения в несущей конструкции автономного объекта при нестационарной и неравномерной тепловой нагрузке.

2. Преобразование аналитической функционально-ориентированной математической модели к структурной схеме объекта управления с распределенными параметрами.

3. Аналитическое и численное решение краевых теплогидравлических задач и задач теплопроводности в объекте управления при неравномерной тепловой нагрузке.

4. Получение, идентификация и аппроксимация распределенных передаточных функций управляемого теплогидравлического процесса.

5. Синтез системы автоматического управления температурным распределением линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции автономного объекта в условиях нестационарного и неравномерного тепловыделения размещенной по ней информационно-измерительной аппаратуры и внешней среды.

6. Аналитическое и расчетно-имитационное численное моделирование автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции автономного в условиях нестационарной и неравномерной тепловой нагрузки.

7. Реализация алгоритмов автоматического управления, расчетных методов, математических моделей в практике расчета, моделирования и управления температурными полями несущих конструкций объектов различного назначения и степени автономности.

#### Научая новизна полученных результатов:

1. Предложена методика моделирования И разработана функциональноориентированная на применение в системах автоматического управления аналитическая математическая модель управляемого распределения температуры в несущей конструкции автономного объекта при нестационарной и неравномерной тепловой нагрузке. Модель отличается от известных включением в нее сопряженных краевых задач управляемого нагрева локальными термоэлектрическими нагревателями и охлаждения управляемой системой жидкостного охлаждения, что позволяет, при обоснованных допущениях, синтезировать распределенную систему автоматического управления температурным полем несущей конструкции.

2. Разработана система автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения

несущей конструкции автономного объекта в условиях неравномерных и нестационарных возмущений тепловыделяющей измерительной аппаратуры и внешней среды. Отличительной особенностью системы является использование в качестве дискретно-распределенного управления мощности размещенных на конструкции управляемых локальных термоэлектрических нагревателей и температуры жидкостного теплоносителя на входе в трубопровод.

3. Разработана структура, содержащая распределенные передаточные функции и переходные блоки, описывающая неравномерное нестационарное распределение температуры в несущей конструкции, в отличие от известных, отражающая управляемые теплогидравлические процессы с помощью распределенной передаточной функции трубопровода с теплоносителем и неравномерным теплообменом по боковой поверхности трубопровода с несущей конструкцией. Структурная модель является конечномерной аппроксимацией бесконечномерного распределенного объекта управления и системы охлаждения и, в отличие от известных, позволяет на основе параметрической идентификации провести декомпозицию структуры и альтернансным методом произвести оптимальную по заданным критериям параметрическую настройку локальных регуляторов.

4. Разработана в программной среде ANSYS расчетно-имитационная конечноэлементная математическая модель системы автоматического управления сопряженным температурного теплогидравлическим процессом распределения на линии ответственного сечения несущей конструкции автономного объекта. В отличие от известных теплогидравлических моделей, она свободна от большинства допущений аналитического моделирования, содержит алгоритм моделирования и программный блок автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции автономного объекта.

Теоретическая и практическая значимость. Методика моделирования теплогидравлических процессов как объектов управления может быть использована при создании непрерывно-дискретных систем автоматического и автоматизированного управления различными объектами технологической теплофизики. Результаты аналитического и численного моделирования, полученные в диссертации, могут быть

использованы в расчетно-проектной практике при создании несущих конструкций, подвергающихся неравномерной и нестационарной тепловой нагрузке, для которых существенна термоградиентная деформация. Разработанные алгоритмы управления, синтезированная структура системы управления, методы ее декомпозиции и аппроксимации передаточных функций имеют перспективы применения в системах обеспечения теплового режима объектов различного назначения и степени автономности.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных в диссертации задач применяются методы математической физики: метод функций Грина, метод конечных интегральных преобразований; методы теории автоматического управления: методы параметрической идентификации, методы теории распределенных систем, альтернансный метод оптимальной настройки регуляторов. С целью компьютерного моделирования использован метод конечных элементов. Используются программные пакеты: Wolfram Mathematica, MATLAB, ANSYS Workbench, ANSYS Mechanical APDL, программный блок моделирования работы системы автоматического управления численной моделью написана на языке Python.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика моделирования и математическая модель распространения тепла в несущей конструкции автономного объекта в аналитической форме краевых задач и их решения, в форме структуры передаточных функций в программной среде MATLAB Simulink, в численной форме сопряженной теплогидравлической задачи в программной среде ANSYS Workbench.

2. Структура и алгоритм системы автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции в условиях возмущений размещенной на конструкции тепловыделяющих информационно-измерительной аппаратуры и внешней среды.

3. Численная расчетно-имитационная математическая модель сопряженного теплогидравлического управляемого температурного распределения в несущей

конструкции автономного объекта и трубопроводах системы жидкостного охлаждения конструкции.

4. Результаты численного решения сопряженной теплогидравлической задачи температурного распределения несущей конструкции информационно-измерительной системы малого орбитального космического аппарата в определенных режимах ее работы.

Степень достоверности и обоснованности диссертационного исследования подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, корректным применением математического аппарата, непротиворечивостью полученных результатов и совпадением частных результатов моделирования с результатами известных авторов из независимых источников.

Апробация работы. Полученные в работе результаты использованы при выполнении НИР по следующим проектам Российского Фонда Фундаментальных Исследований:

- проект №17-08-00593, 2017-2019 гг., тема: «Разработка методов автоматического управления процессами тепло- и массопереноса и оптимального проектирования производственно-технологических комплексов промышленной теплофизики и теплонагруженных конструкций автономных объектов».

- проект №20-08-00240, 2020 г., тема: «Разработка методов математического моделирования и управления по системным критериям качества тепло- и массообменными процессами в автономных объектах и технологической теплофизике».

Основные положения и результаты исследований докладывались на XXI международной научной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» ПУМСС (СамГТУ, Самара, 2019 г.), II всероссийской научнопрактической конференции «Молодежная наука: вызовы и перспективы» (СамГТУ, Самара, 2019 г.), Международной научной конференции «Кибер-физические системы: проектирование и моделирование» СҮВЕRРНҮ (СҮВЕRРНҮ-2020, СҮВЕRРНҮ-2021) и Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях»: ММТТ-33 (КНИТУ, Казань, 2020 г.), ММТТ-33 (БНТУ, Минск, 2020 г.), ММТТ-34 (СПбПУ, Санкт-Петербург, 2021 г). Публикации. По результатам исследований опубликовано 10 научных работ, среди которых 3 статьи, индексируемых в международной наукометрической базе SCOPUS, 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи в журналах, входящих в РИНЦ.

**Личный вклад автора** в работах, выполненных в соавторстве, состоит в разработке методики моделирования, численных и аналитических математических моделей температурного распределения на линии ответственного сечения несущих конструкций, структуры и алгоритма системы автоматического управления температурным распределением, определением передаточных функций в структуре системы автоматического управления

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы изложен на 192 страницах, содержит 147 рисунков, 6 таблиц с листингами программы, список литературы из 173 наименований и 4 приложения.

### 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА

#### 1.1 Основные сведения об автономных объектах

Автономными объектами (AO) в диссертации называются мобильные технические устройства, не имеющие на борту управляющего ими экипажа и связанные с окружающей средой не материальными, а информационными потоками.

Развитие робототехники приводит к возможности использования АО в любых условиях и средах: как на земле и воде, так и под ними, в воздухе и космосе. АО могут функционировать полностью автономно или управляться оператором дистанционно. Они используются В различных сферах: военной, космической, научной, промышленной, медицинской и других областях [1]. АО могут применяться в экстремальных условиях, ситуациях опасных для здоровья и жизни человека, снижая нагрузку на оператора и риски несчастных случаев. АО отличаются широким спектром выполняемых функций: автоматический контроль состояния или поддержание какоголибо параметра технологического процесса; техническое обслуживание и ремонт, аварийное восстановление промышленных объектов; диагностика трещин и других повреждений, наличия ржавчины, а также очистки; тестирования оборудования, транспортировки. Аэрокосмические АО широко применяются для зондирования земной поверхности, для аэрофотосъемки ландшафтов, картографирования и т.д.

Большинство АО включает в себя навигационные комплексы, для определения своего местоположения и коррекции курса, а также информационно-измерительные комплексы для получения, обработки, передачи и хранения рабочей информации.

Корректное функционирование, надежность АО и точность его информационноизмерительных систем (ИИС) во многом определяются температурным состоянием объекта, особенно его несущей конструкции (НК), на которой располагается ИИС и которая подвержена влиянию внутренних и внешних тепловых воздействий. Тепловое влияние могут оказывать нерегулируемые воздействия (окружающая среда; приборы, установленные на конструкции) и регулируемые воздействия (дополнительное оборудование, специально устанавливаемое для управления температурным состоянием). Следствием отклонения температуры конструкции от допустимой равномерной может явиться ненадежная работа АО или полный выход из строя; неправильные или не точные передаваемые данные могут привести и к более опасным последствиям.

### 1.2 Аналитический обзор современного состояния проблемы управления температурным состоянием автономного объекта

## 1.2.1 Методы математического моделирования температурного распределения в несущих конструкциях

Базисом систем обеспечения теплового режима АО является математическое моделирование (ММ) тепловых процессов в форме соответствующих краевых задач математической физики, систематические исследования которых с XVIII и по настоящее время в исчерпывающем объеме изложены в многочисленных работах: Г. Карслоу, А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.Я. Арсенина, Г. Джеффриса, Б. Свирлса, Б.М. Будака, А.А. Самарского, А.Д. Полянина, А.В. Лыкова, В.С. Зарубина, П.Н. Вабищевича и других авторов [2-13]. Эти краевые задачи, имеющие вид дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими краевыми условиями, представляют собой неявную форму ММ, ИХ непосредственное использование в приложениях для анализа и синтеза систем управления тепловым состоянием АО затруднительно. Поэтому в исследованиях систем обеспечения теплового режима (СОТР) АО используются их наиболее известные модификации, представленные в работах О.М. Алифанова, В.В. Малоземова, С.В. Резника, П.В. Просунцова, А.Г. Викулова, А.В. Ненаркомова, Е.А. Микрина, В.П. Легостаева, Г.Н. Дульнева и других авторов [14-22].

Методы решения задач теплопроводности в твердых телах и жидкостях позволяют преобразовать математическую модель из неявной формы краевой задачи теплопроводности в явную зависимость температуры от временной и пространственных аргументов. Решение линейных краевых задач теплопроводности опирается на следующие базовые принципы [23]:

1. Принцип эквивалентности – заключается в том, что замена одного из условий однозначности, определяющего математическую модель объекта с распределенными параметрами (ОРП), другим эквивалентным условием, не влияет на пространственновременное распределение температуры.

2. Принцип взаимности – заключается в том, что если источник тепла заданной интенсивности, находящийся в первой точке, вызывает во второй изменение температуры, то перемещение его во вторую точку, вызовет такое же изменение в первой.

3. Принцип суперпозиции (наложения). Принцип элементарной суперпозиции утверждает, что если граничные условия (ГУ), внутренние теплоисточники и теплофизические характеристики существенно не зависят от температуры тела, то при действии отдельных источников тепла (независимых друг от друга) допускается: учитывать действие каждого теплоисточника по отдельности – итоговый тепловой эффект находится как сумма действий всех источников. Это, в частности, позволяет представлять действие одного источника как сумму действий любой комбинации источников, расположенных на том же месте и имеющих в сумме идентичную интенсивность. Принцип сложной суперпозиции применяется только для источников заданной температуры, располагающихся на границах тела.

Известные методы решения краевых задач теплообмена условно можно разделить на [24]:

1. Аналитические методы, с помощью которых математическая модель получает вид явных математических зависимостей (рядов, интегралов и т.п.). Выделяют: точные (метод Фурье, метод функций Грина, методы интегральных преобразований и др.), приближенные аналитические методы (вариационные методы Ритца, Канторовича, Трефтца, Лейбензона, Био и др.).

2. Численные методы – решение краевых задач представляется в форме массивов чисел, графиков, таблиц, диаграмм и т.п. К наиболее распространенным численным методам относятся: метод конечных элементов (МКЭ); метод конечных разностей (МКР) или метод сеток; статистические (вероятностные) методы (метод Монте-Карло) и др. Численные методы обычно реализуются на компьютерах с помощью программных средств, например: ANSYS, Flownex SE, Altair FLUX, ELCUT, FEMLAB или COMSOL Multiphysics и др.

В качестве среды для численного моделирования в диссертации выбран программный пакет ANSYS, использующий для решения тепловых задач МКЭ. МКЭ – процедура решения краевых задач с использованием вариационного принципа. МКЭ

широко представлен в работах Л.Дж. Сегерлинда [25], О. Зенкевича [26] и др. [27-29]. Первоначально он развивался для решения задач в космической отрасли, позднее получил распространение на широкий спектр задач различных областей. МКЭ использует разбиение (дискретизацию) сплошного тела на конечное число подобластей (конечных элементов), образуя конечно-элементную сетку. Чем выше плотность вычислительной сетки, тем выше точность. Конечные элементы могут иметь различную форму: треугольники или прямоугольники для двумерных задач; тетраэдры, призмы или параллелепипеды – для трехмерных. Конечные элементы имеют вершины – узлы (внешние и внутренние), которые позволяют описать геометрию элемента и обеспечить задание компонент решения. Одной из важных проблем является выбор формы элементов, их количества, а также корректность наложения сетки в местах стыковки различных областей [30]. В программной среде ANSYS выделяются две платформы: классический ANSYS Mechanical APDL (MAPDL) и ANSYS Workbench с приложением ANSYS Mechanical. Важная часть пакета классического ANSYS – программа Flotran, позволяющая быстро и просто осуществлять трехмерное моделирование течения жидкости и гидродинамический анализ, не поддерживается в более поздних современных версиях, поэтому численное моделирование в диссертации реализовано в ANSYS Workbench (Mechanical и Fluent) с использованием связки FSI через System Coupling.

### 1.2.2 Особенности математического моделирования теплообмена в системе жидкостного охлаждения несущей конструкции автономного объекта

Математическая модель отражает взаимное тепловое влияние НК через стенки трубопровода (труб, трубок) (ТР) и жидкостного теплоносителя с учетом характера течения теплоносителя и его температуры. Проблемы моделирования теплогидравлических процессов постановки и решения краевых задач гидродинамики, рассмотрены в работах И. Чермака, В. Петерки, И. Заворки [31], М.А. Михеева [32], Г.Н. Дульнева [33], Г.А. Дрейцера [34], В.К. Мигай [35] и др. [36-38]. Математическое описание жидкостного теплоносителя в ТР базируется на законах классической механики: законе сохранения масс (уравнение неразрывности), законе сохранения энергии (энергетическое уравнение), законе движения Ньютона (уравнение движения). Теплообмен в ТР может осуществляться в следующих условиях течения теплоносителя:

- вынужденное течение (вынужденная конвекция) из-за действия сил внешнего давления;

- свободное течение (свободная или естественная конвекция) из-за гравитационных сил, за счет изменения плотности жидкости, из-за разницы температуры;

- сочетание вынужденного и свободного течения в условиях существенного влияния гравитационных сил.

Интенсивность теплоотдачи определяется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_{zh} = \frac{Nu \cdot \lambda_{zh}}{d_{ekv}}$  Вт/(м<sup>2</sup>·град), где Nu – число Нуссельта;  $\lambda_{zh}$  – коэффициент

теплопроводности теплоносителя при средней температуре, Вт/(м·град);  $d_{ekv} = \frac{4 \cdot F}{\Pi}$  – эквивалентный диаметр, м, где F – площадь сечения канала, м<sup>2</sup>, П – периметр канала, м. Для круглого сечения эквивалентный диаметр равен внутреннему диаметру TP  $d_{ekv} = d_{vnudr}$ . Скоростные и вязкостные характеристики теплоносителя связаны с диаметром канала безразмерным критерием – числом Рейнольдса Re: Re  $= \frac{\upsilon_{zh} \cdot d_{vnudr}}{\upsilon_{zh}}$ ,  $\upsilon_{zh}$  – скорость течения жидкостного теплоносителя, м/с;  $\upsilon_{zh}$  – кинематическая вязкость теплоносителя при средней температуре, м<sup>2</sup>/с. Режим течения теплоносителя в зависимости от величины значения Re подразделяется на следующие: ламинарный

зависимости от величины значения ке подразделяется на следующие. ламинарный режим (Re до 2300), переходный режим (Re от 2300 до 10000), турбулентный (Re более 10000).

В диссертации реализована математическая модель, отражающая взаимное тепловое влияние НК через стенки ТР и жидкостного теплоносителя с учетом характера течения теплоносителя, его температуры.

# 1.2.3 Особенности управления температурным состоянием автономного объекта

В диссертации используются модификации математических моделей к удобному для применения в задачах автоматического управления виду. С этой целью используется

теория управления системами с распределенными параметрами (СРП), заложенная в работах А.Г. Бутковского [39,40], Т.К. Сиразетдинова [41], Э.Я. Рапопорта [42-44] и развитая российскими и зарубежными учеными [45-52].

Для того чтобы получить явную математическую модель объекта управления в диссертации используются методы конечных интегральных преобразований и метод функций Грина [53-54]. Используя предложенный в работах [55-60] метод функций Грина, можно, с помощью обобщенных функций, свести краевую задачу к одномерным краевым условиям и неоднородному уравнению в частных производных и представить ее в виде свертки с обобщенной стандартизирующей функцией, а затем, применяя преобразование Лапласа, можно получить передаточные функции (ПФ) в форме бесконечного числа соответствующих мод. Аппроксимация этих ПФ в конечную форму позволяет практически использовать их для синтеза и анализа систем автоматического управления (САУ) тепловыми режимами АО, например в программной среде MATLAB.

В диссертации для синтеза САУ в среде МАТLAВ используется комбинация синтеза для систем с распределенными и сосредоточенными параметрами, имея ввиду, что объект является распределенным, а с помощью специальных  $x - u \xi$ -звеньев управление и контроль управляемой величины сосредоточены в точках с заданными пространственными параметрами.

Для получения адекватной модели САУ в среде МАТLAВ используется полученная Э.Я. Рапопортом [56] структура объекта с граничными условиями 2 рода (ГУ-2), эквивалентными реальным условиям теплообмена на границах НК. При этом реальный теплообмен излучением моделируется теплообменом с эквивалентными граничными условиями 3 рода (ГУ-3) по закону Ньютона в соответствии с рекомендациями [11] для достаточно узкого диапазона регулирования

В диссертации используется предложенный Э.Я. Рапопортом альтернансный метод для оптимальной настройки регуляторов [61-62].

В работах [63-70] рассмотрены задачи идентификации математических тепловых моделей. Структурная (качественная) и/или параметрическая (количественная) идентификация подразумевают выбор структуры и/или параметров математической модели, минимизирующих невязку между выходом модели и измеренным аналогичным выходом объекта. Решение задач идентификации позволяет связать между собой

аналитическую модель, компьютерный эксперимент на численной модели и результаты натурных экспериментов.

Уточнения полученных в ходе синтеза САУ в среде MATLAB параметров и структуры системы управления производится на конечно-элементной уточненной модели в программной среде ANSYS Workbench с помощью оригинальной авторской процедуры моделирования работы CAУ численной моделью.

### 1.2.4 Технические средства обеспечения теплового режима автономных объектов

Для компенсации температурных погрешностей ИИС в АО применяются СОТР. Выделяют следующие типы СОТР [71-73]:

- пассивные: различные виды теплоизоляции, терморегулирующих покрытий;

- активные - системы терморегулирования (СТР): термоэлектрические нагреватели (ТН), ТР с жидкими и газообразными теплоносителями, теплообменные агрегаты, холодильные машины, тепловые трубы.

СОТР для большинства АО чаще всего используют комбинированные способы поддержания теплового состояния АО. Обеспечение теплового режима может быть также реализовано нестандартными техническими решениями (выбором конструкции, формы и материала, расположения приборов, излучающих тепло), выбором траектории перемещения АО, режимов функционирования, энергетических характеристик.

Основными системами нагрева и/или охлаждения, которые входят в состав СТР, являются:

1. средства термоградиентной стабилизации (СТГС) – системы для поддержания температуры точек или небольших областей (стока и/или притока тепловой энергии) АО;

2. система охлаждения – ТР с газовым или жидкостным теплоносителем (реагентом) для отведения тепла от объекта в область сброса.

СТР классифицируются по месту установки (в зависимости от области использования AO), характеру контакта теплоносителя с источником тепла (прямого и косвенного действия), связи теплоносителя с окружающей средой (разомкнутые системы, в которых отработанный теплоноситель удаляется из системы и замкнутые

системы, где теплоноситель вновь используется, пройдя через специальный теплообменник) и т.п. Основные требования предъявляемые к СТР:

1. Общие: надежность, минимальное энергопотребление, безопасность, весогабаритные ограничения, небольшая стоимость, унификация элементов.

2. Специальные: функциональные (номинальная регулируемая температура и допустимые отклонения), физико-технические (термо- и влагостойкость, прочность, отсутствие влияния на другие элементы АО), эксплуатационные (рациональное размещение, автономность, автоматизация работы, блокировка и сигнализация и т.п.).

#### 1.3 Техническая постановка задачи диссертационного исследования

В качестве базового АО рассматривается малый орбитальный КА, который имеет сложную ИИС, содержащую тепловыделяющую аппаратуру и оптикоэлектронные приборы. ИИС размещена на НК, имеющей форму, близкую к прямоугольной призме. Этот объект принят в качестве базового, т.к. его конструкция и условия эксплуатации включают большинство факторов, характерных для широкого спектра АО, каждый из которых может рассматриваться как частная модификация базового АО. Поэтому для рассматриваемой конструкции этого АО формулируется техническая задача управления температурным состоянием ответственных сечений (ОС) НК ИИС с целью снижения уровня термодеформационной составляющей погрешности оптикоэлектронных приборов ИИС. Полученные в диссертации результаты решения поставленной задачи могут в полной мере или частично быть практически использованы для достаточно широкого класса АО.

На рисунке 1.2 схематично представлены фрагменты базового АО, который включает в себя следующие элементы:

- внешний кожух с многослойной изоляцией. В защитном кожухе (корпусе) имеются люки, которые открываются и закрываются в соответствии с программой работы устройства в штатном режиме;

- несущая ИИС конструкция (размерностабильная плита);

- ИИС – содержит тепловыделяющую информационно-измерительную аппаратуру и пассивные оптические системы (зеркала, линзы).



a) АО в кожухе; б) размещение аппаратуры в АО;в) размещение ИИС на несущей конструкции; г) несущая конструкция в сборе

Рисунок 1.1 – Общий вид АО

НК АО, на которой размещена ИИС, имеет форму прямоугольной призмы (далее в диссертации – пластина) и испытывает различные внешние тепловые воздействия.

Для обеспечения требуемого теплового режима НК используется комбинированное управление:

1. СТГС, содержащие:

- САУ температурным полем, в форме соответствующего специального программного обеспечения бортового контроллера,

- пленочные термоэлектрические нагреватели (TH), присоединенные к источникам питания, которые управляются с помощью бортового контроллера.

Элементы СТГС – теплорассеивающие подложки размером 30·10 мм, на которые крепятся (наклеиваются) ТН к поверхности пластины.

Управление реализуется автономно каждой парой ТН, теплорассеивающие подложки которых расположены на внешних сторонах пластины друг напротив друга.

2. Системы жидкостного охлаждения (СЖО) – ТР с жидким теплоносителем. Охлаждение достигается за счет автоматического управления температурой жидкого теплоносителя отдельно, но синхронно в каждой паре ТР, области контакта с пластиной которых расположены на внешних сторонах пластины строго друг напротив друга, т.е. способ регулирования – качественный. Направления движения теплоносителя показаны на рисунке 1.3 стрелками.

Пластина (рисунок 1.3), на которую оказывает тепловое воздействие окружающая среда, неравномерно нагревается в местах контакта с тепловыделяющими измерительными приборами ИИС (теплоисточники Pr1...Pr4, Pru1...Pru4, PrC1, Prh1, PrC2, Prh2, Pra, Prb), необходимыми для выполнения целевой задачи АО, тепловыделение которых происходит в штатном режиме согласно определенным 1.4-1.9, циклограммам (рисунок где длительность периода работы  $t_1$ \_ тепловыделяющих приборов ИИС), на внешних сторонах пластины размещены ТН СТГС (теплоисточники St1...St9, S1...S9), обеспечивающие управление температурой путем нагрева [74-82], охлаждается воздействием пар ТР tr1...tr5 СЖО (области соприкосновения стенок ТР с противоположных внешних сторон пластины обозначены как: f1...f5).



Рисунок 1.2 – Положение линии ответственного сечения, теплоисточников и системы жидкостного охлаждения на несущей конструкции

Центральные ТН СТГС на стороне пластины x=0: St1, St2, St3, St4, St5. Центральные TH СТГС на стороне пластины  $x=R_1$ : S1, S2, S3, S4, S5. Диагональные TH СТГС на стороне пластины x=0: St6, St7, St3, St8, St9. Диагональные TH СТГС на стороне пластины  $x=R_1$ : S6, S7, S3, S8, S9. Тепловыделяющие измерительные приборы на стороне пластины x=0: Pru1, Pru2, Pru3, Pru4. Тепловыделяющие измерительные приборы на стороне пластины  $x=R_1$ : Pr1, Pr2, Pr3, Pr4. Тепловыделяющие измерительные приборы на стороне пластины z=0: Pra, Prb. Тепловыделяющие измерительные приборы на стороне пластины z=0: Prh1, PrC1. Тепловыделяющие измерительные приборы на стороне пластины z=0: Prh2, PrC2.











Рисунок 1.5 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения приборов Pra, Prb











Рисунок 1.8 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения приборов Prh2

Технические характеристики:

1. Форма НК представляется сплошной в общем случае анизотропной пластиной размеры которой по оси  $x: R_1 = 0.15$  м, по оси  $y: R_2 = 2.15$  м, по оси  $Z: R_3 = 1.97$  м.

2. Теплофизические характеристики материала НК: удельная теплоемкость  $c_{pl} = 1200 - 1600$  Дж/(кг·°С), плотность материала  $\rho = 1300 - 1600$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = 1.8 - 3.2$  Вт/(м·°С).

3. Температура внутри термостабилизированного кожуха предполагается равномерно распределенной по всей его поверхности, температура среды внутри кожуха (далее в диссертации – окружающая среда)  $T_{sred} = 20$  °C, начальная температура пластины  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{01} = 40$  °C,  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{02} = 10$  °C.

4. Для определенности в диссертации рассматривается достаточно интенсивная работа тепловыделяющей аппаратуры ИИС в соответствии с циклограммами рис. 1.4-1.9, номинальная мощность тепловыделяющих измерительных приборов Pr1...Pr4  $P_{\rm Pr} = 16$  BT, Pru1...Pru4  $P_{\rm Pru} = 16$  BT, Pra и Prb  $P_{\rm Pra} = P_{\rm Prb} = 10$  BT, PrC1 и PrC2  $P_{\rm PrC1} = P_{\rm PrC2} = 14$  BT, Prh1 и Prh2  $P_{\rm Prh1} = P_{\rm Prh2} = 20$  BT.

5. Размеры посадочного места ТН СТГС  $S = 0.03 \cdot 0.1 \, \text{m}^2$ .

6. Для охлаждения пластины на определенных ее гранях располагаются ТР СЖО.

Длина ТР СЖО L = 2.97 м, толщина стенки ТР  $\delta_{st} = 3 \cdot 10^{-3}$  м, внутренний диаметр  $d_{vnutr} = 8 \cdot 10^{-3}$  м; площадь внутреннего сечения  $S_{tube} = 0.25 \cdot \pi \cdot d_{vnutr}^2 = 50.26 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>; границы воздействия теплового потока на стенку ТР от пластины: a = 0.5 м, b = 2.47 м; материал ТР – алюминий: удельная теплоемкость стенки  $c_{st} = 951$  Дж/(кг·°C), коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda_{st} = 237.5$  Вт/(м·°C), плотность материала

стенки  $\rho_{st} = 2689 \text{ кг/м}^3$ . Параметры жидкостного теплоносителя: поток массы (массовый расход) M = 0.0671175 кг/c, удельная теплоемкость теплоносителя  $c_{zh} = 1600 \text{ Дж/(кг}^{\circ}\text{K})$ , теплопроводность  $\lambda_{zh} = 0.1 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{K}$ , плотность теплоносителя  $\rho_{zh} = 0.692 \cdot 10^3 \text{ кг/m}^3$ , начальная температура теплоносителя  $T_{zh0}(l_z, 0) = T_{pl}^0$ , кинематическая вязкость  $v_{zh} = 0.74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{c}$ . Скорость теплоносителя:

$$v_{zh} = \frac{4M}{\rho_{zh}\pi d_{vnutr}^2} = 1.93$$
 м/с; число Рейнольдса  $\text{Re} = \frac{v_{zh}d_{vnutr}}{v_{zh}} = 20.865 \cdot 10^3$ .

Для обеспечения нормального функционирования АО необходимо поддерживать температурное поле размерностабильной пластины в заданном диапазоне с минимальным отклонением от номинальной температуры.

Влияние термодеформации НК в космических АО (космических аппаратах (КА)) или их элементах вследствие неравномерности температурного распределения НК, а также влияние отклонения средней температуры оптических систем КА от юстировочной глубоко проанализировано в работах Я.М. Клебанова [83]. В [84] для телескопа Т-170М и бортового комплекса научной аппаратуры КА «СпектрУФ» при номинальной рабочей температуре главного зеркала 20 °C допустимый перепад температуры в осевом направлении не должен превышать 3.5 °C, в диаметральном – не больше 6.0 °C. Для радиотелескопа КА «Спектр-Р» [85] температура в зоне посадочных мест оснований корпусов аппаратуры бортового водородного стандарта чистоты должна находиться в пределах  $+30\pm5$  °C.

В результате анализа работ [86-98] и технических заданий для широкого круга АО в диссертации для стабильной работы размещенной в АО аппаратуры определен температурный диапазон 20-40 °C, из которого следует выбирать требуемую для каждого конкретного АО температуру  $T_{ust}^{pl}$  НК и поддерживать ее с отклонением не превышающим  $\left|\Delta T_{ust}^{pl}\right| \leq 3...5$  °C в зависимости от размеров и материала НК.

Для выбранного в качестве базового АО наиболее существенное влияние на смещение оптической оси в соответствии с расположением оптических приборов ИИС на НК (рисунок 1.3) оказывает перепад температуры по диагональному ОС НК. Линия диагонального сечения, градиент температуры на которой вносит наибольший вклад в

термоградиентную погрешность показаний оптической компоненты ИИС, далее в диссертации называется линией ответственного (критического) сечения (ЛОС). Для различных конструкций АО и способов размещения ИИС на НК ОС может оказаться любая другая линия между точками НК.

В диссертации ставится задача разработать САУ температурным распределением по диагональной ЛОС НК – объекта управления (ОУ), с помощью симметрично расположенных попарно напротив друг друга ТН СТГС и ТР СЖО.

Ограничения  $P_{\min}^{stgs}$ ,  $P_{\max}^{stgs}$  на предельно допустимую величину мощности ТН СТГС  $P_{stgs}$  варьируют для различных АО в широких пределах:

$$P_{\min}^{stgs} \le P_{stgs} \le P_{\max}^{stgs} \tag{1.1}$$

Для базового варианта с учетом возможности размещения нескольких TH рядом принято:  $P_{\min}^{stgs} = 0$  BT,  $P_{\max}^{stgs} = 40$  BT.

Ограничения на предельно допустимые температуры  $T_{\min}^{zh}, T_{\max}^{zh}$  теплоносителя также зависят от типа АО и марки теплоносителя:

$$T_{\min}^{zh} \le T_{zh} \le T_{\max}^{zh} \tag{1.2}$$

Для базового варианта:  $T_{\min}^{zh} = 10$  °C,  $T_{\max}^{zh} = 40$  °C.

В выбранных точках контроля (ТК) ОС температура в установившихся режимах не должна отклоняться на  $\pm 2$  °С от требуемого конечного значения температуры  $T_{ust}^{pl}$  пластины при работе по циклограммам рисунок 1.4-1.9 тепловыделяющей аппаратуры ИИС.

В качестве 
$$T_{ust}^{pl}$$
 принято:  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40$  °С и  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20$  °С.

#### 1.4 Выводы по первой главе

1. Дана краткая характеристика АО. Повышенная значимость информации ИИС АО и высокая степень риска от ее искажения (которое может привести к тяжелой аварии или катастрофе) из-за температурной компоненты погрешности определяют актуальность диссертационного исследования.

2. Установлено, что, несмотря на большое количество исследований в области теплопередачи и управления температурным состоянием объектов промышленной

теплофизики, проблему повышения эффективности функционирования АО путем снижения термоградиентной информационно-измерительной погрешности в условиях воздействия неравномерных и нестационарных тепловых нагрузок к настоящему времени нельзя считать эффективно решенной.

3. Существенную теоретическую сложность к настоящему времени представляет математической создание модели непрерывно распределенного ПО несущей конструкции трехмерного температурного поля с дискретно распределенными управляемыми нагревателями средств термоградиентной стабилизации, системой жидкостного охлаждения и возмущающими теплоисточниками, ее идентификация, верификация и представление в качестве объекта управления для синтеза соответствующей системы.

4. Проблема синтеза САУ с распределенными параметрами для АО, функционирующих в условиях весогабаритных, энергетических и других ресурсных ограничений, к настоящему времени не решена.

5. Численное моделирование работы систем автоматического управления распределенными объектами с дискретно распределенным возмущением с помощью известных программных средств MATLAB, ANSYS, Flownex SE, Altair FLUX, ELCUT, FEMLAB или COMSOL Multiphysics и других наталкивается на значительные трудности.

6. Сформулирована и обоснована содержательная техническая постановка задачи диссертационного исследования. Выбран типовой АО, результаты, полученные при разработке управления которым могут быть распространены на широкий круг АО различного назначения. Сформулированы требования к САУ температурным полем несущей конструкции для типового АО.

### **2** ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

### **2.1** Функционально-ориентированная модель температурного распределения в несущей конструкции в форме теплогидравлической краевой задачи

Уменьшение температурной погрешности ИИС достигается за счет управления распределением температуры T(x, y, z, t) НК с помощью распределенных по ней ТН СТГС и ТР СЖО. Температурное распределение T(x, y, z, t) в качестве управляемой величины отличается непрерывной зависимостью не только от времени <sup>t</sup>, но и от пространственных координат x, y, z. Причем от температурного распределения существенно зависит термоградиентная компонента погрешности ИИС И. следовательно, выполнение задач АО. Поэтому использовать среднюю по объему НК температуру для перехода к управлению объектом с сосредоточенными параметрами (ОСП) невозможно, а температурное состояние НК, включая диагональную ЛОС, представляет собой ОРП и описывается дифференциальным уравнением в частных производных. В рассматриваемом случае – это уравнение теплопроводности, относящееся к классу уравнений математической физики второго порядка параболического типа. Это уравнение с граничными и начальными условиями представляет собой краевую задачу теплопроводности для НК АО.

Как правило, НК изготовлена из анизотропного материала, теплофизические свойства которой зависят от температуры. Процесс теплопроводности в такой конструкции описывается нелинейной краевой задачей:

$$c_{pl}(T_{pl}) \cdot \rho(T_{pl}) \cdot \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial t} = div \Big( \lambda(T_{pl}) \cdot gradT_{pl}(x, y, z, t) \Big),$$

$$x \in \mathcal{A}_x, \ y \in \mathcal{A}_y, z \in \mathcal{A}_z, t > 0,$$
(2.1)

начальные условия (НУ):

$$T_{pl}(x, y, z, t)\Big|_{t=0} = T_{pl}^{0}(x, y, z, t),$$
  

$$x \in \overline{\mathcal{A}}_{x}, \ y \in \overline{\mathcal{A}}_{y}, \ z \in \overline{\mathcal{A}}_{z}, t = 0,$$
(2.2)

граничные условия (ГУ):

$$\Gamma \Big[ T_{pl}(x, y, z, t) \Big] = Q_{pl}(x, y, z, t),$$
  

$$x \in \partial \overline{\mathcal{I}}_x, \ y \in \partial \overline{\mathcal{I}}_y, \ z \in \partial \overline{\mathcal{I}}_z, t > 0,$$
(2.3)

где  $\Gamma$  – оператор, отражающий теплообмен НК с внешней средой;  $A_x, A_y, A_z$  – открытые части областей  $\bar{A}_x, \bar{A}_y, \bar{A}_z$ , не содержащие их границы;  $\partial \bar{A}_x, \partial \bar{A}_y, \partial \bar{A}_z$  – границы областей  $\bar{A}_x, \bar{A}_y, \bar{A}_z$  соответственно, на которых размещены теплоисточники и ТР СЖО;  $Q_{pl}$  – внешнее воздействие на НК.

Однако для функциональной ориентации краевой задачи теплопроводности (2.1-2.3) на использование в синтезе САУ ее необходимо модифицировать. С этой целью в модель (2.1-2.3) вносятся допущения, обеспечивающие возможность аналитического решения краевой задачи, параметрической идентификации модели, получения на ее основе ПФ ОРП:

1. НК принимается правильной прямоугольной призмой (пластиной) с размерами *R*<sub>1</sub>, *R*<sub>2</sub>, *R*<sub>3</sub> (см. раздел 1.3).

2. Принимается, что материал, из которого изготовлена НК, имеет постоянные теплофизические характеристики  $c_{pl} = 1480$  Дж/(кг·°С),  $\rho = 1440$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 2.3$  Вт/(м·°С) и является изотропным.

