

На правах рукописи

ПЕТРОВ Дмитрий Сергеевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЖЕБНЫХ БОРТОВЫХ
СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ
ПОЛЕТОМ

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание степени
кандидата технических наук



Москва — 2017

Работа выполнена в Публичном Акционерном Обществе
«Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва»

Научный кандидат технических наук
руководитель: Павлов Дмитрий Владимирович

Официальные Румянцев Геннадий Николаевич,
оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-производственный центр автоматики
и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина»,
заместитель Генерального конструктора

Янюшкин Вадим Вадимович,
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«Центр тренажеростроения и подготовки персонала»,
заместитель Генерального директора по
технологическому развитию

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение
организация: «Научно-исследовательский испытательный центр
подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина»

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2017 года в
_____ час. _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при
Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана
по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал заседания
Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского госу-
дарственного технического университета имени Н. Э. Баумана и на сайте
bmstu.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

 **Аттетков**
Александр Владимирович

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке методологических и алгоритмических основ системы математического моделирования, предназначенной для создания моделей служебных бортовых систем космических аппаратов, включая имитацию существенных для их функционирования физических явлений.

Актуальность исследования. Задачи управления полетом космических аппаратов (КА) — разработка системы управления и программы полета, подготовка персонала управления, анализ нештатных ситуаций (НШС) и т. д. — решают с использованием модели объекта управления. В составе такой модели присутствуют, как правило, математические модели служебных бортовых систем (СБС) КА, обеспечивающие расчет физических явлений: контактного и радиационного теплообмена, движения заряженных частиц в электрических цепях, течения жидкостей и газов по магистралям, а так же их взаимного влияния.

Модели СБС КА выполняют в приближении сосредоточенных параметров, т. е. пренебрегают пространственной протяженностью элементов исследуемой системы (ИС). Состояние ИС представляют конечным набором фазовых переменных — физических параметров, а физические законы — системой алгебраических и дифференциальных уравнений.

Наиболее сложным этапом моделирования считают создание *концептуальной модели* — формального представления о протекающих в ИС процессах. Построение концептуальной модели — это искусство, опирающееся на интуицию, эрудицию и изобретательность специалиста.

Для *постановки задачи* моделирования — перехода от концептуальной модели к математической — применяют различные методы математического моделирования, обеспечивающие представление ИС в виде стандартизованных составных частей (СЧ) и связей между ними.

В настоящее время наиболее распространенным для моделирования технических объектов является метод физических аналогий, в англоязычной литературе известный как методология Bond Graph. Этот метод обеспечивает представление различных физических явлений в виде совокупности типовых элементов, обладающих линейными диссипативными, индуктивными или емкостными свойствами. Для моделирования простого взаимного влияния явлений различной физической природы предусмотрены специальные типовые элементы, описывающие линейные связи между фазовыми переменными.

Одной из отличительных черт СБС КА является их высокая сложность:

- зачастую нелинейность является неотъемлемым свойством существенных физических явлений, а линеаризация приводит к неадекватности модели;
- взаимное влияние явлений различной физической природы имеет сложный характер;
- СБС КА состоят из большого количества элементов и имеют разветвленную структуру связей.

Применение базового метода физических аналогий для моделирования ИС, обладающих перечисленными свойствами, имеет ряд ограничений.

Для создания моделей СБС КА, используемых при решении задач управления полетом, необходимо разработать новый вариант метода математического моделирования, обеспечивающий имитацию нелинейных явлений, их сложного взаимного влияния и допускающий структуризацию моделей.

Цель работы — разработка методологических и алгоритмических основ системы математического моделирования СБС КА.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка нового варианта метода физических аналогий, обеспечивающего создание адекватных моделей СБС КА, а именно: описание нелинейных физических явлений, имитацию взаимного влияния явлений различной физической природы и многоуровневую структуризацию модели.

2. Разработка математического описания существенных для функционирования СБС КА физических явлений и связей между ними в рамках рассматриваемой предметной области. Должны быть созданы модели типовых элементов рассматриваемых СБС КА.

На основе предложенного варианта метода моделирования:

3. Разработка комплекса программ для проведения расчетов. Этот комплекс программ в качестве входных данных должен получать формальное описание структуры модели и моделей типовых элементов, формировать исходные данные для расчета, вычислять невязки между значениями параметров и, используя программные реализации соответствующих вычислительных методов, проводить расчет состояния ИС и его эволюции.

4. Разработка моделей отдельных служебных бортовых систем КА: двигательной установки и системы обеспечения теплового режима, проведение расчетов штатных и нештатных режимов работы этих ИС.

5. Разработка проекта системы математического моделирования, основанной на новом варианте метода моделирования, обеспечивающей создание моделей сложных систем, таких как СБС КА.

Научная новизна.

1. Предложен вариант алгоритмического представления уравнений, описывающих связи между параметрами модели: каждое уравнение должно быть представлено в виде программной функции, вычисляющей невязку между значениями фазовых переменных и их производных. Такой подход позволяет автоматически выполнять синтез всех СЧ в математическую модель ИС и применять известные численные методы для выполнения вычислений. В системах математического моделирования, использующих приближение сосредоточенных параметров, предложенный подход применен впервые.

2. Разработан оригинальный механизм автоматического описания взаимного влияния явлений различной физической природы. Модель ИС разделена на однородные по составу и свойствам детали, участвующие в различных физических явлениях, взаимное влияние которых локализовано внутри та-

ких деталей. Вычислительный алгоритм задействует программные функции, описанные в библиотеке СЧ, имитирующие это взаимное влияние.

3. Модифицирован алгоритм декомпозиции модели ИС на универсальные поддающиеся классификации СЧ. Декомпозицию предложено проводить в три стадии: на первой стадии — по принадлежности элементам структуры, на второй — выделять в элементах структуры аналоги типовых элементов, однородные по составу и свойствам детали, на третьей — рассматривать участие таких деталей в явлениях различной физической природы.

4. Предложена оригинальная модель течения жидких и газообразных веществ по магистралям в приближении сосредоточенных параметров в виде композиции свойств вещества, явлений гидродинамики и теплообмена. Предложенный подход обеспечивает гибкость модели: для моделирования различных типов течения или течения различных вещества необходимо лишь заменить отдельные СЧ в описании структуры модели.

