

К ВЫБОРУ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ТРИГИДРАТА НИТРАТА ЛИТИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ СИМУЛЯЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



Т.А. Шеленкова¹,
аспирант,
SenshinaTA@laspace.ru;
T.A. Shelenkova

Одним из оптимальных подходов к выбору проектных параметров теплового аккумулятора может быть применение программ симуляции физических процессов с использованием трёхмерной модели. Однако применяемые сегодня программные продукты теплового моделирования, такие как Star-CCM+, FLOEFD или ЛОГОС, либо не реализуют расчёт фазового перехода, либо требуют слишком больших аппаратных ресурсов при расчёте сложных многоэлементных конструкций. В статье приведены вопросы использования программ для моделирования тепловых аккумуляторов и способы их решения. Представлен анализ результатов расчётов в программах, даны рекомендации по условиям использования программ для решения подобных задач.

¹ АО «НПО Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

TO THE SELECTION OF DESIGN PARAMETERS OF A HEAT STORAGE BASED ON LITHIUM NITRATE TRIHYDRATE USING SOFTWARE PACKAGES FOR SIMULATING PHYSICAL PROCESSES



Ю.В. Панин¹,
кандидат
технических наук,
PaninIUV@laspace.ru;
Yu.V. Panin

One of the optimal approaches to choosing the design parameters of heat storage may be the use of programs for simulating physical processes using a three-dimensional model. However, thermal modeling software products used today either do not implement phase change calculations or require too large hardware resources when calculating complex multicellular structures. The article presents problematic issues of using programs for modeling heat storage and ways to solve them. An analysis of the calculation results in some programs is presented, and recommendations are given on the conditions for using programs to solve such problems.

Lavochkin Association, JSC, Russia, Moscow region, Khimki.

Ключевые слова:

*теплоаккумулирующий материал;
фазовый переход;
тепловой расчёт;
тепловой аккумулятор;
тепловая модель;
граница раздела фаз.*

Key words:

*heat storage material;
phase change;
thermal calculation;
heat storage;
thermal model;
phase boundary.*

DOI: 10.26162/LS.2024.27.53.015

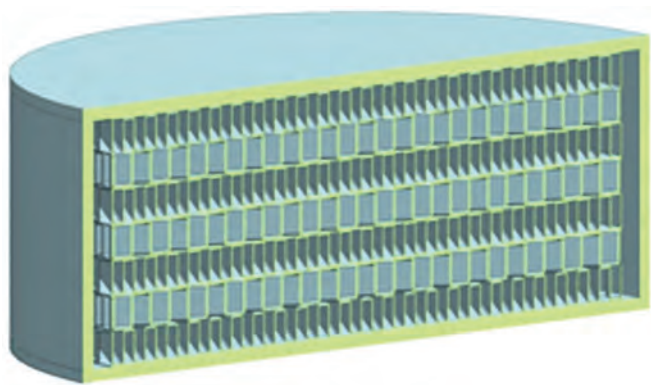
введение

Эффективность работы теплового аккумулятора (ТА) сопряжена с выбором проектных параметров, таких как теплофизические параметры теплоаккумулирующего материала (ТАМ), конфигурация расположенных внутри корпуса структур, формы и толщины корпуса, места подвода и отвода тепла. Решение задачи выбора проектных параметров и оценки их эффективности требует детального теплового расчёта ТА и моделирования его работы. В общем виде расчёт ТА сводится к определению времени его работы и распределению температурных полей в зонах подвода тепла, и объёме ТА на основе решения задачи Стефана, описывающей изменение фазового состояния вещества с подвижной границей раздела фаз. Под границей раздела фаз подразумевают область между разными состояниями вещества, например «жидкость – твёрдое тело», в которой происходит скачок энергии за счёт внутренних преобразований.

