

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Городнова Анатолия Олеговича

**«Моделирование тепломассообмена при бездренажном хранении
криогенных топлив»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05. – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность исследования. Диссертационная работа Городнова А.О. посвящена вопросам свободно-конвективного тепломассопереноса применительно к задаче хранения криогенных компонентов топлива в баках ракет.

Интенсивное исследование конвективного тепломассообмена в ракетных баках было начато в середине прошлого века в связи с бурным развитием ракетной техники и, как следствие, с необходимостью решения задач хранения и транспортировки топлива в баках. Исследование процессов тепломассообмена в ракетных баках осложнено многопараметричностью задачи, широтой диапазонов изменения определяющих параметров, нелинейностью конвективных процессов, фазовыми переходами, многокомпонентностью жидкостной системы с переменными свойствами. Условия хранения топлива в ракетных баках могут быть экстремальными, и приводят к возникновению сильной стратификации по температуре и плотности. Данные процессы, из-за их сложности и сильной нелинейности, до сих пор изучены недостаточно полно, поэтому их исследования актуальны и в настоящее время, причём, не только для прикладных задач, но могут в дальнейшем иметь и фундаментальное значение. Примером этого может свидетельствовать существующий максимум температурного (концентрационного) расслоения в баках в зависимости от определяющих параметров (в частности, от числа Рэлея). Данный эффект максимума температурного расслоения был найден В.И. Полежаевым при решении задач

тепломассообмена при хранении ракетного топлива, и в дальнейшем приобрёл фундаментальное значение для объяснения явлений гидродинамики в других физических процессах и задачах, в частности, в космической технологии полупроводниковых материалов.

Исследуемые в диссертации задачи могут иметь большие градиенты плотности и поэтому могут выходить за рамки применимости модели несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. Несмотря на создание ряда математических моделей и методов для описания теплообмена в подобных задачах, например, приближения малых чисел Маха, проблема свободно-конвективного теплопереноса для подобного класса течений изучена недостаточно. Большинство известных работ, в том числе и выполненных в Институте проблем механики, в которых применялось данное приближение, например, посвященных изучению поршневого эффекта, при этом влияние массовых сил на тепловые и динамические процессы не рассматривалось. Значительная часть диссертационной работы Городнова А.О. посвящена именно исследованию указанной проблемы, что делает ее актуальной с точки зрения развития теоретических знаний о свободно-конвективном теплообмене.

Научная новизна работы. В работе соискателя предложена физико-математическая модель теплообмена при хранении криогенного топлива в баках ракет. Модель основана на численном решении уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска, а также в приближении малых чисел Маха для пара и уравнения теплопроводности для стенки бака. Также изложен метод численного решения уравнений для разработанной в работе модели теплообмена при хранении криогенного топлива. Исследованы вопросы влияния приближения Буссинеска на результаты моделирования конвективного теплообмена в случае наличия больших перепадов температуры. Проведено исследование применимости модели совершенного газа для

описания теплопередачи в паре при хранении путем сравнения с результатами численного моделирования задачи о прогреве слоя газа с использованием более точного вириального уравнения состояния. На примере решения задачи о конвекции газа в вертикальном цилиндре продемонстрировано значительное влияние свойств стенки бака на температуру, скорость роста давления и интенсивность конвективных течений в паровой подушке при хранении топлива. Представлены результаты сравнения с экспериментом и верификации численной модели.

Практическая значимость работы заключается в создании физико-математической модели и метода численного решения для моделирования бездренажного хранения криогенных веществ в баках. Показано отличие влияние приближения Буссинеска на результаты моделирования в случае больших градиентов температуры. Проведено сравнение моделей реального и совершенного газа. Получены численные результаты параметрического моделирования тепломассообмена при бездренажном хранении криогенных веществ в баках. Показано влияние свойств веществ, степени заполнения бака, начальных условий и способов нагрева.

Достоверность результатов работы подтверждается сравнением результатов расчета, полученных по разработанному методу с данными экспериментов по бездренажному хранению водорода и азота. Основные результаты диссертации опубликованы достаточно полно в рецензируемых изданиях, в том числе из перечня ВАК, а также доложены на нескольких конференциях.

Содержание диссертационной работы. Диссертационная работа Городнова А.О. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 128 листов, включая 53 рисунка, 8 таблиц и список литературы из 105 источников.