Практическая значимость. Результаты диссертационного исследования, в т. ч. прототипы вычислительных программ, могут быть использованы при создании принципиально новой системы математического моделирования, использующей приближение сосредоточенных параметров. Такая система позволит разрабатывать адекватные модели СБС КА более эффективно.

Принципы и подходы, разработанные в ходе диссертационного исследования, использованы при создании моделей служебных бортовых систем для комплексных моделирующих стендов КА «Союз-МС» и «Прогресс-МС».

Методы исследования. В ходе диссертационного исследования использованы системный подход и процедура декомпозиции.

Математическое описание существенных для функционирования СБС КА физических явлений основано на уравнении Навье-Стокса, законах теплопроводности Фурье и излучения черного тела Стефана-Больцмана, уравнениях расчета электрических цепей.

При разработке расчетного комплекса программ использованы программные реализации методов численного решения нелинейных алгебраических уравнений и методов численного интегрирования.

Достоверность и обоснованность научных результатов проведенных исследований следует из фактов успешного применения предложенного в диссертационной работе подхода, что удостоверяется актом внедрения, подтверждено положительным рецензированием научных работ при их опубликовании в рейтинговых журналах.

Апробация. Результаты диссертационной работы доложены на заседаниях научно-технического совета ПАО «РКК «Энергия» имени академика С. П. Королёва» (Королёв, 2015-2017); Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2014); Научной конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (СПб, 2014); Международной конференции «Решетневские чтения» (Красно-

ярск, 2014, 2015); Научной конференции «Академические Королёвские чтения» (Москва, 2015, 2016).

Публикация. Основные научные результаты диссертации отражены в 6 научных работах, в том числе в 4 статьях в научных журналах, включенных в Перечень Российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации, и материалах двух конференций.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 123 страницах, содержит 33 иллюстрации, 9 таблиц и 19 листингов программ. Библиография включает 66 наименований.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, выносимые на защиту, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе представлен краткий обзор некоторых подходов к математическому моделированию технических систем: метод конечных элементов, метод физических аналогий, метод функциональных преобразователей и узкоспециализированные языки релейной логики. Сделан вывод, что для моделирования служебных бортовых систем (СБС) космических аппаратов (КА) в контексте решения задач управления полетом не подходит ни один из перечисленных методов в силу сложности имитируемых явлений, сложности структуры исследуемых систем (ИС) и наличия двусторонних связей в ИС.

Приведено более подробное описание метода физических аналогий, возможности которого наиболее близки предъявляемым требованиям. Идея использования физических аналогий развита в работах И. М. Тетельбаума. Формальное описание метода, включая схему построения математических моделей, приведено в работах И. П. Норенкова. Применению метода для математического моделирования механических, электрических, гидравлических, магнитных и др. физических явлений посвящены работы В. А. Трудношина. В зарубежной литературе метод физических аналогий известен как методология Bond Graph, ее физические и математические основы приведены в работах Г. Пэйнтера, Р. Розенберга, Д. Карноппа.

В качестве примера ИС рассмотрена система обеспечения теплового режима (СОТР) пилотируемого космического корабля (Рис. 1). СОТР предназна-

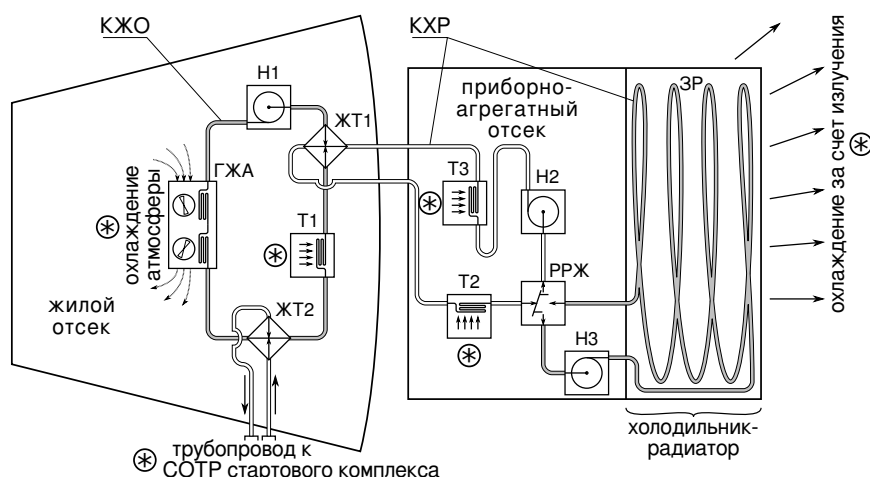


Рис. 1. Схема СОТР КА. СОТР содержит два замкнутых гидравлических контура: контур холодильника-радиатора (КХР) и контур жилого отсека (КЖО), КХР разделен на сообщающиеся наружную (холодную) и внутреннюю (теплую) части: рабочая жидкость (РЖ) во внутренней части охлаждает приборы, в наружной — отдает теплоту змеевику холодильника-радиатора (ЗР). Жидкостный теплообменник ЖТ1 обеспечивает теплообмен между КХР и КЖО, ЖТ2 — съем теплоты во время подготовки к пуску, регулятор расхода жидкости (РРЖ) — сохранение температуры РЖ во внутренней части КХР путем ограничения потока холодной РЖ, поступающей из наружной во внутреннюю часть КХР. Н1, Н2, Н3 — насосы, обеспечивающие циркуляцию РЖ, Т1, Т2, Т3 — теплообменники приборов, ГЖА — газожидкостный агрегат, охлаждающий атмосферу жилого отсека. Знаком ⊗ отмечены агрегаты, взаимодействующие с внешними для СОТР объектами

чена для поддержания теплового режима приборов и жилой зоны КА. Работа системы заключается в передаче тепловой энергии от агрегатов и приборов к холодильнику-радиатору (ХР) для излучения в окружающее пространство посредством циркулирующей по магистралям РЖ. Корпус КА, за исключением ХР, укрыт теплоизоляционным материалом.