3. Потоки от теплоисточников на гранях пластины определяются как отношение соответствующих мощностей теплоисточников к площади поверхности их воздействия:

$$q_{\kappa 1}^{ist \ O} = \frac{P_{ist \ O}}{S},\tag{2.4}$$

где  $\kappa 1 = \xi_x, \xi_y, \xi_z$  – обозначение граней  $\xi_x = \xi_{x0}$   $(x = 0), \xi_x = \xi_{x1}$   $(x = R_1), \xi_y = \xi_{y0}$   $(y = 0), \xi_y = \xi_{y1}$   $(y = R_2), \xi_z = \xi_{z0}$   $(z = 0), \xi_z = \xi_{z1}$   $(z = R_3)$ ; *ist* – тип теплоисточника, *O* – номер теплоисточника. Если *ist* = Pr (обозначение тепловыделяющего прибора ИИС),  $O = t1, \quad t1 = N, M, K$  – номер тепловыделяющего прибора ИИС на грани  $\kappa 1$  соответственно: на грани  $\xi_{x0}$   $N = \overline{1, N_{Pr}}, N_{Pr} = 4$  (Pr1...Pr4), на грани  $\xi_{x1}$   $N = \overline{1, N_{Pr}}, N_{Pr} = 4$  (Pru1...Pru4), на грани  $\xi_{y0}$   $M = \overline{1, M_{Pr}}, M_{Pr} = 2$  (Pra, Prb), на грани  $\xi_{z0}$   $K = \overline{1, K_{Pr}}, K_{Pr} = 2$  (Prh1, PrC1); на грани  $\xi_{z1}$   $K = \overline{1, K_{Pr}}, K_{Pr} = 2$  (Prh2, PrC2); если *ist = stgs* 

(обозначение TH СТГС),  $O = N_s$ ,  $N_s$  – номер TH СТГС на гранях  $\xi_x$ : на грани  $\xi_{x0}$  $N_s = \overline{1, N_{stgs}}$ ,  $N_{stgs} = 9$  (St1...St9), на грани  $\xi_{x1}$   $N_s = \overline{1, N_{stgs}}$ ,  $N_{stgs} = 9$  (S1...S9).

4. В силу использования в дальнейшем математической модели процесса теплопроводности в НК для синтеза САУ, работающей в достаточно малых отклонениях от установившегося температурного режима, теплообмен между стенкой корпуса и НК по закону Стефана-Больцмана [99-102]:

$$q_{\kappa 1}^{pl} = \sigma^* \Big[ T_{pl}^{\ 4} - T_{abs}^{\ 4} \Big], \tag{2.5}$$

где  $T_{abs}$  – абсолютная температура поверхности тепловоспринимающего тела,  $\sigma^*$  – приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/м<sup>2</sup>\*(K)<sup>4</sup>:

$$\sigma^* = \varepsilon_{scher} \cdot \sigma \tag{2.6}$$

 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> · K<sup>4</sup> – постоянная Стефана-Больцмана,  $\varepsilon_{scher} = 0.91$  – степень черноты (относительная излучательная способность) твердого тела;

приближенно можно заменить эквивалентным условием теплообмена по закону Ньютона [11]:

$$q_{\kappa 1}^{pl} \approx \alpha (T_{sred}(t) - T_{pl}(t)) \tag{2.7}$$

Эквивалентный коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающей среде внутри кожуха в зависимости от исполнения КА  $\alpha \approx 0.5-0.9$  Bt/(м<sup>2</sup>·°C), для рассматриваемого в качестве базового АО  $\alpha = 0.7488$  Bt/(м<sup>2</sup>·°C).

5. Контакт ТР с поверхностью пластины считается теплотехнически идеальным.

6. Используется кусочно-линейная аппроксимация тепловых потоков вдоль внешних стенок  $T_{\xi x}^{fi}$  TP, касающихся пластины, и потоков внутренних стенок TP  $q_{d j}^{fi \xi x}$ , где fi – области контакта TP с гранями  $\xi_x = \xi_{x0}$ ,  $\xi_x = \xi_{x1}$  пластины,  $i = \overline{1, N_{tr}}$ ,  $N_{tr} = 5$  – количество труб, расположенных на гранях  $\xi_{x0}$  и  $\xi_{x1}$ .

7. Предполагается идеальной теплоизоляция стенок ТР, не касающихся пластины.

8. Теплоноситель в ТР СЖО считается Ньютоновской жидкостью, изменением гидравлического сопротивления по длине ТР, в связи с возможными изгибами, можно пренебречь. Распределение температуры в каждом поперечном сечении ТР считается равномерным в любой момент времени t, неравномерность скорости перемещения

теплоносителя по поперечному сечению ТР и теплопроводность внутри теплоносителя не учитывается, предполагается, что теплопередача теплоносителем вдоль ТР осуществляется только кондуктивным способом. Управляющее воздействие на температуру теплоносителя считается сосредоточенным в начальной точке касания ТР с пластиной.

В ходе верификации допущения подвергаются проверке численным экспериментом.

С помощью указанных выше допущений математическое описание (2.1-2.3)линейного температурного поля пластины записывается виде В дифференциального уравнения теплопроводности Фурье второго порядка в частных производных [103-105]:

$$c_{pl} \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right)$$

$$0 < x < R_1, \ 0 < y < R_2, \ 0 < z < R_3, \ t \in (0; \infty)$$

$$(2.8)$$

Начальные условия (НУ):

$$T_{pl}(x, y, z, t)\Big|_{t=0} = T_{pl}^{0}$$
(2.9)

Граничные условия (ГУ):

$$-\lambda \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial x} \bigg|_{x=0} = Q_{pl}^{\xi x 0}(y, z, t), \qquad -\lambda \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial x} \bigg|_{x=R_{l}} = Q_{pl}^{\xi x 1}(y, z, t)$$
(2.10)

$$-\lambda \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial y} \bigg|_{y=0} = Q_{pl}^{\xi y 0}(x, z, t), \qquad -\lambda \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial y} \bigg|_{y=R_2} = Q_{pl}^{\xi y 1}(x, z, t)$$
(2.11)

$$-\lambda \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial z} \bigg|_{z=0} = Q_{pl}^{\xi z 0}(x, y, t), \qquad -\lambda \frac{\partial T_{pl}(x, y, z, t)}{\partial z} \bigg|_{z=R_3} = Q_{pl}^{\xi z 1}(x, y, t)$$
(2.12)

Здесь  $Q_{pl}^{\kappa 1}$  – суммарные тепловые потоки на гранях  $\kappa 1$  НК:

$$Q_{pl}^{\xi x0}(y,z,t) = q_{\xi x0}^{pl} + \sum_{N=1}^{N_{\text{Pr}}} q_{\xi x0}^{\text{Pr}\,N} V_{\xi x0}^{\text{Pr}\,N}(y,z) + \sum_{i=1}^{N_{tr}} q_{\xi x0}^{fi} V_{\xi x0}^{fi}(y,z) + \sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} q_{\xi x0}^{stgs\,N_s} V_{\xi x0}^{stgs\,N_s}(y,z)$$
(2.13)

$$Q_{pl}^{\xi x1}(y,z,t) = q_{\xi x1}^{pl} + \sum_{N=1}^{N_{\text{Pr}}} q_{\xi x1}^{\text{Pr}\,N} V_{\xi x1}^{\text{Pr}\,N}(y,z) + \sum_{i=1}^{N_{tr}} q_{\xi x1}^{fi} V_{\xi x1}^{fi}(y,z) + \sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} q_{\xi x1}^{stgs\,N_s} V_{\xi x1}^{stgs\,N_s}(y,z)$$
(2.14)

$$Q_{pl}^{\xi y 0}(x,z,t) = q_{\xi y 0}^{pl} + \sum_{M=1}^{M_{\text{Pr}}} q_{\xi y 0}^{\text{Pr}\,M} V_{\xi y 0}^{\text{Pr}\,M}(x,z)$$
(2.15)

$$Q_{pl}^{\xi y 1}(x, z, t) = q_{\xi y 1}^{pl}$$
(2.16)

$$Q_{pl}^{\xi z0}(x, y, t) = q_{\xi z0}^{pl} + \sum_{K=1}^{K_{\text{Pr}}} q_{\xi z0}^{\text{Pr}\,K} V_{\xi z0}^{\text{Pr}\,K}(x, y)$$
(2.17)

$$Q_{pl}^{\xi z1}(x, y, t) = q_{\xi z1}^{pl} + \sum_{K=1}^{K_{\text{Pr}}} q_{\xi z1}^{\text{Pr} K} V_{\xi z1}^{\text{Pr} K}(x, y)$$
(2.18)

Здесь  $T_{pl}(x, y, z, t)$  – температура пластины;  $q_{\kappa 1}^{\Pr t 1}$  – тепловой поток t1-го тепловыделяющего прибора ИИС на грань  $\kappa 1$  пластины;  $q_{\xi x}^{stgs N_s}$  – управляемый тепловой поток  $N_s$ -го ТН СТГС на грани  $\xi_x$  пластины;  $q_{\kappa 1}^{pl}$  – поток теплообмена грани  $\kappa 1$  пластины с внешней средой, определяемый формулой (2.7);  $q_{\xi x}^{fi}$  – потоки теплообмена fi-ой области контакта стенки ТР СЖО и граней  $\xi_x = \xi_{x0}$ ,  $\xi_x = \xi_{x1}$  пластины;  $V_{\kappa 1}^{Pr t1}$  – функция, определяющая местоположение t1-го тепловыделяющего прибора ИИС на грани  $\kappa 1$  пластины;  $V_{\xi x}^{stgs N_s}$  – функции, определяющие местоположение  $N_s$ -го ТН СТГС на гранях  $\xi_x = \xi_{x0}$  и  $\xi_x = \xi_{x1}$  пластины;  $V_{\xi x}^{stgs N_s}$  – функции, определяющие местоположение  $N_s$ -го СТГС на гранях  $\xi_x = \xi_{x0}$  и  $\xi_x = \xi_{x1}$  пластины;  $V_{\xi x}^{fi}$  – функции, определяющие местоположение fi-ой области контакта стенки ТР СЖО и граней  $\xi_{x0}$  и  $\xi_{x1}$  пластины местоположение fi-ой области контакта стенки ТР СЖО и граней соответственно.

Обозначения координат областей  $V_{\kappa 1}^{ist O}$  ( $V_{\kappa 1}^{Pr \ t 1}$ ,  $V_{\xi x}^{stgs N_s}$ ) контакта теплоисточников  $q_{\kappa 1}^{ist O}$  ( $q_{\kappa 1}^{Pr \ t 1}$ ,  $q_{\kappa 1}^{stgs \ N_s}$ ) с поверхностями пластины для граней  $\xi_x = \xi_{x0}$  и  $\xi_x = \xi_{x1}$  представлены на рисунке 2.1:  $A_{\xi x}^{ist O}$  ( $A_{\xi x}^{ist O \ y}, A_{\xi x}^{ist O \ z}$ ),  $B_{\xi x}^{ist O \ z}$ ( $B_{\xi x}^{ist O \ y}, B_{\xi x}^{ist O \ z}$ ),  $C_{\xi x}^{ist O \ z}$ ( $C_{\xi x}^{ist O \ y}, C_{\xi x}^{ist O \ z}$ ),  $D_{\xi x}^{ist O \ z}$ ). Для других граней пластины обозначения аналогичны, для  $\xi_y = \xi_{y0}$  и  $\xi_y = \xi_{y1}$ :  $A_{\xi y}^{ist O \ z}$ ),  $B_{\xi y}^{ist O \ z}$ ,  $C_{\xi y}^{ist O \ z}$ ( $C_{\xi y}^{ist O \ z}, C_{\xi y}^{ist O \ z}$ ),  $D_{\xi y}^{ist O \ z}$ ,  $D_{\xi y}^{ist O \ x}, D_{\xi y}^{ist O \ z}$ ),  $D_{\xi y}^{ist O \ x}, D_{\xi y}^{ist O \ x}, D_{\xi y}^{ist O \ z}$ ),  $D_{\xi y}^{ist O \ x}, D_{\xi y}^{ist O \ y}, D_{\xi y}^{ist O \ x}, D_{\xi y}^{ist O \ x}, D_{\xi y}^{ist O \ y}, D_{\xi y}^{ist O \ x}, D_{\xi z}^{ist O \ y}, D_{\xi z}^{ist O \ y}, D_{\xi z}^{ist O \ x}, D_{\xi z}^{ist O \ y}, D_{\xi z}$ 



Рисунок 2.1 – Обозначение координат теплоисточников для  $\xi_x$ 

Функции, определяющие местоположение каждого O-го теплоисточника на соответствующей грани пластины, определяются одинаковым способом, для граней  $\xi_x$ :

$$V_{\xi x}^{ist \ O}(y, z) = \left[ 1(y - A_{\xi x}^{istO \ y}) - 1(y - B_{\xi x}^{istO \ y}) \right] \cdot \left[ 1(z - A_{\xi x}^{istO \ z}) - 1(z - D_{\xi x}^{istO \ z}) \right]$$
(2.19)

для граней  $\xi_y$ :

$$V_{\xi_{y}}^{ist O}(x, z) = \left[1(x - A_{\xi_{y}}^{istO x}) - 1(x - D_{\xi_{y}}^{istO x})\right] \cdot \left[1(z - A_{\xi_{y}}^{istO z}) - 1(z - B_{\xi_{y}}^{istO z})\right]$$
(2.20)

для граней  $\xi_z$ :

$$V_{\xi_{z}}^{ist O}(x, y) = \left[ 1(x - A_{\xi_{z}}^{istO x}) - 1(x - D_{\xi_{z}}^{istO x}) \right] \cdot \left[ 1(y - A_{\xi_{z}}^{istO y}) - 1(y - B_{\xi_{z}}^{istO y}) \right]$$
(2.21)

1(·) – функция Хевисайда.

Аналогично обозначены координаты вершин прямоугольной fi-ой области контакта TP и пластины для граней  $\xi_x$ :  $A_{\xi_x}^{fi}(A_{\xi_x}^{fi\,y}, A_{\xi_x}^{fi\,z}), B_{\xi_x}^{fi\,z}(B_{\xi_x}^{fi\,y}, B_{\xi_x}^{fi\,z}), C_{\xi_x}^{fi\,z}(C_{\xi_x}^{fi\,y}, C_{\xi_x}^{fi\,z}),$  $D_{\xi_x}^{fi}(D_{\xi_x}^{fi\,y}, D_{\xi_x}^{fi\,z})$ . Функции  $V_{\xi_x}^{fi}$  fi-ой области контакта TP и пластины для граней  $\xi_x$ :

$$V_{\xi_x}^{fi}(y,z) = \left[ \mathbf{1}(y - A_{\xi_x}^{fi\,y}) - \mathbf{1}(y - B_{\xi_x}^{fi\,y}) \right] \cdot \left[ \mathbf{1}(z - A_{\xi_x}^{fi\,z}) - \mathbf{1}(z - D_{\xi_x}^{fi\,z}) \right]$$
(2.22)

Для придания результатам диссертации обобщенного характера, позволяющего использовать их для различных модификаций АО, краевая задача (2.8-2.12) для относительной температуры пластины  $\theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  записывается в относительных переменных:

$$\frac{\partial \theta_{pl}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^{2} \theta_{pl}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial l_{x}^{2}} + \frac{\partial^{2} \theta_{pl}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial l_{y}^{2}} + \frac{\partial^{2} \theta_{pl}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial l_{z}^{2}}$$

$$0 < l_{x} < R_{1} \cdot R_{2}^{-1}, 0 < l_{y} < 1, 0 < l_{z} < R_{3} \cdot R_{2}^{-1}, \phi \in (0; \infty)$$

$$\theta_{pl}^{0}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, 0) = (T_{pl}^{0} - T^{*}) \cdot T^{*-1}$$

$$(2.24)$$

$$-\frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_x} \bigg|_{l_x=0} = Q_{pl}^{\xi l x 0}(l_y, l_z, \phi), \quad -\frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_x} \bigg|_{l_x=R_1 \cdot R_2^{-1}} = Q_{pl}^{\xi l x 1}(l_y, l_z, \phi)$$
(2.25)

$$-\frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_y} \bigg|_{l_y=0} = Q_{pl}^{\xi l y 0}(l_x, l_z, \phi), \quad -\frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_y} \bigg|_{l_y=1} = Q_{pl}^{\xi l y 1}(l_x, l_z, \phi)$$
(2.26)

$$-\frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_z}\Big|_{l_z=0} = Q_{pl}^{\xi l_z 0}(l_x, l_y, \phi), \quad -\frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_z}\Big|_{l_z=R_3 \cdot R_2^{-1}} = Q_{pl}^{\xi l_z 1}(l_x, l_y, \phi)$$
(2.27)

$$Q_{pl}^{\xi l x 0}(l_{y}, l_{z}, \phi) = q_{\xi l x 0}^{pl} + \sum_{N=1}^{N_{\text{Pr}}} q_{\xi l x 0}^{\text{Pr} N} V_{\xi l x 0}^{\text{Pr} N}(l_{y}, l_{z}) + \sum_{i=1}^{N_{tr}} q_{\xi l x 0}^{fi} V_{\xi l x 0}^{fi}(l_{y}, l_{z}) + \sum_{N_{s}=1}^{N_{stgs}} q_{\xi l x 0}^{stgs N_{s}} V_{\xi l x 0}^{stgs N_{s}}(l_{y}, l_{z})$$
(2.28)

$$Q_{pl}^{\xi l x 1}(l_{y}, l_{z}, \phi) = q_{\xi l x 0}^{pl} + \sum_{N=1}^{N_{\text{Pr}}} q_{\xi l x 1}^{\text{Pr} N} V_{\xi l x 1}^{\text{Pr} N}(l_{y}, l_{z}) + \sum_{i=1}^{N_{tr}} q_{\xi l x 1}^{fi} V_{\xi l x 1}^{fi}(l_{y}, l_{z}) + \sum_{N_{s}=1}^{N_{stgs}} q_{\xi l x 1}^{stgs N_{s}} V_{\xi l x 1}^{stgs N_{s}}(l_{y}, l_{z})$$
(2.29)

$$Q_{pl}^{\xi l y 0}(l_x, l_z, \phi) = q_{\xi l y 0}^{pl} + \sum_{M=1}^{M_{\text{Pr}}} q_{\xi l y 0}^{\text{Pr}\,M} V_{\xi l y 0}^{\text{Pr}\,M}(l_x, l_z)$$
(2.30)

$$Q_{pl}^{\xi ly1}(l_x, l_z, \phi) = q_{\xi ly1}^{pl}$$
(2.31)

$$Q_{pl}^{\xi l z 0}(l_x, l_y, \phi) = q_{\xi l z 0}^{pl} + \sum_{K=1}^{K_{\text{Pr}}} q_{\xi l z 0}^{\text{Pr} K} V_{\xi l z 0}^{\text{Pr} K}(l_x, l_y)$$
(2.32)

$$Q_{pl}^{\xi l z 1}(l_x, l_y, \phi) = q_{\xi l z 1}^{pl} + \sum_{K=1}^{K_{\text{Pr}}} q_{\xi l z 1}^{\text{Pr} K} V_{\xi l z 1}^{\text{Pr} K}(l_x, l_y)$$
(2.33)

Здесь:  $l_y = y \cdot R_2^{-1}$ ,  $l_x = x \cdot R_2^{-1}$ ,  $l_z = z \cdot R_2^{-1}$ ;  $\phi = \frac{a \cdot t}{R_2^2}$  – число Фурье;  $a = \frac{\lambda}{c_{pl}\rho}$  – коэффициент

температуропроводности;  $\kappa^2 = \xi_{lx}, \xi_{ly}, \xi_{lz}$  – обозначение граней  $\xi_{lx} = \xi_{lx0}$   $(l_x = 0), \xi_{lx} = \xi_{lx1}$  $(l_x = R_1 \cdot R_2^{-1}), \xi_{ly} = \xi_{ly0}$   $(l_y = 0), \xi_{ly} = \xi_{ly1}$   $(l_y = 1), \xi_{lz} = \xi_{lz0}$   $(l_z = 0), \xi_{lz} = \xi_{lz1}$   $(l_z = R_3 \cdot R_2^{-1})$ пластины соответственно;  $Q_{pl}^{\kappa^2}$  – это суммарные тепловые потоки на гранях  $\kappa^2$  HK;  $q_{\kappa2}^{\text{Pr}\ t1}, V_{\kappa2}^{\text{Pr}\ t1}$  – тепловой поток t1-го тепловыделяющего прибора ИИС на грань  $\kappa^2$ пластины и функция, определяющая на ней его местоположение;  $q_{\xi lx}^{stgs}, V_{\xi lx}^{stgs}, V_{\xi lx}^{stgs}, N_s$  – управляемый тепловой поток  $N_s$ -го TH CTFC на грани  $\xi_{lx}$  пластины и функция, определяющая на ней его местоположение;  $q_{\xi lx}^{fi}, V_{\xi lx}^{fi}$  – потоки теплообмена fi-ой области контакта стенки TP СЖО и граней  $\xi_{lx} = \xi_{lx0}, \quad \xi_{lx} = \xi_{lx1}$  пластины и функция, определяющая местоположение указанной области;  $q_{\kappa 2}^{pl} = Bi(\theta_{sred}(\phi) - \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi))$ ,  $\theta_{sred} = (T_{sred} - T^*) \cdot T^{*-1}, T^* = T_{sred}$ ,  $Bi = Bio \cdot T^{*-1}$ ,  $Bio = \frac{\alpha \cdot R_2}{\lambda}$  – критерий Био,  $q_{\xi lx}^{fi} = K_l \cdot q_{\xi x}^{fi}$ ,  $q_{\kappa 2}^{\text{Pr} \ l 1} = K_l \cdot q_{\kappa 1}^{\text{Pr} \ l 1}, q_{\xi lx}^{stgs \ N_s} = K_l \cdot q_{\xi x}^{stgs \ N_s}, K_l = \frac{R_2}{\lambda \cdot T^*}$ .

Обозначение областей контакта теплоисточников с поверхностями пластины в относительных переменных для граней  $\xi_{lx}$ :  $A_{\xi lx}^{ist O}(A_{\xi lx}^{ist O ly}, A_{\xi lx}^{ist O lz})$ ,  $B_{\xi lx}^{ist O ly}, B_{\xi lx}^{ist O ly}, B_{\xi lx}^{ist O lz})$ ,  $C_{\xi lx}^{ist O}(C_{\xi lx}^{ist O ly}, C_{\xi lx}^{ist O lz})$ ,  $D_{\xi lx}^{ist O ly}, D_{\xi lx}^{ist O ly}, D_{\xi lx}^{ist O lz})$ ; для граней  $\xi_{ly}$ :  $A_{\xi ly}^{ist O}(A_{\xi ly}^{ist O x}, A_{\xi ly}^{ist O z})$ ,  $B_{\xi ly}^{ist O}(B_{\xi ly}^{ist O x}, B_{\xi ly}^{ist O z})$ ,  $C_{\xi ly}^{ist O (C x O x}, C_{\xi ly}^{ist O z})$ ,  $D_{\xi ly}^{ist O (D x O x}, D_{\xi ly}^{ist O x}, D_{\xi ly}^{ist O z})$ ; для граней  $\xi_{lz}$ :  $A_{\xi lz}^{ist O}(A_{\xi lz}^{ist O lx}, A_{\xi lz}^{ist O ly})$ ,  $B_{\xi lz}^{ist O (B x O lx}, B_{\xi lz}^{ist O ly})$ ,  $C_{\xi lz}^{ist O (D x O lx}, C_{\xi lz}^{ist O lx}, D_{\xi lz}^{ist O lx}, D_{\xi lz}^{ist O ly})$ ;  $D_{\xi lz}^{ist O lx}, D_{\xi lz}^{ist O ly}, D_{\xi lz}^{ist O ly})$ ,  $A_{\xi lz}^{ist O (A_{\xi lz}^{ist O lx}, A_{\xi lz}^{ist O ly})$ ,  $B_{\xi lz}^{ist O (B \xi lx}^{ist O lx}, B_{\xi lz}^{ist O ly})$ ,  $C_{\xi lz}^{ist O (C \xi lz}, C_{\xi lz}^{ist O lx}, C_{\xi lz}^{ist O ly})$ ,  $D_{\xi lz}^{ist O ly}, D_{\xi lz}^{ist O ly}, D_{\xi lz}^{ist O ly})$ , Функции, определяющие местоположение тепловыделяющих приборов ИИС и TH СТГС на соответствующих гранях, в относительных переменных представлены формулами для граней  $\xi_{lx}$ :

$$V_{\xi lx}^{ist \ O} = \left[ 1(l_z - A_{\xi lx}^{ist \ O \ lz}) - 1(l_z - D_{\xi lx}^{ist \ O \ lz}) \right] \cdot \left[ 1(l_y - A_{\xi lx}^{ist \ O \ ly}) - 1(l_y - B_{\xi lx}^{ist \ O \ ly}) \right]$$
(2.34)

для граней  $\xi_{ly}$ :

$$V_{\xi ly}^{ist \ O} = \left[ 1(l_x - A_{\xi ly}^{ist \ O \ lx}) - 1(l_x - D_{\xi ly}^{ist \ O \ lx}) \right] \cdot \left[ 1(l_z - A_{\xi ly}^{ist \ O \ lz}) - 1(l_z - B_{\xi ly}^{ist \ O \ lz}) \right]$$
(2.35)

для граней  $\xi_{lz}$ :

$$V_{\xi l z}^{ist \ O} = \left[ 1(l_x - A_{\xi l z}^{ist O \ l x}) - 1(l_x - D_{\xi l z}^{ist O \ l x}) \right] \cdot \left[ 1(l_y - A_{\xi l z}^{ist O \ l y}) - 1(l_y - B_{\xi l z}^{ist O \ l y}) \right]$$
(2.36)

Координаты fi-ой области контакта TP и пластины для граней  $\xi_{lx}$  представленные в относительных переменных:  $A_{\xi lx}^{fi}(A_{\xi lx}^{fi\,ly}, A_{\xi lx}^{fi\,lz}), \quad B_{\xi lx}^{fi}(B_{\xi lx}^{fi\,ly}, B_{\xi lx}^{fi\,lz}), \quad C_{\xi lx}^{fi}(C_{\xi lx}^{fi\,ly}, C_{\xi lx}^{fi\,lz}),$  $D_{\xi lx}^{fi}(D_{\xi lx}^{fi\,ly}, D_{\xi lx}^{fi\,lz}).$  Функции  $V_{\xi lx}^{fi}$  fi-ой области контакта TP и пластины для граней  $\xi_{lx}$ :

$$V_{\xi lx}^{fi}(l_y, l_z) = \left[1(l_y - A_{\xi lx}^{fi\,ly}) - 1(l_y - B_{\xi lx}^{fi\,ly})\right] \cdot \left[1(l_z - A_{\xi lx}^{fi\,lz}) - 1(l_z - D_{\xi lx}^{fi\,lz})\right]$$
(2.37)

## 2.2 Методика определения температурного распределения несущей конструкции

Математическая модель (2.23-2.27) может быть использована после параметрической идентификации в качестве базы для функционально-ориентированной
модели (ФОМ) температурного состояния НК. Рассматриваются возможные эквивалентные преобразования ФОМ. Для использования ФОМ в задачах автоматического управления требуются различные ее формы. В частности используются методы получения ФОМ в явной форме.

В диссертации используется явная форма ФОМ в виде: аналитического решения соответствующих краевых задач при указанных допущениях; ПФ ОРП и их конечномерных аппроксимаций; численного решения в программной среде ANSYS уточненных краевых задач без некоторых допущений, необходимых для аналитического решения и получения ПФ.

Методика определения температурного распределения несущей конструкции: 1. Решение  $\theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  трехмерной краевой задачи (2.23-2.27) в соответствии с принципом суперпозиции рассматривается как сумма температурных компонент:

$$\theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi) = \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi) + \tilde{\theta}_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi) + \theta_{pl0}^{(3)}(l_x, l_y, l_z, \phi) + \theta_{pl}^{f}(l_x, l_y, l_z, \phi)$$
 (2.38)  
 $\theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  – температурная компонента, определяющая воздействие  
теплоисточников (от приборов ИИС и ТН СТГС) при отсутствии внешнего теплообмена  
пластины со средой ( $q_{\kappa 2}^{pl} = 0$ ) и отсутствии воздействия СЖО на гранях пластины  
( $q_{\xi lx}^{fl} = 0$ );

 $\tilde{\theta}_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  – температурная компонента, учитывающая внешний теплообмен со средой при нулевых потоках от теплоисточников ( $q_{\kappa 2}^{ist O} = 0$ ) и отсутствии воздействия СЖО ( $q_{\xi lx}^{fi} = 0$ );

 $\theta_{pl0}^{(3)}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  – температурная компонента, учитывающая начальную температуру пластины;

 $\theta_{pl}^{f}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)$  – температурная компонента, определяющая воздействие TP tr1...tr5 на области контакта f1...f5 с пластиной при  $q_{\kappa 2}^{ist O} = 0$  и  $q_{\kappa 2}^{pl} = 0$ .

2. Воздействие внешних теплоисточников на пластину – тепловыделяющей аппаратуры ИИС и ТН СТГС определяется отдельно температурной компонентой  $\theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  [106-109].

Краевая задача с ГУ-2 для температурной компоненты  $\theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)$ , отражающей воздействие теплоисточников имеет вид:

$$\frac{\partial \theta_{srce}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^{2} \theta_{srce}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial l_{x}^{2}} + \frac{\partial^{2} \theta_{srce}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial l_{y}^{2}} + \frac{\partial^{2} \theta_{srce}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi)}{\partial l_{z}^{2}}, 0 < l_{x} < \frac{R_{1}}{R_{2}}, 0 < l_{y} < 1, 0 < l_{z} < \frac{R_{3}}{R_{2}}, \phi \in (0; \phi_{k})$$

$$\theta_{srce}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, 0) = 0 \qquad (2.40)$$

$$-\frac{\partial \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_x} \bigg|_{lx=0} = \sum_{O=1}^{O_x} q_{\xi l x 0}^{ist O} \cdot V_{\xi l x 0}^{ist O}, \quad -\frac{\partial \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_x} \bigg|_{lx=R_1 \cdot R_2^{-1}} = \sum_{O=1}^{O_x} q_{\xi l x 1}^{ist O} \cdot V_{\xi l x 1}^{ist O}$$
(2.41)

$$-\frac{\partial \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_y} \bigg|_{ly=0} = \sum_{O=1}^{O_y} q_{\xi ly0}^{ist O} \cdot V_{\xi ly0}^{ist O}, \quad -\frac{\partial \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_y} \bigg|_{ly=1} = \sum_{O=1}^{O_y} q_{\xi ly1}^{ist O} \cdot V_{\xi ly1}^{ist O}$$
(2.42)

$$-\frac{\partial \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_z} \bigg|_{lz=0} = \sum_{O=1}^{O_z} q_{\xi l z 0}^{ist O} \cdot V_{\xi l z 0}^{ist O}, \quad -\frac{\partial \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_z} \bigg|_{lz=R_3 \cdot R_2^{-1}} = \sum_{O=1}^{O_z} q_{\xi l z 0}^{ist O} \cdot V_{\xi l z 0}^{ist O}$$
(2.43)

Здесь  $O_x = N_{\text{Pr}}, N_{stgs}$  – количество теплоисточников на гранях  $\xi_{lx}, O_y = M_{\text{Pr}}$  – количество теплоисточников на гранях  $\xi_{ly}, O_z = K_{\text{Pr}}$  – количество теплоисточников на гранях  $\xi_{lz}$ . Решение этой задачи определяется суммой соответствующих одномерных задач для неограниченных пластин [56].

3. Трехмерное температурное распределение краевой задачи  $\tilde{\theta}_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  для пластины конечных размеров при теплообмене ее с окружающей средой определяется произведением  $\tilde{\theta}_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi) = \tilde{\theta}_{pl}(l_x, \phi) \cdot \tilde{\theta}_{pl}(l_y, \phi) \cdot \tilde{\theta}_{pl}(l_z, \phi)$  решений  $\tilde{\theta}_{pl}(l_x, \phi)$ ,  $\tilde{\theta}_{pl}(l_y, \phi)$ ,  $\tilde{\theta}_{pl}(l_z, \phi)$  одномерных краевых задач для трех неограниченных пластин при  $q_{\kappa 2}^{ist O} = 0$  и  $q_{pl}^{fi}_{\xi lx} = 0$  [5,11,43,45,110,111]:

$$\left[\frac{\partial \tilde{\theta}_{pl}(l_x,\phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^2 \tilde{\theta}_{pl}(l_x,\phi)}{\partial l_x^2}, \ 0 < l_x < R_1 \cdot R_2^{-1}, \ \phi \in (0;\infty),\right]$$
(2.44)

$$\begin{cases} \theta_{pl}^{0}(l_{x},0) = (T_{pl}^{0} - T^{*}) \cdot T^{*-1}, \\ \tilde{z} \in 0 \end{cases}$$
(2.45)

$$\left[ -\frac{\tilde{\theta}_{pl}^{\xi lx0}(0,\phi)}{\partial l_{x}} = Q_{pl}^{\xi lx0} \Big|_{\substack{q_{\xi lx0}^{ist \ O} = 0\\ q_{\beta l}^{fi} \xi lx0} = 0} = q_{\xi lx0}^{pl}(\phi), -\frac{\tilde{\theta}(R_{1} \cdot R_{2}^{-1},\phi)}{\partial l_{x}} = Q_{pl}^{\xi lx0} \Big|_{\substack{q_{\xi lx1}^{ist \ O} = 0\\ q_{\beta l}^{fi} \xi lx1} = 0} = q_{\xi lx1}^{pl}(\phi)$$
(2.46)

$$\left[\frac{\partial \tilde{\theta}_{pl}(l_y,\phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^2 \tilde{\theta}_{pl}(l_y,\phi)}{\partial l_y^2}, \ 0 < l_y < 1, \ \phi \in (0;\infty),$$
(2.47)

$$\begin{cases} \theta_{pl}^{0}(l_{y},0) = (T_{pl}^{0} - T^{*}) \cdot T^{*-1}, \\ (2.48) \end{cases}$$

$$-\frac{\tilde{\theta}_{pl}^{\xi l y 0}(0,\phi)}{\partial l_{y}} = Q_{pl}^{\xi l y 0}\Big|_{q_{\xi l y 0}^{ist \, O} = 0} = q_{\xi l y 0}^{pl}(\phi), \quad -\frac{\tilde{\theta}_{pl}^{\xi l y 1}(1,\phi)}{\partial l_{y}} = \tilde{Q}_{pl}^{\xi l y 1}\Big|_{q_{\xi l y 1}^{ist \, O} = 0} = q_{\xi l y 1}^{pl}(\phi)$$
(2.49)

$$\left|\frac{\partial \tilde{\theta}_{pl}(l_z,\phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^2 \tilde{\theta}_{pl}(l_z,\phi)}{\partial l_z^2}, \ 0 < l_z < R_3 \cdot R_2^{-1}, \ \phi \in (0;\infty),$$
(2.50)

$$\theta_{pl}^{0}(l_{z},0) = (T_{pl}^{0} - T^{*}) \cdot T^{*-1}, \qquad (2.51)$$

$$-\frac{\tilde{\theta}_{pl}^{\xi l z 0}(0,\phi)}{\partial l_{z}} = Q_{pl}^{\xi l z 0}\Big|_{q_{\xi l z 0}^{ist \, 0} = 0} = q_{\xi l z 0}^{pl}(\phi), \quad -\frac{\tilde{\theta}_{pl}^{\xi l z 1}(R_{3} \cdot R_{2}^{-1},\phi)}{\partial l_{z}} = Q_{pl}^{\xi l z 1}\Big|_{q_{\xi l z 1}^{ist \, 0} = 0} = q_{\xi l z 1}^{pl}(\phi)$$
(2.52)

4. Определяется тепловое воздействие СЖО на НК. Для охлаждения пластины на определенных ее гранях  $\xi_{lx0}$  и  $\xi_{lx1}$  располагаются ТР СЖО с протекающим в них жидкостным теплоносителем. Управление температурой теплоносителя в ТР осуществляется путем изменения температуры теплоносителя на входе в ТР, на вход ТР через клапан поступают потоки теплоносителя с различной температурой и смешиваются в требуемом соотношении.

Тепловое воздействие пластины с температурой  $\theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  на стенку ТР температурой  $\theta_{st}^{fi\,\xi lx}$  с протекающем в ТР жидкостным теплоносителем с температурой  $\theta_{sh}^{fi\,\xi lx}$  отражается моделью идеального теплового контакта двух соприкасающихся своими поверхностями тел с различными теплофизическими свойствами [112-114]. Граничные условия в области контакта – условия неразрывности температур и тепловых потоков (граничное условие четвертого рода).

В соответствии с допущениями (см. раздел 2.1) ТР с жидкостным теплоносителем, соприкасающийся с пластиной, разбивается на  $J_d = 7$  дискретных участков (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – ТР, соприкасающийся с пластиной

Тепловое взаимодействие между каждым j-м,  $j = \overline{1, J_d}$  участком пластины и TP определяется температурой  $\theta_{\xi lx}^{fi}$ , распределенной по длине контакта в границах f1...f5, которая ступенчато аппроксимируется  $J_d$  дискретными участками  $(a_1, b_1), ..., (a_{J_d}, b_{J_d})$  с соответствующими температурами  $\theta_{\xi lx}^{fi}$ , ...,  $\theta_{\xi lx}^{fi}$ , где в соответствии с допущениями теплопередача действует только перпендикулярно стенке TP, здесь fi – область контакта TP с пластиной, i-номер TP на соответствующей стороне пластины

$$\theta_{\xi lx}^{fi} \approx \sum_{j=1}^{J_d} \theta_{\xi lx-j}^{fi} \left[ \mathbf{1}(a_j) - \mathbf{1}(b_j) \right]$$
(2.53)

При этом тепловые потоки между пластиной и стенкой TP  $q_{\xi lx\ j}^{fi}$  аппроксимируются тепловыми потоками  $q_{\xi lx\ J_d}^{fi}$  на участках  $(a_1,b_1),...,(a_{J_d},b_{J_d})$ :

$$q_{\xi lx}^{fi} \approx \sum_{j=1}^{J_d} q_{\xi lx \ j}^{fi} \left[ \mathbf{1}(a_j) - \mathbf{1}(b_j) \right]$$
(2.54)

Рассматривается произвольный дискретный j-ый участок TP  $(a_j,b_j)$ , соприкасающейся с пластиной областью fi на грани  $\xi_{lx1}$ . Температура  $\theta_{st j}^{fi} \xi^{lx1}$  стенки j-го участка TP. На внешнюю стенку j-го участка TP с температурой  $\theta_{\xi lx1 j}^{fi}$  области контакта с  $\xi_{lx1}$  гранью пластины действует поток  $q_{\xi lx1 j}^{fi}$ . От внутренней стенки на теплоноситель действует поток  $q_{d j}^{fi} \xi^{lx1}$ , температуры теплоносителя  $\theta_{zh j}^{fi} \xi^{lx1}$  на входе и выходе выбранного участка  $\theta_{zh1 j}^{fi}, \theta_{zh2 j}^{fi}$  соответственно;  $\theta_{st2 j}^{fi}$  – температура внутренней стенки TP, совпадающая с температурой теплоносителя в месте контакта,  $\theta_{st1\,j}^{fi\,\xi lx1} = \theta_{\xi lx1\,j}^{fi}$  – температура внешней стенки TP.