Во введении обосновывается актуальность исследуемой в работе проблемы. Приводятся данные о создании новых изделий ракетной техники, в которых планируется применять низкокипящие компоненты топлива. Дается описание проблемы повышения давления при бездренажном хранении криогенных компонентов топлива в баках ракет. Излагаются цели и задачи диссертационной работы, обосновывается ее научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приводится обзор литературы по исследованиям тепловых и гидродинамических процессов при бездренажном хранении криогенных веществ. Приводятся как работы по экспериментальному изучению данной проблемы, так и исследования с использованием методов математического моделирования.

Вторая глава посвящена постановке, решаемой в диссертационной работе задачи о сопряженном тепломассообмене при бездренажном хранении. Изложена физико-математическая модель процессов сопряженного тепломассопереноса между паровой подушкой, жидкостью и оболочкой бака. Продемонстрированы важные особенности кривых насыщения криогенных веществ и отклонения свойств их паров на этих кривых от модели совершенного газа. Приведено описание численных методов для расчета тепломассообмена в паре и жидкости.

В третьей главе диссертации приведены результаты математического моделирования тепломассообмена на основе приближения гомобаричности тепловых и динамических процессов в газе в условиях хранения криогенного топлива. Материал изложен в виде решения нескольких модельных задач. Первым рассматриваемым примером является задача о прогреве слоя водородного пара. Приведено сравнение численных решений задачи, полученных для различных вариантов уравнений состояния, и зависимостей теплофизических свойств от параметров газа среды. Во втором разделе сравниваются решения задачи о конвекции газообразного водорода в

квадратной ячейке при значительных и малых перепадах температуры. Продемонстрирована существенная зависимость характерной толщины пограничного слоя от величины характерного относительного температурного перепада. В заключительном параграфе третьей главы диссертации представлены результаты решения задачи о нестационарной конвекции паров водорода в вертикальном цилиндрическом сосуде. Представлены результаты расчета, указывающие на существенное влияние теплопроводности и теплоемкости стенки на величину прироста давления, скорость конвективных течений и величину перепадов температуры.

В четвертой главе излагаются результаты численного моделирования бездренажного хранения криогенных веществ в баках. Приведено описание численного алгоритма решения сопряженной задачи тепломассообмена в баке при хранении криогенного топлива. Предложен способ задания неоднородных начальных условий для температуры пара путем решения вспомогательной задачи о конвекции в газовой подушке с постоянным давлением. Продемонстрированы результаты численного моделирования скорости роста давления и температурного расслоения в баках при бездренажном хранении водорода и азота. Получено хорошее совпадение скорости роста давления и температуры в баке с аналогичными экспериментальными данными. Приведена оценка влияния распределения теплового потока по стенке бака на скорость роста давления при бездренажном хранении.

В Заключении диссертационной работы Городнова А.О. сформулированы наиболее важные результаты и выводы.

Автореферат и публикации автора полностью отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе. По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В главе 1 в постановке задачи и допущениях модели не обосновывается пренебрежение подвижностью границы раздела жидкость-газ.
2. Для полноты использования, предложенной автором, математической модели процессов тепломассопереноса в баках ракетного топлива, желательно указать диапазоны параметров, при которых справедливо предположение о гомобаричности, и оценить возможность влияния на тепломассоперенос термокапиллярной конвекции, а также влияние кривизны и устойчивости межфазной поверхности жидкость-пар.
3. При исследовании влияния величины теплового потока через стенку не указано влияние шага расчётной сетки на точность решения для локальных величин, также не приведены результаты исследования сеточной сходимости, предложенного в четвёртой главе численного метода решения сопряженной задачи.
4. К сожалению, работа содержит большое количество стилистических и грамматических ошибок, а также некоторые величины, не имеющие общепринятые обозначения, не определены или неправильно определены, как, например, ускорение силы тяжести, названо вектором перегрузки. Также, например, во многих местах автореферата и диссертации вместо универсальной газовой постоянной указан радиус расчётной области.

Сделанные замечания не уменьшают общую ценность диссертационной работы. Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор, Городнов А.О., заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

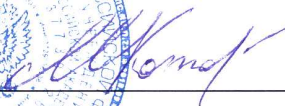
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики сложных жидкостей федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук»



Федюшкин Алексей Иванович

22.04.2021

Подпись А.И. Федюшкина
заверяю, ученый секретарь
«ИПМех РАН»,
к.ф.-м.н.



М.А. Котов

22.04.2021

Адрес: 119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1
e-mail: fai@ipmnet.ru