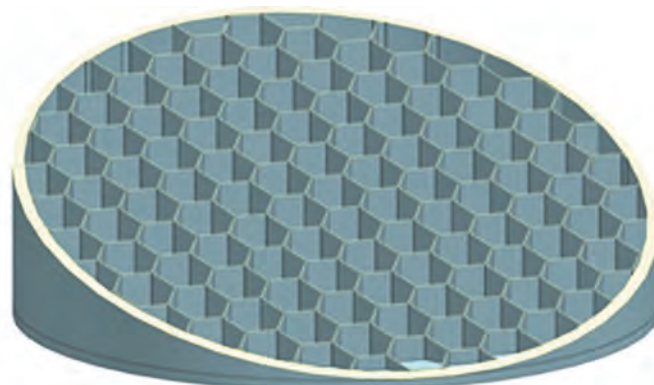
Выбор проектных параметров ТА, расчёт определения эффективности конструкции является сложной комплексной задачей. В настоящее время существуют только приближенные численные методы расчёта ТА определённых конфигураций в двумерной

постановке задачи. Задача моделирования ТА решается только приближенными методами. В монографии (Алексеев В.А., 2016), а также диссертациях (Куколев М.И., 1996; Габитов И.А., 2017) и публикациях (Исмаилов Т.А. и др., 2015; Васильев Е.Н. и др., 2017) математические модели описаны в виде систем дифференциальных уравнений в двумерной постановке. Применение этих моделей для полноценных расчётов ТА с учётом сложных конструкций, неравномерных тепловых нагружений и непостоянства свойств ТАМ затруднительно. В руководящем документе (РД 92-0189-88) представлен автоматизированный расчёт оребрённого ТА с программным кодом. Данная программа предназначена для расчёта определённой конструкции ТА, т.е. не адаптируется к изменению конфигурации ТА.

Тем не менее решение этих задач с использованием трёхмерной модели может быть успешно реализовано. Современные программы для симуляции физических процессов теплового моделирования позволяют решать достаточно широкий круг задач, в том числе определять температуры в каждой точке объёма плавящегося материала, а также распределение фаз и их границы раздела в объёме замкнутой области.



а



б

а – модель ТА с набором слоёв – гофр;

б – модель ТА с сотовым заполнителем.

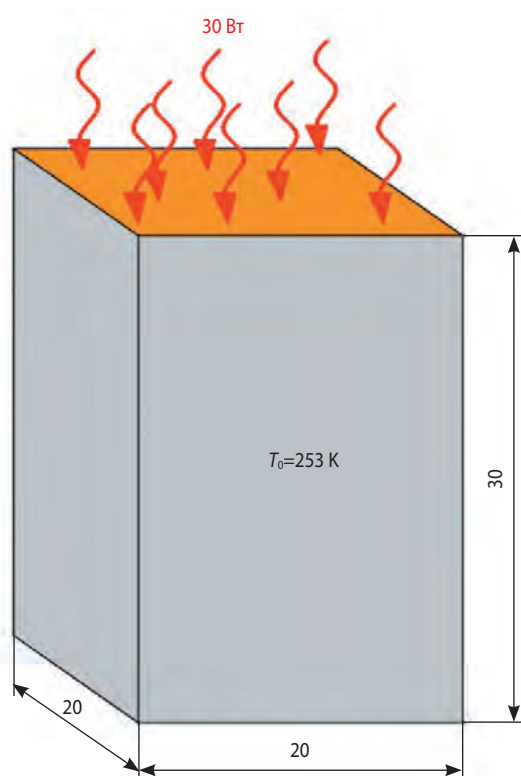
рисунок 1. Примеры моделей ТА со сложными внутренними структурами

Среди рассматриваемых систем машинного проектирования можно выделить программу Star-CCM+, имеющую широкую базу моделей и нагрузжений для выполнения расчётов с учётом фазового перехода. Второй программный комплекс, заслуживающий внимания – ЛОГОС. Несмотря на большой объём заложенных в программу физических моделей, их применение для конкретной инженерной задачи по расчёту проектных параметров ТА является задачей нетривиальной, так как расчёт каждого устройства имеет ряд особенностей в части использования выбранного программного продукта.

1. Постановка задачи

Корректно проведённый расчёт ТА с учётом всех требований к конструкции позволяет получить данные о распределении показателей, необходимых для анализа ТА на этапе проектирования системы терморегулирования космического аппарата (КА), что позволяет оптимизировать построение всей системы терморегулирования КА за счёт получения новых недостающих знаний до начала экспериментальной отработки ТА.