Математическое описание для любого дискретного участка стенки ТР, соприкасающейся с пластиной, в общем виде выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \theta_{st j}^{fi \,\xi lx1}(l_x,\phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^2 \theta_{st j}^{fi \,\xi lx1}(l_x,\phi)}{\partial l_x^2}$$
(2.55)

 $R_1 \cdot R_2^{-1} < l_x < R \cdot R_2^{-1}, a_j < l_z < b_j, l_y = ly_p = const, \ \phi \in (0; \infty)$ 

здесь  $ly_p$  – координата по  $l_y$ , на которой находится ТР.

$$\theta_{st\ j}^{fi\ \xi lx1}(l_x,0) = \theta_{pl}^0 \tag{2.56}$$

$$\theta_{pl}(R_1 \cdot R_2^{-1}, ly_p, l_z, \phi) = \theta_{st j}^{fi \,\xi lx1}(R_1 \cdot R_2^{-1}, ly_p, l_z, \phi)$$
(2.57)

$$-\frac{\partial \theta_{pl}}{\partial l_x}\bigg|_{lx=R_1 \cdot R_2^{-1}} = -\frac{\lambda_{st}}{\lambda \cdot T^*} \frac{\partial \theta_{st j}^{fi \xi lx1}}{\partial l_x}\bigg|_{lx=R_1 \cdot R_2^{-1}} = q_{\xi lx1 j}^{fi}$$
(2.58)

$$-\lambda_{st} \left. \frac{\partial \theta_{st j}^{fi \,\xi lx1}}{\partial l_x} \right|_{lx=R \cdot R_2^{-1}} = q_{d j}^{fi \,\xi lx1}, \qquad (2.59)$$

где  $\theta_{st j}^{fi \xi lx1}$  – относительное температурное распределение стенки j-го участка TP на грани пластины  $\xi_{lx1}$ ;  $\alpha_{st}$  – коэффициент теплоотдачи между стенкой TP и теплоносителем;  $R = R_1 + \delta_{st}$ .

Температура теплоносителя в условиях принятых допущений описывается дифференциальным уравнением [31]:

$$q_{d j}^{fi\,\xi lx1} = Mc_{zh} \frac{\partial \theta_{zh j}^{fi\,\xi lx1}}{\partial l_z} + S_{tube} \rho_{zh} c_{zh} \frac{\partial \theta_{zh j}^{fi\,\xi lx1}}{\partial \phi}$$
(2.60)

$$q_{d j}^{fi \,\xi lx1} = U \alpha_{st} (\theta_{st2 j}^{fi \,\xi lx1} - \theta_{zh j}^{fi \,\xi lx1})$$
(2.61)

$$\left. \theta_{zh\,j}^{fi\,\xi lx1}(l_z,\phi) \right|_{\phi=0} = \theta_{zh0}^{fi\,\xi lx1}(l_z,0) \tag{2.62}$$

$$\left. \theta_{zh\,j}^{fi}(l_z,\phi) \right|_{l_z=0} = 0 \tag{2.63}$$

 $\theta_{zh\,j}^{fi\,\xi lx1}(l_z,\phi) = \left(T_{zh\,j}^{fi\,\xi lx1}(l_z,t) - T^*\right) \cdot \left(T^*\right)^{-1}$  – относительное температурное распределение жидкого теплоносителя в выбранном участке,  $T_{zh\,j}^{fi\,\xi lx1}(l_z,t)$  – температура жидкого теплоносителя в абсолютных величинах,  $U = \pi \cdot d_{vnutr}$  – внутренний контур TP.

5. Решение поставленной трехмерной краевой задачи (2.23-2.27) – температурное распределение в пластине с учетом всех тепловых воздействий  $\theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  определяется суммированием отдельных температурных компонент с помощью различных инструментальных программных средств – MATLAB, Mathcad и др.

#### 2.3 Аналитическое решение теплогидравлических краевых задач

#### 2.3.1 Решение краевой задачи воздействия внешних теплоисточников

Для решения одномерных краевых задач, составляющих краевую задачу (2.39-2.43), в диссертации применяется метод конечных интегральных преобразований Фурье [115-118] с использованием функции Грина в качестве ядра интегрального преобразования [11] для исключения пространственных координат, определения соответствующих этим преобразованиям трансформант Фурье и искомых температурных распределений  $\theta_{srce}(l_x,\phi)$ ,  $\theta_{srce}(l_y,\phi)$ ,  $\theta_{srce}(l_z,\phi)$ .

Определяются собственные числа  $\mu_n, \psi_m, \gamma_k$  для  $l_x, l_y, l_z$ :

$$\mu_n = \frac{\pi n R_2}{R_1} , n = 0, 1, 2, 3...$$
(2.64)

$$\psi_m = \pi m, \ m = 0, 1, 2, 3...$$
 (2.65)

$$\gamma_k = \frac{\pi k R_2}{R_3}, k = 0, 1, 2, 3...$$
(2.66)

и нормированные системы собственных функций  $\varphi_n(\mu_n, l_x), \varphi_m(\psi_m, l_y), \varphi_k(\gamma_k, l_z)$  для одномерных задач, составляющих краевую задачу (2.39-2.43), с нормирующими коэффициентами:

$$E_{n} = \sqrt{\int_{0}^{R_{1} \cdot R_{2}^{-1}} \left[ \varphi_{n}^{*}(\mu_{n}, l_{x}) \right]^{2} r(l_{x}) dl_{x}} = \begin{cases} \sqrt{R_{1} \cdot R_{2}^{-1}}, n = 0\\ \sqrt{R_{1} \cdot (2R_{2})^{-1}}, n = 1, 2, 3... \end{cases}$$
(2.67)

$$E_m = \begin{cases} 1, m = 0\\ \sqrt{0.5}, m = 1, 2, 3... \end{cases}$$
(2.68)

$$E_{k} = \begin{cases} \sqrt{R_{3} \cdot R_{2}^{-1}}, k = 0\\ \sqrt{R_{3} \cdot (2R_{2})^{-1}}, k = 1, 2, 3... \end{cases}$$
(2.69)

имеющие вид:

$$\varphi_n(\mu_n, l_x) = \frac{1}{E_n} \cos\left(\pi n \frac{R_2 l_x}{R_1}\right), \ n = 0, 1, 2, 3...$$
(2.70)

$$\varphi_m(\psi_m, l_y) = \frac{1}{E_m} \cos(\pi m l_y), \ m = 0, 1, 2, 3...$$
(2.71)

$$\varphi_k(\gamma_k, l_z) = \frac{1}{E_k} \cos\left(\pi k \frac{R_2 l_z}{R_3}\right), \ k = 0, 1, 2, 3....$$
(2.72)

из соответствующих задач Штурма-Лиувилля:

$$\frac{d^2 \varphi(\mu, \phi)}{dl_x^2} = -\mu^2 \varphi(\mu, \phi)$$
(2.73)

$$\frac{d\varphi(\mu,0)}{dl_x} = 0, \, \frac{d\varphi(\mu,R_1 \cdot R_2^{-1})}{dl_x} = 0$$
(2.74)

$$\left[\frac{d^2\varphi(\psi,\phi)}{dl_v^2} = -\psi^2\varphi(\psi,\phi)\right]$$
(2.75)

$$\frac{d\varphi(\psi,0)}{dl_y} = 0, \ \frac{d\varphi(\psi,1)}{dl_y} = 0$$
(2.76)

$$\left[\frac{d^2\varphi(\gamma,\phi)}{dl_z^2} = -\gamma^2\varphi(\gamma,\phi)\right]$$
(2.77)

$$\frac{d\varphi(\gamma,0)}{dl_z} = 0, \ \frac{d\varphi(\gamma,1)}{dl_z} = 0$$
(2.78)

Функция Грина (называемая также функцией точечного источника, функцией влияния, импульсной переходной функцией) является фундаментальным решением одномерных краевых задач. Она отражает реакцию краевой задачи с нулевыми НУ и ГУ на точечное импульсное воздействие в виде дельта-функции, приложенное в любой фиксированной точке [119-122]. Временная компонента функции Грина  $G^*(\phi)$  любой из одномерных задач определяется из соответствующего уравнения, если согласно методу Фурье решение одномерной краевой задачи представить в виде:

 $G(l_x, l_y, l_z, \phi) = G^*(\phi) \cdot G(l_x, l_y, l_z)$ . Тогда, например, для одномерной краевой задачи по  $l_x$ , временная компонента  $G^*(\phi) = G_n^*(\phi)$ , должна удовлетворять уравнению [123]:

$$\frac{dG_n^*}{d\phi} + \mu_n^2 G_n^* = \delta(\phi) \tag{2.79}$$

с нулевыми НУ, при  $\delta(\phi) = R(\mu_n, \phi)$ , где  $R(\mu_n, \phi) - \phi$ ункция, определяемая граничными значениями.

Применяя к уравнению (2.79) преобразование Лапласа по времени из изображения  $\tilde{G}_n^*(\mu_n, p) = \frac{1}{p + \mu_n^2}$  определяется оригинал временной компоненты

функции Грина для *l<sub>x</sub>* :

$$G_n^*(\mu_n,\phi) = e(-\mu_n^2\phi) = e(-R_2^2\pi^2n^2(R_1^2)^{-1}\phi), \ n = 0,1,2...$$
(2.80)

Для  $l_y$ ,  $l_z$  аналогично:

$$G_m^*(\psi_m, \phi) = e(-\psi_m^2 \phi) = e(-\pi^2 m^2 \phi), \ m = 0, 1, 2...$$
(2.81)

$$G_k^*(\gamma_k, \phi) = e(-\gamma_k^2 \phi) = e(-R_2^2 \pi^2 k^2 (R_3^2)^{-1} \phi), \ k = 0, 1, 2...$$
(2.82)

Функция Грина для одномерных задач имеет вид:

$$G_n(l_x,\xi_{lx},\phi-\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n^{*}(\mu_n,\phi-\tau)\varphi_n(\mu_n,l_x)\varphi_n(\mu_n,\xi_{lx})r(\xi_{lx})$$
(2.83)

$$G_m(l_y, \xi_{ly}, \phi - \tau) = \sum_{m=0}^{\infty} G_m^{*}(\psi_m, \phi - \tau)\varphi_m(\psi_m, l_y)\varphi_m(\psi_m, \xi_{ly})r(\xi_{ly})$$
(2.84)

$$G_{k}(l_{z},\xi_{lz},\phi-\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} G_{k}^{*}(\gamma_{k},\phi-\tau)\varphi_{k}(\gamma_{k},l_{z})\varphi_{k}(\gamma_{k},\xi_{lz})r(\xi_{lz}),$$
(2.85)

где  $r(\xi_{lx}) = r(\xi_{ly}) = r(\xi_{lz}) = 1$  – весовые функции интегрального преобразования равные единице для рассматриваемых одномерных задач.

Реакция температурного поля пластины на внешнее воздействие определяются его сверткой с функцией Грина согласно методу конечных интегральных преобразований [56,124,125]. Компонента температурного распределения  $\theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \varphi)$  (2.39-2.43) в пластине от воздействия теплоисточников определяется согласно принципу

суперпозиции соответствующей сверткой  $q_{\kappa 1}^{ist O}$  с функцией Грина  $G_{ist}(l_x, \xi_{l_x}, l_y, \xi_{l_y}, l_z, \xi_{l_z}, \phi - \tau)$  [10,126,127]:

$$\begin{aligned} \theta_{srce}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi) &= \theta_{srce}^{lx}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi) + \theta_{srce}^{ly}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi) + \theta_{srce}^{lz}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi) \\ \theta_{srce}(l_{x}, l_{y}, l_{z}, \phi) &= \\ &= \sum_{O=1}^{O} \int_{A_{zto0}^{lin0}l^{z}} \int_{d_{zto0}^{lin0}l^{z}} \int_{d_{zto0}^{lin}l^{z}} \int_{d_{zto0}^{lin0}l^{z}} \int_{d_{zto$$

 $G_n^*, G_m^*, G_k^*$  – временные компоненты функции Грина (2.77-2.79),  $\varphi_n(\mu_n, l_x)$ ,  $\varphi_m(\psi_m, l_y)$ ,  $\varphi_k(\gamma_k, l_z)$  – нормированные системы собственных функций (2.67-2.68),  $r(\xi_{lx}) = r(\xi_{ly}) = r(\xi_{lz}) = 1$  – весовые функции интегрального преобразования.

# 2.3.2 Решение краевой задачи теплообмена с окружающей средой с неоднородным начальным условием

Неоднородное НУ  $\theta_{pl}^0 \neq 0$  в краевых задачах (2.44-2.46), (2.47-2.49), (2.50-2.52), может учитываться отдельно температурной компонентой  $\theta_{pl0}^{(3)}(l_x, l_y, l_z, \phi)$ , для которой собственные функции и собственные числа определяются соответствующей задачей Штурма-Лиувилля. Для координаты  $l_x$ :

$$\begin{cases} \frac{d^{2}\varphi(\mu,\phi)}{dl_{x}^{2}} = -\mu^{2}\varphi(\mu,\phi) \\ \frac{d\varphi(\mu,0)}{dl_{x}} = 0, \qquad \frac{d\varphi(\mu,R_{1}\cdot R_{2}^{-1})}{dl_{x}} + \frac{\alpha}{\lambda}\varphi(\mu,R_{1}\cdot R_{2}^{-1}) = 0 \end{cases}$$
(2.89)

для координат  $l_y$  и  $l_z$  аналогично.

Собственные числа задачи (2.89):

$$\eta tg(\eta) - Bi = 0, \quad \eta = \mu R_1 \cdot R_2^{-1}, \qquad Bi = \frac{\alpha}{\lambda} R_1 \cdot R_2^{-1},$$
 (2.90)

где  $\eta$  – корни трансцендентного уравнения.

Система нормированных собственных функций:

$$\varphi_n(\mu_n, l_x) = \sqrt{\frac{R_2}{R_1} \frac{2\eta_n}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cdot \cos(\eta_n)}} \cos(\eta_n \frac{l_x R_2}{R_1}), n = 1, 2, \dots$$
(2.91)

Функция, определяемая граничными условиями  $\theta_{pl}^0 \neq 0$ :

$$R(\mu_n, \phi) = R_1(\mu_n, \phi) = \frac{\alpha}{\lambda} \theta_{pl}^0(\phi) \varphi_n(\mu_n, R_1 \cdot R_2^{-1}) =$$

$$= \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{R_2}{R_1} \frac{2\eta_n}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cdot \cos(\eta_n)}} \theta_{pl}^0(\phi) \cos(\eta_n), n = 1, 2, \dots$$
(2.92)

Временная компонента функции Грина в этом случае:

$$G_n^*(\mu_n, \phi) = e(-\mu_n^2 \phi) = e(-\eta_n^2 \frac{R_2}{R_1} \phi), \ n = 1, 2...$$
(2.93)

Температурное распределение, учитывающее только начальную температуру пластины по оси  $l_x$ :

$$\begin{aligned} \theta_{pl0}^{(3)}(l_{x},\phi) &= \frac{R_{2}}{R_{1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_{n} \cos(\eta_{n}R_{2} \cdot R_{1}^{-1}l_{x})}{\eta_{n} + \sin(\eta_{n}) \cdot \cos(\eta_{n})} \int_{0}^{R_{1} \cdot R_{2}^{-1}} \theta_{pl}^{0}(\phi) \cos(\eta_{n}R_{2} \cdot R_{1}^{-1}\xi_{lx}) e(-\eta_{n}^{2} \frac{R_{2}}{R_{1}}\phi) dl_{x} = \\ &= \frac{R_{2}}{R_{1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_{n} \cos(\eta_{n}R_{2} \cdot R_{1}^{-1}l_{x})}{\eta_{n} + \sin(\eta_{n}) \cdot \cos(\eta_{n})} \theta_{pl}^{0}(\phi) e(-\eta_{n}^{2} \frac{R_{2}}{R_{1}}\phi) \frac{R_{1}}{\eta_{n}R_{2}} \sin(\eta_{n}R_{2} \cdot R_{1}^{-1}\xi_{lx}) \Big|_{0}^{R_{1} \cdot R_{2}^{-1}} = \\ &= \frac{R_{2}}{R_{1}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_{n} \cos(\eta_{n}R_{2} \cdot R_{1}^{-1}l_{x})}{\eta_{n} + \sin(\eta_{n}) \cdot \cos(\eta_{n})} \theta_{pl}^{0}(\phi) e(-\eta_{n}^{2} \frac{R_{2}}{R_{1}}\phi) \frac{R_{1}}{\eta_{n}R_{2}} \sin(\eta_{n}) \end{aligned}$$

$$(2.94)$$

Функция Грина для этого случая:

$$G(l_x,\xi_{lx},\phi-\tau) = \frac{R_2}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n \cos(\eta_n R_2 \cdot R_1^{-1} l_x)}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cdot \cos(\eta_n)} \sin(\eta_n) e(-\eta_n^2 \frac{R_2}{R_1} (\phi-\tau))$$
(2.95)

Значение  $\eta_n$  можно найти в справочных материалах [11], однако, там, чаще всего приводится ограниченное число примеров корней характеристического уравнения. Поэтому в программной среде MATLAB составлен код, позволяющий найти  $\eta_n$  для произвольного значения n (листинг 2.1). *Fminbnd* определяет минимум функционала, с помощью «@» указывается имя переменной, по которой будет вестись минимизация функции,  $z - \phi$ ормальный параметр, через который определена минимизируемая функция.

Листинг 2.1 – Определения корня трансцендентного уравнения для ГУ-3

n=8; % количество корней, которое нужно рассчитать
Bi=0.7; %Число Био
nu=zeros(n,1);
lb=0; % левая граница диапазона, на котором ищется корень
rb=pi/2; % правая граница диапазона, на котором ищется корень
for i=1:n
nu(i)=fminbnd(@(z) abs(z\*tan(z)-Bi), lb, rb);
lb=rb;
rb=rb+pi;
end
nu %Выводится значение корня трансцендентного уравнения

Температурная компонента  $\theta_{pl0}^{(3)}(l_x, l_y, l_z, \phi)$  определяется как произведение температурных распределений по соответствующим осям  $l_x, l_y, l_z$ :

$$\theta_{pl0}^{(3)}(l_x, l_y, l_z, \phi) = \theta_{pl0}^{(3)}(l_x, \phi) \cdot \theta_{pl0}^{(3)}(l_y, \phi) \cdot \theta_{pl0}^{(3)}(l_z, \phi)$$
(2.96)

Температурное распределение, отражающее эквивалентные неоднородные ГУ-3 пластины по оси  $l_x$  для задачи (2.44-2.46):

$$\tilde{\theta}_{pl}(l_x,\phi) = \frac{R_2}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n \cos(\eta_n R_2 \cdot R_1^{-1} l_x)}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cdot \cos(\eta_n)} \int_0^{R_1 \cdot R_2^{-1}} \theta_{sred}(\phi) \cos(\eta_n R_2 \cdot R_1^{-1} \xi_{lx}) \cdot e(-\eta_n^2 \frac{R_2}{R_1} \phi) dl_x = \frac{R_2}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n \cos(\eta_n R_2 \cdot R_1^{-1} l_x)}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cdot \cos(\eta_n)} \theta_{sred}(\phi) e(-\eta_n^2 \frac{R_2}{R_1} \phi) \frac{R_1}{\eta_n R_2} \sin(\eta_n)$$
(2.97)

получено с помощью функции Грина (2.95). Остальные компоненты по осям  $l_y, l_z$  .

## 2.3.3 Решение краевой задачи жидкостного охлаждения

Математическая модель температуры НК учитывает перекрестное взаимовлияние управляемой температуры жидкостного теплоносителя в ТР и температуры охлаждаемой с помощью СЖО области НК.

В настоящем разделе используются для сокращенной записи следующие обозначения для выбранного j-ого дискретного участка стенки TP:  $q_1 = q_{\xi lx1}^{fi}_{j}$ ,  $q_d = q_{dj}^{fi}_{j}$ ,  $\theta_{st} = \theta_{stj}^{fi}_{j}$ ,  $\theta_{st1} = \theta_{st1j}^{fi}$ ,  $\theta_{st2} = \theta_{st2j}^{fi}_{j}$ ,  $\theta_{zh} = \theta_{zhjj}^{fi}_{j}$ ,  $\theta_{zh1} = \theta_{zh2jj}^{fi}_{j}$ .

В краевой задаче (2.55-2.59) температура внешней стенки ТР и поток на теплоноситель определяются соотношениями (2.53, 2.54). В безразмерных переменных

$$\eta_{st} = \frac{l_x}{\delta_{st}}$$
 и  $\tau = \frac{\phi}{T_{st}}$ , где

$$T_{st} = \frac{\delta_{st}^2 \rho_{st} c_{st}}{\lambda_{st}}$$
(2.98)

уравнение (2.60) может быть преобразовано в систему [31]:

$$-\frac{\partial \varphi_q}{\partial \eta_{st}} + \frac{\partial \varphi_{\theta st}}{\partial \phi} = 0 \tag{2.99}$$

$$\varphi_q + \frac{\partial \varphi_{\theta st}}{\partial \eta_{st}} = 0 \tag{2.100}$$

для отклонений потоков  $\Delta q$  от начальных значений  $q_0$ :

$$\varphi_q = \frac{\Delta q}{q_0} \tag{2.101}$$

и отклонений  $\Delta \theta_{st}$  температур стенки ТР от начальных значений температуры на внешней стороне стенки  $\theta_{st1}$  и внутренней стороне стенки  $\theta_{st2}$ :

$$\varphi_{\theta st} = \frac{\Delta \theta_{st}}{\theta_{st10} - \theta_{st20}} \tag{2.102}$$

Для придания результатам универсального характера вводится относительная координата:

$$\xi_{tr} = \frac{l_z}{L} \tag{2.103}$$

Тогда уравнение (2.60) в относительных переменных примет вид:

$$q_d = \frac{Mc_{zh}}{L} \frac{\partial \theta_{zh}}{\partial \xi_{tr}} + S_{tube} \rho_{zh} c_{zh} \frac{\partial \theta_{zh}}{\partial \phi}$$
(2.104)

В уравнении (2.104) переменные величины  $\theta_{zh}$ , M,  $q_d$  выражаются с помощью их значений в начальном установившемся состоянии и соответствующих приращений ( $\theta_{zh} = \theta_{zh0} + \Delta \theta_{zh}$ ,  $M = M_0 + \Delta M$ ,  $q_d = q_0 + \Delta q_d$ ). В относительных переменных:

$$\varphi_{\theta_{zh}} = \frac{\Delta \theta_{zh}}{T^*}, \ \varphi_M = \frac{\Delta M}{M_0}, \ \varphi_{q_d} = \frac{\Delta q_d L}{M_0 c_{zh} T^*}$$
(2.105)

уравнение (2.104) в отклонениях примет вид:

$$\varphi_{q_d}(\xi_{tr},\phi) = T(\xi_{tr}) \frac{\partial \varphi_{\theta_{zh}}(\xi_{tr},\phi)}{d\phi} + \frac{\partial \varphi_{\theta_{zh}}(\xi_{tr},\phi)}{\partial \xi_{tr}} + \varepsilon(\xi_{tr})\varphi_M(\xi_{tr},\phi), \qquad (2.106)$$

где  $T(\xi_{tr}) = \frac{S_{tube}L\theta_{zh}}{M_0}$  – транспортное запаздывание,  $\varepsilon(\xi_{tr}) = \frac{1}{T^*}\frac{d\theta_{zh0}}{d\xi_{tr}} = \frac{q_0L}{M_0c_{zh}}$ , для

несжимаемой жидкости  $T(\xi_{tr})$  является постоянной  $T(\xi_{tr}) = \frac{L}{\upsilon_{zh}}$  [31].

# 2.4 Функционально-ориентированная модель в форме передаточных функций

Для описания теплообмена пластины с окружающей средой для эквивалентных ГУ-2 используются ПФ, определенные как трансформанты Лапласа функции Грина (2.83-2.85) [9,128,129]. ПФ взаимодействия пластины со средой при нулевой начальной температуре пластины для эквивалентных ГУ-2 имеют вид:

Из уравнений (2.107-2.109) следует, что структурное представление объекта при ГУ-2 представляет собой параллельное соединение одного интегрирующего и бесконечного числа апериодических звеньев первого порядка. На рисунке 2.3 приведена структурная схема для координаты  $l_x$  (уравнение (2.107)), где  $\tilde{\theta}_{pl}^{"}(l_x,\phi)$  – температурное распределение, отражающее ГУ-2 пластины по оси  $l_x$ . Используются следующие

обозначения: 
$$k_1(l_x,\xi_{lx}) = \frac{R_2}{R_1}$$
,  $k_1(l_y,\xi_{ly}) = 1$ ,  $k_1(l_z,\xi_{lz}) = \frac{R_2}{R_3}$ ,  $T_{lxn}^p = \frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2}$ ,  $T_{lym}^p = \frac{1}{\pi^2 m^2}$ ,  
 $T_{lzk}^p = \frac{R_3^2}{R_2^2 \pi^2 k^2}$ ,  $k_n^p(l_x,\xi_{lx}) = 2\cos(\pi n \frac{R_2 l_x}{R_1})\cos\left(\pi n \frac{R_2 \xi_{lx}}{R_1}\right)T_{lxn}^p$ ,  
 $k_m^p(l_y,\xi_{ly}) = 2\cos\left(\pi m l_y\right)\cos\left(\pi m \xi_{ly}\right)T_{lym}^p$ ,  $k_k^p(l_z,\xi_{lz}) = 2\cos(\pi k \frac{R_2 l_z}{R_3})\cos\left(\pi k \frac{R_2 \xi_{lz}}{R_3}\right)T_{lzk}^p$ .



Рисунок 2.3 – Структурная схема одномерной задачи для  $l_{\scriptscriptstyle X}$ при ГУ-2

Аналогичный вид имеют ПФ, представленные уравнениями (2.108, 2.109).

Форма краевой задачи теплопроводности (2.44-2.46), (2.47-2.49), (2.50-2.52) с ГУ-2 является наиболее универсальной, позволяет суммировать потоки тепла.

$$W_{pl}^{lx}(l_x, p) = W_{pl}^{\xi lx0}(l_x, \xi_{lx0}, p) + W_{pl}^{\xi lx1}(l_x, \xi_{lx1}, p)$$
(2.110)

$$W_{pl}^{ly}(l_y, p) = W_{pl}^{\xi ly0}(l_y, \xi_{ly0}, p) + W_{pl}^{\xi ly1}(l_y, \xi_{ly1}, p)$$
(2.111)

$$W_{pl}^{l_z}(l_z, p) = W_{pl}^{\xi l_z 0}(l_z, \xi_{l_z 0}, p) + W_{pl}^{\xi l_z 1}(l_z, \xi_{l_z 1}, p)$$
(2.112)

ПФ ГУ-2 могут быть преобразованы к ПФ для краевой задачи с ГУ-3 [56]. Это преобразование для одномерной задачи при нулевых НУ по оси  $l_x$  показано на рисунке 2.4:

$$W_{pl}^{lx0(3)}(l_x,\xi_{lx0},p) = \frac{\theta_{pl}(l_x,\xi_{lx0},p)}{\theta_{sred}} = \frac{Bi \cdot W_{pl}^{lx0}(l_x,\xi_{lx0},p)}{1 + Bi \cdot W_{pl}^{lx0}(0,\xi_{lx0},p)}$$
(2.113)

$$W_{pl}^{lx1(3)}(l_x,\xi_{lx1},p) = \frac{\theta_{pl}(l_x,\xi_{lx1},p)}{\theta_{sred}} = \frac{Bi \cdot W_{pl}^{lx1}(l_x,\xi_{lx1},p)}{1 + Bi \cdot W_{pl}^{lx1}(R_1 \cdot (R_2)^{-1},\xi_{lx1},p)}$$
(2.114)

Трансформанта температурного распределения по оси  $l_x$  выглядит следующим образом  $\theta_{pl}(l_x, \xi_{lx}, p) = W_{pl}^{lx(3)}(l_x, \xi_{lx}, p) \cdot \theta_{sred}$ :

$$\tilde{\theta}_{pl}(l_x,\xi_{lx},p) = \frac{Bi \cdot \frac{R_2}{R_1} \left[ \frac{1}{p} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{R_2 l_x}{R_1}\right) \cos\left(\pi n \frac{R_2 \xi_{lx}}{R_1}\right) \frac{\frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2}}{\frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2} p + 1} \right]}{1 + Bi \cdot \frac{R_2}{R_1} \left[ \frac{1}{p} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{R_2 \xi_{lx}}{R_1}\right) \cos\left(\pi n \frac{R_2 \xi_{lx}}{R_1}\right) \frac{\frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2} p + 1}{\frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2} p + 1} \right]} \cdot \frac{\theta_{sred}}{p} \quad (2.115)$$



Рисунок 2.4 – Структурное представление одномерной задачи при ГУ-3

Одномерная ПФ, учитывающая начальную температуру пластины, находится отдельно. Например, для одномерной задачи по оси  $l_x$  из (2.95) следует:

$$W_0^{(3)}(l_x,\xi_{lx},p) = \frac{R_2}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n \cos(\eta_n R_2 \cdot R_1^{-1} l_x)}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cdot \cos(\eta_n)} \sin(\eta_n) \frac{T_{nach}^*}{T_{nach}^* p + 1}$$
(2.116)

ПФ представляет собой сумму бесконечного числа апериодических звеньев с постоянными времени  $T_{nach}^* = R_1^2 \cdot (R_2^2 \eta_n^2)^{-1}$ , n = 1, 2, 3... Для других двух одномерных задач ПФ аналогичны (2.116).

ПФ, определяющие тепловое воздействие теплоисточников на пластину, находятся в соответствии с уравнением (2.88). ПФ, определяющая тепловое воздействие потоков теплоисточников на грани пластины  $\xi_{lx}$ :

$$W_{istO}^{\xi_{lx}}(l_{x},\xi_{lx},l_{y},\xi_{ly},l_{z},\xi_{lz},p) = \frac{R_{2}}{R_{1}} \frac{R_{2}}{R_{3}} \left( \left( B_{\xi_{lx}}^{istO\,ly} - A_{\xi_{lx}}^{istO\,ly} \right) \left( D_{\xi_{lx}}^{istO\,lz} - A_{\xi_{lx}}^{istO\,lz} \right) \frac{1}{p} + W_{istO\,\xi_{lx}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{lx}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{lx}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{lx}}^{lxl} + W_{istO\,\xi_{lx}}^$$

$$W_{istO\ \xi_{lx}}^{lx} = 2\sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{R_2 l_x}{R_1}\right) \cos\left(\pi n \frac{R_2 \xi_{lx}}{R_1}\right) \left(B_{\xi_{lx}}^{istO\ ly} - A_{\xi_{lx}}^{istO\ ly}\right) \left(D_{\xi_{lx}}^{istO\ lz} - A_{\xi_{lx}}^{istO\ lz}\right) \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2} \left(\frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2} p + 1\right)^{-1}$$

$$W_{istO\ \xi_{lx}}^{ly} = 2\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\pi m} \cos\left(\pi m l_y\right) \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{lx}}^{istO\ ly}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{lx}}^{istO\ ly}\right)\right) \left(D_{\xi_{lx}}^{istO\ lz} - A_{\xi_{lx}}^{istO\ lz}\right) \cdot$$
(2.118)

$$\cdot \frac{1}{\pi^2 m^2} \left( \frac{1}{\pi^2 m^2} \, p + 1 \right)^{-1} \tag{2.119}$$

$$W_{istO\ \xi_{lx}}^{lz} = 2\sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_3}{\pi k R_2} \cos\left(\pi k \frac{R_2 l_z}{R_3}\right) \left(\sin\left(\pi k \frac{R_2 D_{\xi_{lx}}^{istO\ lz}}{R_3}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_2 A_{\xi_{lx}}^{istO\ lz}}{R_3}\right)\right) \cdot \left(B_{\xi_{lx}}^{istO\ ly} - A_{\xi_{lx}}^{istO\ ly}\right) \frac{R_3^2}{R_2^2 \pi^2 k^2} \left(\frac{R_3^2}{R_2^2 \pi^2 k^2} p + 1\right)^{-1}$$
(2.120)

$$W_{istO\ \xi_{lx}}^{lxly} = 4\sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{R_2 l_x}{R_1}\right) \cos\left(\pi n \frac{R_2 \xi_{lx}}{R_1}\right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\pi m} \cos\left(\pi m l_y\right) \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{lx}}^{istO\ ly}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{lx}}^{istO\ ly}\right)\right) \cdot \left(D_{\xi_{lx}}^{istO\ lz} - A_{\xi_{lx}}^{istO\ lz}\right) \left(\frac{R_2^2 \pi^2 n^2}{R_1^2} + \pi^2 m^2\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_2^2 \pi^2 n^2}{R_1^2} + \pi^2 m^2\right)^{-1} p + 1\right)^{-1}$$
(2.121)

$$\begin{split} W_{isO}^{lylc} \xi_{kc} &= 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi m} \cos\left(\pi m l_{y}\right) \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{kc}}^{isO(l_{y})}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{kc}}^{isO(l_{y})}\right)\right) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_{3}}{\pi k R_{2}} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}l_{z}}{R_{3}}\right) \cdot \\ &\left(\sin\left(\pi k \frac{R_{2}D_{\xi_{kc}}^{isO(l_{z})}}{R_{3}}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{\xi_{kc}}^{isO(l_{z})}}{R_{3}}\right)\right) \left(\pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} p + 1\right)^{-1} \quad (2.122) \\ &W_{isO}^{ldl} \xi_{ik} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{R_{2}l_{x}}{R_{1}}\right) \cos\left(\pi n \frac{R_{2}\xi_{ik}}{R_{1}}\right) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_{3}}{\pi k R_{2}} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}l_{z}}{R_{3}}\right) \left(\sin\left(\pi k \frac{R_{2}D_{\xi_{ik}}^{isO(l_{z})}}{R_{3}}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{\xi_{ik}}^{isO(l_{z})}}{R_{3}}\right) \right) \cdot \left(B_{\xi_{ik}}^{isO(l_{y})} - A_{\xi_{ik}}^{isO(l_{y})}\right) \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \cdot \\ &\cdot \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} p + 1\right)^{-1} \\ &V_{isO}^{log} \xi_{ik} = 8 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{R_{2}l_{x}}{R_{1}}\right) \cos\left(\pi n \frac{R_{2}\xi_{ik}}{R_{1}}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{ik}}^{isO(l_{y})}\right) \right) \cdot \\ &\cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\pi m} \cos\left(\pi m l_{y}\right) \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{k}}^{isO(l_{y})}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{k}}^{isO(l_{y})}\right)\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{\xi_{k}}^{isO(l_{y})}}{R_{3}}\right) \right) \right] \cdot \\ &\cdot \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} p + 1\right)^{-1} \\ &\cdot \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} p + 1\right)^{-1} \\ &\cdot \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} p + 1\right)^{-1} \\ &\cdot \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{$$

