

СОЗДАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПЛАТФОРМЫ СРЕДСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РАЗРАБОТКИ И ОПТИМИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. Ш. Козаев, В. В. Миронов,

А. С. Негодяев✉, Э. С. Цырендоржиев

АО «Государственный научный центр Российской Федерации

«Исследовательский Центр имени М. В. Келдыша»

г. Москва, Российская Федерация

Целью работы является создание отечественной программной платформы для решения задач математического моделирования в отрасли. Известно, что важнейшей задачей снижения издержек и сроков при создании новых изделий является разработка совершенных математических моделей, адекватно описывающих реальные процессы и достаточно быстродействующих. Для решения такой задачи в Центре Келдыша выполняется ряд проектов, направленных на создание отечественной платформы средств математического моделирования и инженерного анализа в обеспечение практических задач разработки и оптимизации параметров, прежде всего, ракетных двигателей и космических энергоустановок. При разработке платформы в нее закладывается ряд основополагающих принципов, которые сформулированы в работе. Во-первых, это разработка и применение только отечественных программных средств и комплексных решений на основе специализированного программного обеспечения Центра Келдыша, а также коммерческих отечественных программных продуктов. Во-вторых, интеграция компонентов в единый комплекс математических моделей и программных средств с автоматизацией расчетов. В-третьих, это валидация создаваемых математических моделей и программного обеспечения для режимов и условий практических задач с обеспечением заданной точности. Авторами приведены примеры успешного применения разрабатываемой платформы применительно к задачам разработки и оптимизации космических аппаратов. На текущий момент наряду с решением прикладных задач результаты моделирования уже позволили сформулировать практические рекомендации, а также выявить ряд новых эффектов и физических закономерностей, свойственных рассматриваемым сложным техническим устройствам.

Ключевые слова: математическое моделирование, инженерный анализ, САЕ, вычислительный эксперимент, программное обеспечение, автоматизация проектирования, предиктивное моделирование.

Введение

Математическое моделирование (ММ) и вычислительный эксперимент в современном мире являются одними из мощнейших инструментов снижения сроков и издержек при создании изделий ракетно-космической техники (РКТ). По различным

данным, стоимость процессов экспериментальной отработки и доведения изделий до состояния соответствия техническому заданию может составлять до 70 % от общей стоимости их создания. В то же время отклонения в комплексной программе экспериментальной отработки зачастую влекут значительное затягивание сроков, как напрямую, так и косвенно, из-за сложностей в выделении дополнительного финансирования. Таким образом, перенос части нагрузки, как временной, так и финансовой, с натурального

✉ negodyaev@kerc.msk.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

на вычислительный эксперимент – актуальная задача, решение которой является одним из приоритетов на уровне государства и ведущих корпораций [1–3].

С учетом вышесказанного цель работы – создание отечественной программной платформы для решения задач математического моделирования в отрасли. Такая платформа является комплексным информационным продуктом, объединяющим готовые и апробированные решатели вкупе с уникальным кодом, описывающим специфичные процессы, преимущественно в энергодвигательных установках, в том числе космических аппаратов. А также всеобъемлющая валидация алгоритмов и программных кодов и упаковка такой информационной инфраструктуры в единый интерфейс пользователя.

В таблице 1 представлена эволюция средств моделирования рабочих процессов и инженерного анализа энергодвигательных установок, свойственная, по крайней мере, для АО ГНЦ «Центр Келдыша» и, вероятно, отражающая ситуацию по всей отрасли.

По этой таблице можно сделать заключение о современных и характерных тенденциях развития средств ММ:

- Значительное усложнение математических моделей для максимально адекватного описания реальных процессов, а также вычислительных алгоритмов для разрешения этих моделей (т.е. повы-

шение быстродействия для проведения больших серий оптимизационных расчетов).

- Переход на полностью отечественное программное обеспечение (ПО), что связано не только с последними событиями государственного масштаба, но и целесообразно ввиду специфики важности и конфиденциальности решаемых в отрасли задач. Также немаловажна доступность разработчика ПО потребителю для реализации технической поддержки и совершенствования вычислительных инструментов.

- Необходимость создания комплексных решений, основанных на большом наборе математических моделей, охватывающих все многообразие происходящих процессов. Повышение точности и адекватности результатов моделирования возможно лишь за счет учета физических процессов, в настоящее время не разрешенных из-за значительного усложнения их математических моделей.

Одним из важнейших аспектов процесса ММ является точность получающихся результатов моделирования. И если раньше результаты расчета соотносились с диапазонами среднеквадратического отклонения единичных опытных данных, то сейчас проводится полноценная валидация ПО, в том числе с результатами статистических испытаний во всем диапазоне возможности при-

Таблица 1

Этапы эволюции средств моделирования

Годы	Физические закономерности	Методы и алгоритмы	Статус	Технические средства
1960–1970	накопление данных; физические основы рабочих процессов	ручной счет; интегральные характеристики	частные методики	калькулятор; ЭВМ «Минск»
1970–1990	термодинамика; теплообмен; газовая динамика; внутрибаллистические характеристики (ВБХ); энергетические характеристики (ЭХ); теплопроводность; излучение; термомеханика	редуцированные уравнения математики; 1D-2D численные авторские коды	программно-методическое обеспечение (ПМО); руководства для конструкторов; отраслевые стандарты	БЭСМ-6; ЕС-1040; ЕС-1060; ОФАП
2000–2015	расширение функционала; коммерческое ПМО; развитие отечественного ПМО	нестационарные 1D-2D численные авторские коды; зарубежное ПО 3D-моделирования	NASTRAN; ANSYS; StarCD; SiemensNX; отраслевые расчетные комплексы и ППП	ПЭВМ; кластер серверов (<1Тф)
2015–2025	расширение функционала отечественного ПО; адаптация отраслевого ПО; внедрение и валидация отечественного ПО	нестационарные 1D-3D- вычислительные методы	отраслевая платформа физико-математического моделирования (ФММ) и инженерного анализа; лаборатория ММ; пилотные проекты; импортозамещение	вычислительные ресурсы (>20Тф)

менения алгоритмов, а также с альтернативными программными решениями.