Проведение расчёта ТА в современных программах требует от инженера высокой квалификации, понимания интерфейса и алгоритмов программы в сочетании с широкими конструкторскими знаниями (Кошляков В.В., 2022), т.к. в процессе расчёта возникает множество вопросов выбора и задания геометрии, сетки и граничных условий.



рисунк 2. Расчётная схема ТА

К тому же внутренние конструкции ТА, применяемые в космической технике, могут иметь достаточно сложные многоэлементные конфигурации, необходимые для равномерного распределения ТАМ в условиях невесомости, например, многослойные пакеты из гофр или соты, которые приведены на рисунке 1, а также пространственные нелинейные структуры, получаемые с помощью современных аддитивных технологий (Сеньшина Т.А. и др., 2023). Для получения корректного результата необходимо учитывать, что расчёт каждой конструкции не является типовым и не может быть проведён только за счёт заложенных в программу стандартных алгоритмов.

Кроме того, в практической постановке задачи актуальным является определение возможности использования программ, позволяющих учесть фазовый переход, типа Star-CCM+ для расчёта ТА со сложными внутренними структурами не только в части получаемых проектных параметров и достоверности результатов, но и в части скорости вычисления и аппаратной производительности оборудования, применяемого на предприятиях отрасли для решения инженерных задач.

В связи с этим в работе была поставлена задача определения возможности применения CAE программ для решения задач с фазовым переходом плавление/затвердевание для моделирования ТА на примере расчёта нагрева объёма вещества тригидрата нитрата лития с определением необходимых параметров в программе Star-CCM+, а также адаптация к решению задачи фазового перехода программы FLOEFD, подтверждение корректности расчётов на основе математического эксперимента.

Для анализа в работе была выбрана конструкция ТА, представляющая собой параллелепипед с размерами $30 \times 20 \times 20$ мм, состоящий из рабочего тела – тригидрата нитрата лития ($\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), где к одной стенке осуществляется подвод тепла мощностью 30 Вт, а остальные стенки адиабатические. В расчёте задаётся начальная температура 253 К, соответствующая минимальной допустимой температуре посадочной поверхности приборов на космических аппаратах. Завершение расчёта происходит при завершении процесса плавления рассматриваемого объёма рабочего тела. Расчётная схема ТА показана на рисунке 2.

2. Проблемные вопросы моделирования ТА в Star-CCM+

Программное обеспечение Simcenter Star-CCM+ представляет собой систему автоматизированного проектирования для решения междисциплинарных задач как в механике жидкости, так и твёрдых сред в рамках единого интегрированного пользовательского интерфейса.

В решаемой задаче вещество пребывает в двух состояниях: твёрдое, жидкое. При переходе из одного агрегатного состояния в другое в веществе выделяется скрытая теплота фазового перехода. При решении задачи вводится допущение: плотность рабочего тела постоянная и равна средней плотности жидкой и твёрдой фаз: 1450 кг/м^3 .

Свойства тригидрата нитрата лития, заданные для расчёта:

- температура плавления – затвердевания 30°C ;
- теплопроводность в жидком состоянии $0,43 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- теплопроводность в твёрдом состоянии $0,64 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- теплоёмкость $1400 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;
- плотность 1450 кг/м^3 ;
- скрытая теплота плавления 297200 Дж/кг .

Для решения задачи в Star-CCM+ использовались следующие параметры, вводимые в модель: равномерная сетка с многогранными ячейками размером $0,5 \text{ мм}$, с шагом по времени 1 с .

В результате расчёта получены изображения с изменением положения границы раздела фаз в зависимости от времени (таблица 1) и распределение температур по времени (таблица 2). На изображениях с положением границы раздела фаз красной зоне соответствует твёрдая фаза, синей – жидкая. На момент времени 1000 с все вещество расплавлено и находится в жидком состоянии.