ПФ, определяющая тепловое воздействие потоков теплоисточников на грани пластины  $\xi_{ly}$ :

$$W_{istO}^{\xi_{ly}}(l_{x},\xi_{lx},l_{y},\xi_{ly},l_{z},\xi_{lz},p) = \frac{R_{2}}{R_{1}} \frac{R_{2}}{R_{3}} \left( \left( B_{\xi_{ly}}^{istO\,lz} - A_{\xi_{ly}}^{istO\,lz} \right) \left( D_{\xi_{ly}}^{istO\,lx} - A_{\xi_{ly}}^{istO\,lx} \right) \frac{1}{p} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lxly} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lxly} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lxly} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lxly} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lxlz} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{lxly} + W_{istO\,\xi_{ly}}^{l$$

$$\begin{split} W_{istO}^{lx} \xi_{ij} &= 2 \frac{R_{1}}{\pi n R_{2}} \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\pi n \frac{R_{2}l_{x}}{R_{1}}\right) \left(\sin\left(\pi n \frac{R_{2}D_{istO}^{istO\,lx}}{R_{1}}\right) - \sin\left(\pi n \frac{R_{2}A_{ij}^{istO\,lx}}{R_{1}}\right)\right) \cdot \\ &\cdot \left(B_{ijv}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \frac{R_{1}^{2}}{R_{2}^{2}\pi^{2}\pi^{2}} \left(\frac{R_{1}^{2}}{R_{2}^{2}\pi^{2}\pi^{2}}p + 1\right)^{-1} \\ & (2.126) \\ & W_{istO}^{ly} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m l_{y}\right) \cos\left(\pi m \xi_{y}\right) \left(B_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \left(D_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \frac{1}{\pi^{2}m^{2}} \left(\frac{1}{\pi^{2}m^{2}}p + 1\right)^{-1} \\ & (2.127) \\ & W_{istO}^{lz} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi m l_{y}\right) \cos\left(\pi m \xi_{y}\right) \left(B_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \left(D_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \frac{1}{\pi^{2}m^{2}} \left(\frac{1}{\pi^{2}m^{2}}p + 1\right)^{-1} \\ & (2.127) \\ & W_{istO}^{lz} = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_{3}}{\pi k R_{2}} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}l_{z}}{R_{3}}\right) \left(\sin\left(\pi k \frac{R_{2}B_{ijv}^{istO\,lz}}{R_{3}}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{ijv}^{istO\,lz}}{R_{3}}\right)\right) \right) \cdot \\ & \cdot \left(D_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \frac{R_{3}^{2}}{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}} \left(\frac{R_{3}^{2}}{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}p + 1\right)^{-1} \\ & (2.128) \\ & \cdot \left(D_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{\xi_{y}^{istO\,lz}}\right) \left(\frac{R_{3}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}p + 1\right)^{-1} \\ & (2.128) \\ & \left(B_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \left(\frac{R_{3}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}}p + 1\right)^{-1} \\ & (2.129) \\ & W_{istO}^{istO\,lz} - A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}}p + 1\right)^{-1} \\ & (2.129) \\ & W_{istO}^{istO\,lz} - A_{mi}^{istO\,lz}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{ijv}^{istO\,lz}}{R_{1}^{2}}\right) \left(D_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{\xi_{y}}^{istO\,lz}\right) \sum_{k=1}^{k} \frac{R_{k}}{\pi k R_{2}}} \cos\left(\pi m l_{y}\right) \cos\left(\pi m \xi_{k}\right) \right) \left(D_{\xi_{y}}^{istO\,lz} - A_{\xi_{y}}^{istO\,lz}\right) - \sin\left(\pi n A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \right) \\ & \left(B_{istO}^{istO\,lz} - A_{mi}^{istO\,lz}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{ijv}^{istO\,lz}}{R_{3}^{2}}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{ijv}^{istO\,lz}}{R_{3}^{2}}\right) - \sin\left(\pi n A_{ijv}^{istO\,lz}\right) \right) \right) \\ & \left($$

$$W_{istO\ \xi_{ly}}^{lxlyl_{z}} = 8\sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{1}}{\pi nR_{2}} \cos\left(\pi n \frac{R_{2}l_{x}}{R_{1}}\right) \left(\sin\left(\pi n \frac{R_{2}D_{\xi_{ly}}^{istO\ lx}}{R_{1}}\right) - \sin\left(\pi n \frac{R_{2}A_{\xi_{ly}}^{istO\ lx}}{R_{1}}\right)\right) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\pi ml_{y}\right) \cos\left(\pi m\xi_{ly}\right) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{R_{3}}{\pi kR_{2}} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}l_{z}}{R_{3}}\right) \left(\sin\left(\pi k \frac{R_{2}B_{\xi_{ly}}^{istO\ lz}}{R_{3}}\right) - \sin\left(\pi k \frac{R_{2}A_{\xi_{ly}}^{istO\ lz}}{R_{3}}\right)\right)\right) \right] \cdot \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1}p + 1\right)^{-1}$$

$$(2.132)$$

ПФ, определяющая тепловое воздействие потоков теплоисточников на грани пластины  $\xi_{lz}$ :

$$W_{istO}^{\xi_{lz}}(l_{x},\xi_{lx},l_{y},\xi_{ly},l_{z},\xi_{lz},p) = \frac{R_{2}}{R_{1}} \frac{R_{2}}{R_{3}} \left( \left( B_{\xi_{lz}}^{istO\,ly} - A_{\xi_{lz}}^{istO\,ly} \right) \left( D_{\xi_{lz}}^{istO\,lx} - A_{\xi_{lz}}^{istO\,lx} \right) \frac{1}{p} + W_{istO\,\xi_{lz}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{lz}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{lz}}^{lz} + W_{istO\,\xi_{lz}}^{lx} + W_{istO\,\xi_{lz}}^{lx}$$

$$\begin{split} W_{istO\ \xi_{lz}}^{lx} &= 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{1}}{\pi n R_{2}} \cos\left(\pi n \frac{R_{2}l_{x}}{R_{1}}\right) \left(\sin\left(\pi n \frac{R_{2}D_{\xi_{lz}}^{istO\ lx}}{R_{1}}\right) - \sin\left(\pi n \frac{R_{2}A_{\xi_{lz}}^{istO\ lx}}{R_{1}}\right)\right) \right) \\ &\cdot \left(B_{\xi_{lz}}^{istO\ ly} - A_{\xi_{lz}}^{istO\ ly}\right) \frac{R_{1}^{2}}{R_{2}^{2} \pi^{2} n^{2}} \left(\frac{R_{1}^{2}}{R_{2}^{2} \pi^{2} n^{2}} p + 1\right)^{-1} \end{split}$$
(2.134)  
$$\begin{split} W_{istO\ \xi_{lz}}^{ly} &= 2\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\pi m} \cos\left(\pi m l_{y}\right) \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{lz}}^{istO\ ly}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{lz}}^{istO\ ly}\right)\right) \left(D_{\xi_{lz}}^{istO\ lx} - A_{\xi_{lz}}^{istO\ lx}\right) \cdot \\ &\cdot \frac{1}{\pi^{2} m^{2}} \left(\frac{1}{\pi^{2} m^{2}} p + 1\right)^{-1} \\ W_{istO\ \xi_{lz}}^{lz} &= 2\sum_{k=1}^{\infty} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}l_{z}}{R_{3}}\right) \cos\left(\pi k \frac{R_{2}\xi_{lz}}{R_{3}}\right) \\ &\cdot \left(D_{\xi_{lz}}^{istO\ lx} - A_{\xi_{lz}}^{istO\ ly}\right) \left(B_{\xi_{lz}}^{istO\ ly} - A_{\xi_{lz}}^{istO\ ly}\right) \frac{R_{3}^{2}}{R_{2}^{2} \pi^{2} k^{2}} \left(\frac{R_{3}^{2}}{R_{2}^{2} \pi^{2} k^{2}} p + 1\right)^{-1} \end{aligned}$$
(2.136)

$$\begin{split} W_{istO}^{leloy} & \xi_{k} = 4\sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{1}}{\pi n R_{2}} \cos\left(\pi n \frac{R_{2}I_{x}}{R_{1}}\right) \left(\sin\left(\pi n \frac{R_{2}D_{\xi_{k}}^{lstO\,k}}{R_{1}}\right) - \sin\left(\pi n \frac{R_{2}A_{\xi_{k}}^{lstO\,k}}{R_{1}}\right)\right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\pi m} \cos(\pi m l_{y}) \cdot \\ & \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{k}}^{istO\,ly}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{k}}^{istO\,ly}\right)\right) \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2}\right)^{-1} p + 1\right)^{-1} \quad (2.137) \\ & W_{istO\,\xi_{k}}^{lytC} = 4\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\pi m} \cos(\pi m l_{y}) \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{k}}^{istO\,ly}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{k}}^{istO\,ly}\right)\right) \sum_{k=1}^{\infty} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}I_{x}}{R_{3}}\right) \cdot \\ & \cos\left(\pi k \frac{R_{2}\xi_{k}}{R_{3}}\right) \left(D_{\xi_{k}}^{istO\,k} - A_{\xi_{k}}^{istO\,k}\right) \left(\pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1}p + 1\right)^{-1} \quad (2.138) \\ & W_{istO\,\xi_{k}}^{lytC} = 4\sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{1}}{\pi n R_{2}} \cos\left(\pi n \frac{R_{2}I_{x}}{R_{1}}\right) \left(\sin\left(\pi n \frac{R_{2}D_{\xi_{k}}^{istO\,k}}{R_{1}}\right) - \sin\left(\pi n \frac{R_{2}A_{\xi_{k}}^{istO\,k}}{R_{1}}\right)\right) \right) \cdot \\ & \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_{3}}{\pi R_{2}} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}I_{x}}{R_{3}}\right) \cos\left(\pi k \frac{R_{2}\xi_{k}}{R_{3}}\right) \left(B_{\xi_{k}}^{istO\,ly} - A_{\xi_{k}}^{istO\,ly}\right) \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \right)^{-1} \\ & \cdot \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1}p + 1\right)^{-1} \\ & W_{istO\,\xi_{k}}^{istO\,k} = 8\sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{1}}{\pi n R_{2}} \cos\left(\pi k \frac{R_{2}I_{x}}{R_{1}}\right) \left(\sin\left(\pi n \frac{R_{2}D_{\xi_{k}}^{istO\,k}}{R_{1}}\right) - \sin\left(\pi n \frac{R_{2}A_{\xi_{k}}^{istO\,k}}{R_{1}}\right)\right) \right) \cdot \\ & \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n}{\pi m} \cos(\pi m l_{y}) \left(\sin\left(\pi m B_{\xi_{k}}^{istO\,k}\right) - \sin\left(\pi m A_{\xi_{k}}^{istO\,k}}{R_{1}^{2}}\right) \right) \cdot \\ & \cdot \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \right) \right) \right) \cdot \\ & \cdot \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}\right)^{-1} \left(\frac{R_{2}^{2}\pi^{2}n^{2}}{R_{1}^{2}} + \pi^{2}m^{2} + \frac{R_{2}^{2}\pi^{2}k^{2}}{R_{3}^{2}}}\right)^{-1} \right) \left(\frac{R_{2}$$

Для определения ПФ распространения тепла через стенку ТР уравнения (2.99-2.100) преобразуются по Лапласу относительно  $\phi$  при начальном условии  $\varphi_{\theta st}(\eta_{st}, 0) = 0$ :

$$-\frac{d\bar{\varphi}_q(\eta_{st}, p)}{d\eta_{st}} + p\varphi_{\theta st}(\eta_{st}, p) = 0$$
(2.141)

$$\overline{\varphi}_q(\eta_{st}, p) + \frac{d\overline{\varphi}_{\theta st}(\eta_{st}, p)}{d\eta_{st}} = 0, \qquad (2.142)$$

<sub>где</sub>  $\overline{\varphi}(\eta_{st}, p) = \int_{0}^{\infty} \varphi(\eta_{st}, \tau) e^{-p\tau} d\tau$ .

К полученным уравнениям (2.141-2.142) применяется второе преобразование Лапласа:

$$\overline{\overline{\phi}}(z_{st},p) = \int_{0}^{\infty} \overline{\phi}(\eta_{st},p) e^{-z_{st}\eta_{st}} d\eta_{st}$$
(2.143)

по безразмерной длине  $\eta_{st}$  при начальных условиях  $\bar{\varphi}_{\theta st}(0, p) = \bar{\varphi}_{\theta st1}(p)$ ,  $\bar{\varphi}_q(0, p) = \bar{\varphi}_{q1}(p)$ . Получены алгебраические уравнения:

$$z_{st}\overline{\overline{\varphi}}_q - \overline{\varphi}_{q1} + p\overline{\overline{\varphi}}_{\theta st1} = 0 \tag{2.144}$$

$$\overline{\overline{\phi}}_{q} + z_{st}\overline{\overline{\phi}}_{\theta st} - \overline{\phi}_{\theta st1} = 0$$
(2.145)

из которых определяются двойные изображения  $\overline{\phi}_q$  и  $\overline{\phi}_{\theta st}$  относительно отклонений  $\varphi_q$ и  $\varphi_{\theta st}$ :

$$\overline{\overline{\phi}}_{q}(z_{st}, p) = \frac{z_{st}}{z_{st}^{2} - p} \overline{\phi}_{q1}(p) + \frac{p}{z_{st}^{2} - p} \overline{\phi}_{\theta st1}(p)$$
(2.146)

$$\overline{\overline{\varphi}}_{\theta st}(z_{st}, p) = -\frac{1}{z_{st}^2 - p} \overline{\varphi}_{q1}(p) + \frac{z_{st}^2}{z_{st}^2 - p} \overline{\varphi}_{\theta st1}(p)$$
(2.147)

Обратное преобразование по  $z_{st}$ :

$$\overline{\varphi}_{q}(\eta_{st}, p) = \overline{\varphi}_{q1}(p) \cdot ch\sqrt{p}\eta_{st} - \overline{\varphi}_{\theta st1}(p)\sqrt{p} \cdot sh\sqrt{p}\eta_{st}$$
(2.148)

$$\overline{\varphi}_{\theta st}(\eta_{st}, p) = -\overline{\varphi}_{q1}(p) \frac{sh\sqrt{p\eta_{st}}}{\sqrt{p}} + \overline{\varphi}_{\theta st1}(p) \cdot ch\sqrt{p\eta_{st}}$$
(2.149)

Для рассматриваемого случая  $l_x = \delta_{st}$ ,  $\eta_{st} = 1$  контроля температуры на внутренней поверхности стенки из (2.148-2.149)  $\varphi_{qd}$  и  $\varphi_{\theta st1}$ :

$$\overline{\varphi}_{qd} = G_1(p)\overline{\varphi}_{q1} - G_2(p)\overline{\varphi}_{\theta st2}$$
(2.150)

$$\overline{\varphi}_{\theta st1} = G_3(p)\overline{\varphi}_{q1}(p) + G_1(p)\overline{\varphi}_{\theta st2}, \qquad (2.151)$$

$$G_1(p) = \frac{1}{ch\sqrt{p}} \tag{2.152}$$

$$G_2(p) = \sqrt{p} th\sqrt{p} \tag{2.153}$$

$$G_3(p) = \frac{th\sqrt{p}}{\sqrt{p}} \tag{2.154}$$

Для полного описания динамики распространения тепла через стенку ТР к уравнениям (2.152-2.154) добавляются уравнения теплопередачи по обеим граничным поверхностям,

вводятся константы:  $\chi_1$ , определяемая как  $\chi_1 = -\left(\frac{\partial q_1}{\partial \theta_{st1}}\right)_0 \frac{\theta_{st10} - \theta_{st20}}{q_0}$ , и  $\chi_2 = \frac{\alpha \cdot \delta_{st}}{\lambda_{st}}$ 

(рисунок 2.5) [31].  $\theta_{st10}$  и  $\theta_{st20}$  – начальные значения относительной температуры на внешней и внутренней стенках ТР соответственно. Для случая идеального теплового контакта  $\chi_1 = 1$ .



Рисунок 2.5 – Структурная схема теплового взаимодействия пластины и ТР СЖО

Схема преобразуется с помощью ПФ  $W_{r1}(p)$  и  $W_{r2}(p)$  к эквивалентной форме (рисунок 2.6):

$$W_{r1}(p) = \frac{-\chi_1}{1 + \chi_1 G_3} = \frac{\varphi_{q1}}{\varphi_{\theta st1}}$$
(2.155)

$$W_{r2}(p) = \frac{1/\chi_2}{1 + G_2/\chi_2} = \frac{\varphi_{\theta st2}}{\varphi_{qd}}$$
(2.156)



Рисунок 2.6 – Эквивалентная структура теплового взаимодействия пластины и ТР СЖО

Эквивалентная схема на рисунке 2.6 позволяет получить необходимые для использования при синтезе системы управления ПФ. ПФ для описания теплопередачи от внешней стенки ТР до теплоносителя:

$$W_{st\ j}(p) = \frac{\varphi_{qd}}{\varphi_{\theta st1}} = \frac{W_{r1}G_1}{1 \pm W_{r1}G_1^2 W_{r2}}$$
(2.157)

ПФ для описания теплопередачи от внутренней стенки ТР до внешней стенки, находящейся в идеальном тепловом контакте с поверхностью пластины:

$$W_{st j}^{'(2)}(p) = \frac{\varphi_{\theta st1}}{\varphi_{\theta st2}} = \frac{G_1}{1 \pm W_{r1} G_1^2 W_{r2}}$$
(2.158)

ПФ для описания теплопередачи от внутренней стенки ТР до потока на пластину:

$$W_{st\ j}^{'(3)}(p) = \frac{\varphi_{q1}}{\varphi_{\theta st2}} = \frac{G_1 W_{r1}}{1 \pm G_1^2 W_{r1} W_{r2}}$$
(2.159)

ПФ  $G_1(p), G_2(p), G_3(p)$ , входящие в структуру (рисунок 2.6), описывающие влияние теплового потока  $q_1$  между пластиной и ТР СЖО, температуры области контакта  $\theta_{st1}$ , имеют трансцендентный характер (2.152-2.154). Для аппроксимации  $G_1(p)$ может быть использовано несколько способов, например [31]:

1. Так как функцию ch(z) можно представить в виде ряда:  $ch(z) = 1 + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^4}{4!} + \frac{z^6}{6!} + ...$ 

то ПФ можно представить как:  $G_1(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2!}p + \frac{1}{4!}p^2 + \frac{1}{6!}p^3 + \dots}$ . Если оставить в

знаменателе первые два члена:  $G_1(p) \approx \frac{1}{1+0.5p}$ , если оставить в знаменателе первые три

члена:  $G_1(p) \approx \frac{1}{1+0.5p+0.0417p^2}$ .

2. Так как функцию ch(z) согласно теореме Вейерштрасса можно разложить в бесконечное произведение:  $ch(z) = \prod_{k=1}^{\infty} \left( 1 + \frac{z^2}{v_k^2} \right)$ , то ПФ можно представить как

$$G_1(p) = \prod_{k=1}^{\infty} \left( \frac{1}{1 + \tau_k p} \right)$$
, где  $\tau_k = \frac{1}{v_k^2} = \frac{4}{\pi^2 (2k-1)^2}$  – постоянная времени.

Подобные аппроксимации довольно грубы, но они дают представление о структуре ПФ, как последовательном соединении апериодических звеньев первого порядка. В этой структуре необходимо определить коэффициенты ПФ с наилучшим совпадением с точным решением. Рассматривается использование для этой цели известных программных средств, обратное преобразование Лапласа для  $G_1(p) = \frac{1}{ch\sqrt{p}}$ , позволяющей осуществить учет теплопередачи через стенку, осуществляется в программе Wolfram Mathematica [106,107]. В эту программу устанавливается дополнительный программный пакет NumericalLaplaceInversion.m [130], который с помощью функции GWR вычисляет обратное преобразование Лапласа, функция TableForm представляет результаты расчета в виде массива данных.

Идентификация ПФ данным, полученным из Wolfram Mathematica, проводится в MATLAB System Identification Toolbox. Аппроксимация осуществляется через модель процесса Estimate - Process Model. Переходная характеристика ПФ  $G_1(p)$  представлена на рисунке 2.7.

Получена ПФ, входящая в состав системы, описывающей теплопередачу от пластины через стенку ТР к теплоносителю:

$$W_{s1}(p) = \frac{1}{(0.406 \cdot p + 1) \cdot (0.042 \cdot p + 1) \cdot (0.025 p + 1)}$$
(2.160)



Для верификации полученной ПФ в МАТLAВ проводится сравнение фазо-частотной характеристики ФЧХ (рисунок 2.8), амплитудно-частотной характеристики АЧХ (рисунок 2.9) и амплитудно-фазовой характеристики АФХ (рисунок 2.10) ПФ  $G_1(p)$  и  $W_{s1}(p)$ .



Рисунок 2.8 – Погрешность аппроксимации ФЧХ



Рисунок 2.10 – Погрешность аппроксимации АФХ

Величина погрешности между ПФ  $G_1(p)$  и  $W_{s1}(p)$  по АЧХ  $\approx 2\%$ , по ФЧХ  $\approx 17\%$ , по АФХ  $\approx 13\%$ . Таким образом, ПФ (2.160) аппроксимирует трансцендентную ПФ (2.152) в частотной области с достаточной точностью.

Результаты для  $G_2(p)$  и  $G_3(p)$  обратного преобразования Лапласа соответственно, где на вход систем подается единичное ступенчатое воздействие, представлены на рисунках 2.11-2.12.



Рисунок 2.11 – График обратного преобразования функции  $G_2(p)$ 



Рисунок 2.12 – График обратного преобразования функции  $G_3(p)$ 

Аналогичным образом проводится аппроксимация ПФ  $G_2(p)$  и  $G_3(p)$  в пакете Wolfram Mathematica.

Для получения ПФ, описывающей теплопередачу в теплоносителе ТР СЖО, проводится преобразование Лапласа уравнения (2.106) по  $\phi$  при нулевом начальном условии  $\varphi_{\theta zh}(\xi_{tr}, 0) = 0$ :

$$\overline{\varphi}_{q_d}(\xi_{tr}, p) = T(\xi_{tr}) p \,\overline{\varphi}_{\theta_{zh}}(\xi_{tr}, p) + \frac{\partial \overline{\varphi}_{\theta_{zh}}(\xi_{tr}, p)}{\partial \xi_{tr}} + \varepsilon(\xi_{tr}) \overline{\varphi}_M(\xi_{tr}, p) \tag{2.161}$$

Если пренебречь продольной теплопроводностью ТР в соответствии с допущениями, то изменение плотности теплового потока  $q_d$  от наружных стенок ТР к теплоносителю зависит только от изменения плотности теплового потока  $q_1$  к наружной поверхности ТР, изменения температуры теплоносителя  $\theta_{zh}$  внутри ТР. Тогда на внутренней поверхности стенок ТР теплообмен можно описать законом Ньютона (2.58). С учетом полученных ПФ (2.157, 2.158), структуры на рисунке 2.6 и результатов аппроксимации из (2.161) и того, что  $\frac{\Delta \alpha_{st}}{\alpha_{st0}} = n \frac{\Delta M}{M_0}$ , следует [31]:

$$\overline{\varphi}_{qd}\left(\xi_{tr},p\right) = \varepsilon_m W_{st\ j}(p)\overline{\varphi}_q\left(\xi_{tr},p\right) + W_{st\ j}^{\prime(2)}(p) \Big[n\varepsilon(\xi_{tr})\overline{\varphi}_M\left(\xi_{tr},p\right) - a_r\overline{\varphi}_\theta\left(\xi_{tr},p\right)\Big], \qquad (2.162)$$

где  $\varepsilon_m = \frac{\theta_{zh20} - \theta_{zh10}}{T^*} = \frac{\Delta \theta_{zh0}}{T^*}$  – отношение изменения температуры теплоносителя к

базовой температуре  $T^*$ ,  $a_r = \frac{U\alpha L}{M_0 c}$ .

Из уравнения (2.162)  $\bar{\varphi}_{qd}(\xi_{tr}, p)$  для определения ПФ выбранной ТР исключается тепловой поток.

$$T(\xi_{tr})p\overline{\varphi}_{\theta zh}(\xi_{tr},p) + \frac{d\overline{\varphi}_{\theta zh}(\xi_{tr},p)}{d\xi_{tr}} + \varepsilon(\xi_{tr})\overline{\varphi}_{M}(\xi_{tr},p) =$$

$$= \varepsilon_{m}W_{st\ j}(p)\overline{\varphi}_{q}(\xi_{tr},p) + W_{st\ j}^{'(2)}(p) \Big[n\varepsilon(\xi_{tr})\overline{\varphi}_{M}(\xi_{tr},p) - a_{r}\overline{\varphi}_{\theta}(\xi_{tr},p)\Big]$$

$$\frac{d\overline{\varphi}_{\theta zh}(\xi_{tr},p)}{d\xi} + \overline{\varphi}_{\theta zh}(\xi_{tr},p) \Big[T(\xi_{tr})p + a_{r}W_{st\ j}^{'(2)}(p)\Big] =$$

$$= \varepsilon_{m}W_{st\ j}(p)\overline{\varphi}_{q}(\xi_{tr},p) - \varepsilon(\xi_{tr})\overline{\varphi}_{M}(\xi_{tr},p) \Big[1 - nW_{st\ j}^{'(2)}(p)\Big]$$

$$(2.164)$$

Таким образом, получается обыкновенное дифференциальное уравнение, описывающее относительное изменение температуры:

$$\frac{d\varphi_{\theta zh}}{d\xi} + F\left(\xi_{tr}\right)\varphi_{\theta zh} = R\left(\xi_{tr}\right)$$
(2.165)

$$F\left(\xi_{tr}\right) = T(\xi_{tr})p + a_r W_{\theta}(p), \ R\left(\xi_{tr}\right) = \varepsilon_m W_{st j}(p)\overline{\varphi}_q\left(\xi_{tr}, p\right) - \varepsilon(\xi_{tr})\overline{\varphi}_M\left(\xi_{tr}, p\right) \left[1 - n W_{st j}^{(2)}(p)\right].$$

Пренебрегая величинами  $\overline{\varphi}_q$  и  $\overline{\varphi}_M$ , получается:

$$\overline{\varphi}_{\theta zh}(\xi_{tr}, p) = \overline{\varphi}_{\theta zh1}(p) \exp(-T_d(\xi_{tr})p - a_r \xi_{tr} W_{st j}^{(2)}(p))$$
(2.166)

где  $T_d(\xi_{tr})$  – транспортное запаздывание на перенос тепла теплоносителем;  $a\xi_{tr}W_{st j}^{'(2)}(p) - \Pi \Phi$  для прогрева TP от поверхности ее расположения.

Осуществляется переход к исходным обозначениям  $\varphi_{q\,j}^{fi\,\xi lx} = \varphi_{q1}, \varphi_{qd\,j}^{fi\,\xi lx} = \varphi_{qd},$   $\varphi_{\theta st1\,j}^{fi\,\xi lx} = \varphi_{\theta st1}, \varphi_{zh\,j}^{fi\,\xi lx} = \varphi_{\theta st2\,j}^{fi\,\xi lx} = \varphi_{\theta st2}.$  Для перевода  $\varphi_{q\,j}^{fi\,\xi lx}, \varphi_{qd\,j}^{fi\,\xi lx}, \varphi_{\theta st1\,j}^{fi\,\xi lx}, \varphi_{\theta st2\,j}^{fi\,\xi lx}$  в  $q_{\xi lx\,j}^{fi}, q_{d\,j}^{fi\,\xi lx}, \theta_{\xi lx\,j}^{fi} = \theta_{st1\,j}^{fi\,\xi lx}, \theta_{zh\,j}^{fi\,\xi lx} = \theta_{st2\,j}^{fi\,\xi lx}$  соответственно вводятся нормирующие коэффициенты:  $K_{norm}^{(1)}, K_{norm}^{(2)}, K_{norm}^{(3)}, K_{norm}^{(4)},$  связывающие установившиеся начальные значения потоков  $q_0$  и начальные средние температуры стенки  $\theta_{st}^0$  на рассматриваемых участках ТР:  $K_{norm}^{(2)} = K_{norm}^{(3)} = q_0, \quad K_{norm}^{(4)} = \frac{1}{K_{norm}^{(1)}} = \theta_{st}^0$ . В результате структурная схема СЖО примет вид, представленный на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Дополненная структурная схема теплового взаимодействия пластины и стенки ТР

Из структурной схемы (рисунок 2.13) определяются дополнительные ПФ для выбранного j-ого дискретного участка ТР fi-ой области контакта с гранью  $\xi_{lx}$  пластины:

ПФ, определяющая поток  $q_{d j}^{fi \, \xi l x}$  с внутренней стенки j-ого дискретного участка TP на жидкостной теплоноситель при воздействии температуры области контакта внешней стенки TP и пластины  $\theta_{\xi l x j}^{fi} = \varphi_{\theta st 1 j}^{fi \, \xi l x}$ :

$$W_{st j}(p) = \frac{q_{d j}^{fi \,\xi lx}}{\theta_{\xi lx j}^{fi}} = \frac{W_{r1}G_1 K_{norm}^{(1)} K_{norm}^{(2)}}{1 \pm W_{r1}G_1^2 W_{r2}}$$
(2.167)

ПФ, определяющая поток  $\varphi_{qd \ j}^{fi \ \xi lx}$  с внутренней стенки j-ого дискретного участка ТР на жидкостной теплоноситель в относительных величинах от воздействия температуры области контакта внешней стенки ТР и пластины  $\theta_{\xi lx \ j}^{fi} = \theta_{st1 \ j}^{fi \ \xi lx}$ :

$$W_{st\ j}^{"}(p) = \frac{\varphi_{qd\ j}^{fi\ \xi lx}}{\theta_{\xi lx\ j}^{fi}} = \frac{W_{r1}G_{1}K_{norm}^{(1)}}{1\pm W_{r1}G_{1}^{2}W_{r2}}$$
(2.168)

ПФ, определяющая температуру области контакта внешней стенки j-ого дискретного участка ТР и пластины  $\theta_{\xi lx \ j}^{fi} = \theta_{st1 \ j}^{fi \ \xi lx}$  при воздействии температуры внутренней стенки, совпадающей с температурой жидкостного теплоносителя  $\varphi_{\theta zh \ j}^{fi \ \xi lx} = \varphi_{\theta st2 \ j}^{fi \ \xi lx}$ :

$$W_{st j}^{(2)}(p) = \frac{\theta_{\xi l x j}^{fi}}{\varphi_{\theta z h j}^{fi \,\xi l x}} = \frac{G_1 K_{norm}^{(1)}}{1 \pm W_{r1} G_1^2 W_{r2}}$$
(2.169)

ПФ (2.157, 2.158) в исходных обозначениях:

$$W_{st\ j}^{'}(p) = \frac{\varphi_{qd\ j}^{fi\ \xi lx}}{\varphi_{\theta st1\ j}^{fi\ \xi lx}} = \frac{W_{r1}G_{1}}{1\pm W_{r1}G_{1}^{2}W_{r2}}$$
(2.170)

$$W_{st j}^{\prime(2)}(p) = \frac{\varphi_{\theta st 1 j}^{fi \,\xi lx}}{\varphi_{\theta zh j}^{fi \,\xi lx}} = \frac{G_1}{1 \pm W_{r1} G_1^2 W_{r2}}$$
(2.171)

Протекая по ТР теплоноситель нагревается в месте контакта ТР с пластиной (рисунок 2.2), температура на области контакта  $\theta_{\xi l x}^{fi}$ , требуемый для пластины тепловой режим СЖО обеспечивается путем управления температурой жидкого теплоносителя [131, 132]. При получении ПФ по каналу  $\theta_{\xi l x}^{fi}_{j} - q_{d j}^{fi}_{j} \xi_{l x}^{fi}$  для любого дискретного участка  $(a_j - b_j)$  применяется преобразование Лапласа.

Учитывается, что контроль температуры осуществляется в конце ТР на расстоянии от каждого j-го участка дискретизации контактной зоны ТР с пластиной (рисунок 2.2). Поэтому, в связи с тем, что общая длина ТР *L*, транспортное запаздывание в (2.106) вместо *L* содержит соответствующее расстояние различное для каждого j-ого участка дискретизации.

ПФ, определяющая изменение температуры жидкостного теплоносителя от теплового воздействия пластины на дискретный участок  $(a_i - b_i)$  TP:

$$W_{tzh j}^{fi \,\xi lx} = e \left( -\frac{S_{tube} \rho_{zh} L}{M} p \right) \cdot W_{st j}^{"}(p) \cdot \left[ \frac{1}{S_{tube} \rho_{zh} c_{zh} p} \left( e \left( \frac{S_{tube} \rho_{zh} b_j}{M} p \right) - e \left( \frac{S_{tube} \rho_{zh} a_j}{M} p \right) \right) - \frac{b_j - a_j}{M c_{zh}} \right]$$

$$W_{tzh j}^{fi \,\xi lx} = W_{kL j}^{fi \,\xi lx} + W_{ab j}^{fi \,\xi lx}$$
(2.172)
$$(2.172)$$

$$W_{ab\ j}^{fi\ \xi lx} = W_{ka\ j}^{fi\ \xi lx} + W_{kb\ j}^{fi\ \xi lx}$$
(2.174)

$$W_{kL\,j}^{fi\,\,\xi lx} = W_{eL\,j}^{fi\,\,\xi lx} \cdot W_{st\,\,j}^{"}(p)$$
(2.175)

$$W_{eL\,j}^{fi\,\xi lx} = e\left(-\frac{S_{tube}\rho_{zh}L}{M}p\right) \cdot \frac{b_j - a_j}{Mc_{zh}}$$
(2.176)

$$W_{ka\ j}^{fi\ \xi lx} = W_{ea\ j}^{fi\ \xi lx} \cdot W_{st\ j}^{"}(p)$$
(2.177)

$$W_{ea j}^{fi \,\xi lx} = \frac{1}{S_{tube} \rho_{zh} c_{zh} p} e \left( -\frac{S_{tube} \rho_{zh} L}{M} p \right) \cdot e \left( \frac{S_{tube} \rho_{zh} a_j}{M} p \right) =$$
(2.178)

$$= \frac{1}{S_{tube}\rho_{zh}c_{zh}p} \cdot e\left(-\frac{S_{tube}\rho_{zh}(L-a_j)}{M}p\right)$$

$$W_{kb\ j}^{fi\ \xi lx} = W_{eb\ j}^{fi\ \xi lx} \cdot W_{st\ j}^{"}(p)$$
(2.179)

$$W_{eb\,j}^{fi\,\xi lx} = \frac{1}{S_{tube}\rho_{zh}c_{zh}p} \cdot e\left(-\frac{S_{tube}\rho_{zh}(L-b_j)}{M}p\right)$$
(2.180)

В дальнейшем при анализе влияния возмущений со стороны пластины на локальную систему управления температурой теплоносителя в ТР в ПФ по каналу возмущения  $W_{kL\,j}^{fi\,\,\xi lx}$  не учитывается.

ПФ, определяющая температуру жидкостного теплоносителя от воздействия пластины на ТР в области контакта fi, на грани пластины  $\xi_{lx}$ :

$$W_{tzh}^{fi\,\xi lx} = \sum_{j=1}^{J_d} W_{tzh\,j}^{fi\,\xi lx}$$
(2.181)

Соответствующая температура теплоносителя ТР в относительных величинах при воздействии пластины на выходе ПФ (2.181) определяется как:

$$\varphi_{\theta z h \, ab}^{fi \, \xi lx} = \sum_{j=1}^{J_d} \varphi_{\theta z h \, j}^{fi \, \xi lx} \tag{2.182}$$

ПФ, определяющая температуру области контакта внешней стенки ТР и пластины  $\theta_{\xi lx \ j}^{fi} = \theta_{st1 \ j}^{fi \ \xi lx}$  при воздействии температуры внутренней стенки, совпадающей с температурой жидкостного теплоносителя  $\varphi_{\theta zh \ j}^{fi \ \xi lx} = \varphi_{\theta st2 \ j}^{fi \ \xi lx}$ :

$$W_{st}^{(2)}(p) = \sum_{j=1}^{J_d} W_{st \, j}^{(2)}(p)$$
(2.183)

В конце ТР длиной L:

$$W_{\theta zh}^{fi\,\xi lx}(L,p) = W_L^{fi\,\xi lx}(L,p) + W_{stzh}^{fi\,\xi lx}(L,p)$$

$$(2.184)$$

$$W_L^{fi\,\xi lx}(L,p) = \exp(-T_d(L)p)$$
 (2.185)

$$W_{stzh}^{fi\,\xi lx}(L,p) = W_{tzh}^{fi\,\xi lx}$$
(2.186)

$$T_d(\xi) = \frac{m_0}{M_0} = \frac{L}{\nu_{zh}},$$
(2.187)

где  $m_0$  – общая масса жидкостного теплоносителя в ТР в начальном установившемся состоянии. ПФ  $W_L^{fi\,\xi lx}(L,p) = \frac{\theta_{zh2}^{fi\,\xi lx}}{\theta_{zh1}^{fi\,\xi lx}}$  определяет влияние управляющей температуры

теплоносителя в начале ТР на температуру в точке контроля на конце ТР.

## 2.5 Структурная схема объекта управления

Полученные ПФ, отражающие ФОМ краевой задачи (2.23-2.27), позволяют построить структурную схему ОУ для любых точек  $M^*(l_x, l_y, l_z)$  НК и  $M^{**}(l_x^*, l_y^*, l_z^*)$  диагональной ЛОС (рисунок 2.14).



Структурная схема ОУ как система содержит в качестве подсистем:

1)  $W_{pl}(M^*, p) - \Pi \Phi$  (рисунок 2.15), выходом которой является трехмерное распределение температуры  $\tilde{\theta}_{pl}(M^*, p)$  в пластине при воздействии среды по ГУ-2 (краевая задача (2.44-2.46), (2.47-2.49), (2.50-2.52)) при нулевых НУ с П $\Phi$  (2.110-2.112)):



2)  $W_{srce}(M^*, p) - \Pi \Phi$ , выходом которой является трехмерное распределение температуры  $\theta_{srce}(M^*, p)$  (краевая задача 2.39-2.43). П $\Phi W_{srce}(M^*, p)$  получена путем суммирования тепловыделений приборов ИИС, работающих по циклограммам (рисунок 1.3-1.8) – П $\Phi W_{Pr}(M^*, p)$  и TH СТГС – П $\Phi W_{stgs}(M^*, p)$  (рисунок 2.16):

$$W_{srce}(M^*, p) = W_{Pr}(M^*, p) + W_{stgs}(M^*, p)$$
 (2.189)

ПФ  $W_{stgs}(M^*, p)$  – определяет влияние ТН СТГС на грани  $\xi_{lx0}$   $N_s = \overline{1, N_{stgs}}$ ,  $N_{stgs} = 9$  (St1...St9), на грани  $\xi_{lx1}$   $N_s = \overline{1, N_{stgs}}$ ,  $N_{stgs} = 9$  (S1...S9) (рисунок 2.17):

$$W_{stgs}(M^*, p) = \sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} W_{stgs N_s}^{\xi lx0}(M^*, p) + \sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} W_{stgs N_s}^{\xi lx1}(M^*, p)$$
(2.190)

ПФ  $W_{Pr}(M^*, p)$  – определяет влияние приборов ИИС

на грани  $\xi_{x0}$   $N = \overline{1, N_{\text{Pr}}}$ ,  $N_{\text{Pr}} = 4$  (Pr1...Pr4), на грани  $\xi_{x1}$   $N = \overline{1, N_{\text{Pr}}}$ ,  $N_{\text{Pr}} = 4$  (Pru1...Pru4), на грани  $\xi_{y0}$   $M = \overline{1, M_{\text{Pr}}}$ ,  $M_{\text{Pr}} = 2$  (Pra, Prb), на грани  $\xi_{z0}$   $K = \overline{1, K_{\text{Pr}}}$ ,  $K_{\text{Pr}} = 2$  (Prh1, PrC1); на грани  $\xi_{z1}$   $K = \overline{1, K_{\text{Pr}}}$ ,  $K_{\text{Pr}} = 2$  (Prh2, PrC2) (рисунок 2.18):

$$W_{\Pr}(M^{*}, p) = \sum_{N=1}^{N_{\Pr}} W_{\Pr N}^{\xi l x 0}(M^{*}, p) + \sum_{N=1}^{N_{\Pr}} W_{\Pr N}^{\xi l x 1}(M^{*}, p) + \sum_{M=1}^{M_{\Pr}} W_{\Pr M}^{\xi l y 0}(M^{*}, p) + \sum_{K=1}^{K_{\Pr}} W_{\Pr K}^{\xi l z 0}(M^{*}, p) + \sum_{K=1}^{K_{\Pr}} W_{\Pr K}^{\xi l z 1}(M^{*}, p)$$

$$(2.191)$$



Рисунок 2.16 – Структура подсистемы  $W_{srce}(M^*, p)$ 



Рисунок 2.18 – Структура подсистемы  $W_{\rm Pr}(M^*, p)$
3) Начальная температура пластины  $\theta_{pl}^0$  учитывается в схеме через ПФ  $W_0^{(3)}(l_x, l_y, l_z, p)$ , определяющую  $\theta_{pl0}^{(3)}$ , на основе уравнения (2.116):

$$W_0^{(3)}(l_x, l_y, l_z, p) = W_0^{(3)}(l_x, \xi_{lx}, p) + W_0^{(3)}(l_y, \xi_{ly}, p) + W_0^{(3)}(l_z, \xi_{lz}, p)$$
(2.192)

4)  $\xi$ -блок 1 –  $\xi$ -блок температуры грани пластины, который переводит непрерывное температурное распределение пластины  $\theta_{pl}(M^*, p)$  при воздействии среды и теплоисточников с учетом начальной температуры пластины в j,  $j = \overline{1, J_d}$  дискретных значений температуры  $\theta_{\xi lx \ 1}^{fi}, ..., \theta_{\xi lx \ J_d}^{fi}$  на гранях пластины  $\xi_{lx}$ , контактирующих с fi-ми областями TP ( $i = \overline{1, 5}$ , на гранях пластины  $\xi_{lx0}$  и  $\xi_{lx1}$ ), разбитыми на участки  $(a_1, b_1), ..., (a_{J_d}, b_{J_d})$ .