Математическое моделирование СОТР в контексте решения задач управления полетом КА требует решения уравнений, описывающих физические явления, и подразумевает имитацию течения РЖ по магистралям (ур. неразрывности, Навье-Стокса и состояния РЖ), теплообмена (з-ны теплопроводности Фурье, сохранения энергии), электрического тока (ур. Максвелла) и взаимного влияния этих явлений: тепломассообмена (ур. переноса теплоты и массы) и теплового действия электрического тока (з-н Джоуля-Ленца).

При решении рассматриваемого класса задач вместо перечисленных уравнений микроуровня обычно используют их упрощенные формулировки в приближении сосредоточенных параметров, связывающие средние по объему элементов значения физических величин. Таким образом описывают: 1) различные физические явления, 2) их взаимное влияние, 3) двусторонние связи между различными подсистемами, системами КА и внешними объектами.

Все перечисленные явления, существенные для работы СБС КА, в приближении сосредоточенных параметров в общем виде могут быть описаны нелинейными алгебраическими уравнениями относительно фазовых переменных и их производных. Для расчета эволюции ИС решают задачу Коши:

$$\begin{aligned}\vec{F}(\dot{\vec{x}}, \vec{x}, t, \vec{u}) &= 0; \\ \vec{x}|_{t=t_0} &= \vec{x}_0,\end{aligned}\tag{1}$$

где \vec{x} — вектор состояния (ВС) ИС, \vec{F} — вектор-функция, t — модельное время, \vec{u} — внешнее воздействие на ИС, \vec{x}_0 — ВС на момент времени t_0 . Вектор \vec{x} состоит из фазовых переменных — реальных физических величин $\{x_i, i \in \mathbb{V} \subset \mathbb{N}\}$ (\mathbb{N} — множество натуральных чисел) — и описывает состояние ИС. Для решения задач управления полетом выполняют численное интегрирование системы (1) при наличии ненулевого внешнего воздействия \vec{u} .

В задачах рассматриваемой предметной области ИС описывают как совокупность элементов, каждый из которых является в достаточной мере изученным, а интерес представляет продукт их взаимодействия. С формальной точки зрения это означает, что известны скалярные уравнения, связывающие связь параметров каждого отдельного элемента:

$$f_i(\dot{x}_{p_{i,1}} \dots \dot{x}_{p_{i,N_i}}, x_{q_{i,1}} \dots x_{q_{i,M_i}}, t, \vec{u}) = 0, \quad i \in \mathbb{E} \subset \mathbb{N},\tag{2}$$

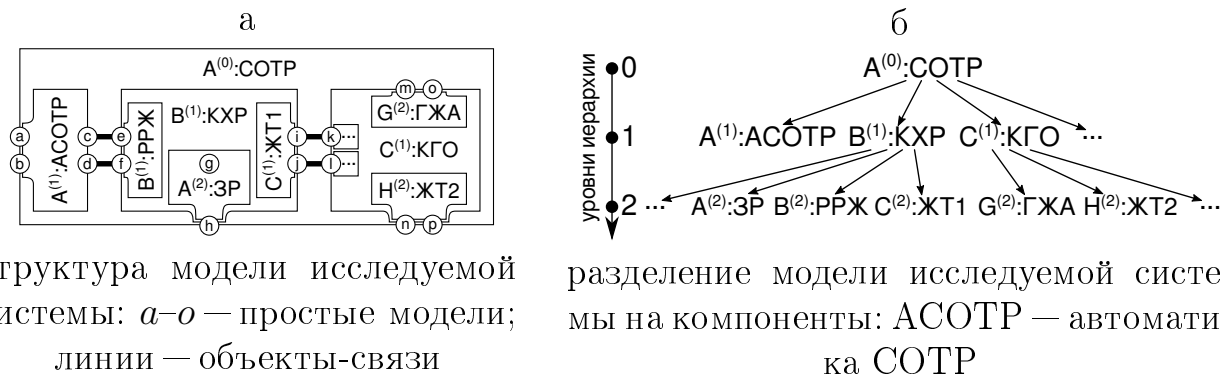
где $p_{i,j} \in \mathbb{V}_d \subset \mathbb{N}$, $q_{i,j} \in \mathbb{V}$. Функции $f_i(\dots)$ из (2) в общем случае являются нелинейными относительно $\dot{x}_{p_{i,j}}$ и $x_{q_{i,j}}$.

При моделировании СБС КА одной из ключевых является проблема постановки задачи моделирования, т. е. синтеза вектора состояния \vec{x} и алгоритмического представления уравнений (2) в единую модель на основании формального представления структуры ИС. Существенную роль здесь играет структурная сложность ИС: количество элементов составляет сотни и тысячи, в связи с чем необходимо иметь возможность структурировать модель и раздельно разрабатывать отдельные ее составные части.

Во второй главе изложен разработанный автором новый вариант метода моделирования, позволяющий, во-первых, построить представление об ИС как о совокупности формализованных составных частей (СЧ) и, во-вторых, на основании этого представления разработать математическую модель ИС для ее численного анализа. Предложенный вариант метода обеспечивает моделирование нелинейных явлений и сложных связей между ними, многоуровневую структуризацию модели, возможность коллективной разработки и расширения спектра имитируемых физических явлений.

Описан модифицированный трехстадийный алгоритм декомпозиции для нового варианта метода моделирования. Вначале, согласно структурной схеме ИС, модель разделяют на несколько уровней *компонентов* — моделей элементов структуры ИС, затем в каждом компоненте выделяют модели однородных по составу и свойствам деталей (ОССД) — *простые модели (ПМ)*, в

конец рассматривают участие ОССД в различных физических явлениях: разделяют ПМ на *фрагменты* — модели участия ОССД в явлениях выбранной физической природы (Рис. 2,а, 2,б, 3).