1. Принципы разрабатываемой платформы

Анализируя таблицу 1 на предмет выявления современных тенденций развития средств ММ и инженерного анализа энергодвигательных установок, можно сделать следующее заключение. Для успешного решения задачи снижения издержек и сроков при создании новых и перспективных изделий РКТ необходимо создание некоего комплексного полностью отечественного программного решения, обладающего описанными свойствами. И именно для этого Центр Келдыша выполняет ряд проектов, направленных на создание отечественной платформы средств математического моделирования и инженерного анализа, прежде всего ракетных двигателей (РД) и космических энергоустановок (КЭ). Ядром коллектива, занимающегося разработкой такой платформы, являются молодые специалисты – выпускники и аспиранты Московского физико-технического института (МФТИ) и Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Следует отметить, что естественная вовлеченность современной молодежи в информационные технологии вкупе со знаниями в области ракетной и космической техники позволяет создавать достаточно совершенные и специфичные для отрасли программные средства.

При разработке платформы в нее закладываются следующие основополагающие принципы:

1.1. Разработка и применение только отечественных программных средств и комплексных решений. Среди них следующие компоненты:

- Собственное специализированное программное обеспечение Центра Келдыша. Это те специфичные для нашей деятельности задачи, которые попросту не могут быть реализованы сторонними разработчиками ввиду их недостаточной компетентности в данных вопросах. Речь в основном идет об одно- и двухмерных нестационарных задачах, описывающих кинетику горения жидких и твердых топлив, акустические колебания в камерах двигателей, разрушение высокотемпературных композиционных материалов, двухфазную газовую динамику и пр. Важным является тот факт, что разработка таких моделей основана в том числе на проводимых экспериментах, которые могут быть поставлены как в рамках отдельных НИОКР [4], так и в рамках разработки рассматриваемой платформы.

- Реализация численных алгоритмов трехмерного моделирования целесообразна на основе отечественного программного обеспечения

(решателя) «Логос» (ЛОГОС) разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ. ЛОГОС – это система, позволяющая решать сложные пространственные задачи, моделировать аэро-, гидро- и газодинамику, распространение тепла в твердом теле, тепловую конвекцию, перенос излучения, напряжения, деформации и разрушения конструкций, а также взаимодействие перечисленных физических процессов между собой [5, 6]. В ЛОГОС реализованы численные методы расчетов с использованием неструктурированных и структурированных сеток. В состав пакета входит препостпроцессор, предназначенный для импорта и обработки CAD-моделей, генерации поверхностных и объемных сеток, имеющих визуальную среду для подготовки и постобработки расчетной модели. Важным является тот факт, что ЛОГОС – это законченный программный продукт трехмерного моделирования, имеющий возможность интеграции с авторскими алгоритмами, а также «дружественную» команду разработчиков, в отличие от иностранных программных CAE-продуктов.

- Для разрешения задач динамического моделирования нуль- и одномерных моделей применяется программное обеспечение SimInTech компании «ЗВ Сервис». SimInTech (Simulation In Technic) – отечественная среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев. SimInTech предназначен для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных объектах управления. Данное программное обеспечение является удобным, гибким и эффективным инструментом для моделирования пневмогидравлических систем и электрических цепей систем управления.

1.2. Следующим принципом является интеграция всех компонентов разрабатываемой платформы в единый комплекс математических моделей и программных средств на предмет автоматизации проводимых расчетов, оптимизации сложной технической системы по заданному параметру, построения дерева расчетов, постобработки и представления результатов.

Принцип интеграции существующих программных средств и собственных уникальных разработок вкупе с использованием унифицированных интерфейсов позволяет объединять различные модули и решать комплексные задачи, автоматизируя процессы таких расчетов. В случае разрабатываемой платформы такая интеграция оснащается:

- Программным обеспечением pSeven компании «Аванс Инжиниринг». ПО pSeven является отечественной программной разработкой и предназначено для автоматизации сложных процессов

проектирования и интеграции внешних программных продуктов и данных в единую расчетную цепочку, а также решения инженерных задач при помощи набора инструментов для анализа данных, оптимизации и предиктивного моделирования. ПО pSeven позволяет собирать комплексные модели изделия на основе наборов данных, аналитических или расчетных моделей, исследовать и оптимизировать эти модели с помощью инструментов анализа данных и оптимизации, а также прогнозировать поведение новых вариантов изделий или режимов их работы при помощи инструментов предиктивного моделирования.

В случае разрабатываемой платформы настоящее ПО выполняет роль интегратора расчетных модулей различных средств моделирования, в том числе упомянутых выше, и решает сложные сопряженные задачи с их оптимизацией по заданным параметрам.

1.3. Третьим, крайне важным, является принцип валидации создаваемых математических моделей и программного обеспечения для режимов и условий практических задач с обеспечением заданной точности. Ценность разработанных моделей определяется точностью результатов расчета, для этого в Центре Келдыша и организациях, работающих в кооперации, проводятся натурные эксперименты на моделях с целью получения первичных экспериментальных данных для создания моделей, а также уточнения и подтверждения правильности разработанных цифровых моделей. При этом большой накопленный опыт выполнения НИОКР в Центре Келдыша позволяет проводить валидацию как на ранее проведенных, так и сегодня выполняемых экспериментах, не связанных с разработкой настоящей платформы. При необходимости проводится постановка новых экспериментальных задач валидации. Большой массив экспериментальных данных позволяет надежно подтверждать адекватность предложенных математических моделей и алгоритмов либо проводить их модернизацию.

1.4. И наконец, принципиальным моментом является организация работ в кооперации «конструкторское бюро – Центр Келдыша – разработчик ПО» для наиболее точного задания исходных данных, правильной постановки задач вычислительного эксперимента и, как следствие, максимальной оптимизации разрабатываемых изделий по заданным параметрам.