В кружках 1-1...1-5 показана теплопередача со стороны  $\xi_{lx0}$  грани пластины на TP tr1...tr5, в кружках 1-6...1-10 аналогично – теплопередача с грани  $\xi_{lx1}$ . В кружках 2-1...2-5 показана теплопередача с боковой поверхности TP tr1...tr5 на грани  $\xi_{lx0}$  и соответственно в кружках 2-6...2-10 – на грани  $\xi_{lx1}$ . На рисунке 2.19 для примера приведена структурная схема теплового влияния TP tr1 и пластины.

5) В силу того, что в соответствии с технической постановкой задачи (см.раздел 1.3) необходимо обеспечить на требуемом уровне температурное распределение на диагональной ЛОС НК АО, являющееся в диссертации объектом управления (ОУ), на выходе структурной схемы (рисунок 2.14) стоит  $\xi$ -блок 2 температуры диагональной ЛОС НК, который осуществляет выборку из температурного распределения  $\theta_{pl}(M^*, p)$  температур  $\theta_{Uz}(M^{**}, p)$  фиксированных точек  $M^{**}(l_x^*, l_y^*, l_z^*) \in M^*(l_x, l_y, l_z)$  диагональной ЛОС НК.

На рисунке 2.19 представлена структурная схема взаимного влияния пластины и TP, в касающейся пластины области f1 на грани  $\xi_{lx0}$ . Для остальных TP на гранях  $\xi_{lx0}$  и  $\xi_{lx}$  структуры аналогичны.



Рисунок 2.19 - Структурная схема теплового взаимодействия ТР и пластины

 $W_{stzh}^{fi \, \xi lx}$  – определяет температуру жидкостного теплоносителя  $\varphi_{ab \, \theta_{zh}}^{fi \, \xi lx}$  fi-ой TP на гранях  $\xi_{lx}$ , на которые оказывает температурное влияние  $\theta_{\xi lx \, 1}^{fi}, ..., \theta_{\xi lx \, J_d}^{fi}$  пластина (2.186). В представленной структуре (рисунок 2.19)  $W_{stzh}^{f1 \, \xi lx0}$  определяет температуру жидкостного теплоносителя  $\varphi_{ab \, \theta_{zh}}^{f1 \, \xi lx0}$  для TP, соприкасающейся с пластиной областью f1 на грани  $\xi_{lx0}$ .

 $W_L^{fi\,\xi lx}$  – определяет температуру теплоносителя  $\varphi_{L\,\theta zh}^{fi\,\xi lx}$  fi-ой TP на гранях  $\xi_{lx}$ , входом которой является  $\varphi_{\theta zh1}^{fi\,\xi lx}$ , без учета температурного влияния пластины (2.185).  $W_L^{f1\,\xi lx0}$  – ПФ, отражающая температуру теплоносителя  $\varphi_{L\,\theta zh}^{f1\,\xi lx0}$  TP, соприкасающейся с пластиной областью f1 на грани  $\xi_{lx0}$ .

Нормирующий коэффициент  $K_{norm}^{(4)}$  позволяет согласовать относительную величину температуры  $\varphi_{\theta zh}^{f1\xi lx0}$  и температуру  $\theta_{zh}^{f1\xi lx0}$  теплоносителя.

 $\xi$ -блок 3 –  $\xi$ -блок температуры теплоносителя в ТР областей  $(a_1,b_1),...,(a_{J_d},b_{J_d})$ , осуществляющий выборку температур областей контакта f1...f5 пар ТР tr1...tr5, которые передаются на вход ПФ  $\left(W_{st\,\xi lx}^{(2)\,fi}\right)^{-1}$ – ПФ, обратная (2.183), выходом являются температуры областей контакта пластины с внешними стенками ТР, которые суммируются с температурными распределениями пластины от влияния среды и теплоисточников.

$$W_{st\,\xi lx}^{(2)\,fi} = \sum_{j=1}^{J_d} W_{st\,j}^{(2)} \tag{2.193}$$

Для представленном на рисунке 2.19 в частном случае  $W_{st \ \xi l x 0}^{(2) f 1}$  отражает тепловое взаимодействие TP с областью f1 с пластиной на ее грани  $\xi_{l x 0}$ .

Таким образом ОУ описывается системой краевых задач (2.39-2.43), (2.44-2.46), (2.47-2.49), (2.50-2.52), (2.55-2.59) и соответствующей им структурой на рисунке 2.14 из ПФ (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193).

#### 2.6 Постановка и решение задачи идентификации объекта управления

Структура ПФ (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193) ОУ, полученная на основе фундаментальных законов путем эквивалентных преобразования соответствующих уравнений математической физики [11, 56, 133-134] обеспечивает адекватность ΦΟΜ (рисунок 2.14) физическим закономерностям процесса распространения тепла в НК. Однако эту структуру затруднительно напрямую использовать для синтеза САУ:

Во-первых, в составе ПФ (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193) математической модели (рисунок 2.14) содержится бесконечное число апериодических звеньев и, хотя их коэффициенты и постоянные времени убывают с увеличением номера, сохранение конечного числа звеньев может привести к существенной ошибке, если их не подвергать параметрической идентификации.

Во-вторых, для аналитического формирования соответствующих явных и неявных математических моделей и ПФ на их основе были использованы достаточно сильные допущения (см.раздел 2.1), например в определении теплофизических характеристик, пренебрежение различными механизмами теплопередачи в жидком теплоносителе и стенках ТР, принят механизм теплопроводности в прямоугольной стенке вместо цилиндрической в силу соотношения толщины и размера стенки ТР, пренебрежение несимметричностью теплопередачи по периметру стенки ТР, пренебрежение пограничным слоем жидкостного теплоносителя и т.п.

В связи с изложенным в диссертации решается задача идентификации параметров математической модели (рисунок 2.14, (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193)) с использованием в качестве вычислительного эксперимента конечно-элементный численной математической модели температурного распределения в НК, свободной от большинства допущений (см. раздел 2.1).

В силу того, что параметрическую идентификацию для каждого конкретного АО необходимо проводить в конкретных условиях, процедура идентификации параметров модели ОУ проводится в абсолютных величинах [110]. Преобразование Лапласа для задачи в относительных величинах представленное как:  $\theta(l_x, l_y, l_z, \phi) \rightleftharpoons \theta(l_x, l_y, l_z, p)$ , в абсолютных величинах выглядит следующим образом:  $T(x, y, z, t) \rightleftharpoons T(x, y, z, s)$ .

Конечно-элементная математическая модель температурного распределения в НК реализована в диссертации в программной среде ANSYS [135-137].

С целью конечно-элементной аппроксимации каждая краевая задача ФОМ записывается в эквивалентной вариационно-энергетической интегральной форме [25-29], а интеграл соответственно аппроксимируется конечными элементами и минимизируется с целью наилучшей аппроксимации. Детальное изложение конечно-элементного моделирования в среде ANSYS содержится в главе 4, в данной главе изложена процедура параметрической идентификации ПФ ОУ в MATLAB [138-140] с использованием в качестве вычислительного эксперимента результатов конечно-элементного моделирования, полученных автором диссертации.

На диагональной ЛОС НК, ответственной за термостабильность объекта, определяются ответственные ТК UzH (H – номер ТК,  $H = \overline{1,7}$ ) оказывающие наибольшее температурное влияние на пластину (рисунок 2.20), количество ТК корректируется численным экспериментом.



Рисунок 2.20 – ТК на диагональной ЛОС НК

Заданные температурные кондиции на диагональной ЛОС НК обеспечиваются с помощью управления температурой ТК с помощью тепловых воздействий от пар ТН СТГС и ТР СЖО: S6, St6 в ТК Uz1; tr1 в ТК Uz6; S7, St7, tr2 в ТК Uz2; S3, St3, tr3 в ТК Uz3; S8, St8, tr4 в ТК Uz4; tr5 в ТК Uz7; S9, St9 в ТК Uz5. Управление температурой ТК с помощью ТР СЖО осуществляется парами ТР tr1и tr5, влияние пар TP tr2-tr4 не требуется, что объясняется результатами вычислительных экспериментов в разделе 4.2.

В среде MATLAB Simulink построены идентификационные модели (рисунки 2.21-2.24) для определения коэффициентов, постоянных времени и количества удерживаемых апериодических звеньев ПФ, составляющих ОУ (рисунок 2.14), использующие уточненную численную модель в среде ANSYS:

- Блок №1 передает в МАТLAВ данные температур  $T_{UzH}$  ТК пластины и температуры  $T_{zh1}^{fi\,\xi x}$  и  $T_{zh2}^{fi\,\xi x}$  теплоносителя на входе и выходе ТР вычислительного эксперимента численной модели ANSYS.

- Блок №2 – визуальный графопостроитель, который отображает на графике значения температур  $T_{UzH}$  и  $T_{UzH}^{mat}$ ,  $T_{zh2}^{fi \, \xi x \, mat}$ .

- Блок №3 моделирует критерий идентификации  $I_1$ ,  $I_2$ :

$$I_{1} = \int_{0}^{t_{1}} \left| T_{UzH}^{mat} - T_{UzH} \right| dt \to \min$$
 (2.194)

$$I_{2} = \int_{0}^{t_{1}} \left| T_{zh2}^{fi\,\xi x\,mat} - T_{zh2}^{fi\,\xi x} \right| dt \to \min, \qquad (2.195)$$

где  $T_{U_{ZH}}$  — температура TK, полученная на численной модели ANSYS,  $T_{U_{ZH}}^{mat}$  — температура TK, определяемая в среде MATLAB;  $T_{zh2}^{fi\,\xi x}$  — температура теплоносителя на выходе TP, полученная из численной модели ANSYS,  $T_{zh2}^{fi\,\xi x\,mat}$  — температура теплоносителя на выходе TP, определяемая в среде MATLAB.

- Блок №4 отображает значение  $I_1$  или  $I_2$  и передает критерий идентификации в рабочую область MATLAB.

Для определения коэффициентов и постоянных времени ПФ  $W_{sred}^{U2H}$ ,  $W_{ist O}^{U2H}$ ,  $W_1^{fi}$ ,  $W_2^{U2H fi}$ ,  $W_3^{fi U2H}$  применяется команда fminsearch, в которую вносится формат вызова функции и передаются предполагаемые начальные значения коэффициентов и постоянных времени указанных ПФ. Команда fminsearch многократно запускает модель в Simulink, осуществляя поисковую процедуру параметров, минимизирующую критерии идентификации  $I_1$  или  $I_2$ , отражающих величину отклонения переходной характеристики идентифицируемой ПФ от данных вычислительного эксперимента, полученного от уточненной численной модели ANSYS. При этом осуществляется контроль, предотвращающий переход в ошибочное решение по команде fminsearch.

На рисунке 2.21 представлена схема параметрической идентификации ПФ  $W_{sred}^{UzH}$ , структура которой определяется структурой ПФ  $W_{pl}(M^*, p)$  (2.188), коэффициенты  $K_1^{"}...K_5^{"}$  и постоянные времени  $T_1^{"}...T_5^{"}$  ПФ  $W_{sred}^{UzH}$ , на поверхности пластины.



Рисунок 2.21 – Схема идентификации ПФ  $W_{sred}^{UzH}$ 

На рисунке 2.22 представлена модель для идентификации ПФ  $W_{ist O}^{U2H}$ : отражающих тепловое воздействие теплоисточников на пластину – ПФ приборов ИИС:  $W_{Pr1}^{U2H} ... W_{Pr4}^{U2H}$ ,  $W_{Pru1}^{U2H} ... W_{Pru4}^{U2H}$ ,  $W_{PrC1}^{U2H}$ ,  $W_{PrA1}^{U2H}$ ,  $W_{PrA2}^{U2H}$ ,  $W_{Pra}^{U2H}$ ,  $W_{Prb}^{U2H}$  и ПФ ТН СТГС:  $W_{St6}^{U2H}$ ,  $W_{S6}^{U2H}$ ,  $W_{S77}^{U2H}$ ,  $W_{S77}^{U2H}$ ,  $W_{St3}^{U2H}$ ,  $W_{S78}^{U2H}$ ,  $W_{S78}^{U2H}$ ,  $W_{S79}^{U2H}$  (структура которых определяется ПФ  $W_{PrN}^{\xilx}$ ,  $W_{PrM}^{\xily}$ ,  $W_{PrK}^{\xilz}$ ,  $W_{stgs N_s}^{\xilx}$  (2.117), (2.125), (2.133)).



Рисунок 2.22 – Схема идентификация ПФ  $W_{ist O}^{UzH}$ 

Аналогично осуществляется параметризация ПФ для системы жидкостного охлаждения (рисунок 2.23-2.24):

 $W_{1}^{fi} - \Pi \Phi$ , определяющая влияние температуры  $T_{zh1}^{fi\,\xi x}$  теплоносителя на входе пары TP, касающихся пластины областями fi, на его температуру  $T_{L\,zh}^{fi\,\xi x}$  на выходе TP. Структура П $\Phi$   $W_{1}^{fi}$  определяется структурой последовательного соединения  $\left(K_{norm}^{(4)}\right)^{-1}$ ,  $W_{L}^{fi\,\xi lx}$ ,  $K_{norm}^{(4)}$  (рисунок 2.19, уравнение (2.185)).

 $W_2^{U_2H fi} - \Pi \Phi$ , определяющая влияние температуры  $T_{U_2H}$  ТК пластины UzH на температуру  $T_{ab\ zh}^{fi\ \xi x}$  теплоносителя на выходе ТР. Структура П $\Phi$   $W_2^{U_2H\ fi}$  определяется структурой последовательного соединения  $\xi$ -блока температуры грани пластины,  $W_{stzh}^{fi\ \xi lx}$ и  $K_{norm}^{(4)}$  (рисунок 2.19, (2.186)).

Температура  $T_{zh2}^{fi\,\xi x\,mat}$  теплоносителя на выходе ТР в МАТLAВ определяется суммой компонент  $T_{L\,zh}^{fi\,\xi x}$  и  $T_{ab\,zh}^{fi\,\xi x}$ :

$$T_{zh2}^{fi\,\xi x\,mat} = T_{L\,zh}^{fi\,\xi x} + T_{ab\,zh}^{fi\,\xi x}$$
(2.196)  
по аналогии с  $\varphi_{\theta zh}^{fi\,\xi lx} = \varphi_{L\,\theta zh}^{fi\,\xi lx} + \varphi_{ab\,\theta zh}^{fi\,\xi lx}$  (рисунок 2.19).

 $W_{3}^{fi\,UzH}$  – ПФ, определяющая влияние температуры теплоносителя  $T_{zh2}^{fi\,\xi x}$  на температуру  $T_{UzH}^{mat}$  ТК UzH пластины. Структура ПФ  $W_{3}^{fi\,UzH}$  определяется структурой  $\left(W_{st\,\xi lx}^{(2)\,fi}\right)^{-1}$  (рисунок 2.19, (2.183)).



Рисунок 2.23 – Схема идентификация ПФ  $W_1^{fi}$ ,  $W_2^{UzH fi}$ 



Рисунок 2.24 — Схема идентификация ПФ  $W_3^{fi\,UzH}$ 

Идентифицированные ПФ САУ температурой Uz1:

$$\begin{split} W_{S6}^{U_{Z1}} &= \frac{1.697e - 06}{s} + \frac{1.782}{23594.447 \cdot s + 1} + \frac{-0.187}{1706.903 \cdot s + 1}, \\ W_{St6}^{U_{Z1}} &= \frac{2.535e - 05}{s} + \frac{1.665}{561.2 \cdot s + 1} + \frac{0.861}{7393.684 \cdot s + 1} + \frac{6.571e - 05}{5100.516 \cdot s + 1}, \\ W_{Pr3}^{U_{Z1}} &= \frac{1.889e - 05}{s} + \frac{-0.535}{41636.623 \cdot s + 1} + \frac{-0.062}{7227.588 \cdot s + 1}, \\ W_{Pru3}^{U_{Z1}} &= \frac{1.366e - 05}{s} + \frac{-0.148}{42189.749 \cdot s + 1} + \frac{-0.017}{51184.95 \cdot s + 1} + \frac{-0.097}{7817.164 \cdot s + 1}. \end{split}$$

ПФ воздействия среды на ТК Uz1 при условиях  $T_{pl}^0 = 40$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C:

$$W_{sred}^{U_{z1}} = \frac{1.079e - 06}{s} + \frac{1.199}{103661.045 \cdot s + 1} + \frac{0.004}{305.047 \cdot s + 1} \, .$$

Для условий  $T_{pl}^0 = 10$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C уточняется ПФ воздействия среды на TK Uz1:  $W_{sred}^{Uz1} = \frac{8.80936287822089e-06}{s} + \frac{0.113120753368305}{45508.7252328163 \cdot s + 1} + \frac{0.00474855141449136}{602.862423731430 \cdot s + 1}.$ 

Идентифицированные ПФ САУ температурой Uz2:

$$\begin{split} W^{U_{z}2}_{S7} &= \frac{7.003e - 06}{s} + \frac{0.454}{7530.814 \cdot s + 1} + \frac{-0.056}{1940.534 \cdot s + 1} \,, \\ W^{U_{z}2}_{St7} &= \frac{1.361e - 05}{s} + \frac{0.759}{2448.6 \cdot s + 1} + \frac{-0.009}{837.858 \cdot s + 1} \,. \end{split}$$

ПФ воздействия среды на ТК Uz2 при условиях  $T_{pl}^0 = 40$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C:

$$W_{sred}^{U_Z2} = \frac{1.118e - 06}{s} + \frac{0.783}{121618.643 \cdot s + 1} + \frac{-0.022}{11358.276 \cdot s + 1} + \frac{-0.001}{300.3 \cdot s + 1}.$$

Для условий  $T_{pl}^0 = 10$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C уточняется ПФ воздействия среды на ТК Uz2:

$$W_{sred}^{U_Z2} = \frac{5.62\text{e-}06}{s} + \frac{0.0133}{15866.657 \cdot s + 1} \,.$$

Идентифицированные ПФ САУ температурой Uz3:

$$\begin{split} W^{U_{z3}}_{S3} &= \frac{1.079e - 07}{s} + \frac{0.611}{22977.899 \cdot s + 1} + \frac{0.35}{3359.572 \cdot s + 1} + \frac{7.458e - 09}{1000.023 \cdot s + 1}, \\ W^{U_{z3}}_{St3} &= \frac{9.94e - 06}{s} + \frac{9.94e - 06}{4496.853 \cdot s + 1} + \frac{-0.011}{839.622 \cdot s + 1}. \end{split}$$

ПФ воздействия среды на ТК Uz3 при условиях  $T_{pl}^0 = 40$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C:

 $W_{sred}^{Uz3} = \frac{6.609\text{e-}06}{s} + \frac{-0.208}{319499.063 \cdot s + 1}.$ 

Для условий  $T_{pl}^0 = 10$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C уточняется ПФ воздействия среды на ТК Uz3:

$$W_{sred}^{U_{Z3}} = \frac{5.795\text{e-}06}{s} + \frac{0.033}{49036.62 \cdot s + 1} + \frac{-0.008}{5649.171 \cdot s + 1}.$$

Идентифицированные ПФ САУ температурой Uz4:

$$W_{S8}^{Uz4} = W_{St7}^{Uz4}$$
,  $W_{St8}^{Uz4} = W_{S7}^{Uz2}$ ,  $W_{sred}^{Uz4} = W_{sred}^{Uz2}$ .

Идентифицированные ПФ САУ температурой Uz5:

$$W_{S9}^{Uz5} = W_{St6}^{Uz1}, \ W_{St9}^{Uz5} = W_{S6}^{Uz1}, \ W_{Pr1}^{Uz5} = W_{Pru3}^{Uz1}, \ W_{Pru1}^{Uz5} = W_{Pr3}^{Uz1}, \ W_{sred}^{Uz5} = W_{sred}^{Uz1}.$$

Идентифицированные ПФ САУ температурой Uz6:

$$\begin{split} W_{1}^{f1} &= \frac{0.434}{20 \cdot s + 1}, \ W_{2}^{Uz6\,f1} = \frac{0.566}{(1.057e + 02) \cdot s + 1}, \\ W_{3}^{f1Uz6} &= \frac{0.537}{(3.624e + 04) \cdot s + 1} + \frac{0.4637}{(4.241e + 02) \cdot s + 1}, \\ W_{56}^{Uz6} &= \frac{1.552e - 05}{s} + \frac{-0.162}{10420.669 \cdot s + 1}, \\ W_{5t6}^{Uz6} &= \frac{1.477e - 05}{s} + \frac{-0.088}{28065.826 \cdot s + 1} + \frac{-0.064}{4101.473 \cdot s + 1} + \frac{0.002}{408.686 \cdot s + 1}, \\ W_{Pr3}^{Uz6} &= \frac{2.086e - 06}{s} + \frac{0.53}{24505.39 \cdot s + 1} + \frac{-0.052}{1332.786 \cdot s + 1}, \\ W_{Pru3}^{Uz6} &= \frac{9.868e - 07}{s} + \frac{1.064}{84845.274 \cdot s + 1} + \frac{0.226}{4397.117 \cdot s + 1} + \frac{0.002}{59942.144 \cdot s + 1} + \frac{-0.038}{429.38 \cdot s + 1}, \end{split}$$

ПФ воздействия среды на ТК U6 при условиях  $T_{pl}^0 = 40$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C:

$$W_{sred}^{U_{Z}6} = \frac{8.145e - 06}{s} + \frac{-0.014}{9987.484 \cdot s + 1}$$

Для условий  $T_{pl}^{0} = 10$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C уточняется ПФ воздействия среды на ТК Uz6:  $W_{wred}^{Uz6} = \frac{1.079e-06}{1.090} + \frac{1.199}{1.000} + \frac{0.004}{1.000}$ .

$$sred = \frac{1}{s} + \frac{1}{103661.045 \cdot s + 1} + \frac{1}{305.047 \cdot s + 1}$$

В качестве результатов идентификации демонстрируется:

1) переходный процесс ПФ  $W_{sred}^{Uz1}$  – температура  $T_{Uz1}^{mat}$  в ТК Uz1 при воздействии среды с температурой  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{pl}^0 = 40$  °C (рисунок 2.25, по схеме на рисунке 2.21);

2) переходный процесс ПФ  $W_{Pr3}^{Uz1}$  – температура  $T_{Uz1}^{mat}$  в ТК Uz1 при воздействии тепловыделяющего прибора ИИС Pr3 с мощностью 16 Вт, температура среды  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{pl}^0 = 20$  °C (рисунок 2.26, по схеме на рисунке 2.22);

3) переходный процесс ПФ  $W_{S6}^{Uz1}$  – температура  $T_{Uz1}^{mat}$  в ТК Uz1 при воздействии ТН СТГС S6 с мощностью 8 Вт, температура среды  $T_{sred}$  = 20 °С (рисунок 2.27, по схеме на рисунке 2.22);

4) температура  $T_{zh2}^{f1\xi x mat}$  теплоносителя на выходе пары TP tr1, как результат суммы выходов ПФ  $W_1^{f1}$ ,  $W_2^{Uz6 f1}$  (рисунок 2.28, по схеме на рисунке 2.23), начальная температура пластины  $T_{pl}^0 = 40$  °C, температура теплоносителя  $T_{zh1}^{f1\xi x} = 10$  °C на входе пары TP tr1;

5) переходный процесс ПФ  $W_3^{f1\ Uz6}$  – температура  $T_{Uz6}^{mat}$  в ТК Uz6 при воздействии  $T_{zh2}^{f1\xi x}$  пары ТР tr1, начальная температура пластины  $T_{pl}^0 = 40$  °C (рисунок 2.29, по схеме на рисунке 2.24).





Рисунок 2.26 – Переходный процесс в Uz1 при воздействии тепловыделяющего прибора ИИС Pr3



Рисунок 2.27 – Переходный процесс в Uz1 при воздействии TH СТГС S6



Рисунок 2.28 – Переходный процесс на выходе пары TP tr1





Установлено, что для допустимой погрешности в структуре ПФ достаточно удерживать не более 4 апериодических звеньев при параметрической идентификации их коэффициентов и постоянных времени. Рисунки 2.25-2.29 демонстрируют отклонение идентифицированных ПФ расчетной структуры (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193) от аналогичной переходной характеристики уточненной численной модели ANSYS в пределах 3%, что свидетельствует об удовлетворительной идентификации.

#### 2.7 Выводы по второй главе

1. Предложена методика математического моделирования распределения температуры в НК АО в условиях нестационарного и неравномерного воздействия на нее локально-распределенного тепловыделения аппаратуры ИИС и внешних тепловых воздействий.

2. Обоснованы и поставлены в качестве неявной функциональноориентированной на использование в управлении ММ сопряженные краевые теплогидравлические задачи, описывающие процессы теплопроводности в НК и ее теплообмен с СЖО.

3. Получено решение поставленных сопряженных краевых задач математической физики, представляющее собой явную форму функционально-ориентированной ММ температурного распределения в НК.

4. Получены и приведены к дробно-рациональному виду ПФ процесса теплообмена СЖО и НК.

5. Методами конечных интегральных преобразований с использованием функции Грина получены распределенные ПФ температурного распределения от дискретнораспределенных теплоисточников в НК.

6. Получена структурная форма описания температурного распределения в НК как распределенного объекта управления.

7. Проведена параметрическая идентификация ОУ с использованием вычислительного эксперимента на конечно-элементной модели в программной среде ANSYS.

8. В ходе параметрической идентификации установлено допустимое число членов аппроксимации ПФ ОУ и уточнены значения параметров ПΦ, составляющих структуру ОУ.

### **3** РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

3.1 Постановка задачи автоматического управления температурным распределением на диагональной линии ответственного сечения несущей конструкции

Технические требования к температурному распределению в ЛОС НК (см.раздел 1.3) в диссертации обеспечиваются разработанной САУ температурным распределением на ЛОС НК АО [140-143].

В соответствии с этими техническими требованиями перед САУ стоит следующая задача: перевести ОУ (рисунок 2.14, ПФ (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193)) из начального состояния  $T_{pl}^{0}$  в требуемое конечное  $T_{ust}^{pl}$  в следующих условиях:

1. Ограничения на управляющие воздействия:

а) Управляющим воздействием ТН СТГС являются потоки  $q_{\xi x}^{stgs N_s} N_s$ -х ТН на гранях  $\xi_x$  пластины. Значения этих потоков определяются соответствующими мощностями  $P_{stgs N_s}$  (2.4), дискретно распределенными по поверхности НК в области  $V_{\xi x}^{stgs N_s}$  (размеры посадочного места теплоисточников S), ограничения на предельно допустимые величины  $P_{\min}^{stgs}$ ,  $P_{\max}^{stgs}$  мощности ТН СТГС  $P_{stgs N_s}$ :

$$P_{\min}^{stgs} \le P_{stgs \ N_s} \le P_{\max}^{stgs}, \tag{3.1}$$

где  $P_{\min}^{stgs} = 0$  Вт,  $P_{\max}^{stgs} = 40$  Вт.

Управление осуществляется парами ТН СТГС в области диагональной ЛОС НК: S6-St6, S7-St7, S3-St3, S8-St8, S9-St9. ТН СТГС S1-St1, S2-St2, S4-St4, S5-St5 для управления температурой диагональной ЛОС не используются.

б) Управляющим воздействием СЖО является температура теплоносителя на входе ТР. Ограничения на предельно допустимые температуры теплоносителя в ТР tr1...tr5 определяются техническими возможностями СОТР:

$$T_{\min}^{zh} \le T_{zh}^{fi\,\xi x} \le T_{\max}^{zh},$$
 (3.2)

где  $T_{\min}^{zh} = 10$  °C,  $T_{\max}^{zh} = 40$  °C.

2. Теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона (2.7) и тепловыделение приборов ИИС тепловыми потоками  $q_{\kappa 1}^{\Pr l 1}$  на гранях  $\kappa 1$  пластины, определяющиеся согласно (2.4) их мощностями  $P_{\Pr l 1}$ , дискретно распределенными по поверхности НК в окрестности  $V_{\kappa 1}^{\Pr l 1}$ , изменяющими в соответствии с циклограммами (рисунок 1.3-1.8), рассматриваются как возмущения.

3. Требования к показателям качества работы САУ [56, 75,76, 144-148146]: Величина статической ошибки результирующих температур в выбранных ТК диагональной ЛОС НК  $\Delta_{cmam} \le 0.5$  °C, величина динамической ошибки  $\Delta_{duh} \le 2$  °C. Величина перерегулирования  $\sigma$  не более 30% ( $\sigma \le 30$  %), степень затухания  $\psi_3$  не менее 97% ( $\psi_3 \ge 97$  %), время регулирования  $t_{nn}$  не более 10800 сек. ( $t_{nn} \le 10800$  сек.).

В качестве требуемого конечного значения температуры  $T_{ust}^{pl}$  принято:  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40$  °C и  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20$  °C.

# 3.2 Структура системы автоматического управления температурным распределением на диагональной линии ответственного сечения несущей конструкции

Разработанная в разделе 2 ФОМ в форме структурной схемы (рисунок 2.14) и идентификация ПФ (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193), составляющих ФОМ (см.подраздел 2.6) позволяют предложить структуру САУ температурным распределением на диагональной ЛОС НК. На рисунке 3.1 представлена укрупненная структурная схема САУ.

САУ, построенная как супервизорная система управления, содержит две основные подсистемы, замыкаемые по отклонению управляемой величины.



Рисунок 3.1 – Укрупненная структурная схема САУ температурным распределением ЛОС НК

1) Подсистема управления температурой ТК ТН СТГС с мощностями  $P_{stgs N_s^*}$  (САУ ТН), которая в соответствии с (2.4) отражает изменение тепловыделения пар ТН СТГС, расположенными в окрестности диагональной ЛОС НК.  $N_s = N_s^* + N_s^*$  – номер ТН СТГС на гранях  $\xi_{lx}$ : на грани  $\xi_{lx0}$   $N_s = \overline{1, N_{stgs}}$ ,  $N_{stgs} = 9$  (St1...St9), на грани  $\xi_{lx1}$   $N_s = \overline{1, N_{stgs}}$ ,  $N_{stgs} = 9$  (S1...S9);  $N_{s}^{"}$  – TH СТГС не входящие в систему управления диагональной ЛОС НК,  $N_{s}^{"} = (1, 2, 4, 5)$  на гранях  $\xi_{lx0}$  и  $\xi_{lx1}$ : пары TH S1-St1, S2-St2, S4-St4, S5-St5;  $N_{s}^{*}$  – ТН СТГС, входящие в САУ температурой диагональной ЛОС НК,  $N_s^* = (6,7,3,8,9)$ : пары TH S6-St6, S7-St7, S3-St3, S8-St8, S9-St9. Координаты соответствующих ТК диагональной ЛОС НК  $M^{**}(l_x^*, l_v^*, l_z^*)$  .

2) Подсистема управления температурой теплоносителя в ТР СЖО (САУ ТР), построенная на базе полученной в главе 2 структурной схемы ОУ (рисунок 2.14).

Синтез ПИ- и ПИД-регуляторов, реализующих пропорционально-интегральный (ПИ) пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) И законы регулирования, производится известными методами [46, 149-152] путем моделирования в среде MATLAB.  $W_{reg}^{U_Z}(p) - \Pi \Phi$  регуляторов ТН СТГС (рисунок 3.2) для управления температурами ТК Uz1...Uz5;  $W_{reg}^{Uz6}(p)$  и  $W_{reg}^{f1}(p)$  – внешний и внутренний регулятор СЖО для управления ТК Uz6 TP tr1 на грани  $\xi_{lx0}$ , регуляторы для TP tr1 на грани  $\xi_{lx1}$ также для ТК Uz6 и пары ТР tr5 для ТК Uz7 определяются по аналогии.



Рисунок 3.2 – Структура подсистемы  $W_{reg}^{Uz}(p)$ 

Заданные температуры диагональной ЛОС НК в соответствующих ТК и TP определяются алгоритмом супервизорного температуры теплоносителя В

управления, реализованным в форме соответствующего программного обеспечения бортового компьютера или специального программируемого контроллера.

Базовым принципом, заложенным в алгоритм, является управление путем изменения мощности управляемых ТН для предотвращения недопустимого уровня термоградиентных деформаций НК, а для предотвращения недопустимого перегрева НК с помощью корректирующего регулятора изменяется заданное значение температуры жидкостного теплоносителя в соответствующих ТР СЖО, что обеспечивает необходимую интенсивность зонального охлаждения НК.

Основу САУ ТН и САУ ТР составляют локальные САУ стабилизации заданного алгоритмом супервизорного управления значения температуры в ТК диагональной ЛОС НК. Рассматриваются особенности синтеза локальных САУ температурой в ТК  $M^{**}(l_x, l_y, l_z)$  диагональной ЛОС НК, составляющих соответствующую подсистему.

# 3.3 Структура локальных систем автоматического управления температурой точек контроля диагональной линии ответственного сечения несущей конструкции

В связи с тем, что параметрический синтез САУ связан с определением настроек регуляторов и требует использования идентифицированной математической модели ОУ, которая в свою очередь привязана к конкретному АО, используются полученные в разделе 2.6 идентифицированные ПФ математической модели для базового АО.

Локальные САУ стабилизации температуры теплоносителя обеспечивают охлаждение наиболее горячих ТК диагональной ЛОС НК. Так как наиболее горячие ТК не совпадают с регулируемыми с помощью САУ ТН, а связаны с ними лишь через распределенную ПФ, САУ ТН и САУ ТР рассматриваются как автономные локальные системы и их взаимодействия отражаются соответствующими возмущающими воздействиями одной системы на другую.

Структурная схема локальной САУ ТН температурой  $T_{Uz1}^{mat}$  ТК Uz1 (рисунок 3.3), содержит следующие ПФ:  $W_{reg}^{Uz1}$  – ПФ регулятора пары ТН СТГС S6 и St6,  $W_{S6}^{Uz1}$  и  $W_{St6}^{Uz1}$  – ПФ влияния ТН СТГС S6 и St6 на Uz1;  $W_{Pr1}^{Uz1}...W_{Pr4}^{Uz1}$  – ПФ влияния приборов Pr1...Pr4 на Uz1;  $W_{Pru1}^{Uz1}...W_{Pru4}^{Uz1}$  – ПФ влияния приборов Pru1...Pru4 на Uz1;  $W_{Pra}^{Uz1}, W_{Prb}^{Uz1}$  –  $\Pi \Phi$  влияния приборов Pra и Prb на Uz1;  $W_{PrC1}^{Uz1}, W_{PrC2}^{Uz1} - \Pi \Phi$  влияния приборов PrC1 и PrC2 на Uz1;  $W_{Prh1}^{Uz1}, W_{Prh2}^{Uz1}$  – ПФ влияния приборов Prh1 и Prh2 на Uz1;  $e_{Uz1}$  – величина рассогласования в Uz1, и<sup>Uz1</sup> – величина управляющего воздействия ТН СТГС  $u^{Uz1} = q_{\xi x0}^{stgs \, 6} = q_{\xi x1}^{stgs \, 6}$ ,  $T_{ust}^{pl}$  – заданное значение температуры,  $T_{pl}^{0}$  – начальная температура пластины,  $T_{sred}$  – температура среды,  $\alpha$  – эквивалентный коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающей среде,  $T_{Uz1}^{mat}$  – температура в Uz1,  $W_{sred}^{Uz1}$  –  $\Pi \Phi$ влияния среды на Uz1; $W_{S7}^{Uz1}$  и  $W_{St7}^{Uz1}$ ,  $W_{S3}^{Uz1}$  и  $W_{St3}^{Uz1}$ ,  $W_{S8}^{Uz1}$  и  $W_{St8}^{Uz1}$ ,  $W_{S9}^{Uz1}$  и  $W_{St9}^{Uz1}$  – ПФ влияния ТН СТГС S7 и St7, S3 и St3, S8 и St8, S9 и St9 на Uz1;  $W_{f1\xi x0}^{Uz1}$  и  $W_{f1\xi x1}^{Uz1}$ ,  $W_{f2\xi x0}^{Uz1}$  и  $W_{f2\,\xi x1}^{Uz1}$ ,  $W_{f3\,\xi x0}^{Uz1}$  и  $W_{f3\,\xi x1}^{Uz1}$ ,  $W_{f4\,\xi x0}^{Uz1}$  и  $W_{f4\,\xi x1}^{Uz1}$ ,  $W_{f5\,\xi x0}^{Uz1}$  и  $W_{f5\,\xi x1}^{Uz1} - \Pi \Phi$  влияния соответствующих пар ТР tr1...tr5, касающихся граней  $\xi_{x0}$  и  $\xi_{x1}$  пластины областями f1...f5, на Uz1;  $q_{\xi x 0}^{\operatorname{Pr} u 1}$ ... $q_{\xi x 0}^{\operatorname{Pr} u 4}$ ,  $q_{\xi x 1}^{\operatorname{Pr} 1}$ ,  $q_{\xi z 0}^{\operatorname{Pr} h 1}$  и  $q_{\xi z 1}^{\operatorname{Pr} h 2}$ ,  $q_{\xi z 0}^{\operatorname{Pr} C 1}$  и  $q_{\xi z 1}^{\operatorname{Pr} C 2}$ ,  $q_{\xi y 0}^{\operatorname{Pr} a}$  и  $q_{\xi y 0}^{\operatorname{Pr} b}$  – потоки от приборов, работающих по циклограммам (рисунок 1.3-1.8). Аналогичным образом построены системы для управления остальными ТК; цифрами 1-5, обведенными кругами обозначены каналы воздействия от соответствующих регуляторов ТН СТГС, цифрами 6-10 каналы воздействия температуры жидкостного теплоносителя ТР СЖО в соответствующих ТК.