структура модели исследуемой системы: *а-о* — простые модели; линии — объекты-связи

разделение модели исследуемой системы на компоненты: ACOTR — автоматика COTR

Рис. 2. Декомпозиция модели COTR. Изображены компоненты, ПМ и ОС

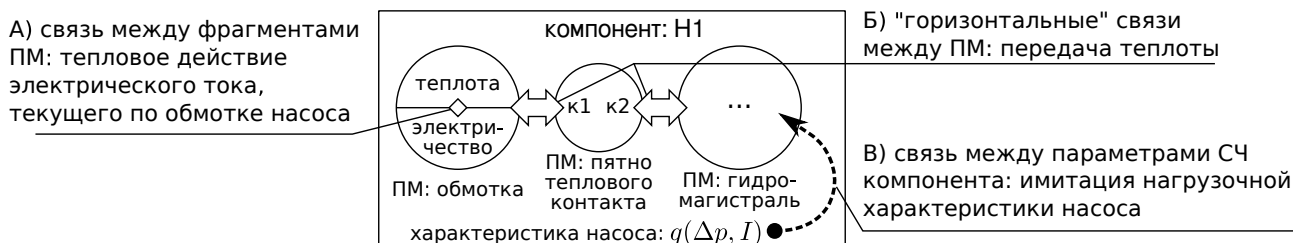


Рис. 3. Связи в компоненте Н1 (см. Рис. 1)

q , Δp — расход и перепад давления, создаваемые насосом, I — сила тока через обмотку, «к1», «к2» — полюса теплового проводника-двухполюсника

Для синтеза фрагментов, ПМ и компонентов в общую модель служат:

1. Связи между фрагментами одной и той же простой модели (см. «А» на Рис. 3), имитирующие взаимное влияние явлений различной физической природы. Математическое описание таких связей — дополнительные уравнения вида (2). Учет таких связей выполняет расчетный алгоритм при наличии в составе ПМ соответствующего набора фрагментов.

2. *Объекты-связи (ОС)* — «горизонтальные» связи между ПМ, имитирующие взаимодействие элементов одного уровня иерархии (см. Рис. 2,а и «Б» на Рис. 3). Их математическое описание — уравнения связи.

3. Связи между параметрами СЧ отдельного компонента (см. «В» на Рис. 3). Позволяют имитировать характеристики агрегатов, работу приборов автоматического управления или организовать информационный обмен со сторонними моделями и реальной аппаратурой. Математическое описание — дополнительные уравнения вида (2).

4. «Вертикальные» связи между компонентами различных уровней иерархии. Объединяют компоненты низшего уровня иерархии в компонент высшего уровня иерархии (например, ПМ $a, b, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o$ на Рис. 2,а).

В связи с консерватизмом состава СБС и существенных для их функционирования физических явлений оказывается возможным моделировать различные ИС рассматриваемого класса при помощи одних и тех же СЧ —

классов фрагментов, компонентов и связей. Создание новых моделей в большинстве случаев сводится к композиции существующих фрагментов, компонентов и задании связей между ними, т. е. разработке структуры модели.

Для каждого класса фрагментов и компонентов предложено разрабатывать программное представление, включающее: 1) фазовые переменные, описывающие его состояние, 2) программное представление уравнений вида (2), описывающих связи фазовых переменных; для каждого класса связей между фрагментами, составляющими ПМ, — программное представление уравнений вида (2), описывающих связи фазовых переменных фрагментов этой ПМ.

Уравнения связи, программным представлением которых являются ОС, предложено, как и в методе физических аналогий, объединять в матрицу инцидентности графа ИС. Для программного представления уравнений вида (2) — использовать программные функции \hat{f}_i , вычисляющие значение $f_i(\dots)$ для текущих значений параметров: фазовых переменных и их производных.

В диссертации разработан расчетный алгоритм, выполняющий на основании формального описания структуры модели синтез программного представления уравнений (2), описывающих СЧ ИС, в программное представление уравнения всей ИС (1), и проведение вычислительных экспериментов.

При проведении вычислительных экспериментов этот расчетный алгоритм вызывает программные функции \hat{f}_i , оценивает невязку между параметрами и корректирует их значения. После выполнения нескольких итераций коррекции, когда невязка становится достаточно малой, алгоритм производит численное интегрирование: увеличивает значения фазовых переменных пропорционально найденным значениям их производных. Работа этого алгоритма основана на программных реализациях методов численного решения нелинейных алгебраических уравнений и численного интегрирования.

На основе расчетного алгоритма была разработана компьютерная программа, выполняющая подготовку исходных данных и расчет эволюции ВС ИС. Для решения системы алгебраических уравнений в различных задачах применены библиотечные реализации квазиньютоновского метода с оценкой матрицы Якоби по алгоритму Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шенно и гибридного метода Пауэлла, для численного интегрирования — авторские реализации обратного метода Эйлера и метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

В третьей главе диссертации описано применение нового варианта метода и разработанного комплекса программ для моделирования двигательной установки (ДУ) и СОТР космических аппаратов.

В разделе 1 третьей главы приведено описание математических моделей физических явлений, существенных для функционирования ДУ и СОТР: течения тока по электрическим цепям, контактного и лучистого теплообмена, течения жидкостей и газов по магистралям и их взаимного влияния: тепло-массообмена и теплового действия электрического тока.

Компьютерная модель каждого из перечисленных физических явлений представлена в виде совокупности фрагментов — узлов-аккумуляторов (УА)

и проводников. Как и в методе физических аналогий, все фрагменты, моделирующие явления одной и той же физической природы, образуют граф, узлами которого являются УА, а ребрами — проводники.

Для моделирования течения электрического тока применены известные правила расчета электрических цепей:

$$\sum_{j \in \mathbb{E}_i} I_j = 0; \quad I_j = (\varphi_{i,j,1} - \varphi_{i,j,2}) g_j, \quad (3)$$

где I_j — сила тока через j -й проводник, g_j — проводимость j -го проводника, $\varphi_{i,j,1}, \varphi_{i,j,2}$ — потенциалы узлов, соединенных j -м проводником, \mathbb{E}_i — множество номеров проводников, присоединенных к i -му узлу.