Необходимо отметить, что загрузка в программу Star-CCM+ полноразмерной модели ТА с внутренней структурой, заполненной ТАМ, а также элементами крепления оборудования на нём представляет техническую сложность, а иногда и невозможность проведения теплового расчёта. Конструкции ТА, как на рисунке 1, имеющие тонкие многоэлементные структуры, при расчёте разбиваются примерно на 24 миллиона конечных элементов. Программа Star-CCM+ затруднительно работает с большим объёмом тонкостенных элементов, что приводит к использованию всей оперативной памяти персонального компьютера и невозможности дальнейшего расчёта. Решение данной проблемы возможно путём увеличения вычислительных мощностей, например за счёт применения вычислительного кластера, что позволяет решить данную задачу за несколько дней, тем не менее его аппаратные мощности не безграничны, а усложнение модели приведёт к ещё большим временным затратам. Другой вариант – упрощение модели до отдельных узлов, но это может привести к снижению точности получаемого результата. В связи с этим рассмотрим возможность использования для этих целей некоторых допущений в расчёте, позволяющих применять менее ресурсоёмкие программы, например FLOEFD.

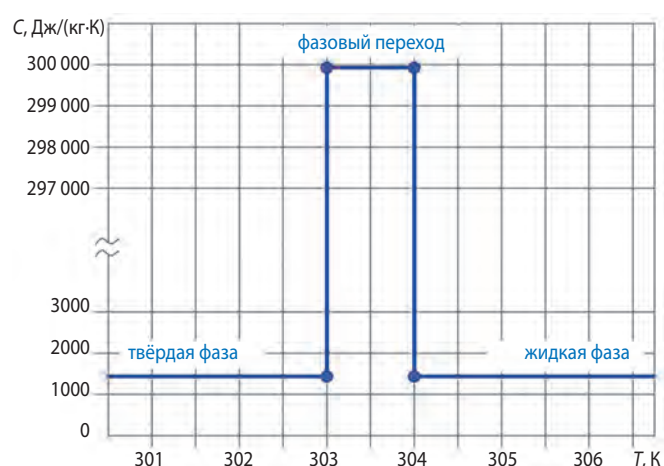


рисунок 3. График зависимости удельной теплоёмкости вещества от температуры для тригидрата нитрата лития

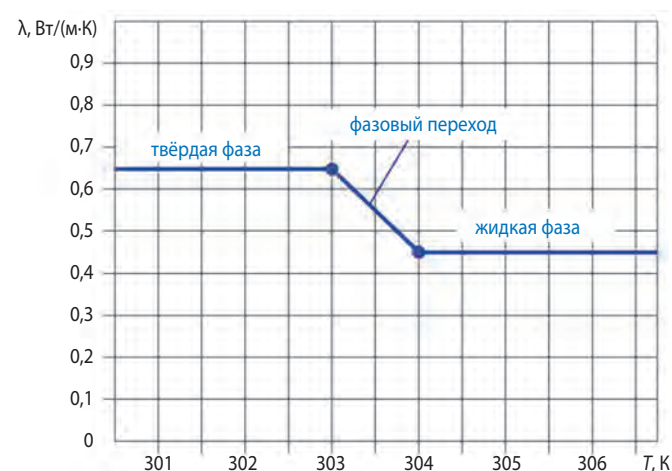


рисунок 4. График зависимости теплопроводности вещества от температуры

3. Адаптация моделирования фазового перехода во FLOEFD

Simcenter FLOEFD™ software for NX™ является программным обеспечением для расчёта движения текучих сред (газа или жидкости) внутри и снаружи моделей, исследования теплообмена этих моделей за счёт конвекции, излучения и проводимости с использованием технологии вычислительной гидродинамики.

В программе FLOEFD не заложена возможность моделирования фазового перехода «твёрдое тело – жидкость». В связи с этим было предложено использовать подход к моделированию скрытой теплоты плавления-затвердевания вещества заданием скачка функции удельной теплоёмкости от температуры, как показано на рисунке 3. Это допущение было представлено в статье (Алексеев В.А., 2016; Васильев Е.Н. и др., 2017) при составлении математической модели для численного решения аналогичных задач, но не применялось для расчёта в программных пакетах.