Локальная одноконтурная САУ температурой в ТК Uz1 с помощью ПИрегулятора, управляющего мощностью пары ТН СТГС S6 и St6 с учетом наиболее существенных возмущений, представлена на рисунке 3.4. Также работает САУ температурой ТК Uz5.

На рисунке 3.5 представлена локальная одноконтурная САУ температурой в ТК Uz2 с помощью ПИ-регулятора, управляющего мощностью пары TH CTГС S7 и St7 с учетом наиболее существенных возмущений, также работает САУ температурой в ТК Uz4. САУ температурой в ТК Uz3 выполняется по аналогии.

Регулирование температуры диагональной ЛОС НК с помощью ТН СТГС позволяет осуществлять компенсацию термодеформаций только с помощью нагрева. Чтобы избежать опасности перегрева предусмотрена локальная система управления температурой жидкостного теплоносителя в ТР СЖО (рисунок 1.2, 2.2). Структура САУ

температурой ТК Uz6 с помощью пары TP tr1, касающейся пластины областями f1 представлена на рисунке 3.6. Регулятор внешнего контура регулирует температуру в ТК, рассчитывая температуру на выходе TP, рассматриваемую как задающее значение  $u^{Uz6} = T_{zh\,ust}^{f1\xix}$  для внутреннего регулятора. Регулятор внутреннего контура регулирует температуру на выходе TP, рассчитывая температуру на входе TP  $T_{zh1}^{f1\xix}$  mat.



Рисунок 3.3 – Общее структурное представление САУ ТН температуры в Uz1



Рисунок 3.4 – Структура локальной САУ температурой ТК Uz1 TH СТГС S6 и St6



Рисунок 3.5 – Структурная схема локальной САУ температурой в Uz2



Рисунок 3.6 – Структурная схема локальной САУ температурой в Uz6

## 3.4 Параметрический синтез локальных систем управления в точках контроля

Структурная схема САУ ОУ, представленная на рисунке 3.1, представляет собой многосвязную систему. В диссертации САУ ОУ рассматривается как система локальных САУ с управлением со стороны соответствующих ТН СТГС и ТР СЖО с температурой ТК  $T_{UzH}^{mat}$  ( $T_{UzH}$  – в модели ANSYS) UzH,  $H = \overline{1,7}$  диагональной ЛОС НК; воздействия со

стороны смежных локальных САУ и внешней среды при синтезе регулятора интерпретируются возмущениями. В этом случае для каждой ТК диагональной ЛОС НК можно рассматривать приведенную структурную схему локальной САУ (рисунок 3.7), где  $W_u^{U_2H}(s)$  – приведенная ПФ ОУ,  $W_v^{U_2H}(s)$  – приведенная ПФ возмущений.

Расчетная структура (рисунок 3.7) описывается операторными уравнениями [61, 62, 151]:

$$T_{UzH}^{mat}(s) = W_{u}^{UzH}(s)u^{UzH}(s) + W_{v}^{UzH}(s)v^{UzH}(s)$$
  

$$u^{UzH}(s) = W_{reg}^{UzH}(s,\bar{K})e_{UzH}(s)$$
, (3.3)

где  $e_{UzH}(s) = T_{ust}^{pl} - T_{UzH}^{mat}(s)$ .



Рисунок 3.7 – Структурная схема локальной САУ

Выбор ПИ- или ПИД-закона регулирования для регуляторов  $W_{reg}^{UzH}$  определяется, тем что ПИ- и ПИД-регуляторы широко применяются в промышленности. Регуляторы с этой универсальной структурой хорошо изучены, обеспечивают высокое качество регулирования, отличаются минимизацией дисперсии при случайных нормальнораспределенных возмущениях, пригодностью для решения широкого круга практических задач, простотой настройки и программной реализации [153-159].

Управляющий сигнал, на выходе ПИД-регулятора определяется формулой:

$$u(t) = P + I + D = K_{\Pi} e_{UzH}(t) + K_{\Pi} \int_{0}^{t} e_{UzH}(\tau) d\tau + K_{\Pi} \frac{de_{UzH}(t)}{dt}, \qquad (3.4)$$

где P, I, D – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие;  $K_{u}, K_{n}, K_{d}$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты;  $e_{UzH} = \Delta T_{UzH} = T_{ust}^{pl} - T_{UzH}^{mat}$  – величина рассогласования, представляющая собой разность между заданным значением и регулируемой величиной процесса. Параметрический синтез локальной САУ при выбранной структуре сводится к определению параметров  $\overline{K}$ ,  $\overline{K} = (K_{\Pi}, K_{\mu}, K_{\Lambda})$  регуляторов  $W_{reg}^{UzH}(s, \overline{K})$ , который определяется критериями качества регулирования и соответствующими ограничениями.

Если требования к качеству САУ удается перевести в частотную область, трансформант Фурье, то с учетом требований к качеству процесса управления, сформированных для АЧХ частотной области, по показателю колебательности  $M^{\psi_3}$ , связанным со степенью затухания  $\psi_3$ , ставится минимаксная задача оптимизации [61, 62, 160-163]:

$$\max_{\omega \in [0;\infty)} \left| W_{\nu k}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) \right| \to \min_{\bar{K}}$$
(3.5)

$$\max_{\omega \in [0;\infty)} \left| W_{uk}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) \right| \le M^{\psi_3}$$
(3.6)

Минимаксная задача программирования (3.5, 3.6) сформирована на основе зависимости основных динамических показателей качества, перерегулирования  $\sigma$ , степени затухания  $\psi_3$  и времени регулирования  $t_{nn}$  от показателей колебательности  $M^{\psi_3}$  и максимума АЧХ по возмущению  $W_{vk}^{UzH}(j\omega, \bar{K})$ .

В соответствии с приведенной на рисунке 3.7 структурной схемой в задаче программирования (3.5, 3.6):

$$W_{vk}^{UzH}(j\omega,\overline{K}) = \frac{W_v^{UzH}(j\omega)}{1 + W_{reg}^{UzH}(j\omega,\overline{K}) \cdot W_u^{UzH}(j\omega)}$$
(3.7)

$$W_{uk}^{UzH}(j\omega,\overline{K}) = \frac{W_{reg}^{UzH}(j\omega,\overline{K}) \cdot W_{u}^{UzH}(j\omega)}{1 + W_{reg}^{UzH}(j\omega,\overline{K}) \cdot W_{u}^{UzH}(j\omega)}$$
(3.8)

В данном подразделе ј – обозначение мнимой единицы.

Проблема параметрического синтеза САУ сводится к поиску  $K_{\mu}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Lambda}^{onm}$ , доставляющих экстремум требуемому показателю качества:

$$W_{reg}^{U_zH}(s,\bar{K}) = K_{\Pi} + \frac{K_{\Pi}}{s} + K_{\Pi}s$$
(3.9)

Решение поставленной минимаксной задачи (3.5, 3.6) получается альтернансным методом Э.Я. Рапопорта [61,62].

В частности при выборе ПИ-регулятора ( $K_{\rm d} = 0$ ) ТН с двумя параметрами настройки  $K_{\rm n}$  и  $K_{\rm u}$  для управляемой ТК Uz1:

$$W_{reg}^{Uz1}(s,\bar{K}) = K_{\Pi} + \frac{K_{\Pi}}{s}$$
(3.10)

структурная схема локальной САУ примет вид, представленный на рисунке 3.4, в этом случае справедливы соотношения:

ПФ ОУ по каналу управляющего воздействия:

$$W_{uk1}^{Uz1}(s,\bar{K}) = \frac{W_{reg}^{Uz1} \cdot \left(W_{S6}^{Uz1} + W_{St6}^{Uz1}\right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}}{1 + W_{reg}^{Uz1} \cdot \left(W_{S6}^{Uz1} + W_{St6}^{Uz1}\right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}}$$
(3.11)

ПФ объекта управления по первому каналу возмущения:

$$W_{vk1}^{Uz1}(s,\overline{K}) = \frac{W_{Pr3}^{Uz1} \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}}{1 + W_{reg}^{Uz1} \cdot \left(W_{S6}^{Uz1} + W_{St6}^{Uz1}\right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}}$$
(3.12)

по второму каналу возмущения:

$$W_{vk2}^{Uz1}(s,\overline{K}) = \frac{W_{Pru3}^{Uz1} \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}}{1 + W_{reg}^{Uz1} \cdot \left(W_{S6}^{Uz1} + W_{St6}^{Uz1}\right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}}$$
(3.13)

Решение задачи математического программирования (3.5, 3.6) с учетом наиболее существенного возмущения  $W_{vk2}^{Uz1}(s, \overline{K})$  в соответствии с процедурой альтернансного метода сводится к решению системы пяти уравнений [61, 62, 151,152,164-166]:

$$\begin{bmatrix} \left| W_{vk2}^{Uz1}(j\omega_{v}^{onm}, K_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| - I_{1}(K_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{vk2}^{Uz1}(j\omega_{v}^{onm}, K_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| - M_{1} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0 \\ \frac{\partial}{\partial W_{uk}^{Uz1}}(j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}) \right| = 0$$

относительно пяти неизвестных:

1) частота  $\omega_u^{onm}$  в точке максимума АЧХ системы по каналу управляющего воздействия:

$$\omega_{u}^{onm} = \arg \max_{\omega \in [0;\infty)} \left| W_{uk_{1}}^{Uz1}(j\omega, \bar{K}) \right| \le M^{\psi_{3}}$$
(3.15)

2) частота  $\omega_v^{onm}$  в точке максимума АЧХ системы по каналу возмущающего воздействия:

$$\omega_{\nu}^{onm} = \arg \max_{\omega \in [0,\infty)} \left| W_{\nu k2}^{Uz1}(j\omega, \bar{K}) \right| \to \min_{\bar{K}}$$
(3.16)

- 3) параметр  $K_{\mu} = K_{\mu}^{onm}$  регулятора;
- 4) параметр  $K_{\Pi} = K_{\Pi}^{onm}$  регулятора;

5) минимизируемое значение критерия оптимизации, в качестве которого рассматривается максимум АЧХ системы по каналу возмущающего воздействия (3.20).

Для решения системы (3.14) используется программный код листингов 3.1-3.5 в среде MATLAB. Пять указанных неизвестных обозначены в листингах 3.1-3.5 как: x1, x2, x3, x4, x5 соответственно. Функции для определения АЧХ по каналам управления  $W_{uk1}^{U_{z1}}(s, \overline{K})$  и возмущения  $W_{uk1}^{U_{z1}}(s, \overline{K})$  с помощью соответствующих ПФ САУ определяются согласно программе листинга 3.1.

| Листинг 3.1 – Функции для определения | АЧХ по каналам управления и возмущения |
|---------------------------------------|--|
|---------------------------------------|--|

| function y=kontur_u_uz1(x1,x3,x4)   | function y=kontur_v2_uz1(x1,x3,x4)   |
|---|--|
| % для выражения   | % для выражения  |
| % $\left(W_{S6}^{Uz1} + W_{St6}^{Uz1}\right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}$ | $\% \left( W_{S6}^{Uz1} + W_{St6}^{Uz1} \right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz1}}$ |
| %записывается числитель:  | % записывается числитель:  |
| W1  | W1   |
| %знаменатель:   | %знаменатель:  |
| W2,   | W2,  |
| % вместо оператора Лапласа  | % вместо оператора Лапласа   |
| %записывается (j*x1)  | %записывается (j*x1)   |
| % записывается ПФ:  | % записывается ПФ:   |
| Wu1=W1./W2;   | Wu1=W1./W2;  |
| % для выражения $\frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{U_z 1}}$                                 | % для выражения $\frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{U_z 1}}$                                    |
| % записывается числитель:   | % записывается числитель:  |
| W3  | W3   |
| %знаменатель:   | %знаменатель:  |
| W4,   | W4,  |
| % вместо оператора Лапласа  | % вместо оператора Лапласа   |
| %записывается (j*x1)  | %записывается (j*x1)   |
| % записывается ПФ:  | % записывается ПФ:   |
| Wu2=W3./W4;   | Wu2=W3./W4;  |
| %запись регулятора:   | % числитель ПФ действия в ТК прибора Pru3:   |
| Wreg1 = (x4*(j*x1)+x3)/(j*x1);  | W_Pru3_ch  |
| %числитель АФХ по каналу управления:  | % знаменатель ПФ действия в ТК прибора   |
| W_num=Wu1.*Wreg1;   | Pru3:  |
| %знаменатель АФХ по каналу  | W_Pru3_zn  |
| управлен.:  | % вместо оператора Лапласа   |
| W_den=1+Wu1.*Wreg1;   | %записывается (j*x1)   |
| %АФХ по каналу управления:  | % полня ПФ действия в ТК прибора Pru3:   |
| Bu=W_num./W_den;  | W_Pru3=W_Pru3_ch./W_Pru3_zn;   |
| %АЧХ системы по каналу  | Wv1=W1./W2;  |
| %управляющего воздействия   | Wv2=W3./W4;  |
| y=sqrt((real(Bu).^2+imag(Bu).^2));  | Wreg1 = (x4*(j*x1)+x3)/(j*x1);   |
| end   | %числитель АФХ по каналу возмущения:   |
|   | W_num=Wv2.*W_Pru3;   |
|   | %знаменатель АФХ по каналу возмущения:   |
|   | W_den=1+Wv1.*Wreg1;  |
|   | %АФХ по каналу возмущения:   |
|   | Bu=W_num./W_den;   |
|   | %АЧХ системы по каналу возмущ.   |
|   | воздействия:   |
|   | y=sqrt((real(Bu).^2+imag(Bu).^2));   |
|   | end  |

С помощью представленных в листинге 3.2 команд вызова функций листинга 3.1 определены частотные характеристики по каналам управления и возмущения, которые представлены на рисунках 3.8 и 3.9 соответственно. Показатель колебательности  $M^{\psi_3} = 1.15$ .

Листинг 3.2 – Команды вызова функций АЧХ

| %команда вызова АЧХ по управлению                | %аналогично записывается    |
|--|-----------------------------|
| %запись диапазона частот x1 в формате            | % по возмущению:            |
| % начальное значение:шаг:конечное значение       |                             |
| x1   | for i=1:length(x1)          |
| % запись коэффициента И-составляющей регулятора: | y(i)=                       |
| x3   | kontur_v2_uz1(x1(i),x3,x4); |
| %коэффициент П-составляющей регулятора:          | end                         |
| x4   | plot(x1,y)                  |
| for i=1:length(x1)                               |                             |
| y(i)=kontur_u_uz1(x1(i),x3,x4);                  |                             |
| end  |                             |
| plot(x1,y)                                       |                             |







Для решения системы уравнений (3.14) определяются производные АЧХ управлению и возмущению:

$$\frac{\frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk1}^{Uz1} \left( j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|, \\ \frac{\frac{\partial}{\partial \omega} \left| W_{uk}^{Uz1} \left( j\omega_{u}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\frac{\partial}{\partial W_{vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\partial}{\partial W_{Vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\partial}{\partial W_{Vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\partial}{\partial W_{Vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm}, K_{\Pi}^{onm} \right) \right|}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\partial}{\partial W_{Vk2}^{Uz1} \left( j\omega_{v}^{onm} \right)}{\frac{\partial}{K_{\Pi}^{onm}}}, \quad \frac{\partial}{\partial W_{Vk2}^{Onm}} \right|}$$

что показано в листинге 3.3. Система уравнений (3.14) в среде MATLAB представлена в листинге 3.4. Для решения системы уравнений (3.14) используется листинг 3.5.

| % Производная АЧХ канала управления                 | % Производная АЧХ канала возмущения                 |
|---|---|
| % $uk_1$ по $\omega_u^{onm}$ (по х1)                | % $vk_2$ по $\omega_v^{onm}$ (по х2)                |
| function df=DU1(x1,x3,x4) %производная              | function df=DV2(x2,x3,x4) %производная              |
| %АЧХ (по управлению) по х1                          | %АЧХ (по возмущению) по x2                          |
| h=1e-12;  | h=1e-12;  |
| $df = (kontur_u_u1(x1+h,x3,x4)-$                    | $df = (kontur_v2_uz1(x2+h,x3,x4)-$                  |
| kontur_u_uz1(x1,x3,x4))/h;                          | kontur_v2_uz1(x2,x3,x4))/h;                         |
| end   | end   |
| % Производной АЧХ $uk_1$ по $K_{\Pi}^{onm}$ (по х4) | % Производная АЧХ $vk_2$ по $K_{\Pi}^{onm}$ (по х4) |
| function df=D2U1(x1,x3,x4)                          | function df=D2V2(x2,x3,x4) %производная             |
| %производная АЧХ (по управлению) по                 | %АЧХ (по возмущению) по х4 - начальное              |
| %х4 - начальное Кр регулятора                       | %Кр регулятора                                      |
| h=1e-12;  | h=1e-12;  |
| $df = (kontur_u_u1(x1,x3,x4+h)-$                    | $df = (kontur_v2_uz1(x2,x3,x4+h)-$                  |
| kontur_u_uz1(x1,x3,x4))/h;                          | kontur_v2_uz1(x2,x3,x4))/h;                         |
| end   | end   |
| % Производная АЧХ $uk_1$ по $K_{\mu}^{onm}$ (по х3) | % Производная АЧХ $vk_2$ по $K_{\mu}^{onm}$ (по х3) |
| function df=D1U1(x1,x3,x4)                          | function df=D1V2(x2,x3,x4) %производная             |
| %производная АЧХ (по управлению) по                 | %АЧХ (по возмущению) по х3 - начальное              |
| %х3 - начальное Ки регулятора                       | %Ки регулятора                                      |
| h=1e-12;  | h=1e-12;  |
| $df = (kontur_u_uz1(x1,x3+h,x4)-$                   | $df = (kontur_f2_uz1(x2,x3+h,x4)-$                  |
| kontur_u_uz1(x1,x3,x4))/h;                          | kontur_f2_uz1(x2,x3,x4))/h;                         |
| end   | end   |

Листинг 3.3 – Функции для системы уравнений (3.14)

Листинг 3.4 – Система уравнений (3.14), записанная в MATLAB

function F = myfun(x)  $F = [kontur_u_uz1(x(1),x(3),x(4))-1.1495;$  DU1(x(1),x(3),x(4));  $kontur_v2_uz1(x(2),x(3),x(4))-x(5);$  DV2(x(2),x(3),x(4)); D1U1(x(1),x(3),x(4))\*D2V2(x(2),x(3),x(4))-D1V2(x(2),x(3),x(4))\*D2U1(x(1),x(3),x(4))];end

Листинг 3.5 – Вызов решателя для системы (3.14)

x0=[ x01 x02 x03 x04 x05]; %где вместо x00-x01 вводятся соответствующие значения options = optimoptions('fsolve','Display','iter'); %опции для вывода результата [x,fval]=fsolve(@myfun,x0,options) %вызов решателя

В результате решения системы (3.14) альтернансным методом для регулятора  $W_{reg}^{Uz1}(s, \bar{K})$  определены оптимальные параметры  $K_{\Pi}^{onm} = 1.67, K_{\mu}^{onm} = 0.01$  для следующих

условий:  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{01} = 40$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40$  °C. Параметры регулятора  $W_{reg}^{Uz1}$  незначительно отличаются от коэффициентов, рассчитанных встроенными методами численной оптимизации в MATLAB Simulink.  $T_{sred} = 20$ 

Для ПИ-регулятора пары TH СТГС S7 и St7 CAУ температурой в TK Uz2, определяются ПФ по управлению  $W_{uk2}^{Uz2}$  и возмущению  $W_{vk2}^{Uz2}$  (рисунок 3.5). ПФ объекта управления по каналу управляющего воздействия определяется следующим соотношением:

$$W_{uk}^{Uz2}(s,\bar{K}) = \frac{W_{reg2}^{Uz2} \cdot \left(W_{S7}^{Uz2} + W_{St7}^{Uz2}\right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz2}}}{1 + W_{reg2}^{Uz2} \cdot \left(W_{S7}^{Uz2} + W_{St7}^{Uz2}\right) \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{Uz2}}}$$
(3.17)

ПФ по возмущению определяется следующим соотношением:

$$W_{vk2}^{U_{z2}}(s,\bar{K}) = \frac{\alpha \cdot W_{sred}^{U_{z2}} \cdot W_p}{1 + \alpha \cdot W_{sred}^{U_{z2}} \cdot W_p},$$
(3.18)

где  $W_p = \frac{1}{1 + W_{reg2}^{Uz2} \cdot \left(W_{S7}^{Uz2} + W_{St7}^{Uz2}\right)}.$ 

ПФ регулятора для ТК Uz2  $W_{reg}^{Uz2} = 0.9 + \frac{0.01}{s}$ , ПФ регулятора для ТК Uz3  $W_{reg}^{Uz3} = 0.7 + \frac{0.01}{s}$ , ПФ регулятора для ТК Uz4  $W_{reg}^{Uz4} = W_{reg}^{Uz2}$ , ПФ регулятора для ТК Uz4  $W_{reg}^{Uz4} = W_{reg}^{Uz2}$ , ПФ регулятора для ТК Uz5  $W_{reg}^{Uz5} = W_{reg}^{Uz1}$ .

В практике инженерного проектирования САУ широко используется встроенная процедура численного поиска параметров ПИ- и ПИД-регуляторов для ОУ различного назначения. Эти вычислительные поисковые процедуры нельзя в полной мере назвать оптимизационными, т.к. не установлено в достаточной степени единственность решения и его устойчивость. Однако, в силу широкого распространения этой процедуры в инженерной практике приведены ПФ регуляторов TH CTГС, полученные в MATLAB Simulink для условий  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{02} = 10$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20$  °C:  $W_{reg}^{Uz1} = 0.8 + \frac{0.0025}{s}$ ,  $W_{reg}^{Uz3} = 3.9 + \frac{0.0008}{s}$ ,  $W_{reg}^{Uz4} = W_{reg}^{Uz2}$ ,  $W_{reg}^{Uz5} = W_{reg}^{Uz1}$ .

Регуляторы САУ ТР  $W_{reg}^{Uz6}(p)$  и  $W_{reg}^{f1}(p), W_{reg}^{Uz7}(p)$  и  $W_{reg}^{f5}(p)$  имеют ПИДструктуру (рисунок 3.6):  $W_{reg}^{Uz6} = 4.4 + \frac{0.3}{s} + 0.1 \cdot s$ ,  $W_{reg}^{f1} = 10 + \frac{0.4}{s} + 0.1 \cdot s$ ,  $W_{reg}^{Uz7} = W_{reg}^{Uz6}$ ,  $W_{reg}^{f5} = W_{reg}^{f1}$ .

### 3.5 Результаты моделирования локальных систем автоматического управления в среде MATLAB

Результат моделирования локальных САУ ТН СТГС в узлах Uz1, Uz2 и ТР СЖО в Uz6: при начальной температуре пластины  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{01} = 40$  °C, температуре среды  $T_{sred} = 20$  °C, заданной температуре  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40$  °C, времени расчета  $t_1 = 30000$  сек., температурном возмущении от измерительных приборов Pr3, Pru3, работающих по циклограммам (рисунок 1.3-1.4), продемонстрирован:

1) на рисунке 3.10 для управления с помощью регулятора  $W_{reg}^{Uz1} = 1.67 + \frac{0.01}{s}$  TH СТГС S6-St6 температурой в TK Uz1 ( $\Delta_{\partial u \mu} = 0.04$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0$  °C,  $\sigma = 0.1\%$ ,  $t_{nn} = 0$ );

2) на рисунке 3.11-3.12 для управления с помощью регулятора  $W_{reg}^{Uz2} = 0.9 + \frac{0.01}{s}$  TH CTFC S7-St7 температурой в TK Uz2 ( $\Delta_{\partial u \mu} = 0.04$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0$  °C,  $\sigma = 0.1\%$ ,  $t_{nn} = 0$ ); 3) на рисунке 3.13 для управления с помощью регуляторов  $W_{reg}^{Uz6} = 4.4 + \frac{0.3}{s} + 0.1 \cdot s$  и  $W_{reg}^{f1} = 10 + \frac{0.4}{s} + 0.1 \cdot s$  температуры теплоносителя в TP tr1 температурой в TK Uz6 ( $\Delta_{\partial u \mu} = 0.04$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0$  °C,  $\sigma = 0.1\%$ ,  $t_{nn} = 0$ ).



1 – Температура в ТК Uz1 при автоматическом управлении, °С; 2 – Температура в ТК Uz1 без управления, °С; 3 – Мощность ТН СТГС S6 и St6, Вт; 4 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pr3, Вт; 5 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pru3, Вт

Рисунок 3.10 – Результат моделирования в среде MATLAB локальной CAV температуры в TK Uz1 при  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{01} = 40$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40$  °C



Рисунок 3.11 – Результат моделирования в среде MATLAB локальной САУ температуры ТК Uz2 при  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{01} = 40$  °С,  $T_{sred} = 20$  °С,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40$  °С





1 – Температура в ТК Uz6 при управлении, °С; 2 – Температура в ТК Uz6 без управления, °С; 3 – Температура теплоносителя на входе пар ТР tr1,°С; 4 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pr3, Вт; 5 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pru3, Вт

Рисунок 3.13 – Результат моделирования в среде MATLAB локальной CAV температуры TK Uz6 при  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{01} = 40$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40$  °C

Результат моделирования локальных САУ ТН СТГС в узлах Uz1, Uz2 и ТР СЖО в Uz6 для следующих условий: начальная температура пластины  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{02} = 10$  °C, температура среды  $T_{sred} = 20$  °C, заданная температура  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20$  °C,  $t_1 = 30000$  сек.: 1) на рисунке 3.14 для управления с помощью регулятора  $W_{reg}^{Uz1} = 0.8 + \frac{0.002}{s}$  TH CTГС S6-St6 температурой в TK Uz1 ( $\Delta_{dun} = 0.5$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0$  °C,  $\sigma = 2.5\%$ ,  $t_{nn} = 779.77$  сек.); 2) на рисунке 3.15 для управления с помощью регулятора  $W_{reg}^{Uz2} = 0.889 + \frac{0.00025}{s}$  TH CTГС S7-St7 температурой в TK Uz2 ( $\Delta_{dun} = 0$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0.5$  °C,  $\sigma = 0\%$ ,  $t_{nn} = 8416.15$  сек.);

3) на рисунке 3.16 для управления с помощью регуляторов  $W_{reg}^{Uz6} = 4.4 + \frac{0.3}{s} + 0.1 \cdot s$  и  $W_{reg}^{f1} = 10 + \frac{0.4}{s} + 0.1 \cdot s$  температуры теплоносителя в TP tr1 температурой в TK Uz6 ( $\Delta_{duh} = 0.28$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0$  °C,  $\sigma = 1.4$  %,  $t_{nn} = 2117.652$  сек.).

108


1 – Температура в ТК Uz1 при автоматическом управлении, °С; 2 – Температура в ТК Uz1 без управления, °С; 3 – Мощность ТН СТГС, Вт; 4 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pr3, Вт; 5 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pru3, Вт

Рисунок 3.14 – Результат моделирования в среде МАТLAВ локальной САУ температуры ТК Uz1 при  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{02} = 10$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20$  °C



1 – Температура в ТК Uz2 при автоматическом управлении, °C; 2 – Температура в ТК Uz2 без управления, °C; 3 – Мощность ТН СТГС, Вт

Рисунок 3.15 – Результат моделирования в среде MATLAB локальной CAV температуры TK Uz2 при  $T_{pl}^0 = T_{pl}^{02} = 10$  °C,  $T_{sred} = 20$  °C,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20$  °C



1 – Температура в ТК Uz6 при автоматическом управлении, °C; 2 – Температура в ТК Uz6 без управления, °C; 3 – Выход внешнего ПИД-регулятора; 4 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pr3, Вт; 5 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения Pr3, Вт; 5 – Циклограмма изменения мощности

Рисунок 3.16 – Результат моделирования в среде MATLAB локальной САУ температуры ТК Uz6 при  $T_{pl}^{0} = T_{pl}^{02} = 10 \text{ °C}$ ,  $T_{sred} = 20 \text{ °C}$ ,  $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20 \text{ °C}$ 

Полученные в ходе моделирования результаты демонстрируют, что локальные САУ, составляющие соответствующие подсистемы САУ температурой по диагональной ЛОС НК АО, устойчивы, их статические и динамические показатели качества лежат в пределах установленных техническими требованиями. Однако, в силу существенных допущений при моделировании ОУ для учета взаимосвязей всех САУ результаты моделирования уточняются на конечно-элементной численной модели в среде ANSYS, свободной от большинства допущений, принятых в аналитическом моделировании ОУ и в ходе параметрического синтеза.

Полученные коэффициенты регуляторов в MATLAB Simulink используются в программном коде, реализующем регуляторы в ANSYS.

#### 3.6 Выводы по третьей главе

1. Предложена структура САУ температурным распределением на диагональной ЛОС НК АО.

2. Проведена декомпозиция САУ температурным распределением на диагональной ЛОС НК АО на автономные локальные САУ ТН и САУ жидкостным охлаждением ТР.

3. Выбрана структура и проведен параметрический синтез параметров регуляторов САУ, обеспечивающих требуемые динамические и статические показатели качества.

4. В программной среде MATLAB смоделирована работа САУ в условиях типовых возмущений. Моделирование продемонстрировало, что показатели качества САУ удовлетворяют техническим требованиям.

### 4 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ В СРЕДЕ ANSYS

# 4.1 Разработка программного блока численного моделирования объекта управления

Результаты аналитического моделирования ОУ и синтеза на основе этой модели системы управления (см. раздел.3.3) нуждаются в уточнении и корректировке, т.к. они получены в условиях существенных допущений (см.раздел 2.1): аппроксимации ГУ Стефана-Больцмана (2.5) условием Ньютона (2.7), конечного числа звеньев ПФ в (2.192), (2.188), (2.189), (2.185), (2.186), (2.193) и других. Кроме того, процедура параметрической идентификации (см. раздел 2.6), использует результаты вычислительного эксперимента на численной математической модели.

В диссертации численная математическая модель базируется на конечноэлементной аппроксимации связанной (сопряженной) теплогидравлической задачи (2.2-2.12) [167-171]. Для автоматизации сопряженных расчетов применяется программный пакет ANSYS Workbench.

Для моделирования ОУ построены отдельно геометрия пластины и системы ТР; наложена конечно-элементная сетка [25-30]: тип конечных элементов в тепловой задаче – SOLID70 (объемные тепловые твердотельные восьмиузловые изопараметрические элементы), в гидродинамической задаче накладывается сетка в виде тетраэдров (рисунок 4.1). Сетка на пластине вблизи ТР мельче (рисунок 4.2), в окрестности каждого теплоисточника геометрически выделены области для нанесения корректной сетки (рисунок 4.3.).



Рисунок 4.1 – Сгенерированная конечно-элементная сетка, наложенная на ТР



Рисунок 4.2 – Конечно-элементная сетка на пластине вблизи ТР



Рисунок 4.3 – Конечно-элементная сетка на областях теплоисточников на пластине

В цикле расчета для реализации проекта используются следующие программные модули (рисунок 4.4):

- *Parameter Set* – модуль хранения основных исходных данных (геометрические размеры, теплофизические свойства пластины, теплоносителя и среды, коэффициенты регуляторов, температуры среды и начальная температура пластины и т.п.) и переменные, в которые записываются основные данные из макросов.

- *Geometry* – модуль геометрии объекта.

- *Fluid Flow* – модуль гидродинамической задачи движения жидкостного теплоносителя в ТР.

- Transient Thermal – модуль нестационарной тепловой задачи. После того, как блок отрабатывает свою функцию, макрос из данного блока записывает узловые температуры (по всему телу) на текущем шаге во внешний файл и также подсчитывает среднюю температуру по диагональной ЛОС НК, которая выводится в переменную, которая записывается в файл. В блоке *Transient Thermal* осуществляется выбор и наложение сетки; на поверхностях пластины задается теплообмен со средой (исключая выделенные

области теплоисточников и ТР), также в соответствии с циклограммами задаются мощности теплоисточников.

- System Coupling – модуль связывания двух задач – тепловой и гидродинамической, где основной настройкой является определение трех интерфейсов (*Data Transfer*): первый интерфейс позволяет передать данные из гидродинамического блока в тепловой и передает коэффициент теплоотдачи, второй – передается температура среды вблизи стенки, третий – температура передается из тепловой задачи в гидродинамическую.

- *External Data* – собирает в свою оболочку данные температур пластины по координатам и передает их в блок *Steady-State Thermal*.

- Steady-State Thermal – технический блок организации пошаговых вычислений. Узловые температуры нужно передать на вход следующего шага, но непосредственно сразу отправить данные в тепловой блок не представляется возможным, т.к. требуется, чтобы в начальных условиях пластины уже было подсчитано температурное состояние, поэтому реализована подобная связка.

- *Mechanical APDL* – технический блок, используемый для формирования внешних файлов (запись картинок и узловых температур во внешний файл, данных на последнем шаге, т.к. данные перезаписываются).



Рисунок 4.4 – Дерево проекта

## 4.2 Результаты вычислительного эксперимента для параметрической идентификации объекта управления

Температурное распределение T(x, y, z, t) в пластине в различные моменты времени при теплообмене со средой и тепловыделении приборами ИИС, работающим согласно циклограммам (рисунок 1.3-1.8), при  $t_1 = 30000$  сек. без управляющих воздействий ТН СТГС и ТР СЖО показано на рисунке 4.5, а соответствующие температуры по диагональной ЛОС НК на рисунках 4.6-4.7.



Рисунок 4.5 – Температурное распределение НК при тепловыделении приборами ИИС без управления в фиксированные моменты времени при  $T_{pl}^0 = 40 \ ^\circ C$ ,  $T_{sred} = 20 \ ^\circ C$ : 3000, 10000, 16000 и 25000 секунд соответственно



Рисунок 4.6 – Распределение температуры по диагональной ЛОС НК при воздействии приборов ИИС на пластину без управления при  $T_{pl}^0 = 40 \ ^\circ C$ ,  $T_{sred} = 20 \ ^\circ C$  в фиксированные моменты времени: 3000 и 10000 секунд



Рисунок 4.7 – Распределение температуры по диагональной ЛОС НК при воздействии приборов ИИС на пластину без управления при  $T_{pl}^0 = 40 \ ^\circ C$ ,  $T_{sred} = 20 \ ^\circ C$  в фиксированные моменты времени: 16000 и 25000 секунд

На рисунках 4.6-4.7 показаны центры областей, располагающихся напротив диагональной ЛОС НК: линии S6-St6, S7-St7, S3-St3, S8-St8, S9-St9 – центры

соответствующих ТН СТГС; линии f1...f5 – центры областей f1...f5 контакта пар ТР; линии Pr1-Pru1 и Pr3-Pru3 – центры приборов ИИС, действующих по циклограммам; Uz1...Uz11 – ТК температуры диагональной ЛОС НК.

Полученные в этом разделе температурные поля пластины без моделирования работы САУ используются в качестве вычислительного эксперимента в процедуре идентификации (см.раздел 3.2). Результаты моделирования ОУ на уточненной численной конечно-элементной расчетно-имитационной модели в среде ANSYS использованы в качестве данных вычислительного эксперимента для идентификации ПФ ОУ  $W_{sred}^{UzH}$ ,  $W_1^{fi}$ ,  $W_2^{UzH}$ ,  $W_3^{fiUzH}$ , показали, что для расчета САУ достаточно учета не более 4 апериодических звеньев.

### 4.3 Алгоритм численного моделирования системы автоматического управления теплогидравлическими процессами несущей конструкции в ANSYS

В алгоритме численного моделирования САУ теплогидравлическими процессами несущей конструкции в ANSYS используются обозначения основных Uz1-Uz7 и дополнительных Uz8-Uz11 ТК на диагональной ЛОС НК показаны на рисунке 4.8.

Алгоритм численного моделирования включает в себя последовательность шагов (рисунок 4.9- 4.12), выполняемых в разработанном макросе *Main Script*.

Main Script - программный код на языке Python для управления всем проектом; в ANSYS Workbench запускается командами File-Scripting-Run Script File (вместо команд Solve или Update *Project*). Python – универсальный стандартных высокоуровневый язык программирования, который может применяться как предметноориентированный язык автоматизации для описания сценария управления. Достоинствами языка являются возможность параллельных вычислений, понятный синтаксис, возможность программирования практически на всех платформах (т.к. программный код – это текстовый файл).

При первом запуске проекта создается файл с начальными температурами по всей пластине: один раз запуская на расчет статическую теплопроводность, вычисляются узловые температуры на всей пластине, которые сохраняются в файл и используются для дальнейших расчетов, данный файл необходим для начала итераций всего цикла,

программа считывает в блок *External Data* узловые температуры с предыдущего шага и они импортируются в файл, который получен с помощью макроса в *Transient Thermal*.