Для моделирования теплообмена использованы законы сохранения энергии, теплопроводности Фурье и излучения черного тела Стефана-Больцмана, учтен взаимный лучистый теплообмен массивных тел:

$$\sum_{j \in \mathbb{K}_i} Q_j + \sum_{k \in \mathbb{T}_i} W_k - C_i \dot{T}_i = 0; \quad (4)$$

$$Q_j = \kappa_j (T_{i,j,1} - T_{i,j,2}); \quad W_k = \sigma_0 \varepsilon_{i,k,1} \varepsilon_{i,k,2} S_k (T_{i,k,1}^4 - T_{i,k,2}^4), \quad (5)$$

где Q_j, W_k — потоки теплоты, обусловленные, соответственно, j -м тепловым проводником и k -й оптической связью, C_i, T_i — теплоемкость и температура i -го теплового аккумулятора, \mathbb{K}_i — множество номеров тепловых проводников, присоединенных к i -му тепловому аккумулятору, \mathbb{T}_i — множество номеров оптических связей, присоединенных к i -му тепловому аккумулятору, κ_j — коэффициент теплообмена j -го теплового проводника, $T_{i,j,1}, T_{i,j,2}$ — температуры тепловых аккумуляторов, соединенных j -м тепловым проводником, σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана, $\varepsilon_{i,k,1}, \varepsilon_{i,k,2}, S_k, T_{i,k,1}, T_{i,k,2}$ — степень черноты, взаимная поверхность излучения, и температуры пары тепловых аккумуляторов, соединенных k -й оптической связью.

Для моделирования теплового действия электрического тока использована следующая формулировка закона Джоуля-Ленца:

$$W_j^{el} = I_j \cdot (\varphi_{i,j,1} - \varphi_{i,j,2}), \quad (6)$$

где W_j^{el} — тепловая энергия, выделяемая протекающим по j -му проводнику электрическим током за единицу времени, I_j — сила тока в j -м проводнике, $\varphi_{i,j,1}, \varphi_{i,j,2}$ — потенциалы узлов, соединенных j -м проводником.

Для имитации течения жидких и газообразных веществ по магистралям ИС с учетом тепломассообмена в диссертации разработана математическая модель этих явлений. Рассмотрено ламинарное течение несжимаемой жидкости и совершенного газа по длинной цилиндрической трубе под действием градиента давления. Получено приближенное решение системы дифференциальных уравнений в частных производных: уравнений Навье-Стокса, неразрывности и состояния вещества.

Для описания течения несжимаемой жидкости было получено решение:

$$\begin{aligned}
\bar{q}_j &= -\frac{g_j \bar{\rho}_j}{\eta} (p_{i,j,1} - p_{i,j,2}); \\
\Delta q_j &= -V_j \cdot \beta \cdot \bar{\rho}_j \cdot \dot{\bar{T}}_j; \\
\bar{\rho}_j &= \rho^* \cdot (1 - \beta(\bar{T}_j - T^*)); \\
P_{j,1} &= c \cdot (\bar{q}_j - \frac{\Delta q_j}{2}) \cdot \left\{ T_{i,j,1}, \bar{q}_j - \frac{\Delta q_j}{2} \geq 0 \mid T'_j, \bar{q}_j - \frac{\Delta q_j}{2} < 0 \right\}; \\
P_{j,2} &= c \cdot (\bar{q}_j + \frac{\Delta q_j}{2}) \cdot \left\{ T'_j, \bar{q}_j + \frac{\Delta q_j}{2} > 0 \mid T_{i,j,2}, \bar{q}_j + \frac{\Delta q_j}{2} \leq 0 \right\}; \\
-c \cdot \bar{\rho}_j V_j \cdot \dot{\bar{T}}_j + P_{j,1} + P_{j,2} + W_j &= 0; \\
T'_j &= \bar{T}_j + \frac{V_j \bar{\rho}_j}{2 \bar{q}_j} \cdot \dot{\bar{T}}_j,
\end{aligned} \tag{7}$$

где $p_{i,j,1}$, $T_{i,j,1}$, $p_{i,j,2}$, $T_{i,j,2}$ — давление и температура жидкости в узлах, соединенных j -й трубой, η , β — коэффициенты динамической вязкости и объемного расширения жидкости, g_j — геометрический коэффициент проводимости, зависящий от длины и диаметра j -й трубы, $\bar{\rho}_j$, \bar{T}_j , \bar{q}_j — средние плотность, температура и расход жидкости в j -й трубе, Δq_j — разность между входным и выходным расходом в j -ю трубу, обусловленная тепловым расширением жидкости, V_j — объем j -й трубы, ρ^* , T^* — константы, определяющие тепловое расширение жидкости, $P_{j,1}$, $P_{j,2}$ — изменение внутренней энергии жидкости в трубе, обусловленное массообменом, c — теплоемкость единицы массы жидкости, W_j — суммарная тепловая энергия, подводимая к j -й трубе, T'_j — температура жидкости, истекающей из j -й трубы.

Для политропного течения совершенного газа было получено решение:

$$\begin{aligned}
\bar{q}_j &= -\frac{g_j}{\eta} \cdot \frac{h_j(h_j+2)}{(h_j+1)^2} \cdot p_{i,j,1} \bar{\rho}_j \cdot \left(1 - \alpha_j^{1+1/h_j}\right)^2 \cdot \left(1 - \alpha_j^{1+2/h_j}\right)^{-1}; \\
\alpha_j &= \frac{p_{i,j,2}}{p_{i,j,1}}; \\
\Delta q_j &= -V_j \cdot \frac{\bar{\rho}_j}{\bar{T}_j} \cdot \dot{\bar{T}}_j; \\
\bar{\rho}_j &= \frac{p_{i,j,1}}{\bar{T}_j} \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{h_j+1}{2h_j+1} \cdot \left(1 - \alpha_j^{2+1/h_j}\right) \cdot \left(1 - \alpha_j^{1+1/h_j}\right)^{-1}; \\
P_{j,1} &= c_{h_j} \cdot (\bar{q}_j - \frac{\Delta q_j}{2}) \cdot \left\{ T_{i,j,1}, \bar{q}_j - \frac{\Delta q_j}{2} \geq 0 \mid T'_j, \bar{q}_j - \frac{\Delta q_j}{2} < 0 \right\}; \\
P_{j,2} &= c_{h_j} \cdot (\bar{q}_j + \frac{\Delta q_j}{2}) \cdot \left\{ T'_j, \bar{q}_j + \frac{\Delta q_j}{2} > 0 \mid T_{i,j,2}, \bar{q}_j + \frac{\Delta q_j}{2} \leq 0 \right\}; \\
-c_{h_j} \cdot \bar{\rho}_j V_j \cdot \dot{\bar{T}}_j + P_{j,1} + P_{j,2} + W_j &= 0; \\
T'_j &= \bar{T}_j \cdot \frac{2h_j+1}{h_j+2} \cdot \left(1 - \frac{1-\alpha_j^{1-1/h_j}}{1-\alpha_j^{2+1/h_j}}\right); \\
c_{h_j} &= \frac{h_j c_V - c_p}{h_j - 1},
\end{aligned} \tag{8}$$

где h_j — показатель политропы для j -й трубы, η — коэффициент динамической вязкости газа, μ — молярная масса газа, R — универсальная газовая постоянная, c_{h_j} — теплоемкость единицы массы газа при политропном процессе в j -й трубе, c_p , c_V — теплоемкость единицы массы газа при постоянном давлении и объеме. Остальные обозначения аналогичны (7).