таблица 1 – Изменение положения границы раздела фаз (твёрдое тело – жидкость) по времени (в сечении)

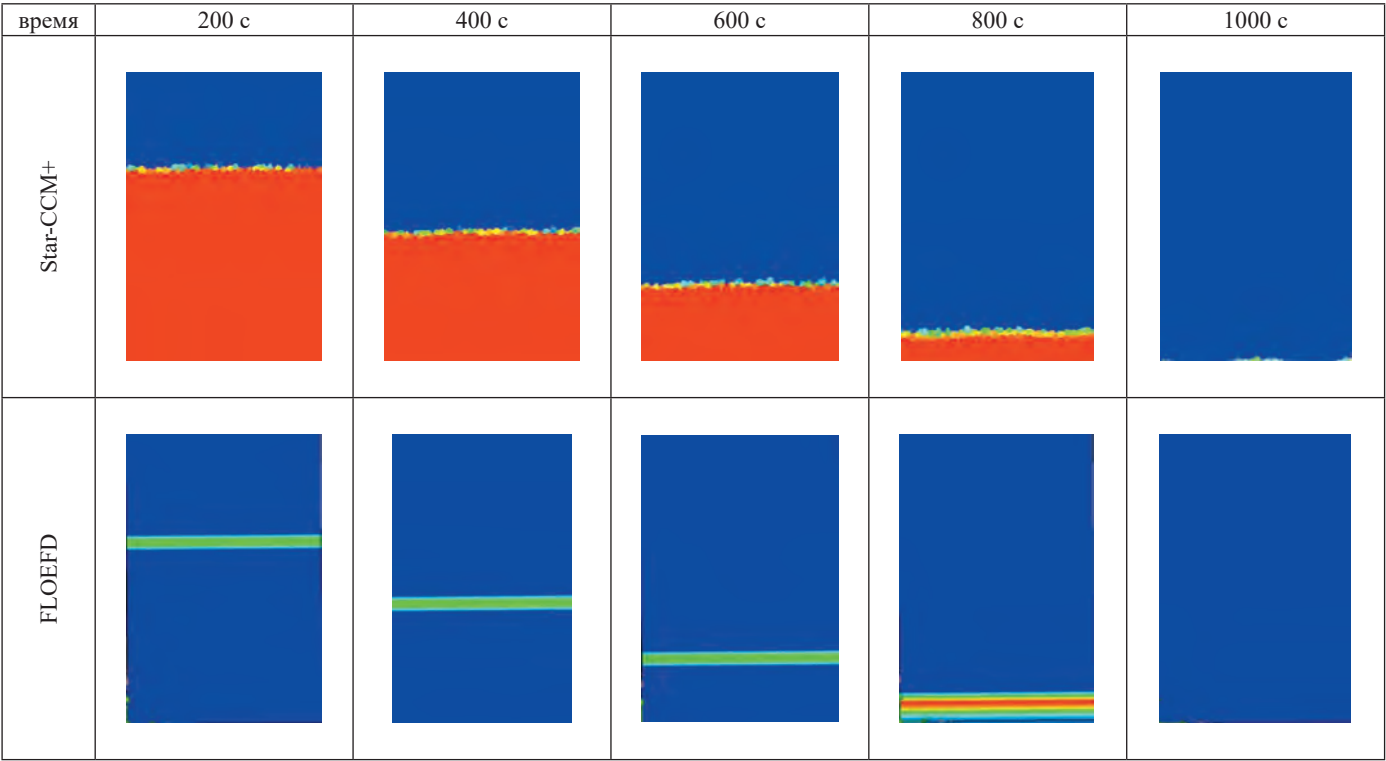
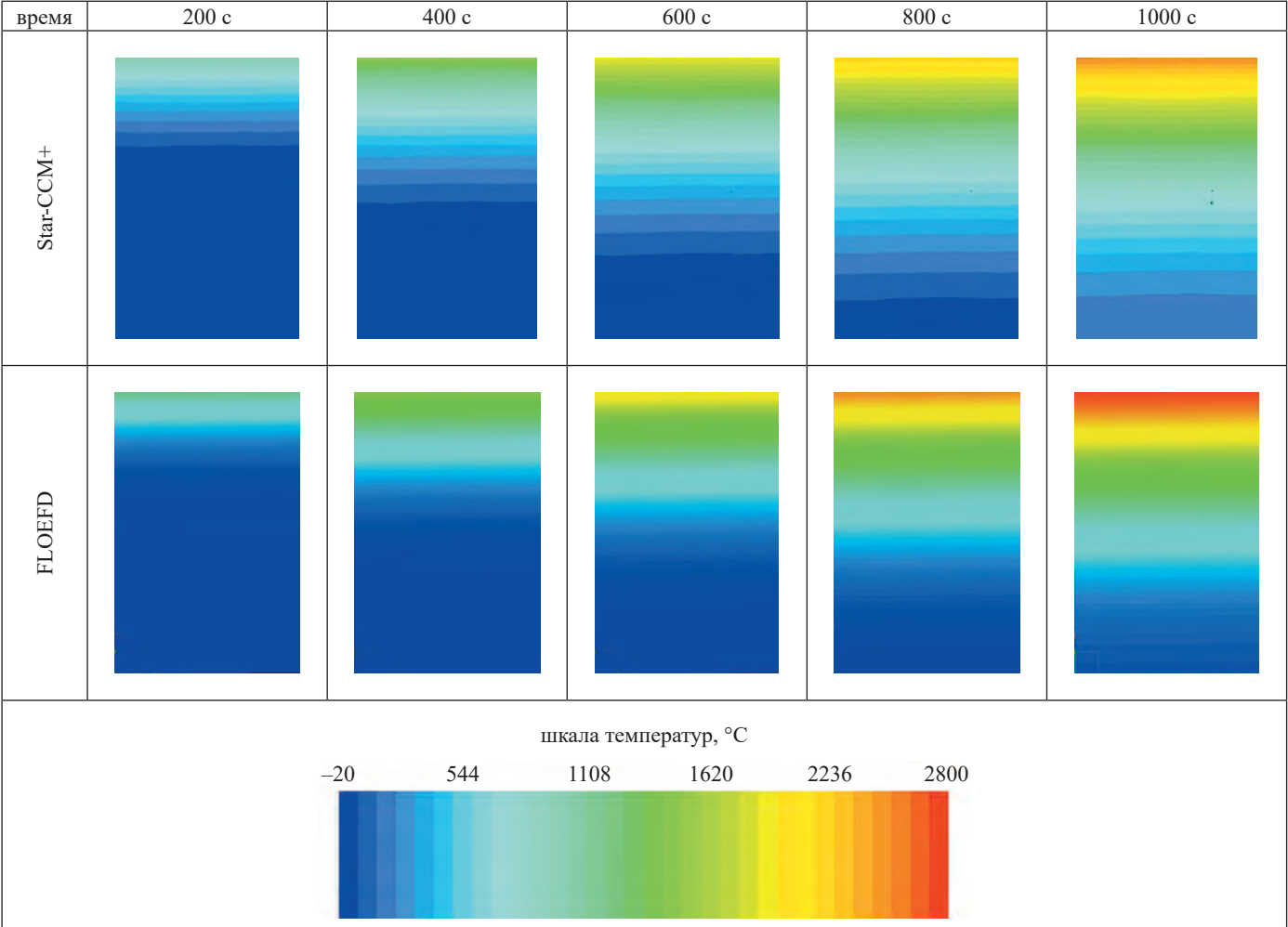


