

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Городнова Анатолия Олеговича
«Моделирование тепломассообмена при бездренажном хранении
криогенных топлив» представляемую на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05. –
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Городнова А.О. посвящена разработке методов моделирования физических процессов при бездренажном хранении криогенных топлив в баках ракет. Экспериментальное исследование хранения подобных веществ в баках ракет осложняется дороговизной опытов и трудностью соблюдения условий подобия. Развитие методов математического моделирования крайне важно для оптимизации и удешевления отработки систем хранения перспективных изделий ракетно-космической техники.

Методы математического моделирования конвекции в жидкой фазе компонентов криогенного топлива к настоящему времени развиты достаточно хорошо. В работе соискателя основной упор делается на моделирование процессов тепломассообмена в паровой подушке бака на основе приближения малых чисел Маха. Необходимо отметить, что свободная конвекция в газах при значительных перепадах температуры, когда нарушаются условия применимости модели Буссинеска, изучена недостаточно подробно. Поэтому диссертация Городнова А.О. является актуальной работой также и с точки зрения прояснения процессов свободно-конвективного тепломассопереноса

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 128 машинописных листов, включающих 53 рисунка, 8 таблиц и список литературы на 105 наименований.

Во введении приводятся актуальные задачи по созданию новых образцов ракетной техники на криогенных компонентах топлива. Приведено описание проблемы роста давления при бездренажном хранении криогенных компонентов топлива. Изложены цели и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая значимость представленного исследования.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

28.04.2021 г.

Первая глава посвящена обзору литературы по экспериментальным исследованиям проблемы хранения, методам математического моделирования внутрибаковых процессов при бездренажном хранении, в том числе свободно-конвективному тепломассообмену в паре и жидкости, а также методам численного решения уравнений, описывающих свободно-конвективные течения.

Во **второй главе** дано описание постановки задачи о бездренажном хранении криогенного компонента топлива в баке. Приведена физико-математическая модель тепломассообмена между паром, жидкостью и стенкой бака. Сформулированы особенности теплофизических свойств криогенных веществ. Приведено описание численных методов для расчета течений в паре и жидкости.

В **третьей главе** приводятся результаты исследования тепломассопереноса в парах водорода. В первом разделе на примере задачи о прогреве слоя газообразного водорода путем численного эксперимента исследована применимость модели совершенного газа по сравнению с более точным вириальным уравнением состояния. На основании приведенных в разделе результатов расчетов делается вывод о том, что использование модели совершенного газа с учетом температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности и теплоемкости дает приемлемую погрешность в описании полей температуры в сравнении с применением более точного вириального уравнения состояния и учета зависимости теплофизических свойств от давления. Во втором разделе анализируется применимость модели Буссинеска для описания конвекции водорода при значительных перепадах температуры на примере задачи о конвекции в квадратной ячейке. Показаны существенные отличия характерной толщины пограничного слоя от величины характерного относительного температурного перепада. В последнем разделе данной главы приводятся результаты численного моделирования тепловой конвекции при нагреве водорода в цилиндрической металлической емкости. Продемонстрировано существенное влияние теплопроводности и теплоемкости стенки на скорость роста давления, интенсивность конвекции и величину температурного расслоения.

Четвертая глава посвящена численному моделированию бездренажного хранения криогенных веществ в баках. Изложен алгоритм решения сопряженной задачи хранения с учетом тепломассообмена в паре, жидкости, фазовых переходов, теплообмена со стенкой бака и перетоков тепла в оболочке.

Предложен способ моделирования начальной неоднородности температуры в паре. Приведены результаты численного моделирования бездренажного хранения водорода и азота. Получено хорошее совпадение с данными экспериментов по хранению по температуре и давлению. Приведены оценки влияния распределения теплового потока в бак на скорость роста давления в нем.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты.