Для моделирования узлов пневмо- и гидромагистралей в приближении сосредоточенных параметров использованы уравнения неразрывности и смешивания вещества в узле (время смешивания вещества с разными плотностями и температурами в узле принято пренебрежимо малым):

$$\begin{aligned} V_i \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \dot{p}_i + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \dot{T}_i \right] + \sum_{j \in \mathbb{H}_i} q_j &= 0; \\ c \rho_i V_i \dot{T}_i + c \sum_{j \in \mathbb{H}_i} \max(q_j, 0) \cdot (T'_j - T_i) - W_i &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где V_i — объем i -го узла, p_i , ρ_i , T_i — давление, плотность и температура вещества в i -м узле, \mathbb{H}_i — множество номеров труб, присоединенных к i -му узлу, q_j , T'_j — массовый расход и температура вещества, втекающего в i -й узел из j -й трубы, W_i — теплота, подводимая к i -му узлу за единицу времени, c — массовая теплоемкость вещества, для газа — в политропном процессе. Частные производные плотности ρ получены из уравнений состояния вещества.

На основании приведенных выше уравнений были разработаны фрагменты — программные модули, служащие для моделирования различных физических явлений. В составе фрагментов реализованы программные функции, вычисляющие невязки между фазовыми переменными и их производными.

Для моделирования электрических схем разработаны фрагменты «электрический узел» (Эу) и «электрический проводник» (Эп). Программная функция для Эп, соединяющего $i_{j,1}$ -й и $i_{j,2}$ -й узлы, вычисляет силу тока I_j из (3), программная функция для i -го Эу вычисляет невязку между токами $I_j \forall j \in \mathbb{E}_i$ в присоединенных Эп.

Для моделирования теплообмена разработаны фрагменты «тепловой аккумулятор» (Та), «контактный тепловой проводник» (Тк) и «радиационный тепловой проводник» (Тр). Программная функция для Та вычисляет невязку в тепловом балансе (4), программные функции для Тк и Тр вычисляют, соответственно, величины Q_j и W_k из (5).

На основании систем уравнений (7)–(9) разработаны фрагменты для описания течения несжимаемой жидкости и совершенного газа по магистралям ИС. Одна группа фрагментов описывает свойства веществ, жидкостей (Вж) или газов (Вг), вторая — элементов магистралей, узлов (Гу) и труб (Гп), третья — параметров емкости (Оо). Были использованы разработанные ранее фрагменты Та. Модели конкретных ОССД магистрали предложено представлять в виде суперпозиции перечисленных фрагментов (Рис. 4).

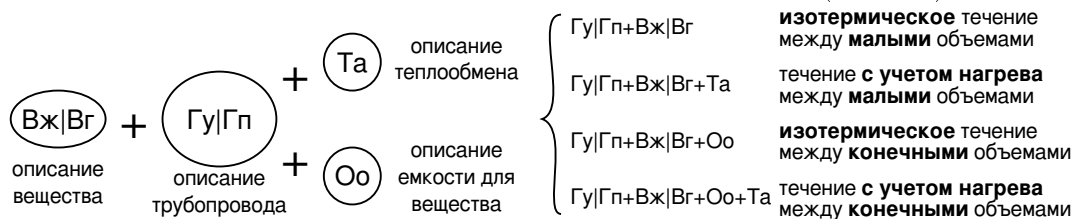


Рис. 4. Варианты моделирования течения жидкости и газа

В разделе 2 третьей главы приведено описание модели двигательной установки, предназначенной для сообщения космическому аппарату импульса в соответствии с программой полета за счет реактивной тяги, образуемой при сгорании топливной пары. КА оборудован двигателями малой тяги (ДМТ) и маршевым двигателем (МД). Схема ДУ приведена на Рис. 5.

Компоненты топлива приняты несжимаемыми жидкостями, газ наддува — совершенным газом. В модели учтено: течение газа наддува и компонентов топлива по магистралям, охлаждение ДМТ вследствие излучения, нагрев при горении топлива и от электрических нагревателей, изменение удельного импульса ДМТ с температурой; работа автоматики ДУ: закрытие клапана ЭКН по превышению порогового значения давления в баках окислителя (БО) или горючего (БГ), включение и отключение нагревателей для поддержания температуры ДМТ.

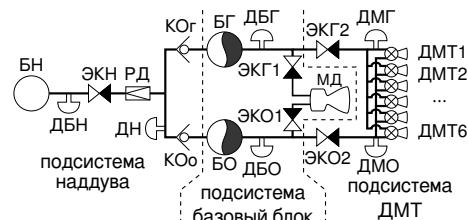
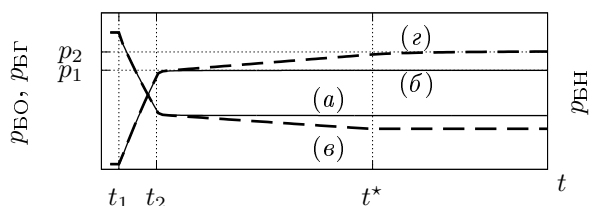


Рис. 5. Схема ДУ

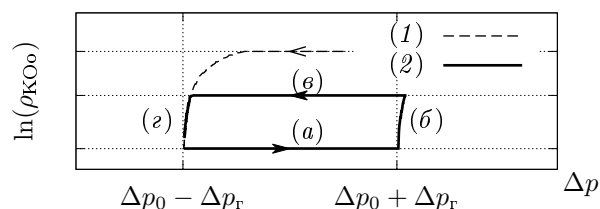
Предусмотрен ввод нештатных ситуаций: негерметичность магистралей, аварийная работа редукционного и обратных клапанов РД, КОо и КОг.