таблица 2 – Распределение температур по времени (в сечении)



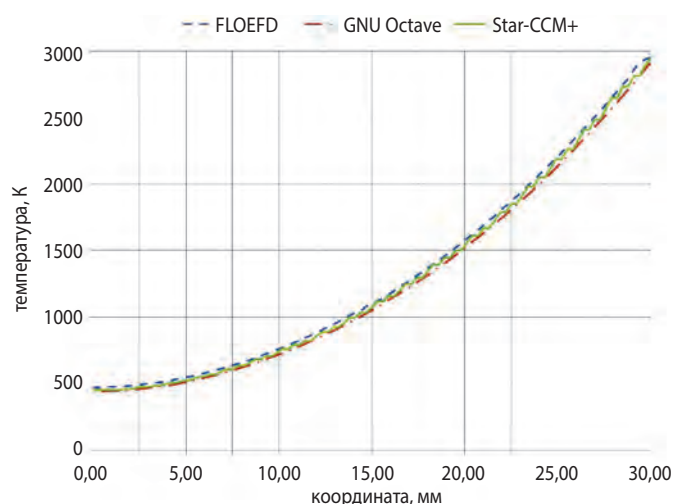


рисунок 5. Графики распределения температур по сечению модели в зависимости от координаты для момента времени $t=1000$ с