Рисунок 4.8 – ТК температуры диагональной ЛОС НК

В Main Script указан путь корневой папки расположения проекта, осуществляется ввод начальных значений мощности ТН СТГС и температуры жидкостного теплоносителя; ввод параметра накопленной итерации (технический параметр) с нулевым начальным значением. Указывается количество итераций *iter\_kon*, количество шагов *shag\_kon* и их длительность, запускается цикл: внешний цикл макроса выполняет заданное количество шагов, внутренний цикл - количество итераций. Ввод значений мощностей приборов ИИС, работающих по циклограммам, параметры которых прописаны в *Parameter Set*.

Запускаются модули ПИ- и ПИД-регулирования, которые на выходе определяют набор новых значений управления (мощности ТН СТГС и температуры жидкостного теплоносителя на входе системы ТР) для следующего временного шага, которые находятся в *Parameter Set*.

В ходе вычисленного эксперимента установлено, что в рамках поставленной задачи, в ТК температуры Uz2-Uz4 охлаждение не требуется, поэтому влияние ТР, соприкасающихся с пластиной областями f2-f4 исключено из анализа.

На рисунке 4.9 кружками 1...5 обозначены алгоритмы работы подпрограмм для реализации ПИ-закона управления парами ТН СТГС S6-St6, S7-St7, S3-St3, S8-St8, S9-St9 соответственно. На рисунке 4.10 показан алгоритм работы подпрограммы для управления температурой в ТК Uz1 парой ТН СТГС S6-St6, управление температурой точек Uz2-Uz5 остальными парами ТН СТГС осуществляется аналогично. Определяется накапливающаяся ошибка интегратора, как сумма текущего значения ошибки ТК Uz1 (разница между заданной температурой пластины и текущего значения температуры ТК Uz1) и предыдущего значения ошибки. Если текущая ошибка в ТК Uz1 отрицательная, то ТН СТГС S6-St6 выключаются (мощность пары ТН СТГС S6-St6 равна нулю  $P_{step6} = 0$ ). Если текущая ошибка в ТК Uz1 больше или равна нулю то вычисляется мощность ТН СТГС по ПИ-закону, но в случае нулевой текущей ошибки значение накопленной ошибки интегратора сбрасывается (приравнивается к нулю). Выходом регулятора является сумма П- и И-составляющих и мощность ТН СТГС предыдущего шага. После определения мощности для пары теплоисточников, выполняется проверка: если полученная мощность меньше допустимого минимального значения мощности, то используется последнее; если больше допустимого максимального значения мощности, то также используется последнее, в противном случае - мощность пары ТН СТГС устанавливается как вычисленное ПИ-регулятором значение мощности. Далее осуществляется запись накопленной ошибки и выбранной мощности ТН СТГС на данном шаге.

На рисунке 4.9 кружками 6 и 7 указаны алгоритмы работы подпрограмм для реализации ПИД-закона управления температурой жидкостного теплоносителя в парах TP tr1 и tr5 соответственно, соприкасающихся с пластиной областями f1 и f5. Согласно данным полученным для модели среды MATLAB Simulink, с помощью системы пар TP, соприкасающихся с пластиной областями f1 и f5, преимущественно регулируется температура в TK пластины Uz6 и Uz7 соответственно. Алгоритм управления температурой TK Uz6 парой TP tr1, соприкасающихся с пластиной областями f1, представлен на рисунке 4.11, управление температурой Uz7 с помощью пары TP tr5 осуществляется аналогично. Температура контролируется в TK Uz6, она не должна быть ниже среднего значения, для упрощения принято, что температура не должна быть ниже температуры в Uz10. Если ошибка по температуре в Uz6 меньше нуля, то температура

жидкости на входе ТР устанавливается равной заданной температуре пластины  $T_{ust}^{pl}$ , если же это условие не выполняется, то текущее значение ошибки складывается с накапливаемой ошибкой И-составляющей; следующее условие: если величина текущей ошибки равна нулю, то накопленная ошибка сбрасывается в ноль. Вычисляется температура жидкостного теплоносителя согласно ПИД-закону управления. Получаемая температура  $T_{zh}^{f1\xi x}$  сравнивается с допустимым диапазоном температуры теплоносителя, если температура выходит за пределы данного диапазона, берутся его границы. Последним этапом подпрограммы является запись накопленной ошибки, текущей ошибки и текущей температуры жидкости для данного шага.

После вычислений воздействий ПИ- и ПИД-управления осуществляется вызов блоков последовательного расчета всей цепочки проекта (рисунок 4.12). Обновление исходных данных с узловыми температурами, обновление *External Data* - данные попадают в *Steady-State Thermal*, где узловые температуры, полученные на предыдущем шаге, переносятся на текущий шаг для обеспечения непрерывности. Данные поступают в модуль решения связанной задачи *System Coupling*, который объединяет *Transient Thermal* и *Fluid Flow* (*Fluent*), в которых присваиваются значения мощности ТН СТГС и температуры жидкостного теплоносителя на входе в ТР, вычисленные с помощью подпрограмм ПИ- и ПИД-регулирования соответственно. Здесь происходит обновление модулей и реализуется обмен данными: из *Fluent* в *Transient Thermal* передаются коэффициент теплообмена со средой и температура вблизи стенки, а обратно из модуля нестационарного теплоносителя на модуль моделирования течения жидкостного теплоносителя на входе в ГР, вычисленные с помощью подпрограмм ПИ- и ПИД-регулирования соответственно. Здесь происходит обновление модулей и реализуется обмен данными: из *Fluent* в *Transient Thermal* передаются коэффициент теплообмена со средой и температура вблизи стенки, а обратно из модуля нестационарного теплоносителя на модуль моделирования течения жидкостного теплоносителя на входе в температура вблизи стенки, в обратно из модуля нестационарного теплонобиена в модуль моделирования течения жидкостного теплоносителя на входе в техното теплоносителя на входе в техното теплонобиена в модуль моделирования течения жидкостного теплоносителя на входе в техното теплоносителя передаются констрирования течения жидкостного теплоносителя на модуль моделирования течения жидкостного теплоносителя передаются констрирования течения жидкостного теплоносителя передаются техното теплоносителя на входе вся в техното теплоносителя передаются техното теплоносителя на модуль моделирования течения жидкостного теплоносителя передаются телноносителя на модуле вся в техното теплоносителя

Если достигнуто максимально разрешенное количество итераций *iter=iter\_kon* (или снижение невязки), то данный шаг завершен, если нет – снова повторяется цикл. Когда один шаг по времени закончен - постпроцессинг, запись графических данных с помощью модуля Mechanical APDL; подсчет и запись переменных в Parameter Set, которые должны быть выведены по итогам временного шага (температуры в ТК, значение средней температуры по диагональной ЛОС НК, разница температур точек со средней температурой). Далее счетчик шагов прибавляется на единицу и цикл повторяется, до тех пор пока количество шагов не станет равным конечному заданному значению  $shag = shag_kon$ .



Рисунок 4.9 – Начало схемы алгоритма численного моделирования



Рисунок 4.10 – Алгоритм работы подпрограммы управления ТН СТГС



Рисунок 4.11 – Алгоритм работы подпрограммы управления температурой теплоносителя





Рисунок 4.12 – Окончание схемы алгоритма численного моделирования

Чем мельче сетка и меньше величина шага – тем точнее результат вычислений, но тем он более длителен по времени.

## 4.4 Результаты имитационного моделирования системы автоматического управления

Разработанная процедура моделирования работы САУ температурного состояния несущей конструкции АО в среде ANSYS Workbench может применяться для имитации

различных режимов эксплуатации и поддержания различных температур на ЛОС НК. Проведено несколько вычислительных экспериментов.

Вычислительный эксперимент №1. Исходные данные: начальная температура пластины  $T_{pl}^0 = 40 \ ^\circ C$ , температура среды  $T_{sred} = 20 \ ^\circ C$ , заданная температура  $T_{ust}^{pl} = 40 \ ^\circ C$ ,  $t_1 = 30000$  сек., шаг по времени 500 сек.(частота опроса датчиков).

На рисунках 4.13-4.22 представлены значения мощности ТН СТГС, а также динамика температуры в соответствующих ТК за 25000 сек., линией 1 обозначены температуры в ТК при работе САУ, линией 2 – температуры без управления.

Основные показатели качества, полученные в ходе эксперимента для: Uz1  $\Delta_{\partial u \mu} = 0.065 \,^{\circ}\text{C}, \ \Delta_{cmam} = 0 \,^{\circ}\text{C}, \ \sigma = 0.16 \,^{\circ}\text{W}, \ t_{nn} = 0; \ \text{Uz2} \ \Delta_{\partial u \mu} = 0.099 \,^{\circ}\text{C}, \ \Delta_{cmam} = 0 \,^{\circ}\text{C}, \ \sigma = 0.25 \,^{\circ}\text{W}, \ t_{nn} = 0; \ \text{Uz3} \ \Delta_{\partial u \mu} = 0.14 \,^{\circ}\text{C}, \ \Delta_{cmam} = 0 \,^{\circ}\text{C}, \ \sigma = 0.35 \,^{\circ}\text{W}, \ t_{nn} = 0; \ \text{Uz4} \ \Delta_{\partial u \mu} = 0.115 \,^{\circ}\text{C}, \ \Delta_{cmam} = 0 \,^{\circ}\text{C}, \ \sigma = 0.29 \,^{\circ}\text{W}, \ t_{nn} = 0; \ \text{Uz5} \ \Delta_{\partial u \mu} = 0.063 \,^{\circ}\text{C}, \ \Delta_{cmam} = 0 \,^{\circ}\text{C}, \ \sigma = 0.16 \,^{\circ}\text{W}, \ t_{nn} = 0.$ 





Рисунок 4.18 – Температура в ТК Uz3



Значения температуры жидкостного теплоносителя в парах TP tr1 и tr5, предназначенных для управления температурой в TK Uz6 (показатели качества  $\Delta_{\partial u \mu} = 0.288$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0$  °C,  $\sigma = 0.72$  %,  $t_{nn} = 0$ ), Uz7 (показатели



Температуры в дополнительных ТК Uz8 и Uz9, соседних с ТК Uz6 и Uz7 показаны на рис. 4.27-4.28.



Графики температур на диагональной ЛОС НК в разные моменты времени продемонстрированы на рисунках 4.29-4.35.



Рисунок 4.29 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=500 секунд



Рисунок 4.31 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=8000 секунд





Рисунок 4.33 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=16000 секунд



Рисунок 4.34 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=22000 секунд



Рисунок 4.35 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=25000 секунд

Температурное поле пластины и области соприкосновения пары TP tr1 с пластиной в разные моменты времени показано на рисунках 4.36-4.41.



Рисунок 4.36 – Температурное поле пластины при управлении t=3000 секунд



Рисунок 4.37 – Температурное поле пластины при управлении t=8000 секунд





Рисунок 4.39 – Температурное поле пластины при управлении t=16000 секунд



Рисунок 4.40 – Температурное поле пластины при управлении t=22000 секунд



Рисунок 4.41 – Температурное поле пластины при управлении t=25000 секунд

Вычислительный эксперимент №2. Исходные данные: начальная температура пластины  $T_{pl}^0 = 10 \ ^\circ C$ , температура среды  $T_{sred} = 20 \ ^\circ C$ , заданная температура  $T_{ust}^{pl} = 20 \ ^\circ C$ ,  $t_1 = 30000$  cek.

Аналогично первому эксперименту представлены значения мощности ТН СТГС, температура теплоносителя на входе в TP, а также динамика температуры в соответствующих ТК за 25000 сек. (рисунок 4.42-4.57).

Основные показатели качества, полученные в ходе эксперимента для: Uz1  $\Delta_{\partial u \mu} = 0.49 \text{ °C}, \ \Delta_{cmam} = 0 \text{ °C}, \ \sigma = 2.45 \text{ \%}, \ t_{nn} = 1440 \text{ cek.}; \ \text{Uz2} \ \Delta_{\partial u \mu} = 0 \text{ °C}, \ \Delta_{cmam} = 0.44 \text{ °C},$  $\sigma = 0\%$ ,  $t_{nn} = 8850$  cek.; Uz3  $\Delta_{\partial uh} = 0.4$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0.22$  °C,  $\sigma = 2\%$ ,  $t_{nn} = 2300$  cek.; Uz4  $\Delta_{\partial u \mu} = 0 \, {}^{\circ}C, \ \Delta_{cmam} = 0.249 \, {}^{\circ}C, \ \sigma = 0 \, \%, \ t_{nn} = 9900 \, \text{cek.}; \ \text{Uz5} \ \Delta_{\partial u \mu} = 0.5 \, {}^{\circ}C, \ \Delta_{cmam} = 0 \, {}^{\circ}C,$  $\sigma = 2.5 \%$ ,  $t_{nn} = 1500$  cek.; Uz6  $\Delta_{duH} = 0.48 \text{ °C}$ ,  $\Delta_{cmam} = 0 \text{ °C}$ ,  $\sigma = 2.4 \%$ ,  $t_{nn} = 4500$  cek; Uz7  $\Delta_{\partial u \mu} = 0.5$  °C,  $\Delta_{cmam} = 0$  °C,  $\sigma = 2.5$  %,  $t_{nn} = 5150$  ceκ.







Рисунок 4.47 – Температура в ТК Uz3











Рисунок 4.53 – Температура в ТК Uz6



Рисунок 4.54 – Температура в ТК Uz8





Графики температур на диагональной ЛОС НК в разные моменты времени продемонстрированы на рисунках 4.58-4.63.



Рисунок 4.58 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=3000 секунд



Рисунок 4.59 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=8000 секунд



Рисунок 4.60 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=10000 секунд



Рисунок 4.61 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=16000 секунд



Рисунок 4.62 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=22000 секунд



Рисунок 4.63 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=25000 секунд

Температурное поле пластины и области соприкосновения первой пары TP tr1 с пластиной областью f1 в разные моменты времени показано на рисунках 4.64-4.69.



Рисунок 4.64 – Температурное поле пластины при управлении t=3000 секунд


Рисунок 4.65 – Температурное поле пластины при управлении t=8000 секунд



Рисунок 4.66 – Температурное поле пластины при управлении t=10000 секунд



Рисунок 4.67 – Температурное поле пластины при управлении t=16000 секунд



Рисунок 4.68 – Температурное поле пластины при управлении t=22000 секунд





Вычислительный эксперимент №3. На рисунке 4.11 представлен алгоритм работы подпрограммы управления температурой в ТК Uz6 посредством управления температурой жидкости пары TP tr1, соприкасающихся с пластиной областями f1, аналогично составляется схема алгоритма для TK Uz7 и пары TP tr5 с областью контакта f5. Однако, из результатов моделирования в среде ANSYS, для более качественной стабилизации температуры на диагональной ЛОС НК по графикам распределения температуры (рисунок 4.6-4.7) определены дополнительные ответственные TK: в области первой пары TP на диагональной ЛОС НК выделены TK Uz8, Uz10 и в области пятой пары TP Uz9, Uz11.

Измененный алгоритм управления парой TP tr1, соприкасающихся с пластиной областями f1, представлен на рисунке 4.70, для tr5 аналогично. Температура контролируется в TK Uz6 и Uz8, однако Uz6 на диагонали находится ровно напротив первой пары TP и охлаждается сильнее, поэтому вводится дополнительное ограничение, что температура в нем не должна быть ниже среднего значения, для упрощения принято, что не должна быть ниже температуры в Uz10. Сравниваются вычисленные температуры в TK Uz6 и Uz10, в случае если температура в Uz6 меньше или равна температуре в Uz10, температура теплоносителя на входе TP устанавливается равной

 $T_{ust}^{pl}$ , если же это условие не выполняется - осуществляется проверка следующего условия: если текущая ошибка в ТК Uz6 и Uz8 меньше нуля, то также температура теплоносителя  $T_{ust}^{pl}$ , если нет – определяется в какой ТК Uz6 и Uz8 текущая ошибка больше и, соответственно, большее и принимается за текущее значение ошибки и складывается с накапливаемой ошибкой И-составляющей; следующее условие: если величина текущей ошибки равна нулю, то накопленная ошибка сбрасывается в ноль. Дальнейшие вычисления, связанные с определением температуры жидкостного теплоносителя по ПИД-закону регулирования аналогичны алгоритму, представленному рисунке 4.11.

Значения температуры теплоносителя в парах TP tr1 и tr5, касающихся пластину областями f1 и f5, предназначенных для управления температурой в TK Uz6 и Uz8, Uz7 и Uz9, а также температуры в TK Uz10 и Uz11 продемонстрированы на рисунках 4.71-4.78, где начальная температура пластины  $T_{pl}^0 = 40 \,^{\circ}C$ , температура среды  $T_{sred} = 20 \,^{\circ}C$ , заданное значение температуры  $T_{ust}^{pl} = 40 \,^{\circ}C$ ,  $t_1 = 30000$  сек., шаг по времени 500 сек. (частота опроса датчиков), результаты продемонстрированы для 25000 сек.



Рисунок 4.70 – Подпрограмма алгоритма управления температурой теплоносителя



Рисунок 4.71 – Температура теплоносителя на входе пары TP tr1





Рисунок 4.74 – Температура в ТК Uz10

150











Характер управляющего воздействия регуляторов ТР СЖО, контролирующих температуры ТК Uz6 и Uz7, определяется введенными дополнительными условиями, связанными с поддержанием температуры и в ТК Uz8 и Uz9. Без этих ограничений

151

управление больше соответствует классическому виду переходного процесса теории управления, однако с большей погрешностью обеспечивается термостабильность диагональной ЛОС, т.к. температура в ТК Uz8 и Uz9 превышают  $T_{ust}^{pl}$  более чем на 0.5°С.

В качестве  $T_{ust}^{pl}$  принята начальная температура пластины, однако в ряде случаев более рационально выравнивать температуру объекта по средней температуре диагональной ЛОС (для упрощения принято, что это температуры в Uz10 и Uz11) – оба варианта продемонстрированы на графиках температур на диагональной ЛОС НК в разные моменты времени (рисунок 4.79-4.85), где: линия 1 – температура в ТК при работе САУ с  $T_{ust}^{pl} = T_{pl}^{0} = 40 \,^{\circ}C$ ; линия 2 – температура в ТК без управления; линия 3 – температура в ТК при работе САУ с  $T_{ust}^{pl}$ , равной средней температуре диагональной ЛОС.



Рисунок 4.79 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=500 секунд







Рисунок 4.81 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=8000 секунд

153



Рисунок 4.82 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=10000 секунд



Рисунок 4.83 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=16000 секунд

154



Рисунок 4.84 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=22000 секунд



Рисунок 4.85 – Температура на диагональной ЛОС НК при t=25000 секунд

Дополнительный вычислительный эксперимент. Приведенные выше численные эксперименты №1-3 проводились в условиях не установившегося процесса в пределах 25000 сек. Однако в зависимости от назначения, области применения и режима работы АО могут работать более длительное время и тепловые нагрузки могут прикладываться в любых условиях эксплуатации.

Проводится эксперимент с данными эксперимента №2 для более длительного времени; когда процесс установился, включаются приборы ИИС, работающие по циклограммам. На рисунке 4.86 показаны температуры в ТК Uz6 при регулировании парой ТР tr1, касающихся пластины областями f1: линия 1 – температура в ТК при управлении, линия 2 – температура в ТК без управления, линия 3 – температура в ТК только при теплообмене со средой; на рисунке 4.87 – значение температуры теплоносителя в рассматриваемых ТР; на рисунке 4.88 – работа приборов ИИС.

В момент времени 2119000 сек. достигается максимальное значение температуры 21.634 °С ( $\Delta_{duh}$  =1.634 °С,  $\Delta_{cmam}$  =0 °С,  $\sigma$  = 8.17 %).

В случае жестких ограничений на результат управления, можно снизить температуру теплоносителя в ТР, либо изменить скорость протекания теплоносителя по ТР. Если АО является космический аппарат, то области контакта ТН СТГС, можно заменить на люки притока/оттока тепла.





Полученные результаты основных вычислительных экспериментов по показателям качества переходного процесса лежат в установленных пределах (см.раздел 3.1), что подтверждает эффективность алгоритма и системы управления.

Разработанный проект в ANSYS может эффективно использоваться при различных исходных данных, изменения в проект легко вносятся в блок *Parameter Set* и макрос *Main Script*. Кроме того, дерево проекта может быть расширено дополнительными модулями расчета.

157

# 4.5 Технические средства реализации системы автоматического управления температурным распределением несущей конструкции

Разработанная в диссертации САУ температуры на диагональной ЛОС НК технически реализуется с помощью современных средств промышленной автоматизации. Предложенное оборудование отвечает типовым массогабаритным ограничениям и областью использования АО [172].

В качестве базового АО рассматривается малый КА. Конструкция КА предполагает размещения на нем аппаратуры для дистанционного зондирования Земли, различных видов научной аппаратуры, а также бортовых обеспечивающих систем [16,18,21,22,71].

Контроль температуры поверхности НК может осуществляться термодатчиками TM 293-05 (рисунок 4.89), которые крепятся к ней при помощи клея [1]. Они представляют собой пластину из изоляционного материала с напыленным медным чувствительным элементом. Термодатчик защищен окисью компаундом и предназначен для измерений в диапазоне -196...+200 °C. Характерной его особенностью является малый вес - не более 1 г.



Рисунок 4.89 – Датчик температуры ТМ 293

Пленочный электронагреватель ТН СТГС изображен на рисунке 4.90.



Рисунок  $4.90 - TH CT\Gamma C$ 

ТР СЖО, по которым течет жидкостной теплоноситель, представлен на рисунке 4.91. В качестве жидкостного теплоносителя может использоваться теплоноситель ЛЗ-ТК-2.



Рисунок 4.91 – ТР СЖО

Для измерения температуры теплоносителя используется система измерения ИСТОК, состоящая из термометра ТР 269 и вторичного преобразователя (рисунок 4.92).



Рисунок 4.92 – Система измерения температуры ИСТОК

Выходной сигнал с термометра поступает на вход преобразователя. Выходной сигнал системы представляет собой четырнадцатиразрядный код, содержащий информацию о температуре, плюс один знаковый разряд и разряд синхроимпульса, по которому происходит изменение показаний системы. Диапазон измеряемых температур -60...+60 °C, масса не более 0.5 кг.

Для реализации алгоритма САУ возможно использование бортового контроллера, кроме других задач решающего задачу обеспечения теплового режима. Кроме того в различных типах АО может использоваться специальный контроллер обеспечения теплового режима АО, который обычно конструктивно входит в бортовую систему контроля и управления (БСКУ). Например БСКУ, разработанная и изготовленная ООО «НИЛАКТ ДОСААФ» г. Калуга (рисунок 4.93), предназначена для выполнений задач, таких как прием командно-программной информации, управление аппаратурой, организация формирования, сбора и передачи данных и в том числе позволяет управлять системой терморегулирования [173].



Рисунок 4.93 – Внешний вид БСКУ

Имеет следующие технические характеристики:

- 1. Скорости передачи информации
- в прямом канале: основная 600 Бит/с, резервные 1200, 300 Бит/с,
- в обратном канале: основная 2400 Бит/с, резервные 4800, 1200, 600 Бит/с.
- 2. Напряжение питания 23,5...32 В.
- 3. Выходное напряжение питания 23,3...32 В.

Включает в себя унифицированные малогабаритные конструктивно-функциональные блоки (рисунок 4.94):

- блок радиоканалов метрового диапазона (БРКМ);
- контроллер теплового режима (КТР);
- контроллер телеметрических измерений (КТИ)
- контроллер раздачи питания (КРП);
- блок центральных контроллеров резервированный (БЦКР);

- приемное антенное устройство;
- передающее антенное устройство;
- навигационное антенное устройство (АУ КНВ).



Рисунок 4.94 – Функциональная схема БСКУ

Шина CAN предназначена для обмена информацией между аппаратурой БСКУ и бортовой аппаратурой AO по принципу «каждый с каждым»: данные передаются кадрами (фреймами), содержащими служебную и информационную части, с последовательным битовым потоком в них, достоверность доставки которых и повтор доставки при нарушениях контролируется аппаратно.

Разработанная САУ температуры ЛОС НК пригодна для АО различного назначения.

## 4.6 Выводы по четвертой главе

1. Разработана в программной среде ANSYS расчетно-имитационная численная конечно-элементная модель сопряженного теплогидравлического температурного распределения в несущей конструкции, пригодная для уточненных расчетов параметров

процесса нагрева и охлаждения конструкции и параметрической идентификации этого процесса.

2. Разработан в программной среде ANSYS алгоритм моделирования и конечноэлементная расчетно-имитационная модель управления процессом температурного распределения на диагональной ЛОС НК АО.

3. Имитационное моделирование в программной среде ANSYS синтезированной САУ температурой диагональной ЛОС НК подтвердило ее эффективность.

4. Предложен комплекс технических средств для реализации разработанной САУ на базовом АО.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в диссертационном исследовании цели достигнуты.

Установлено, что:

1. Повышенная значимость информации ИИС АО и высокая степень риска от ее искажения (которое может привести к тяжелой аварии или катастрофе) из-за температурной компоненты погрешности определяют актуальность диссертационного исследования.

2. Несмотря на большое количество исследований в области теплопередачи и управления температурным состоянием объектов промышленной теплофизики, проблему повышения эффективности функционирования АО путем снижения термоградиентной информационно-измерительной погрешности в условиях воздействия неравномерных и нестационарных тепловых нагрузок к настоящему времени нельзя считать эффективно решенной. Существенную теоретическую сложность к настоящему времени представляет создание математической модели непрерывно распределенного несущей конструкции трехмерного температурного по поля с дискретно распределенными управляемыми ТН СТГС, СЖО и возмущающими теплоисточниками, ее идентификация, верификация и представление в качестве ОУ для синтеза соответствующей системы. Проблема синтеза САУ с распределенными параметрами для АО, функционирующих в условиях весогабаритных, энергетических и других ресурсных ограничений, к настоящему времени не решена. Численное моделирование работы САУ распределенными объектами с дискретно распределенным возмущением с помощью известных программных средств наталкивается на значительные трудности.

3. Предложена методика математического моделирования распределения температуры в НК АО в условиях нестационарного и неравномерного воздействия на нее локально-распределенного тепловыделения аппаратуры ИИС и внешних тепловых воздействий.

4. Обоснованы и поставлены в качестве неявной функциональноориентированной на использование в управлении ММ сопряженные краевые теплогидравлические задачи, описывающие процессы теплопроводности в НК и ее теплообмен с СЖО. Получено решение поставленных сопряженных краевых задач математической физики, представляющее собой явную форму ФОМ температурного распределения в НК.

5. Методами конечных интегральных преобразование с использованием функции Грина получены распределенные ПФ температурного распределения от дискретнораспределенных теплоисточников в НК. Получены и приведены к дробнорациональному виду ПФ процесса теплообмена СЖО и НК. Получена структурная форма описания температурного распределения в НК как распределенного ОУ.

6. Проведена параметрическая идентификация ОУ с использованием вычислительного эксперимента на конечно-элементной модели в программной среде ANSYS. В ходе параметрической идентификации установлено допустимое число членов аппроксимации ПФ ОУ и уточнены значения параметров ПФ, составляющих структуру ОУ.

7. Предложена структура САУ температурным распределением на диагональной ЛОС НК АО. Проведена декомпозиция САУ температурным распределением на диагональной ЛОС НК АО на автономные локальные САУ ТН и САУ жидкостным охлаждением ТР.

8. Выбрана структура и проведен параметрический синтез параметров регуляторов САУ, обеспечивающих требуемые динамические и статические показатели качества.

9. В программной среде MATLAB смоделирована работа САУ в условиях типовых возмущений. Моделирование продемонстрировало, что показатели качества разработанной САУ удовлетворяют техническим требованиям.

10. Разработана в программной среде ANSYS расчетно-имитационная конечноэлементная модель сопряженного теплогидравлического температурного распределения в несущей конструкции, пригодная для уточненных расчетов параметров процесса нагрева и охлаждения конструкции и параметрической идентификации этого процесса.

11. Разработан в программной среде ANSYS алгоритм моделирования и конечноэлементная расчетно-имитационная модель управления процессом температурного распределения на диагональной ЛОС НК АО.

12. Имитационное моделирование в программной среде ANSYS синтезированной САУ температурой диагональной ЛОС НК подтвердило ее эффективность.

13. Предложен комплекс технических средств для реализации разработанной САУ на базовом АО.

Разработанная САУ компенсирует нестационарные и неравномерные возмущения температуры НК со стороны тепловыделяющей аппаратуры бортовой ИИС и внешней среды, уменьшая до требуемого уровня термоградиентную компоненты погрешности ИИС. При этом отклонение температуры от заданного значения на линии сечения ответственной за термодеформацию несущей конструкции не превышает 1.634 °C при требуемом значении 2 °C. Динамические показатели работы системы находятся в допустимых пределах  $\Delta_{cmam} \leq 0.5$  °C,  $\Delta_{duh} \leq 2$  °C,  $\sigma \leq 30$  %,  $\psi_3 \geq 97$  %,  $t_{nn} \leq 10800$  сек. Разработанный алгоритм моделирования САУ в среде ANSYS может быть использован при синтезе САУ в бортовых контроллерах АО различных типов, а также при стендовых испытаниях различного назначения.

Результаты работы внедрены в расчетно-проектировочную практику на предприятиях ООО «СКТБ «Пластик», АО «ТЯЖМАШ», АО «Сызранский НПЗ» и в учебный процесс кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета.

Материалы диссертационного исследования могут быть использованы при моделировании, проектировании различных процессов технологической теплофизики, а также при создании САУ ОРП различной физической природы.

## ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АО автономный объект;
- ИИС информационно-измерительная система;
- НК несущая конструкция;
- ММ математическое моделирование;
- СОТР системы обеспечения теплового режима;
- ОРП объект с распределенными параметрами;
- МКЭ метод конечных элементов;
- ТР трубопровод (труба, трубка);
- СЖО система жидкостного охлаждения;
- СРП системами с распределенными параметрами;
- ПФ передаточная функция;
- САУ система автоматического управления;
- ГУ граничное условие;
- НУ начальное условие;
- СТР системы терморегулирования;
- TH термоэлектрические нагреватели;
- СТГС средства термоградиентной стабилизации;
- ОС ответственное сечение;
- ЛОС линия ответственного сечения;
- ОУ объект управления;
- КА космический аппарат;
- ТК точка контроля.

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

*x*, *y*, *z* и  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $l_z$  – обозначение координат в абсолютных и относительных величин;

*t* и  $\phi$  – обозначение времени в абсолютных и относительных (число Фурье) величинах;

 $R_1, R_2, R_3$  – размеры пластины по оси x, y, z соответственно;

с<sub>pl</sub> – удельная теплоемкость материала пластины;

*ρ* – плотность материала пластины;

 $\lambda$  – теплопроводность пластины;

 $T_{sred}$  и  $\theta_{sred}$  – температура среды в абсолютных и относительных величинах;

 $T_{pl}^0$  и  $\theta_{pl}^0$  – начальная температура пластины в абсолютных и относительных величинах;

α – эквивалентный коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающей среде внутри кожуха;

§ – размеры посадочного места теплоисточников;

L – длина ТР;

 $\delta_{\it st}$  – толщина стенки ТР;

*d*<sub>vnutr</sub> – внутренний диаметр ТР;

*S<sub>tube</sub>* – площадь внутреннего сечения ТР;

*c*<sub>st</sub> – удельная теплоемкость стенки ТР;

 $\lambda_{st}$  – коэффициент теплопроводности стенки ТР;

 $\rho_{st}$  – плотность материала стенки ТР;

М – поток массы (массовый расход) жидкостного теплоносителя;

*c*<sub>*zh*</sub> – удельная теплоемкость теплоносителя;

 $\lambda_{zh}$  – теплопроводность теплоносителя;

 $\rho_{zh}$  – плотность теплоносителя;

 $T_{zh0}$  и  $\theta_{zh0}$  – начальная температура теплоносителя в абсолютных и относительных величинах;

*v*<sub>*zh*</sub> – кинематическая вязкость теплоносителя;

 $\upsilon_{zh}$  – скорость теплоносителя;

Re – число Рейнольдса;

*Bio* – критерий Био;

 $T_{ust}^{pl}$  и  $\theta_{ust}^{pl}$  – заданная температура пластины в абсолютных и относительных величинах;  $P_{stgs}$  – мощность ТН СТГС;

Т – распределение температуры в пластине в абсолютных величинах;

 $\kappa 1$  – обозначение граней  $\xi_x, \xi_y, \xi_z$  пластины в абсолютных величинах:  $\xi_x = \xi_{x0}$  (x = 0),

 $\xi_{x} = \xi_{x1} \ (x = R_{1}), \ \xi_{y} = \xi_{y0} \ (y = 0), \ \xi_{y} = \xi_{y1} \ (y = R_{2}), \ \xi_{z} = \xi_{z0} \ (z = 0), \ \xi_{z} = \xi_{z1} \ (z = R_{3});$ 

 $\kappa^2$  – обозначение граней  $\xi_{lx}, \xi_{ly}, \xi_{lz}$  пластины в относительных величинах:  $\xi_{lx} = \xi_{lx0}$   $(l_x = 0)$ ,

$$\xi_{lx} = \xi_{lx1} \ (l_x = R_1 \cdot R_2^{-1}), \ \xi_{ly} = \xi_{ly0} \ (l_y = 0), \ \xi_{ly} = \xi_{ly1} \ (l_y = 1), \ \xi_{lz} = \xi_{lz0} \ (l_z = 0), \\ \xi_{lz} = \xi_{lz1} \ (l_z = R_3 \cdot R_2^{-1});$$

 $\theta_{pl}$  – распределение температуры в пластине в относительных величинах;

 $\hat{\theta}_{pl}$  – температурная компонента, учитывающая внешний теплообмен со средой при нулевых потоках от теплоисточников и отсутствии воздействия СЖО в относительных величинах;

 $\theta_{srce}$  — температурная компонента, определяющая воздействие теплоисточников в относительных величинах;

 $\theta_{pl}^{f}$  – температурная компонента, определяющая воздействие TP tr1...tr5 на области контакта f1...f5 с пластиной;

 $\theta_{pl0}^{(3)}$  – температурная компонента, учитывающая начальную температуру пластины;

 $Q_{pl}^{\kappa 1}$  и  $Q_{pl}^{\kappa 2}$  – суммарные тепловые потоки на гранях  $\kappa 1$  и  $\kappa 2$  НК;

ist — обозначение теплоисточников: ist = Pr — обозначение тепловыделяющего прибора ИИС, ist = stgs — обозначение TH CTГС;

 $q_{\kappa 1}^{ist \, O}$  и  $q_{\kappa 2}^{ist \, O}$  – поток от O -го теплоисточника *ist* на гранях  $\kappa 1$  и  $\kappa 2$  соответственно; O – обозначение номера теплоисточника: O = t1 – номер тепловыделяющего прибора ИИС,  $O = N_s$  – номер TH СТГС;

t1 – номер тепловыделяющего прибора ИИС на грани  $\kappa 1(\kappa 2)$ ;

*N*, *M*, *K* – номера тепловыделяющих приборов ИИС на соответствующих гранях  $\kappa 1(\kappa 2)$  пластины;

 $N_{\rm Pr}, M_{\rm Pr}, K_{\rm Pr}$  – количество тепловыделяющих приборов ИИС на соответствующих гранях  $\kappa l(\kappa 2)$  пластины;

 $q_{\kappa 1}^{pl}$  и  $q_{\kappa 2}^{pl}$  – теплообмен между стенкой корпуса и НК (взаимодействие пластины со средой) гранях  $\kappa 1$  и  $\kappa 2$ ;

 $V_{\xi lx}^{ist O}, V_{\xi ly}^{ist O}, V_{\xi lz}^{ist O}$  – функции, определяющие местоположение тепловыделяющих приборов ИИС и TH СТГС гранях  $\kappa^2$ ;

*N*<sub>tr</sub> – количество труб на гранях пластины;

fi – обозначение области контакта ТР и пластины,  $i = \overline{1, N_{tr}}$ ;

j – номер дискретного выделенного участка TP,  $j = \overline{1, J_d}$ ;

*G* – функция Грина;

Обозначения для j-го участка TP fi-ой области контакта с гранью  $\xi_{lx}$  пластины:

 $(a_{i},b_{i})$  – координаты области контакта j-ого участка ТР и пластины по оси  $l_{z};$ 

 $q_{\xi lx}^{fi}$  – потоки теплообмена области контакта стенки ТР СЖО и граней  $\xi_{lx}$  пластины;

 $\theta_{\xi lx \, j}^{fi}$  – температура области контакта дискретного участка ТР СЖО и граней  $\xi_{lx}$  пластины в относительных величинах;

 $\theta_{zh}^{fi \, \xi lx}$  – температура теплоносителя участка ТР в относительных величинах;

 $\theta_{st \, j}^{fi \, \xi lx}$  – температурное распределение стенки j-го участка TP в относительных величинах;

 $\theta_{st1\,j}^{fi\,\xi lx}$  – температура внешней стенки j-го участка ТР в относительных величинах,  $\theta_{st1\,j}^{fi\,\xi lx} = \theta_{\xi lx\,j}^{fi};$ 

 $\theta_{st2\,j}^{fi\,\xi lx}$  – температура внутренней стенки j-го участка TP в относительных величинах, совпадающая с температурой теплоносителя в месте контакта;

 $\theta_{zh1\,j}^{fi\,\xi lx}$  и  $\theta_{zh2\,j}^{fi\,\xi lx}$  – температура теплоносителя на входе и выходе j-го участка TP в относительных величинах;

 $q_{d\ j}^{fi\ \xi lx}$  – тепловой поток между внутренней поверхностью участка ТР и теплоносителем;

 $\varphi_{\theta st1 j}^{fi \, \xi lx}$  – температура внешней стенки дискретного участка ТР без нормирующего коэффициента;

 $\varphi_{\theta st2 j}^{fi \xi lx}$  – температура внутренней стенки дискретного участка ТР без нормирующего коэффициента;

 $\varphi_{\partial zh j}^{fi \, \xi lx}$  – температура жидкокостного теплоносителя дискретного участка ТР без нормирующего коэффициента;

 $\varphi_{qd}^{fi\,\xi lx}$  – температура внутренней стенки дискретного участка ТР без нормирующего коэффициента;

 $\varphi_{q1\,j}^{fi\,\xi lx}$  – поток между внешней стенкой дискретного участка ТР и пластиной без нормирующего коэффициента;

 $\varphi_{L\,\theta_{zh}}^{fi\,\xi_{lx}}$  – температура теплоносителя, которая зависит только от изменения его температуры на входе ТР без нормирующего коэффициента;

 $\varphi_{ab \ \theta zh}^{fi \ \xi lx}$  – температура теплоносителя, которая зависит только от теплового взаимодействия TP с пластиной без нормирующего коэффициента;

Обозначения схемы ОУ в относительных величинах:

 $M^*$  – сокращенное обозначение осей  $M^* = l_x, l_y, l_z;$ 

р – оператор Лапласа для относительного времени;

 $\theta_{UzH}(M^{**}, p)$  — температура точек диагональной ЛОС НК в фиксированных пространственных координатах  $M^{**} = l_x^*, l_y^*, l_z^*;$ 

 $W_{pl}(M^{*}, p) - \Pi \Phi$ , определяющая теплообмен со средой;

 $W_{srce}(M^{*}, p) - \Pi \Phi$ , определяющая влияние теплоисточников на пластину;

 $W_{stzh}^{fi \, \xi lx} - \Pi \Phi$ , которая определяет температуру жидкостного теплоносителя ТР на гранях  $\xi_{lx}$ , на которые оказывает температурное влияние пластина;

*W*<sub>L</sub><sup>fi ξlx</sup> – определяет температуру теплоносителя ТР без учета температурного влияния пластины;

*ξ*-блок – блок, переводящий распределенное входное воздействие в сосредоточенный выходной сигнал;

Обозначения для локальных САУ:

Н – номер ТК пластины;

 $T_{Uz H}$  – температура H-ой ТК пластины, полученная в Ansys;

 $T_{Uz H}^{mat}$  – температура Н-ой ТК пластины, полученная в Matlab;

 $T_{\tau h}^{fi\,\xi x}$  – температура теплоносителя в ТР с областью контакта с пластиной fi;

 $T_{zh1}^{fi\,\xi x}$  и  $T_{zh2}^{fi\,\xi x}$  – температура теплоносителя на входе и выходе TP, полученные в Ansys;  $T_{zh1}^{fi\,\xi x\,mat}$  и  $T_{zh2}^{fi\,\xi x\,mat}$  – температура теплоносителя на входе и выходе TP, полученные в

Matlab;

 $T_{L\,zh2}^{fi\,\xi x}$  – температура теплоносителя на выходе TP, которая зависит только от изменения его температуры на входе TP;

*T*<sup>*fi ξx*</sup><sub>*ab zh2*</sub> – температура теплоносителя на выходе TP, которая зависит только от теплового взаимодействия TP с пластиной.