Так что же собой представляет разрабатываемая платформа? В настоящее время она определяется как набор взаимосвязанных программных средств, упомянутых выше, объединенных в единую вычислительную среду и обеспечивающих решение конкретных прикладных задач разработки и оптимизации изделий ракетно-космической техники.

- Основным компонентом платформы являются уже упомянутые решатели, интерпретирующие физические явления вычислительными алгоритмами.

- Для проведения расчетов по разработанным алгоритмам нужны свойства веществ и материалов, характеристики исследуемых явлений, а также примеры решений, апробированных на практике. Поэтому следующим важнейшим компонентом платформы являются базы данных, содержащие исчерпывающие исходные данные для проведения расчетов.

- Проводимые мультиплатформенные расчеты имеют различные форматы входных и выходных данных, потому что у них разные разработчики. Поэтому еще двумя компонентами платформы являются средство преобразования интерфейсов для «сшивания» всех компонентов платформы, а также модуль постобработки и анализа полученных результатов.

- Наконец, в зависимости от цели расчета могут потребоваться дополнительные модули, например для формирования дерева расчетов. Таким образом, описанный набор программных компонентов является на настоящий момент полным, но не обязательно исчерпывающим при проведении дальнейших работ.

2. Успехи в разработке платформы и примеры выполненных работ

Формальным основанием разрабатываемой платформы являются стратегии Госкорпорации Роскосмос по «развитию цифровых технологий», а также по «развитию средств математического моделирования». При этом Центр Келдыша проводит разработку платформы в рамках финансовой поддержки Российского фонда развития информационных технологий (РФРИТ) в форме гранта. Роль Центра Келдыша не ограничивается координацией работ, а включает в себя создание уже упомянутых программных компонентов – решателей (преимущественно тепловые модели, двухфазная газовая динамика, топология оптимизации траекторий ракетных двигателей, разрушение высокотемпературных композиционных материалов и пр.). А также, что крайне важно, Центр Келдыша проводит валидацию разрабатываемых алгоритмов.

В качестве примеров успешного применения разрабатываемой платформы применительно к задачам разработки и оптимизации космических аппаратов (КА) можно отметить моделирование процессов в двигательных установках КА, таких как РБ Фрегат, КА серии «Луна-Ресурс» и «Луна-Глоб», заказчик расчетных моделей НПО «Лавочкина» и КБХМ им. Исаева.

2.1. Моделирование жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРД МТ) на гидразине. В качестве первого примера рассмотрено моделирование работы ЖРД МТ космического аппарата на гидразине [7], т.е. на однокомпонентном топливе, разлагающемся на катализаторе (рисунок 1).

Проблемой моделирования такого процесса является учет всего многообразия физических яв-

лений. Моделирование теплопроводности элементов конструкции реализовано за счет программных средств модуля «Логос Тепло», а в качестве интеграционной платформы для проведения расчетов был выбран модуль «Логос МИП».

Применение авторских методик совместно с коммерческими решателями позволило в короткие сроки и с высокой степенью точности решить

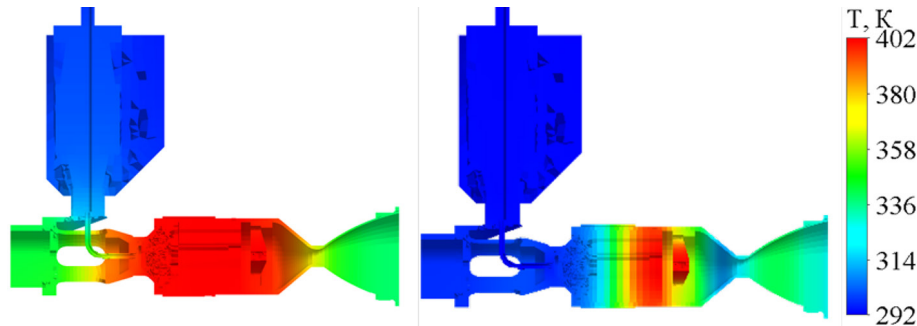
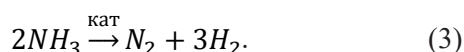
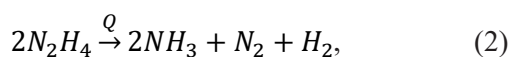
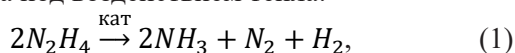


Рисунок 1. Моделирование работы ЖРД МТ

ний, таких как фильтрационное горение в камере сгорания (а это, в свою очередь, испарение жидкого топлива, химические реакции в газовой фазе и процессы теплообмена между газовой, жидкой и твердой фазой), перенос тепла в элементах конструкции, кондуктивно-конвективный перенос тепла по топливу в трубопроводе и течение продуктов реакции в сопле ракетного двигателя. Имеющиеся на текущий момент модели теплового состояния ЖРД МТ применяют упрощения, заключающиеся в использовании источников тепловыделения вместо непосредственного воспроизведения физики отдельных процессов, что, в свою очередь, негативно сказывается на итоговой точности расчетов и на практике может привести к перегреву поступающего топлива и конструкции. В рамках данной работы достигнута цель расширения списка учитываемых факторов. Задачей работы является построение тепловой модели двигателя, определение тепловых режимов его конструкции при заданной циклограмме работы и формирование рекомендаций по безаварийной работе.

В качестве авторского кода применены модели течения гидразина в трубопроводе, радиационный теплообмен, модели фильтрационного горения [8], а также моделирование работы электронагревателя.

Механизм разложения гидразина в фильтрационной модели горения представлен тремя реакциями, включающими в себя каталитическое разложение гидразина и аммиака, а также разложение гидразина под воздействием тепла:



поставленную задачу. Максимальная относительная погрешность по температуре составила 5 %. Отклонение температурной кривой, полученной в ходе численного моделирования от экспериментальной, можно объяснить упрощением CAD-модели двигателя (рисунок 2).