Модель ДУ разработана путем композиции фрагментов, описанных в разделе 1, и отдельных программных функций, имитирующих специальные связи в элементах ДУ. В моделях элементов ДУ использованы комбинации фрагментов «Вг+Гп», «Вг+Гу», «Вг+Гу+Оо», «Вж+Гп», «Вж+Гу», «Эп+Та».

Проведены вычислительные эксперименты по моделированию эволюции состояния ДУ в сценариях: первоначальный наддув топливных баков, работа МД, работа ДМТ с заданной скважностью. Рассмотрена штатная и нештатная работа узлов ИС. Некоторые результаты расчетов показаны на Рис. 6.



Начальный наддув БО и БГ. Штатная работа: (а) — давление в баллоне наддува БН $p_{БН}(t)$, (б) — давления в БО и БГ $p_{БО}(t)$, $p_{БГ}(t)$. Негерметичность РД: (в) — $p_{БН}(t)$, (г) — $p_{БО}(t)$, $p_{БГ}(t)$. t_1 , t_2 — моменты начала и окончания наддува, p_1 — давление настройки РД, p_2 — давление, по которому автоматика ДУ закрывает ЭКН, t^* — момент времени отключения наддува автоматикой



Изменение коэффициента проводимости КОо при начальном наддуве (1) и при работе МД (2) для случая наличия гистерезиса в характеристике КОо. (б) — кривая открытия КОо при включении и работе МД, (г) — кривая закрытия КОо при отключении МД, (а), (в) — переходы между этими кривыми. Δp_0 — падение давления на КОо, при котором он закрывается, Δp_r — величина гистерезиса

Рис. 6. Результаты моделирования ДУ

В разделе 3 третьей главы приведено описание модели системы обеспечения теплового режима. СОТР предназначена для термостатирования агрегатов КА, ее работа основана на циркуляции жидкого теплоносителя по замкнутому контуру. Схема СОТР приведена на Рис. 7.

Теплоноситель принят несжимаемой жидкостью. В модели учтено: изменение освещенности ХР при движении по орбите, охлаждение ХР за счет излучения, поток теплоты от агрегатов КА к термоплатам Т1 и Т2, изменение давления, создаваемого газожидкостным компенсатором К1 в контуре, вследствие термического расширения теплоносителя; работа автоматики СОТР: формирование команд на изменение положения заслонки РРЖ для поддержания температуры РЖ в заданном диапазоне.

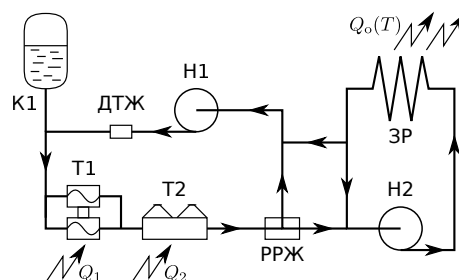
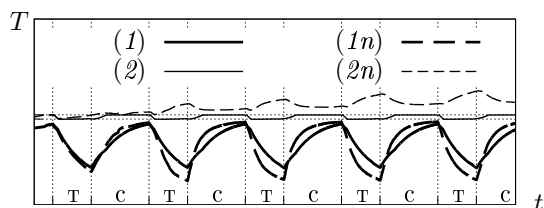


Рис. 7. Схема СОТР

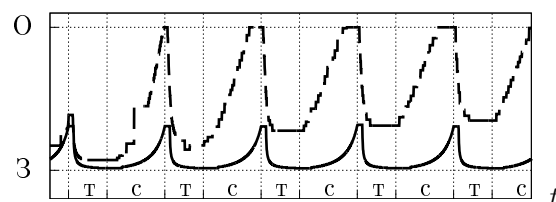
Предусмотрен ввод нештатных ситуаций, включая негерметичность гидроарматуры и аварийную работу насосов Н1 и Н2 и РРЖ.

Модель СОТР разработана путем композиции фрагментов, описанных в разделе 1, и программных функций, имитирующих специальные связи в элементах СОТР. Для моделирования гидравлических магистралей использованы комбинации фрагментов «Вж+Гп», «Вж+Гп+Оо+Та», «Вж+Гу+Та»; для моделирования теплообменников — фрагменты «Та».

Проведены вычислительные эксперименты по моделированию эволюции состояния СОТР: 1) в процессе установления температур после выведения на орбиту и 2) при периодическом изменении освещенности ХР вследствие движения по орбите. Рассмотрена штатная и нештатная работа узлов ИС. Некоторые результаты расчетов показаны на Рис. 8.



Изменение температур с течением времени: (1), (1n) — температуры РЖ в ЗР, (2), (2n) — температуры охлаждаемых приборов. Сплошные линии — изменение температур РЖ при штатной работе, пунктир — проявление и развитие аварии: негерметичности контура СОТР



Работа РРЖ во время орбитального полета с учетом изменения освещенности ХР. «О» — РРЖ полностью открыт, «З» — РРЖ полностью закрыт. Сплошные линии — положение РРЖ при штатной работе, пунктир — проявление и развитие аварии: негерметичности контура СОТР

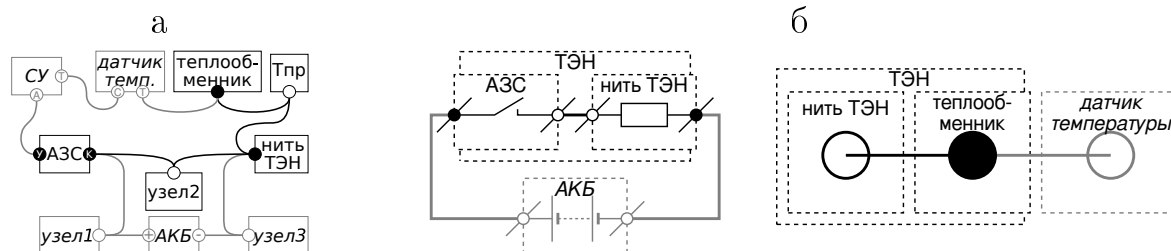
Рис. 8. Результаты моделирования СОТР.