*I*<sub>1</sub> и *I*<sub>2</sub> – критерии идентификации;

*s* – оператор Лапласа для абсолютного времени;

 $W_{sred}^{U_{z}H}$  – ПФ, определяющая теплообмен пластины со средой;

W<sup>U</sup><sub>ist O</sub> – ΠΦ, определяющая температурное влияние теплоисточников
 (тепловыделительных приборов ИИС и ТНС СТГС) на пластину;

 $W_1^{fi} - \Pi \Phi$ , определяющая влияние температуры  $T_{zhl}^{fi\,\xi x}$  теплоносителя на входе пары TP, касающихся пластины областями fi, на его температуру  $T_{Lzh}^{fi\,\xi x}$  на выходе TP;

 $W_2^{U_{ZH} fi} - \Pi \Phi$ , определяющая влияние температуры  $T_{U_{ZH}}$  ТК пластины UzH на температуру  $T_{ab \ 7h}^{fi \ \xi x}$  теплоносителя на выходе TP;

 $W_3^{fi\,UzH} - \Pi \Phi$ , определяющая влияние температуры теплоносителя  $T_{zh2}^{fi\,\xi x}$  на температуру  $T_{UzH}^{mat}$  ТК UzH пластины;

 $\overline{K}$  – вектор параметров регулятора  $\overline{K} = (K_{\Pi}, K_{\mu}, K_{\mu});$ 

 $W_{reg}^{UzH} - \Pi \Phi$  регулятора;

- $W_u^{UzH}$  приведенная ПФ ОУ;  $N_s = \overline{1, N_{stgs}}$ ,
- $W_v^{U_{\mathcal{C}}H}$  приведенная ПФ возмущений;
- *и<sup>UzH</sup> и v<sup>UzH</sup> управляющее и возмущающее воздействие;*

 $e_{UzH}$  — величина рассогласования  $e_{UzH} = \Delta T_{UzH}$ ;

- $W_{vk}^{UzH}(j\omega, \overline{K}) AЧХ$  системы по возмущению;
- $W_{uk}^{UzH}(j\omega,\overline{K})$  АЧХ системы по каналу управляющего воздействия;
- М<sup>₩3</sup> показатель колебательности;

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 3. Экстремальная робототехника. Российский технологический журнал, 2020. – 8(3). – С.14-32.

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32

2. Bahrami M., Culham J.R., Yovanovich M.M. Modeling thermal contact resistance: a scale analysis approach // Journal of heat transfer, December 2004. V. 126. Pp. 896-906.

3. Cooper M.G., Mikic B.B., Yovanovich M.M. Thermal contact conductance // Int. J. Heat Mass Transfer, 1969. V. 12. Pp. 279-300.

4. Sluzalec Andrzej. Identification in stochastic thermodiffusion problems // Heat Transfer Research, 2017. V. 48. N. 1. Pp. 1-8.

Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел: пер. с англ. // 2 т.: под ред. А.
 А. Померанцева. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

6. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1974.

Лаврентьев М. М. О некоторых некорректных задачах математической физики / М.
 М. Лаврентьев. – Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1962. – 92 с.

8. Джеффрис Г., Свирлс Б. Методы математической физики / Г. Джеффрис, Б. Свирлс. Вып. 3 Пер. с англ. под ред. В.Н. Жаркова. – М.: Мир, 1970. – 344 с.: ил.

Будак Б.М. Сборник задач по математической физике / Б.М. Будак,
 А.А. Самарский, А.Н. Тихонов: учеб.пособие. – М.: Наука, 1979. – 685 с.

 Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.

11. Лыков А.В. Теория теплопроводности: Учебное пособие для теплотехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

12. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Математические модели термомеханики. – М.: Физматлит, 2002. – 168 с.

 Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

 Алифанов О.М. Регуляризационные схемы решения обратных задач теплопроводности / О. М. Алифанов // ИФЖ, 1973. – Т. 24, № 2. – С. 324-333. 15. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.

Резник С.В. Перспективы повышения размерной стабильности и весовой эффективности рефлекторов космических антенн из композиционных материалов / С.В.
 Резник, П.В. Просунцов, А.Д. Новиков // Известия высших учебных заведений.
 Машиностроение. – 2018. – № 1(694). – С. 71–83.

Викулов А.Г., Ненарокомов А.В. Идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах // Инженерно-физический журнал, 2019. – Т. 92, №1. – С. 32.

Легостаев В.П. История создания систем управления космических аппаратов / В.П.
 Легостаев, Е.А. Микрин // Автоматика и телемеханика, 2013. – №3. – С. 15-37.

Дульнев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г.Н. Дульнев,
 В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Высшая школа, 1990. – 207 с.

20. Дульнев Г.Н. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.

21. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М., 1984. – 246 с.

22. Дульнев Г.Н. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры.
/ Г.Н. Дульнев, А.П. Беляков. – М.: Радио и связь, 1985. – 96 с.

23. Пехович А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович,
В.М. Жидких // изд.2-е, перераб. и дополн., Ленинград: Энергия. – 1976. – 351 с.

24. Дилигенский Н.В. Современные методы математического моделирования теплопроводности в теплоэнергетике и машиностроении / Н.В. Дилигенский, А.В. Темников, А.Б., Девяткин, А.П. Слесаренко. – Самара: СамГТУ, 1995. – 335 с.

25. Сегерлинд Л.Дж. Применение метода конечных элементов // Пер. с англ. А.А. Шестакова; Под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

26. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: перевод с английского / О. Зенкевич; под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

27. Chen Z. Finite element methods and their applications // Scientific Computation. Springer, 2010. 410 p.

28. Crisfield M.A. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Vol.1 Essentials. Reprinted 2000. 345 p.

29. Dhond G. The Finite Element Method for 3D Thermomechanical Applications. John Wiley & Sons Ltd, 2004. 355 p. ISBN 0-470-85752-8.

30. Форум пользователей ANSYS [Электронный ресурс]: Моделирование процессов теплообмена средствами пакета конечно-элементного анализа ANSYS / Методические материалы. – Режим доступа: https://cae-

club.ru/sites/default/files/users/files/13/metodika\_dlya\_zadach\_teploobmena\_v\_ansys\_mechan ical\_apdl.pdf (accessed January 9, 2020).

31. Чермак И. Динамика регулируемых систем в теплотехнике и химии / И. Чермак,
В. Петерка, И. Заворка. Перевод с чешского Ю.Ф. Кичатова и И.В. Шварца. – М.: Мир,
1972. – 624 с.

32. Михеев М.А. Основы теплопередачи //М.А. Михеев, И.М. Михеева. Изд.2-е, стереоти. –М.: Энергия, 1977. – 344 с.

33. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.

34. Байбиков Б.С. Влияние числа Рейнольдса на нестационарный конвективный теплообмен в трубе при изменении тепловой нагрузки / Б.С. Байбиков,
Дрейцер, Э.К. Калинин, А.С. Неверов // ТВТ, 1972. – Т.10, №6. – С. 1248-1255.

Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. – Л.:
 Энергоатомиздат, 1987. – 262 с.

36. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М: Наука. – 1970.Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // ТВТ, 2005. – Т. 43, № 2. – С. 223-230.

37. Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш. Расчетное моделирование движения теплоносителя в сложных криволинейных каналах // Тепловые процессы в технике, 2019. – Т. 11, № 5. – С. 194-202.

38. Юкин А.Ф. Моделирование нестационарных тепловых процессов в теплоизолированных трубопроводах / А.Ф. Юкин // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2003. – №5. – С. 63-69.

Бутковский А. Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. –
 320 с.

40. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1965. – 474 с.

41. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1977. – 479 с.

42. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: учеб.пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш.шк, 2005. – 292 с.

43. Рапопорт Э.Я. Программная управляемость линейных многомерных систем с распределенными параметрами // Журнал «Известия Российской академии наук. Теория системы управления», №2. – М.: Российская академия наук, 2015. – С. 22.

44. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2009. – 677 с.

45. Фельдбаум А.А. Методы теории автоматического управления / А.А. Фельдбаум, А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1971. – 744 с.

46. Ротач В.Я. Теория автоматического управления // учебник для вузов. — 2-е изд., перераб и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 400 с.

47. Лившиц М.Ю. Теория и алгоритмы оптимального управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества: Автореф. дис... докт. техн. наук. – Самара, 2001. – 46 с.

48. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. Серия «Теоретические основы технической кибернетики». – М.: Наука, 1978. – 463 с.

49. Егоров Ю.В. Необходимые условия оптимальности управления в банаховых пространствах // Математический сборник, 1964. – Т. 64, № 1. – С. 79-101.

50. Егоров Ю.В. Оптимальное управление в банаховом пространстве // Докл. АН СССР, 1963. – Т. 150, № 2. – С. 241-244.

51. Олейников В.А. Основы оптимального и экстремального управления /
В.А. Олейников, Н.С. Зотов, А.М. Пришвин: учеб. пособие для студентов вузов. – М.:
Высшая школа, 1969. – 296 с.

52. Гаркушенко В.И., Дегтярев Г.Л. Теория автоматического управления: учеб. пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. – 274с.

53. Мартыненко Н.А. Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами: справочное пособие / Н.А. Мартыненко, Л.М. Пустыльников; под ред. А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1986. – 303 с.

54. Дидук Г.А. Специальные разделы теории автоматического регулирования и управления / Г.А. Дидук, О.И. Золотов, Л.М. Пустыльников. Теория СРП. Учеб. Пособ. с грифом Минобразования. – СЗТУ СПб., 2000. – 172 с.

55. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами // справочное пособие. – М.: Наука, 1979. – 224 с.

56. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2003. – 299 с.

57. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. –
М.: Высш. шк., 1985. – 485 с.

58. Туголуков Е.Н. Решение задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований // Учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 116 с.

59. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления (в 3-х томах). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – Т.1. – 616 с.

60. Диткин В.А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В.А. Диткин, А. П. Прудников. – М.: Государственное издевательство физикоматематической литературы, 1961. – 524 с.

61. Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.

62. Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в векторных задачах параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева // Институт проблем управления сложными системами РАН. Журнал «Онтология проектирования». – Самара: Предприятие «Новая техника», 2018. – Т.8, №4(30). – С.615-627.

63. Алифанов О.М. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, А.В. Ненарокомов. – М.: Янус-К, 2009. – 300 с.

64. Мацевитый Ю. М., Мултановский А. В. Идентификация в задачах теплопроводности. – Киев: Наук. думка, 1982. – 240 с.

65. Matsevity Yu.M. Inverse Heat Conduction Problems. Kyiv: NAS of Ukraine, Institute for Problems in Mechanical Engineering, 2008. V.1. Methodology. 428 p.

66. Matsevity Yu. M. Inverse Heat Conduction Problems. Kyiv: NAS of Ukraine, Institute for Problems in Mechanical Engineering, 2008. V. 2. Applications. 417 p.

67. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 228 с.

68. Beck J.V. Criteria for comparison of methods of colution of the inverse heat conduction problem. Nucl. Eng. And Des., 1979. 53, № 1. Pp. 11-22.

69. Miller K. Three-circle theorems in Partial Differential Equations and Applications to Improperly Posed Problems. Arch. Rat. Mech. Anal., 1964. T. 16. Pp. 126-154.

70. Cullum J. Numerical differentiation and regularization. SIAM J.Numer. anal., 1971. V. 8. №2. Pp. 254-265.

71. Цаплин С.В., Болычев С.А. Моделирование влияния тепловых факторов космического пространства на оптические характеристики линзового телескопа космического аппарата // Вестн. СамГУ. Естественнонаучн. сер., 2013. – № 3(104). – С. 97-106.

72. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов // учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 245 с.

73. Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Оптимизация систем терморегулирования космических аппаратов / В.В. Малоземов, Н.С. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1988 г. – 134 с.

74. Савельева Ю.О. Термоградиентная размерная стабилизация ответственных сечений несущей конструкции автономного объекта / Ю.О. Савельева, М.Ю. Лившиц, И.Е. Адеянов, И.А. Данилушкин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ, 2020. – Т.2. – С.79-87.

75. Лившиц М.Ю. Распределенное оптимальное управление объектами технологической теплофизики / М.Ю. Лившиц, М.Ю. Деревянов, С.А. Копытин // Материалы 4-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Т. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 99-102.

76. Лившиц М.Ю. Стабилизация температурного поля несущих конструкций автономных объектов / М.Ю. Лившиц, М.Ю. Деревянов, А.Н. Давыдов, С.А. Копытин // Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Часть 2. – Самара, 2013. – С.47-52. 77. Савельева Ю.О. Моделирование процесса оптимального управления системой с распределенными параметрами. Научный журнал Вестник НГИЭИ. №1 (92). Княгино, 2019. – С.5-15.

78. Савельева Ю.О. Решение задач оптимального управления системами с сосредоточенными параметрами с помощью принципа максимума Понтрягина. Вестник НГИЭИ, 2018. №11(90). С.77-86. ISSN 2227–9407.

79. Савельева Ю.О. К вопросу реализации математического моделирования систем с распределенными параметрами. Сб. статей «Современные научные исследования и разработки». Москва. Научный центр «Олимп». Выпуск № 9 (26), 2018. – С.350-352. ISSN 2415-8402.

80. Лившиц М.Ю. Распределенное управление температурными режимами конструкционных элементов автономных объектов / М.Ю. Лившиц, Б.Б. Бородулин, А.В. Ненашев, Ю.О. Савельева // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах. Т.1. – Самара: ООО «Офорт», 2019. – С. 349-352.

81. Савельева Ю.О. Моделирование тепловых процессов несущей конструкции автономного объекта / Ю.О. Савельева, И.Е. Адеянов // Сб. материалов XVII Международной научно-практической конференции «Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики». Актуальные проблемы информатизации науки и производства. Актуальные проблемы юридической науки (Трибуна молодого ученого).– Тольятти: Волжский университет имени В.Н. Татищева, 2020. – Т.3. – С.102-106.

82. Савельева Ю.О. Учет температурных потерь конструкции автономного объекта при взаимодействии с окружающей средой в задаче термостабилизации. Электронный журнал Cloud of Science http://cloudofscince.ru. ISSN 2409-031X, 2020. – Т. 7, № 2. – С.334-346.

83. Клебанов Я.М. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа / Я.М.Клебанов, А. В. Карсаков, С. Н. Хонина, А.Н. Давыдов, К. А. Поляков // Компьютерная оптика, 2017 – Т. 41, № 1. – С.30-36.

84. Тулин Д.В. Система обеспечения теплового режима телескопа Т-170М и научной аппаратуры космического аппарата «Спектр-УФ» / Д.В. Тулин, Т.Н. Ефремова, С.М. Плугарь, А.Ф. Шабарчин // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, 2014. –№ 5. – С. 97-103.

85. Тулин Д.В. Система обеспечения теплового режима космического радиотелескопа / Д.В. Тулин, И.С. Виноградов, А.Ф. Шабарчин, А.С. Привезенцев, К.А. Гончаров // Космические исследования, 2014. – Т. 52, № 5. – С. 423.

86. Викулов А.Г. Математическое моделирование теплообмена в космических аппаратах. Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей», 2017. – №2. – С. 61-78.

87. Цаплин С.В. Основы теплообмена космических аппаратов // С.В. Цаплин, С.А. Болычев, А.Е. Романов: учеб.пособие. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2013. – 287с.

 Муратов А.В. Способы обеспечения тепловых режимов РЭС: учеб. пособие / А.В. Муратов, Н.В. Ципина. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 96 с.

89. Быков В.В. Обеспечение тепловых режимов энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов // Вестник науки Сибири, 2014. – №3(13). – С.16-20.

90. Гордеев К.Г. Развитие энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания навигационных космических аппаратов / К.Г. Гордеев [и др.] // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: тез. докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 30-летию запуска на орбиту первого навигац. космич. аппарата «Глонасс» / ОАО «Информационные спутниковые системы». – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2012. – С. 145–147.

91. Schmidt R., Gustafson E. Space Station Active Thermal Control System Modelling. AIAA Pap. 1987. Pp.60-71.

92. Tomana H., Akira O. Space Station Thermal Control. Proc . 14-th I ntersoc. Symp . Space Technol and Sci., Tokyo , 1984. Pp.88-95.

93. Fox B., Brewster L. Design Assistant for Spacecraft Thermal Management System. Proc. of Int. Energy Conversion Engineering Conference. 1985. Pp. 18-24.

94. Судомоин П.Д. Моделирование теплового режима космического аппарата. Электронный журнал Молодежный научно-технический Вестник, М.: Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова, 2015. – №7. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24107907.

95. Седельников А.В. О влиянии температурных деформаций упругих элементов на динамику движения космического аппарата / А.В. Седельников, М.И. Казарина/ Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук, Самара: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 2010. – С.321-324.

96. Луконин Н.В. Способ изготовления гибко-плоских электронагревателей космических летательных аппаратов // Н.В. Луконин, И.Я. Шестаков. Решетневские
чтения : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева: в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – Ч. 1. – С.30-31.

97. Бураков В.А. Математическое моделирование теплообмена в негерметичном приборном отсеке космических аппаратов / А. В. Буракови др. // Инженерно-физический журнал, 2000. – Т. 73, №1. – С. 113-124.

98. Морковин А.В. Теплоносители для тепловых труб и наружных гидравлических контуров систем терморегулирования автоматических и пилотируемых космических аппаратов / А.В. Морковин, А.Д. Плотников, Т.Б. Борисенко // Теплоносители для тепловых труб и наружных гидравлических контуров. Космическая техника и технологии, 2015. – № 3(10). – С. 89-99.

99. Martynenko O.G. Free- convective heat transfer with many photographs of flows and heat exchange / O. G. Martynenko, P. P. Khramtsov. Berlin: Spinger, 2005. 516 p.

100. Авдуевский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдуевский и др.. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.

101. Блох А. Г. Теплообмен излучением. Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат. 1991. – 432 с.

102. Залетаев В.М. Расчет теплообмена космического аппарата / В. М. Залетаев,
Ю. В. Капинос, О. В. Сургучев. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.

103. Antonio Campo, Salah Chikh. On the Paradox about the Propagation of Thermal Energy Speed in a Semi-Infinite Body Heated by a Forced Convective Flow // Heat Transfer Research. 2007. V. 38. N. 6. Pp. 565-572.

104. Behrooz Abbasi Souraki, Assareh N., Omidi M. Effect of internal heat generation on the applicability of different lumped models with unsteady onedimensional conduction // Heat Transfer Research. 2014. V. 45. N. 8. Pp. 767-793.

105. Lazuchenkov N.M., Lazuchenkov D.N. Analytical Solution of the Problem of Heat Conduction of a Semi-Bounded Body with an Envelope and Its Application to Control and Identification of Heat Transfer Processes // Heat Transfer Research. 2006. V. 37. N.2. Pp. 183-189.

106. Золотилов В.А. Автоматическая температурная стабилизация несущей конструкции автономного объекта // В.А. Золотилов, Н.Р. Тухватулин. Дни науки – 2016. 71-я научно-техническая конференция студентов и магистрантов СамГТУ: сб. тезисов докл. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – С.60-61.

107. Золотилов В.А. Автоматическая температурная стабилизация несущей конструкции автономного объекта // В.А. Золотилов, Н.Р. Тухватулин. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2016. – №12(94). – С.321-325.

108. Yovanovich M. M. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics / M. M. Yovanovich // IEEE Transactions on components and packaging technologies. 2005. Vol.28. №2. P.182-206.

109. Григолюк Э.И Оптимизация нагрева оболочек и пластин / Э.И. Григолюк, Я.С. Подстригач, Я.И. Бурак. – Киев: Наукова думка, 1979. – 364 с.

110. Дилигенская А.Н. Математическое моделирование систем с распределенными параметрами: учеб.пособие / А.Н. Дилигенская, И.А. Данилушкин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 65 с.

111. Хватцев А.А. Дифференциальные уравнения в частных производных: Учебное пособие / А.А. Хватцев, И.А. Строчков. – Псков: Псковский государственный университет, 2016. – 80 с.

112. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества : учеб. пособие. – Томск: STT, 2016. – 48 с.

113. Меснянкин, С. Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел / С. Ю. Меснянкин, А. Г. Викулов, Д. Г. Викулов // Успехи физических наук. 2009. – Т. 179, № 9. – С. 945-970.

114. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. – Томск, 2007. – 104 с.

115. Lynch A.F. Flatness-based boundary control of a class of quasilinear parabolic distributed parameter systems / A.F. Lynch, J. Rudolph // International journal of control. – 2002. V.75. P. 1219-1230.

116. Sakawa Y. Solution of an optimal control problem in a distributed-parameter system /Y. Sakawa // IEEE Transactions on Automatic Control. 1964. V.9. No.4. P. 420-426.

117. Ray W.H. Some recent applications of distributed parameter systems theory – a survey / W.H. Ray // Automatica. 1978. No.14. P. 281-287.

118. Kim M. On the design of optimum distributed parameter system with boundary control function/ M. Kim, H. Erzberger//IEEE Transactions on Automatic Control. 1967. No.12. P. 22.

119. Левитов Л.С. Функции Грина. Задачи с решениями. 2-е изд., дополн. – М.:Физматлит, 2002 – 352 с.

120. Луценко А.В. Функция Грина и ее применение: методическое пособие по курсу Дифференциальные уравнения // А. В. Луценко, В. А. Скорик. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 28 с.

121. Ольшанская Т.В. Построение тепловых моделей при электронно-лучевой сварке методом функций Грина // Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева, Е.Г. Колева. Вестник ПНИПУ, Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2017. – Т.19, №3. – С.49-74.

122. Павлова А.В. Математические основы теории систем. Конспект лекций по курсу «Математические основы теории систем»: в 2 ч. Минск: БГУИР. 144 с.

123. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. ФИЗМАТГИЗ, 1961. – 303 с.

124. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. – 2-е изд. переработ. и доп. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 384 с.

125. Казунина Г. А. Математика: преобразования Фурье, преобразования Лапласа: учеб. пособие / Г. А. Казунина; КузГТУ. – Кемерово, 2015. – 258 с.

126. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.:Высшаяшкола, 1970. – 712 с.

127. Чупров И. Ф. Уравнения параболического типа и некоторые методы их решения [Текст] : учеб. пособие / И. Ф. Чупров, Е. А. Канева. – Ухта : УГТУ, 2012. – 103 с. : ил.

128. Шевелев В.В. Преобразование Лапласа и его приложения к решению задач, моделирующих процессы тепломассопереноса / В.В. Шевелев, А.А. Валишин, Д.Л. Локшин, И.Р. Тишаева. Методическое пособие. – М: МИТХТ, 2002. – 71 с.

129. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978.

130. Valky P.P., Vajda S.: Inversion of noise-free Laplace transforms: Towards a standardized set of test problems, Inverse Problems in Engineering, (2002) vol .10.No.5, pp 467-483.

131. Данилушкин И.А. Моделирование температурного поля потока жидкости при // Вестник параметрических возмущениях Самарского государственного Королева аэрокосмического университета им. академика С.П. (национального исследовательского университета), Самара: Самарский национальный

исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – 2010. – №2(22). – С.224-226.

132. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии/ В. В. Кафаров // учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 463 с.

133. Пикулин В.П. Практический курс по уравнениям математической физики / В.П. Пикулин, С.И. Похожаев. 2-е изд., стереотип. – М.: МЦНМО, 2004. – 208 с.

134. Девятов Б.Н. Теория и методы анализа управляемых распределенных процессов /Б.Н. Девятов, Н.Д. Демиденко. – Новосибирск: Наука, 1983.

135. MathWorks [Электронный pecypc]: Nick (2020). Interactive link between MATLAB and ANSYS (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53032-interactive-link-between-matlab-and-ansys), MATLAB Central File Exchange. (accessed January 9, 2020).

136. Каплун А.Б. Ansys в руках инженера / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. Практическое руководство. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 272 с.

137. ANSYS 5.7 Thermal Analysis Guide. Решение задач теплообмена. Перевод В.П.Югова, CADFEM 2001. – 108 с.

138. MATLAB [Электронный ресурс]: Введение в современные методы оптимизации систем управления (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53032-

interactive-link-between-matlab-and-ansys), MATLAB Central File Exchange. (accessed January 9, 2020).

139. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Электронный ресурс]. – М.: Softline Co, 2001. – Режим доступа:

http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php,свободный. – загл.с экрана.

140. Livshits M.Yu., Borodulin B.B., Nenashev A.V., Saveleva Yu.O. Distributed control of temperature regimes for structure elements of autonomous objects. IEEE Xplore Digital Library. 2020.

141. Базаров А.А Синтез замкнутой системы управления для объекта с распределенными параметрами. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки, 2002. № 16. – С. 212-215.

142. Колесников С.В., Кудинов И.В., Еремин А.В., Бранфилева А.Н. Использование компьютерных моделей для проектирования сложных трубопроводных сетей/ С.В. Колесников, И.В. Кудинов, А.В. Еремин, А.Н. Бранфилева // Энергетика. Известия

высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Минск, 2014 (5). С. 72-84.

143. Fattorini H.O. Optimal control problems for distributed parameter systems in banach spaces / H.O. Fattorini // Applied Mathematics and Optimization. – 1993. – V.28 (3). – P. 225–257.

144. Зайцев А.П. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 152 с.

145. Сиразетдинов, Т.К. Устойчивость систем с распределенными параметрами / Т.К. Сиразетдинов. – Новосибирск: Наука, 1987.

146. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности.– М.:Наука,1977. – 392с.

147. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПБ, Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.

148. Воронов А.А. Теория автоматического управления / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др.: учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / Под ред. А. А. Воронова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1986. 504 с.

149. Французова Г.А. Сравнительный анализ возможностей типовых регуляторов и регуляторов по методу локализации / Г.А. Французова, Е.П. Толстоконева, Н.Ю. Шилкова // Автоматика и программная инженерия. - 2015. - № 1 (11). - С. 29-34.

150. Чертков А.А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MATLAB / А.А. Чертков, Д.С. Тормашев, С.В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. - 2014. - №5(27). - С. 164-171.

151. Афиногентов А.А. Структурно-параметрический синтез многоконтурной системы автоматического регулирования процесса первичной переработки нефти с объектом регулирования с транспортным запаздыванием / А.А. Афиногентов, Ю.Э.Плешивцева, С.П. Сетин, Ю.А. Тычинина //Вестн.Самар.гос.техн.ун-та. Сер.технические науки. 2014. №4(44). С.160-169.

152. Плешивцева Ю.Э. Альтернансный метод структурно-параметрического синтеза каскадных систем автоматического управления/ Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов //

Автометрия, Т.51, №5. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН. – 2015. – С.17-26.

153. Жмудь В. А. Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления / В. А. Жмудь, Л. В. Димитров // Автоматика и программная инженерия. – 2016. – № 2 (16). – С. 47-61.

154. Пантелеев А.В. Теория управления в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, А.С. Бортаковский. – М.:Высш.шк., 2003. – 583с.

155. Гейда А.С. Автоматизация решения задач исследования потенциала систем и эффективности их функционирования / А. С. Гейда, И. В. Лысенко // Труды СПИИРАН. 2012. № 3 (22). С. 260–281.

156. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. – М.: Высшая школа, 2003.

157. Певзнер Л.Д. Практикум по теории автоматического управления: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2006. 590 с.

158. Prokopev A., Nabizhanov Z., Ivanchura V., Emelyanov R. Parametric Synthesis Method of PID Controller for High-Order control Systems. Studies in systems, decision and control. Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Springer International Publishing. 2020. Vol. 260. Pp. 91-102.

159. Прокопьев А.П. Идентификация нелинейной системы управления с ПИДрегулятором / А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов // Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'15), М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015, С.387-397.

160. Зеликин М. И. Оптимальное управление и вариационное исчисление // Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Едиториал УРСС, 2004. 160 с.

161. Трошина Н.Ю. Теория оптимального управления [Электронный ресурс]: учебнометодическое пособие / Н.Ю. Трошина. Саратов: Саратовский государственный университет, 2008, 117 с. - Режим доступа: http://www.twirpx.com/.

162. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983. – 384 с.

163. Сиразетдинов Т.К. К аналитическому конструированию регуляторов в процессах с распределенными параметрами / Т.К. Сиразетдинов // Тр. Унта Дружбы народов им. П.Лумумбы. – М.: 1968. – Т. 27. – Вып.5. – С. 15-19.

164. Рапопорт Э.Я. Технология оптимального проектирования сложноструктурированных систем с распределёнными параметрами: программные стратегии принятия решений / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, №2(24). - С. 172-190.

165. Рапопорт Э.Я. Программная реализация обратных связей в задачах параметрической оптимизации не полностью определенных систем с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2016. – №3. – С.36–50.

166. Савельева Ю.О. К вопросу применения вычислительных алгоритмов альтернансного метода в задачах оптимизации систем с распределенными параметрами. Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики»: в 2 т. Том. 1. Гуманитарные и социальные науки, образование. Актуальные проблемы информатизации науки и производства. Актуальные проблемы экологии и охраны окружающей среды. Тольятти. 2019 г. С.161-168.

167. Кучерявая И.Н. Применение мультифизического моделирования в решении задач электротехники. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. – №. 42. – С.112-123.

168. Chi S.W. Heat pipe theory and practice: a sourcebook (Series in thermal and fluids engineering). Hemisphere Pub. Corp., 1976. 242 p.

169. Zaghdoudi M.C. Experimental investigation on the effects of body force environment on flat heat pipes thermal performance / M.C. Zaghdoudi, A. Teyti, C. Sarno // AIAA Paper. –  $2001. - N_{2} 346. - P. 1-5.$ 

170. Moss T.W. Modeling and performance of a flat plate heat pipe fin space radiator /
T.W. Moss, W. J. Bowman // AIAA Paper. – 2000. – № 2282. – P. 1–6.

171. Amir Faghri Heat pipe science and technology. Taylor and Francis. 1995. 874 p

172. Алексеев В.П., Коблов Н.Н., Хрулев Г.М. Современные технологии автоматизации проектирования РЭА специального назначения. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2003. – 134 с.

173. Кирилин А.Н. Опытно-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» // А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов, и д.р. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

#### Акт о внедрении результатов диссертационной работы



Специальное Конструкторско-Технологическое Бюро «Пластик» ООО «Специальное Конструкторскотехнологическое Бюро «Пластик», Самарская обл., г. Сызрань, Саратовское шоссе, 4 Тел./факс: +7(8464) 90-41-44, факс +7(846) 229-54-23 e-mail: sktb@sktb-plastik.ru



#### АКТ О ВНЕДРЕНИИ

#### результатов диссертационной работы Савельевой Юлии Олеговны «Автоматическое управление температурным распределением несущей конструкции автономного объекта»

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «СКТБ «Пластик» - заместитель генерального конструктора по научной работе О.Г. Лайкова и ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в г. Сызрани - заместитель директора по учебной и научно-инновационной работе филиала А.В. Тараканов составили настоящий акт в том, что разработки Ю.О. Савельевой, изложенные в ее диссертации на тему «Автоматическое управление температурным распределением несущей конструкции автономного объекта», а именно:

- функционально-ориентированная аналитическая модель тепловых процессов несущей конструкции автономного объекта;

 процедура моделирования связанной (сопряженной) задачи — тепловой и гидродинамической, для реализации системы обеспечения теплового режима с помощью управляемых дискретно распределенных термоэлектрических нагревателей и системы жидкостного охлаждения;

- программа имитационного моделирования на численной модели в среде Ansys системы автоматического управления температурным распределением несущей конструкции;

внедрены на предприятии при проектировании размеростабильных несущих конструкций из полимерных композиционных материалов.

Внедрение данных разработок позволило уменьшить время проектирования, а также снизить погрешности информационно-измерительной системы, полученные при наземных испытаниях системы, за счет снижения термодеформационной составляющей этой погрешности.

Заместитель генерального конструктора по научной работе ООО «СКТБ «Пластик», к.т.н.

Заместитель директора по учебной и научно-инновационной работе филиала ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в г.Сызрани, к.п.н., доцент

*Эрай* О.Г. Лайкова

А.В. Тараканов

## приложение б

# Справка об использовании результатов кандидатской диссертации



#### СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

результатов диссертационной работы Савельевой Юлии Олеговны «Автоматическое управление температурным распределением несущей конструкции автономного объекта»

Настоящая справка дана Ю.О. Савельевой в том, что разработанная в ее диссертации на тему «Автоматическое управление температурным распределением несущей конструкции автономного объекта» методика моделирования в среде Ansys и расчетно-имитационная численная модель управляемого температурного распределения использована предприятием в программном обеспечении проекта для теплогидравлических расчетов несущих конструкций различного назначения.

Методика и численная модель продемонстрировали высокую эффективность и повысили качество расчетов.

MAU

Директор по информационным технологиям и инженерно-техническому развитию АО «ТЯЖМАШ»

•



9.11.2021

М.В. Ванёков

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Справка о внедрении результатов кандидатской диссертации



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «СЫЗРАНСКИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИЙ ЗАВОД»

(AO «CHПЗ»)

Почтовый адрес: ул. Астраханская, д.1, г.Сызрань, Самарская область, Россия, 446029 Юридический адрес: г. Сызрань, Самарская область, Российская Федерация Тел.: (8464) 90 80 09, факс: (8464) 98 81 22, e-mail: sekr@snpz.rosneft.ru ОКПО 05766586, ОГРН 1026303056823, ИНН/КПП 6325004584/ 997250001

ot\_<u>19.11.</u> 2021r. №\_

\_\_\_\_тот \_\_\_\_

на №

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Савельевой Юлии Олеговны «Автоматическое управление температурным распределением несущей конструкции автономного объекта»

Справка дана Савельевой Ю.О. в том, что результаты ее диссертационного исследования на тему «Автоматическое управление температурным распределением несущей конструкции автономного объекта» внедрены в процесс проектирования тепловой модели теплообменников «труба в трубе» и использованы при разработке системы автоматического управления тепловым режимом.

При этом получен существенный технический эффект в части качества проектирования.

| Заместитель генеральн | ого директора  |
|-----------------------|--|
| по развитию           | AO<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS<br>CHUS |
|                       | P # (000)  |

А.С. Напалков

### ПРИЛОЖЕНИЕ Г

# Справка об использовании результатов кандидатской диссертации в учебном

## процессе ФГБОУ ВО СамГТУ



Комиссия в составе д.т.н., зав.кафедрой УСАТСК Лившица М.Ю., д.т.н., профессора зам. зав. кафедрой УСАТСК Плешивцевой Ю.Э., к.т.н., доцента, зам. зав. кафедрой УСАТСК Деревянова М.Ю., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Савельевой Ю.О., внедрены в учебный процесс на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Результаты научных исследований, проведенных Савельевой Ю.О. использованы при выполнении выпускных квалификационных работ и при изучении учебных дисциплин «Идентификация и адаптация управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики», «Теория управления теплоэнергетическими системами с распределенными параметрами», «Синтез систем управления», «Вычислительные методы и компьютерные технологии в управлении теплоэнергетическими системами».

Внедрение результатов, диссертации улучшило качество учебного процесса.

Заведующий кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических» и социотехнических комплексов», д.т.н., профессор

Зам. зав. кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических» и социотехнических комплексов», д.т.н., профессор

Зам. зав. кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических» и социотехнических комплексов», к.т.н., доцент

29.11.21

Лившиц М.Ю.

Плешивцева Ю.Э.

Деревянов М.Ю.