2.2. Моделирование теплового состояния бака КА. Следующим примером является моделирование теплового состояния бака КА (рисунок 3), а также процессов внутри него.

Работа такого бака сопровождается следующим комплексом явлений:

- теплопроводность материалов стенки бака и диафрагмы с учетом теплообмена через элементы крепления бака к термостабилизированной поверхности и подвод тепла от электронагревателей с внешней стороны бака;
- прогрев и свободноконвективное течение гидразина в топливной полости в условиях микрогравитации;
- прогрев гидразина в условиях невесомости;
- испарение и/или конденсация пропана в наддувной полости;
- кипение пленки жидкого пропана;
- изменение объема наддувной и топливной полостей вследствие отбора топлива в двигатели;
- изменение конфигурации диафрагмы;
- управление работой нагревателей наддувной полости по показаниям виртуальных датчиков температуры и датчиков давления.

Целью моделирования является определение режима работы нагревателей наддувной полости бака, обеспечивающих поддержание давления газообразного пропана по заданной циклограмме работы ДУ. Представленный набор процессов характерен для работы типового бака КА, а точное

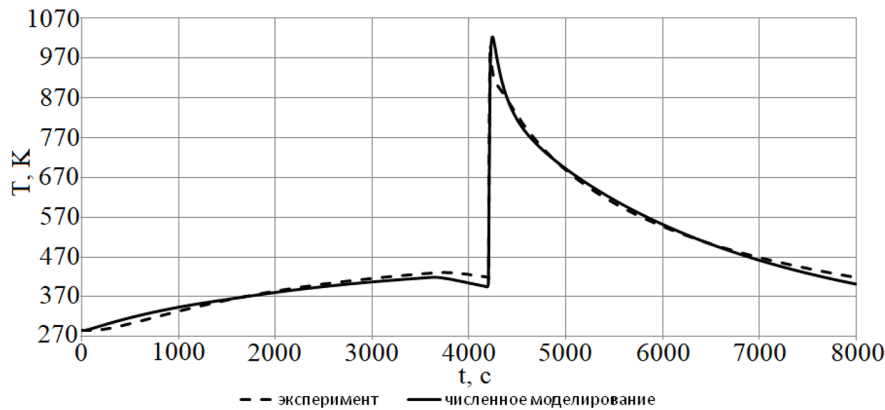


Рисунок 2. Изменение температуры в точке на камере сгорания ЖРД МТ;
линии – расчёт, пунктир – эксперимент

моделирование его работы невозможно без учета полноты перечисленных явлений. В то же время учет всех этих явлений нельзя провести в рамках коммерческих пакетов как из-за отсутствия в них такого функционала, так и из-за специфики ряда разрешаемых процессов.

Моделирование проводилось в квазистационарной постановке – когда непрерывное перемещение диафрагмы заменяется набором её дискретных положений, каждому из которых соответствует некоторая конфигурация и объём топливной полости. В зависимости от циклограммы работы ДУ определяются моменты времени перехода между конфигурациями. При этом на интервале времени между моментами перехода положение диафрагмы считается неизменным, но гидравлическая задача решается в непрерывной постановке. Соответственно, при смене конфигурации внутренних полостей рассчитанные для предыдущего момента времени параметры в полости (поля температуры в баке и скорости в гидразине) переносятся на новую конфигурацию.

Прогрев материала стенки и мембраны, контактный теплообмен интерфейса «мембрана-стенка», а также имитация электрического нагревателя и тепловые мосты в точках подвеса бака реализованы с помощью модуля «Логос Тепло».

Предполагается, что все тепло, выделяющееся при конденсации газа наддува (пропана) на поверхности диафрагмы, расходуется на прогрев пленки конденсата, материала диафрагмы и гидразина. Эти процессы моделируются на основе следующей системы уравнений [9]:

$$\begin{cases} \rho_w c_w \delta_w \frac{d\theta_w}{dt} = q_l - q_w \\ \lambda_l \frac{\theta_l - \theta_w}{\delta_l} = r \rho_l \frac{d\delta_l}{dt} \\ q_l = r \rho_l \frac{d\delta_l}{dt} \\ q_w = \alpha q_l \end{cases}, \quad (4)$$

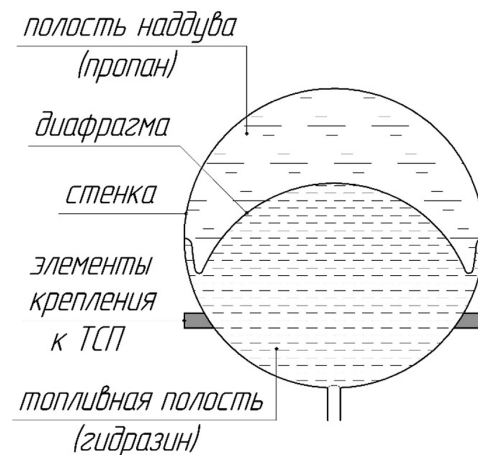


Рисунок 3. Бак КА

где q_l – тепловой поток, образующийся в результате конденсации газа наддува; q_w – поток тепла от диафрагмы в гидразин; ρ_w, c_w, T_w – плотность, удельная теплоемкость и температура материала диафрагмы; ρ_l – плотность вещества конденсата; δ_l – толщина пленки конденсата; r – теплота парообразования пропана; $\theta = T - T_\infty$, T_∞ – температура гидразина до начала его забора из бака; α – доля тепла, ушедшего в топливо вдоль стенки (диафрагмы). Результаты натурного расчета в виде различных конфигураций мембраны бака и полей температур в различные моменты времени приведены на рисунке 4.

Так как задача охватывает широкий диапазон физических процессов, ее решение сопряжено с применением различных модулей. Сопряжение расчетных модулей с авторской методикой и расчетом свободно-конвективного течения топлива в баке было проведено в модуле «Логос МИП». Помимо вышеописанного также была проведена верификация и валидация разработанной модели [10].