«С» и «Т» — интервалы времени при движении по орбите, на которых КА, соответственно, освещен Солнцем и находится в тени Земли

В четвертой главе диссертации представлен проект системы математического моделирования технических объектов, основанной на изложенных выше результатах диссертационного исследования.

Рассмотрено использование системы в различных процессах жизненного цикла модели в соответствии со стандартом разработки программного обеспечения, включая проектирование и разработку модели, контроль и управление моделью на этапах отладки, внедрения и использования в составе моделирующих стендов. Сформулированы требования к системе моделирования.

Разработан внешний вид графического представления модели. При проектировании модели и формировании связей между ее СЧ предложено использовать структурную схему вида Рис. 9,а, при разработке модели физических явлений — схему модели в обозначениях, характерных для предметной области: электротехники, гидравлики и т. д. (Рис. 9,б). Предложенный в диссертации метод моделирования позволяет провести однозначное соответствие между схемами, изображенными на Рис. 9,а, 9,б, и структурой модели.



Пример структурной схемы модели

Пример схемы моделей физических взаимодействий ИС. Показана электрическая схема (слева) и схема теплообмена (справа)

Рис. 9. Графическое представление модели

На этапе проектирования модели задают ее структуру, включая СЧ модели — компоненты, и связи между ними — ОС. Интерфейсами СЧ являются ПМ. В процессе разработки производят дальнейшую структурную декомпозицию компонентов и наделение их внутренним содержимым. Для компонентов низшего уровня используют стандартные элементы — экземпляры библиотечных классов фрагментов и классов компонентов.

Для этапов проектирования, разработки и отладки в составе проекта системы моделирования предусмотрены средства коллективной разработки, служащие для обмена составными частями модели, контроля версий и интерфейсов, объединения составных частей в общую модель.

Для упрощения отладки в составе системы моделирования предусмотрены средства визуализации работы модели на разработанной графической схеме, отображение текущих значений параметров и истории их изменения в виде графиков и диаграмм, слежение за ключевыми параметрами и контроль нахождения параметров в заданных пределах. Также предусмотрено пошаговое исполнение, анализ решения уравнений, контроль скорости вычислений, имитация потока входных данных для модульной отладки.

Разработанный проект системы моделирования включает также описание средств эксплуатации моделей. Предусмотрена возможность контроля и управления моделью, включая отображение параметров на алфавитно-цифровых и графических форматах и анимацию пользовательских форматов.

Для интеграции моделей в состав моделирующих стендов предусмотрен открытый двусторонний промежуточный программный интерфейс, позволяющий реализовать различные виды протоколов обмена с реальной аппаратурой и сторонними моделями. Этот интерфейс также предложено использовать для организации обмена с пультами контроля и управления.

Создание системы математического моделирования на основе предложенного проекта позволит значительно упростить и ускорить разработку, интеграцию в состав стендов и эксплуатацию моделей СБС КА.

Основные результаты работы

1. Разработан новый вариант метода моделирования технических объектов, являющийся развитием метода физических аналогий. Предложенный вариант метода обеспечивает описание нелинейных физических явлений, взаимных связей между явлениями различной физической природы и многоуровневую структуризацию модели.

2. Получено обоснование используемых при решении задач управления полетом математических моделей физических явлений, существенных для функционирования служебных бортовых систем КА, в частности, явлений теплообмена и гидродинамики с учетом тепломассопереноса.

3. Разработан алгоритм и пакет программ, основанный на предложенном варианте метода моделирования, обеспечивающий подготовку к расчету и расчет эволюции исследуемой системы. Исходными данными для вычислений являются формальные описания структуры модели и ее составных частей.

Пакет программ обеспечивает моделирование широкого спектра физических явлений, разработку адекватных моделей таких бортовых систем как двигательные установки, системы дозаправки, системы электроснабжения, системы жизнеобеспечения, системы обеспечения теплового режима КА и их модификацию за ограниченное время. Возможность описания нелинейных явлений позволяет использовать созданный пакет программ для имитации разнообразных нештатных ситуаций, например, с целью прогнозирования их развития на борту КА.

4. На основе разработанного пакета программ созданы модели служебных бортовых систем космического аппарата — двигательной установки и системы обеспечения теплового режима.

Проведены вычислительные эксперименты: выполнено моделирование эволюции состояния перечисленных служебных бортовых систем в ряде сценариев, в том числе при наличии нештатных ситуаций. Результаты вычислений совпали с данными, наблюдаемыми в ходе реальных полетов.

5. Разработан проект интерфейса пользователя и функций системы математического моделирования технических объектов, включая средства проектирования, коллективной разработки, отладки и эксплуатации моделей, обеспечивающей имитацию нелинейных явлений, их сложного взаимного влияния, позволяющий структурировать модель исследуемой системы.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Петров Д. С. Имитационное моделирование двигательной установки космического аппарата при помощи трехстадийного метода декомпозиции // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 1. С. 43–57. (0,9 п.л. / 0,9 п.л.).

2. Петров Д. С. Моделирование течения жидкостей и газов по трубопроводам при помощи трехстадийного метода декомпозиции // Управление в морских и аэрокосмических системах: Материалы научной конференции. Спб., 2014. С. 583–590. (0,5 п.л. / 0,5 п.л.).

3. Павлов Д. В., Петров Д. С. Настройка модели двигательной установки космического аппарата с использованием трехстадийного метода декомпозиции // Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина». 2015. № 1. С. 80–87. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).

4. Павлов Д. В., Петров Д. С. Использование метода трехстадийной декомпозиции для моделирования системы терморегулирования космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 42–54. (0,55 п.л. / 0,3 п.л.).

5. Петров Д. С. Разработка среды моделирования бортовых систем космических аппаратов на базе трехстадийного метода декомпозиции // Решетневские чтения: Материалы международной конференции. Красноярск, 2015. С. 79–81. (0,2 п.л. / 0,2 п.л.).

6. Павлов Д. В., Петров Д. С. Оптимизация алгоритма расчета моделей, разработанных с использованием метода, основанного на трехстадийной декомпозиции // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 8. С. 1–15. (0,9 п.л. / 0,5 п.л.).