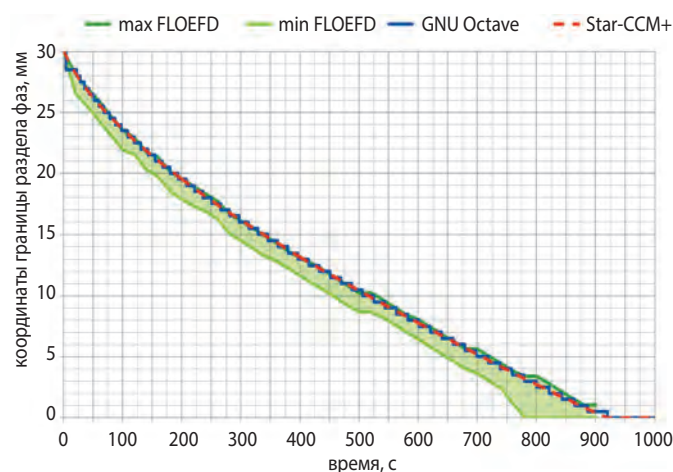


рисунок 6. Графики изменения положения границы раздела фаз по времени

В момент фазового перехода удельная теплоёмкость рабочего тела стремится к бесконечному значению, поэтому для реализации расчёта вводится допущение – эффективная теплоёмкость на определённом температурном диапазоне. Как показано на графике (рисунок 3) для твёрдой и жидкой фаз удельная теплоёмкость составляет $1400 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$, при этом задаётся эффективная удельная теплоёмкость $297200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ при фазовом переходе на температурном диапазоне от 303 до 304 К. Таким образом, вещество моделируется как твёрдое тело и при нагреве выше температуры плавления не переходит в жидкое состояние, но изменяются величины теплофизических характеристик: теплоёмкость и теплопроводность.

Плотность вещества задаётся равной 1450 кг/м^3 как среднее между плотностью жидкой и твёрдой фаз, т.к. во FLOEFD решаем задачу твёрдого тела с постоянной плотностью.

Теплопроводность для твёрдой и жидкой фаз составляет $0,64 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ и $0,43 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, а для фазового перехода в диапазоне температур 303–304 К задаётся среднее значение между фазами как показано на рисунке 4.

В результате расчёта получены изменения положения границы раздела фаз в зависимости от времени (таблица 1) и распределение температур по времени (таблица 2). Граница раздела фаз на изображениях представлена зелёно-красной линией, отличной от синей области твёрдого и жидкого вещества. Снизу от границы вещество твёрдое, сверху – жидкое. Через 1000 с все вещество расплавлено и находится в жидком состоянии.

Сопоставление результатов расчётов в программе Star-CCM+ и FLOEFD показывает их сходимость в части времени и распределения температур и корректность предложенного подхода. Более подробно сходимость результатов различных подходов будет показана в разделе 4 с учётом численного решения задачи Стефана.

Оценка правомерности применения допущения – скачка теплоёмкости во FLOEFD и верности результатов, полученных в программах симуляции физических процессов, была проведена на основании расчёта численным методом системы дифференциальных уравнений, описывающих нагрев аналогичной модели как в Star-CCM+ и FLOEFD, в одномерной постановке. Верификация использованной одномерной математической модели на основании экспериментальных данных была приведена в монографии (Алексеев В.А., 2016). Расчёт проводился в программе GNU Octave.

4. Обсуждение результатов расчётов

Полученные в результате численных расчётов данные в GNU Octave, Star-CCM+ и FLOEFD были сгруппированы в графики в одной системе координат для качественного, наглядного сравнения. На рисунке 5 можно увидеть, что распределения температур по сечению визуально близки к совпадению.

На рисунке 6, отражающем положение границы раздела фаз, линия графика Star-CCM+ визуально проходит в границах ступенчатого спуска решения GNU Octave, и время наступления полного расплава материала одинаково. Из-за введённых допущений во FLOEFD мы не получаем чёткой границы раздела фаз, а наблюдаем область, в которой происходит фазовый переход, что было видно на изображениях в таблице 2. Поэтому при расчёте мы получили минимальное и максимальное значение положения границы фазового перехода, ограничивающие зону, в пределах которой вещество находится в переходном агрегатном состоянии (переходная зона).