Постановка точного физического эксперимента в земных условиях для валидации результатов расчета не представляется возможной (или является крайне дорогостоящей) из-за существенного отличия ускорения свободного падения в срав-

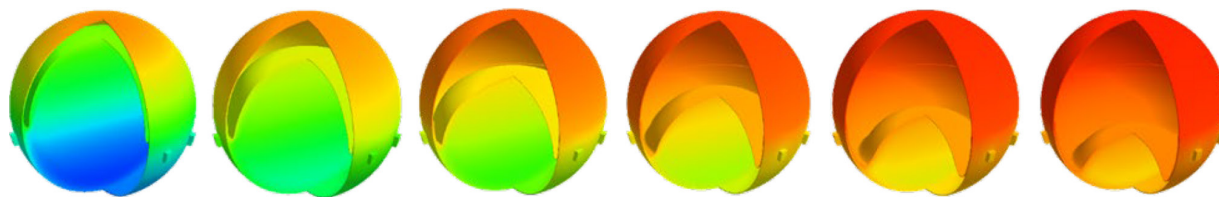


Рисунок 4. Конфигурации мембраны бака и поля температур в различные моменты времени

нении с условиями космического полета. Взамен этого была разработана экспериментальная установка – упрощенная модель бака [11], устройство и фотография которой представлены на рисунке 5.

Установка представляет собой измерительный бак, состоящий из прозрачной цилиндрической трубы, крышки и дна. Между дном бака и медной пластиной, имитирующей диафрагму бака и выступающей в качестве поверхности конденсации, установлены элементы Пельтье. Подача пропана в бак осуществляется через штуцер, соединяемый магистралью с резервуаром пропана. Для дренажа бак оборудуется выпускным штуцером и вентилем. Измерения температуры осуществляются

термопарами, а давление в баке – датчиком давления. Масса бака определяется весами.

Целью проведенных экспериментов было определение количества сконденсировавшегося на медной пластине пропана в условиях по температуре и давлению, имитирующего соответствующие условия на КА.

Сравнение результатов эксперимента и расчета по приведенной методике представлено на рисунке 6., где по оси X – отложено время эксперимента, а по оси Y – масса конденсата пропана на пластине.

Как видно из графика на рисунке 6, разработанная модель занижает массу конденсата на 10–

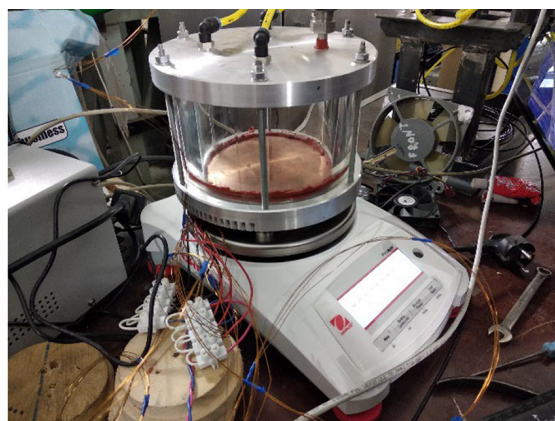
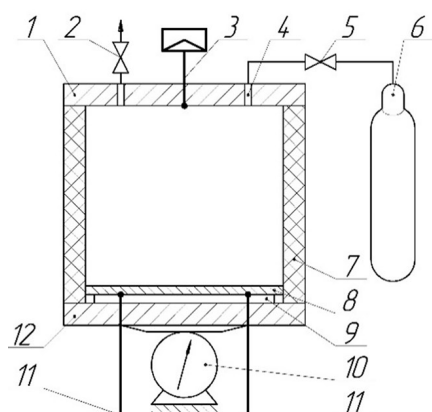


Рисунок 5. Экспериментальная установка: 1 – крышка бака; 2 – выпускной штуцер с вентилем; 3 – датчик давления; 4 – штуцер подачи пропана; 5 – вентиль; 6 – резервуар с пропаном; 7 – прозрачная цилиндрическая труба; 8 – медная пластина; 9 – модули Пельтье; 10 – лабораторные весы; 11 – термопары; 12 – дно бака

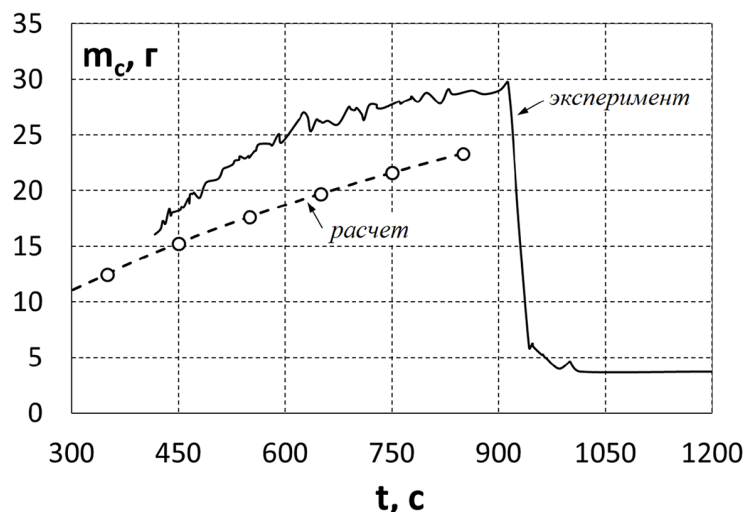


Рисунок 6. Изменение массы конденсата; линия – эксперимент, пунктир – расчёт

15 %, что может быть связано с такими факторами, как отсутствие учета в модели неоднородности параметров газообразного пропана вдоль поверхности медной пластины, а также некорректное определение поверхности выпадения пленки – нижняя часть боковой поверхности бака (контакт с медной пластиной) также принимала участие в ее формировании. Тем не менее результаты разработки модели можно считать удовлетворительными ввиду ее сложности и комплексности. А дальнейшее совершенствование целесообразно проводить совместно с постановкой экспериментов с учетом реальной конфигурации, свойств материалов и условий.