В диссертационной работе предложены и протестированы физико-математическая модель хранения на основе уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска для жидкости, приближения малых чисел Маха для пара и уравнения теплопроводности для стенки бака. Предложен численный метод для решения сопряженной задачи теплообмена между жидкостью, газом и стенкой бака. Получены результаты численного моделирования конвекции в паре при наличии существенных перепадов температуры. Изучен вопрос применимости различных моделей среды для описания теплопереноса в газе в условиях, близких к реализуемым при бездренажном хранении. Установлено существенное влияние стенки бака на температуру в газе. Исследованы отличия конвекции паров водорода при больших перепадах температуры от конвекции Буссинеска. Представлены результаты численного моделирования процесса бездренажного хранения водорода и азота.

Практическая значимость работы заключается в создании метода математического моделирования бездренажного хранения компонентов криогенных топлив в баках ракет носителей.

Достоверность результатов работы подтверждается валидацией разработанного метода расчета и модели путем сравнения с данными экспериментов по бездренажному хранению водорода и азота. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых изданиях, в том числе из перечня ВАК, а также достаточно полно доложены на конференциях.

К работе имеются следующие замечания:

1. Необходимо отметить, что применяемый в работе метод SIMPLE является широко известным, в полной мере развитым для случая различных сеток и явных и неявных схем дискретизации уравнений. Применяемые в работе методы дискретизации и аппроксимаций уравнений также давно известны, и являются недостаточно эффективными для решения промышленных задач. При этом, в пункте 1 научной новизны и основных положений,

выносимых на защиту, присутствует формулировка – *метод численного моделирования тепловых процессов при естественной конвекции в газах*. Несмотря на то, что в контексте данной работы эти пункты являются второстепенными, учитывая прописанные в паспорте специальности 01.02.05 положения, считаю более подходящей формулировку доработанный *метод численного моделирования тепловых процессов при естественной конвекции в газах в части*

2. Необходимо сделать замечание по части используемых в диссертации для расчетов программ. Если программа применяется для численного исследования\моделирования какого-либо процесса, то для вновь реализованной программы есть определенные правила верификации\валидации – расчеты на сходимость, оценка схемной вязкости и т.д. Частично что-то представлено в работе, но полного описания нет.
3. Большая часть формул в работе тяжело читается из-за отсутствия расшифровки применяемых обозначений тех или иных величин. Нормальное описание только у самой главной системы уравнений (раздел 2.2).
4. Диссертант подробно привел применяемые допущения в используемой им физико-математической модели. Однако умолчал, как все эти допущения влияют на итоговые результаты исследуемых им тепломассообменных процессов.
5. В постановке задачи, диссертант умалчивает режим протекания тепломассообменных процессов – турбулентный или ламинарный. Из приведенных чисел Рэлея видимо следует, что режим является переходным. На этом все же было надо остановиться более детально и пояснить почему рассматривается именно такая постановка, какие режимы эксплуатации она охватывает и что в итоге с учетом турбулентности.
6. В диссертации приводятся численные исследования на примере модельных задач. В целом для исследования того или иного процесса, может этого и достаточно, но после названия диссертации ожидаешь применение и описание разработанных моделей при решении реальных производственных задач.


Замечания носят дискуссионный характер, а работа и представленные результаты заслуживают высокой оценки. Все представленные задачи, их постановки и численные решения, разобраны и описаны с детальными пояснениями - за это отдельный плюс диссертанту.

Диссертация А.О. Городнова, несомненно, имеет важное научное и прикладное значение и ее можно квалифицировать как законченное актуальное исследование. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие практическую и научную значимость для создания перспективных устройств, работающих в условиях космического пространства.

Название отвечает существу работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что работа А.О. Городнова соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Начальник научно-исследовательского отдела,
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИТМФ,
доктор физико-математических наук


26.04.21.

А.С. Козелков

Подпись А.С. Козелкова заверяю
учёный секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
кандидат физико-математических наук





В.В. Хижняков

Сведения об организации: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Федеральное государственное унитарное предприятие РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ»); 607188, Нижегородская обл. г.Саров, пр. Мира, д.37, Телетайп 151535 «Мимоза» Факс 83130 29494, E-mail: staff@vniief.ru.