Данная область соответствует полю температур вещества в пределах от 303 до 304 К. Процесс плавления можно считать законченным, если вещество поглотило энергию фазового перехода, следовательно, граница раздела фаз будет соответствовать графику *max FLOEFD*, когда теплоёмкость вещества меняется от значения для фазового перехода к значению для жидкости.

Для количественной оценки точности полученных результатов был проведён расчёт относительной погрешности значений расчётов *FLOEFD* и *Star-CCM+* по сравнению со значениями расчёта, проведённого в *GNU Octave*. Погрешность расчёта средней температуры модели в *Star-CCM+* составляет не более 1,5%, а во *FLOEFD* – не более 5%. Погрешность расчёта температуры по сечению модели на момент окончания расчёта в *Star-CCM+* составляет не более 2,5%, а во *FLOEFD* – не более 7,25%. Погрешность расчёта положения границы раздела фаз в *Star-CCM+* до момента времени 700 с составляет не более 5%. После 700 с погрешность возрастает, но это связано с особенностями взаимного расположения графиков, а также временем наступления полного расплава материала, что является особенностями расчёта, которые приводят к скачку погрешности, но не является ошибкой.

заключение

Рассмотрены проблемные вопросы расчёта ТА для выбора проектных параметров с использованием программ симуляции физических процессов. Предложены варианты решения проблем нехватки аппаратных ресурсов при моделировании ТА со сложными многоячеистыми структурами.

Проведена адаптация заложенной в программе *FLOEFD* математической модели путём введения скачка характеристик теплоёмкости для возможности проведения расчёта фазового перехода. Указанное допущение позволило получить результаты расчёта параметров распределения температуры и положения границы раздела фаз с малой погрешностью. Программа хорошо применима для быстрых оценочных расчётов. Тем не менее использование *FLOEFD* с введённым скачком теплоёмкости ограничено расчётом плавления – затвердевания, так как в ней нельзя учитывать сочетание плавление – гравитация – конвекция.

Адекватность и корректность введённых допущений были подтверждены на примере простой задачи расчёта объёма рабочего тела на основе численного решения одномерной задачи плавления ТА, приведённой в монографии (Алексеев В.А., 2016) и подтверждённой при сравнении с экспериментальными данными.

Проведён анализ перспективы использования программы *Star-CCM+*, где заложен учёт фазового перехода, для более детальной проработки конструкции и проектных параметров ТА, включая оптимизацию внутренних структур. Тем не менее к недостатку её использования следует отнести потребность в большой вычислительной мощности, что накладывает ограничения для её применения при текущих инженерных расчётах полноразмерных многоэлементных конструкций.

список литературы

Алексеев В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов. Курск: Наукком, 2016. 248 с.

Васильев Е.Н., Деревянко В.А. Расчет температурных полей в тепловом аккумуляторе с фазовым переходом // Материалы XXI междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2 ч. / Под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 08–11 ноября 2017 г. С. 230-232.

Габитов И.А. Системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры на базе плавящихся тепловых аккумуляторов с дополнительным воздушным и жидкостным теплосъёмом: дисс. канд. техн. наук: 05.04.03. Махачкала, 2017. 127 с.

Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавящихся тепловых аккумуляторов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. № 36. С. 38-44. URL: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-36-1-38-44> (дата обращения: 01.08.2024).

Кошляков В.В. Содружество НПО имени С.А. Лавочкина и Центра Келдыша – вчера, сегодня, завтра // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2022. № 2. С. 65-75.

Куколев М.И. Проектный анализ тепловых аккумуляторов: диссертация кандидата технических наук: 05.14.06. Петрозаводск, 1996. 144 с.

РД 92-0189-88. Методические указания. Расчет тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры.

Сеньшина Т.А., Холяков А.Е., Панин Ю.В., Борщев Ю.П. Обзор применения аддитивных технологий в тепловых агрегатах с фазопереходными процессами и пути совершенствования их конструкции на основе этих технологий // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 3. С. 81-87.

Статья поступила в редакцию 12.08.2024

Статья после доработки 15.08.2024

Статья принята к публикации 16.08.2024