2.3. Моделирование теплового состояния жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ) КА. Последний пример показывает успешное применение принципов разрабатываемой платформы при моделировании теплового состояния ЖРДУ КА, в том числе его жидких компонентов, в зависимости от траектории полета и в условиях радиационного теплообмена. Целью расчетного анализа является определение теплового состояния ДУ на всех стадиях полета КА, а также определение алгоритма работы электронагревателя, обеспечивающего незамерзание топлива при минимальных уровнях его энергопотребления. Для этого рассматривается трёхмерная нестационарная задача сопряженного теплообмена, включающая в себя следующие процессы:

- теплопроводность материалов элементов конструкции;
- радиационный нагрев элементов конструкции от внешнего излучения, в частности от Солнца;
- перенос тепла излучением в системе многих тел (собственных элементов ДУ).

Перечисленные физические процессы оказывают существенное влияние друг на друга, а неучёт какого-либо из них может значительно повлиять на точность результатов расчета.

Основным решателем, моделирующим кондуктивное распространение тепла в сложной трехмерной геометрии ДУ, в данной задаче также является ПО трехмерного моделирования ЛОГОС. В качестве авторских методик используются более оптимальные для поставленной задачи методы расчета внешнего радиационного нагрева, а также виртуальные датчики температуры, по которым проводится оптимизация работы электронагревателя ДУ.

Для определения доли излучения одного тела, приходящейся на поверхность другого тела, для каждого элемента ДУ была введена поверхностная сетка. Для каждой грани такой сетки рассчитывались условия взаимного облучения от всех прочих граней, а также в направлении Солнца.

Результирующий тепловой баланс грани описывался следующим уравнением:

$$Q_i = Q_i^+ - Q_i^- = \sum_J \sum_{\Phi_j} \varepsilon_i \varepsilon_j \sigma_{CB} T_j^4 \frac{F_j \cos \theta_j \cdot F_i \cos \theta_i}{\pi R_{ij}^2} - \varepsilon_i \sigma_{CB} T_i^4 F_i, \text{ Вт} \quad (5)$$

где внешняя сумма представляет собой цикл по объектам расчетной геометрии, а внутренняя по граням J -ого объекта, $\varepsilon, \sigma_{CB}, \theta$ и R – коэффициенты черноты, постоянная Стефана-Больцмана, угол между направлением облучения и нормалью к грани и расстояние между гранями соответственно.

Радиационный поток от Солнца задавался в виде плоскопараллельного теплового потока с заданным направлением, меняющимся в соответствии с ориентацией КА и заданной величиной в зависимости от орбиты.

Учет затенения одних элементов конструкции другими для каждой грани основывался на построении луча, выходящего из этой грани в направлении ответной грани или Солнца, и проверки пересечения этого луча с другими элементами конструкции.

Благодаря такому подходу получены следующие результаты:

- определен уровень мощности и циклограмма работы электронагревателей, необходимые для обеспечения условий, при которых элементы конструкции с топливом смогут сохранять работоспособность;
- предложен способ снижения мощности электронагревателей за счет обеспечения заданной ориентации КА, при которой ДУ будет сохранять необходимые температурные условия в условиях солнечного излучения.

Результаты расчетов в виде полей температур поверхностей ДУ в различные моменты времени представлены на рисунке 7.

Заключение

Разрабатываемая платформа является комплексным информационным проектом с той точки зрения, что помимо программных компонентов для ее успешного функционирования нужно проведение большого объема работ по валидации разрабатываемых алгоритмов, а также более тесное взаимодействие между участниками кооперации: конструкторскими бюро, экспериментаторами и разработчиками ПО. В настоящее время создана основа платформы в виде отдельных специализированных программных модулей, валидированных на модельных экспериментах, и продолжается ее совершенствование по следующим направлениям:

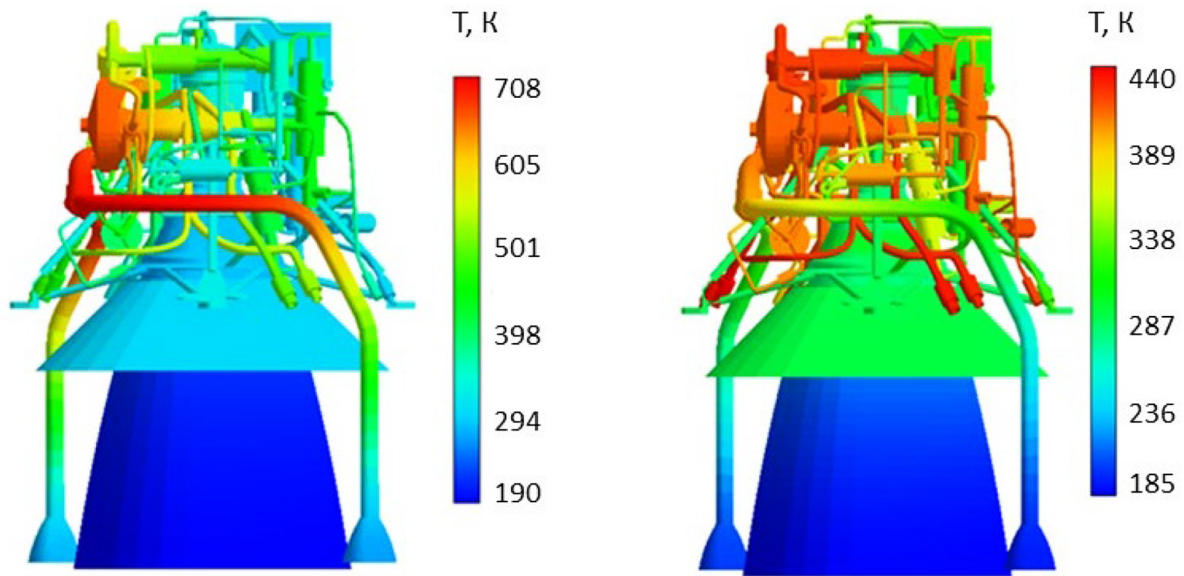


Рисунок 7. Поле температур ДУ в различные моменты времени

- Расширение функционала и классов решаемых задач, в том числе в части моделирования двухфазных течений, процессов взаимодействия высокотемпературных химически активных сред с материалами, процессов турбулентного горения и некоторые другие.
- Разработка новых быстродействующих алгоритмов для построения сеточных областей и алгоритмов интерполяции больших массивов данных для решения задач с подвижными границами.
- Формирование типовых моделей агрегатов РД для наполнения баз данных и библиотек ПО.

Завершающим этапом планируется разработка интерфейса пользователя, объединяющего функционал отдельных модулей и программ.

Также следует отметить, что в представленных примерах, наряду с решением прикладных задач, результаты моделирования позволили сформулировать практические рекомендации и выявить ряд новых эффектов и физических закономерностей, свойственных сложным техническим устройствам. Наконец, по результатам проведенных работ уже был сформирован ряд поручений по доработке некоторых алгоритмов программных модулей ЛОГОС и SimInTech.

Список литературы

- [1] Погосян М. А., Савельевских Е. П., Шагалиев Р. М., Козелков А. С., Стрелец Д. Ю., Рябов А. А., Корнев А. В., Дерюгин Ю. Н., Спиридонов В. Ф., Цибереv К. В. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2013, № 2. С. 3–18.
- [2] Иванова Т. Г., Стрюков Я. А., Берг Д. А., Каракотин И. Н. Перспективы внедрения программного комплекса «Логос» и методика его тестирования для аэродинамического и теплового проектирования ракет-носителей // XIV Королёвские чтения: международная молодежная научная конференция, посвящённая 110-летию со дня рождения академика С. П. Королёва, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли: в 2 томах, Самара, 03–05 октября 2017 года. Том 1. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, 2017. С. 198.
- [3] Корнев А. В., Козелков А. С. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2021. Т. 17, № 2. С. 250–264
- [4] Кошляков В. В., Готовцев К. В., Захаренков Л. Э., Каревский А. В., Кирюшин Е. Н., Ловцов А. С., Ошев Ю. А., Семёнкин А. В., Солодухин А. Е., Федотов С. Ю., Федюнин С. Ю., Цветков А. Г. Экспериментальная стендовая база АО ГНЦ «Центр Келдыша» для проведения испытаний мощных энергодвигательных установок // Космическая техника и технологии. 2022, № 1(36). С. 80–95.
- [5] Абдуллин М. Ф., Барабанов Р. А., Кварацхелия Д. Д., Филимонкин Е. А., Китаев М. В., Корнев А. В., Никитин М. В., Саганов Е. Б. Пакет программ «Логос». Функциональные возможности для моделирования статического деформирования слоистых композиционных материалов на основе оболочечного конечного элемента // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2020, № 2. С. 60–70.

- [6] Моделирование динамики полёта летательного аппарата с учетом работы силовой установки и органов управления / А. В. Саразов, А. С. Козелков, А. А. Уткина, А. В. Корнев // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2022. Т. 1. С. 203–204.
- [7] Ананьев А. В., Лаптев И. В., Цырендоржиев Э. С. Тепловая модель термokatалитического двигателя на гидразине // *Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену: Материалы конференции*. В 2 т. Москва, 17–22 октября 2022 года. Том 1. Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. С. 224–225.
- [8] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023667463 Российская Федерация. Программа расчёта параметров фильтрационного горения в камере сгорания ЖРДМТ: № 2023666617: заявл. 01.08.2023; опубл. 15.08.2023 / А. В. Ананьев, А. А. Куроедов, И. В. Лаптев, Э. С. Цырендоржиев; заявитель Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша».
- [9] Куроедов А. А., Черкасов С. Г., Лаптев И. В., Моисеева Л. А. Конденсация газа наддува в топливном баке с разделительной диафрагмой в условиях невесомости // *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т. 13, № 4. С. 155–163.
- [10] Петрова С. В., Городнов А. О., Лаптев И. В. Модель сопряженного теплообмена в ракетном баке при отборе топлива с одновременным наддувом // *Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIV школы семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А. И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В. Е. Алемасова*, Казань, 23–27 мая 2023 года. Казань: АО Информационно-издательский центр, 2023. С. 256–257.
- [11] Определение условий, обеспечивающих постоянство давления паров сжиженного газа в топливном баке при внешнем теплообмене и изменении объёма наддувной полости / ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Исполнители Ананьев А. В., Васютин А. С., Городнов А. О. Инв. № 7428. 2020. 70 с.

CREATING A DOMESTIC PLATFORM FOR MATHEMATICAL MODELLING AND ENGINEERING ANALYSIS TOOLS TO SOLVE PRACTICAL PROBLEMS RELATED TO THE DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGIES

**A. Sh. Kozaev, V. V. Mironov,
A. S. Negodyaev, E. S. Tsirendorzhiev**
*JSC State Scientific Center of the Russian Federation
“Keldysh Research Center”
Moscow, The Russian Federation*

The purpose of the work is to create a domestic software platform for solving mathematical modeling problems in the industry. It is known that the most important task of reducing costs and meeting deadlines when creating new products is the development of advanced mathematical models which are quick-response enough and adequately approximate real processes. To solve this problem, the Keldysh Research Center has been implementing a number of projects aimed at the development of the domestic platform for the mathematical modeling and engineering analysis tools to provide practical issues for the development and optimization of parameters primarily for rocket engines and space power systems. A set of fundamental principles taken into account while developing the platform is formulated in the work. Firstly, this is the development and application of the only domestic software tools and complex solutions based on specialized software of Keldysh Research Center, as well as commercial domestic software

products. Secondly, the integration of components into a single complex of mathematical models and software with automated calculations. Besides that, the validation of mathematical models and software created for modes and conditions of practical tasks to ensure a given accuracy. The authors provide examples of successful application of the developed platform in relation to the problems of development and optimization of spacecraft. At the moment, along with solving applied problems, the modeling results have already made it possible to formulate a number of practical recommendations, as well as to identify a number of new effects and physical patterns inherent in the complex technical devices considered.

Keywords: Mathematical modelling, engineering analysis, CAE, computational experiment, software, design automation, predictive modelling.

References

- [1] Pogosyan M.A., Savelevskikh E.P., Shagaliev R.M., Kozelkov A.S., Strelets D. Yu., Ryabov A.A., Kornev A.V., Deryugin Yu.N., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V. Application of Domestic Supercomputer Technologies for the Creation of Promising Samples of Aviation Equipment // VANT Journal, ser. Mathematical modelling of physical processes, 2013, No. 2, pp. 3–18.
- [2] Ivanova T.G., Stryukov Ya. A., Berg D.A., Karakotin I.N. Prospects for the Implementation of the Logos Software Package and its Testing Methodology for Aerodynamic and Thermal Design of Launch Vehicles // XIV Korolyov readings: international youth scientific conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician S.P. Korolev, the 75th anniversary of KuAI-SGAU-SamSU-Samara University and the 60th anniversary of the launch of the first artificial Earth satellite: in 2 volumes, Samara, October 03–05, 2017. Volume 1. – Samara: Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 2017. p. 198.
- [3] Kornev A.V., Kozelkov A.S., The Use of Domestic Supercomputer Technologies to Create Promising Models of Aviation Equipment // Modern information technologies and IT education. 2021. vol. 17, No. 2. pp. 250–264
- [4] Koshlakov V.V., Gotovtsev K.V., Zakharenkov L.E., Karevsky A.V., Kiryushin E.N., Lovtsov A.S., Oshev Yu.A., Seminkin A.V., Solodukhin A.E., Fedotov S. Yu., Fedyunin S. Yu., Tsvetkov A.G. The Experimental Bench Base of JSC “Keldysh Research Center” for Testing Powerful Power Propulsion Systems // Space engineering and technologies. 2022, No. 1(36), pp. 80–95.
- [5] Abdullin M.F., Barabanov R.A., Kvaratskhelia D.D., Filimonkin E.A., Kitaev M.V., Kornev A.V., Nikitin M.V., Saganov E.B. The Logos Software Package. Functional Capabilities for Modelling Static Deformation of Layered Composite Materials Based on a Shell Finite Element // Journal of VANT, ser. Mathematical modelling of physical processes, 2020, No. 2, pp. 60–70.
- [6] Modelling of Flight Dynamics of an Aircraft Taking into Account the Operation of the Power Systems and Controls / A.V. Sarazov, A.S. Kozelkov, A.A. Utkina, A.V. Kornev // Aerospace engineering, high technologies and innovations. 2022. Vol. 1. pp. 203–204.
- [7] Ananyev A.V., Laptev I.V., Tsirendorzhiev E.S. A Thermal Model of a Thermocatalytic Engine on Hydrazine // Proceedings of the Eighth Russian National Conference on Heat Exchange: Proceedings of the Conference. In 2 volumes, Moscow, October 17–22, 2022. Vol. 1. Moscow: National Research University “MEI”, 2022. pp. 224–225.
- [8] Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2023667463 Russian Federation. The program for calculating the parameters of filtration combustion in the combustion chamber of the LRE Gorenje: No. 2023666617: application. 08/01/2023: publ. 08/15/2023 / A.V. Ananyev, A.A. Kuroedov, I.V. Laptev, E.S. Tsirendorzhiev; applicant Joint Stock Company State Scientific Center of the Russian Federation “Keldysh Research Center”.
- [9] Kuroedov A.A., Cherkasov S.G., Laptev I.V., Moiseeva L.A. Condensation of Pressurized Gas in a Fuel Tank with a Separating Diaphragm in Zero Gravity // Thermal processes in engineering. 2021. vol. 13, No. 4. pp. 155–163.
- [10] Petrova S.V., Gorodnov A.O., Laptev I.V. Model of Conjugate Heat Transfer in a Rocket Tank during Fuel Extraction with Simultaneous Supercharging // Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power systems: Abstracts of the XXIV school of the seminar of young scientists and specialists under the leadership of the Academy of Sciences. RAS A.I. Leontiev, dedicated to the 100th anniversary of Academician V.E. Alemasov, Kazan, May 23–27, 2023. Kazan: JSC Information and Publishing Center, 2023. pp. 256–257.
- [11] Determination of conditions ensuring constant pressure of liquefied gas vapor in the fuel tank during external heat exchange and changing volume of the pressurized cavity / State Scientific Center FSUE “Keldysh Research Centre”. Executors are Ananyev A.V., Vasyutychev A.S., Gorodnov A.O. Inv. № . 7428, 2020, 70 p.

Сведения об авторах

Козаев Алан Шотаевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории АО ГНЦ «Центр Келдыша». Окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана в 2010 году. Область научных интересов: энергодвигательные установки летательных аппаратов, космическая техника, энергетика, композиционные материалы.

Миронов Вадим Всеволодович – доктор технических наук, профессор кафедры тепловых процессов Московского физико-технического института, заместитель генерального директора-начальник отделения АО ГНЦ «Центр Келдыша». Окончил Московский физико-технический институт с отличием в 1981 году. Область научных интересов: энергодвигательные установки летательных аппаратов, космическая техника, энергетика, физика плазмы, физическая кинетика, тепловая защита, композиционные материалы, математическое моделирование, предиктивное моделирование, вычислительная математика.

Негодяев Андрей Сергеевич – научный сотрудник АО ГНЦ «Центр Келдыша», аспирант кафедры тепловых процессов Московского физико-технического института. Окончил Московский физико-технический институт с отличием в 2021 году. Область научных интересов: космическая техника, энергетика, физика плазмы.

Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич – инженер-программист АО ГНЦ «Центр Келдыша», аспирант кафедры тепловых процессов Московского физико-технического института. Окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана в 2021 году. Область научных интересов: энергодвигательные установки летательных аппаратов, космическая техника, математическое моделирование.