

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по прикладным исследованиям,
испытаниям и экспериментальной базе
— начальник Центра прикладных
исследований, к.ф.м.н.

В.А. Титов

«27»

04

2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»
на диссертационную работу А.О. Городнова на тему
«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 Анатолия Олеговича посвящена исследованию методами математического моделирования тепловых и динамических процессов внутри криогенного бака в режиме бездренажного хранения. Эта задача является составной частью общей задачи прогнозирования температурных режимов и теплосилового нагружения системы хранения криогенных компонентов топлив перспективных изделий в условиях их эксплуатации. Задача актуальна. С одной стороны - есть запрос на создание перспективных изделий на низкокипящих компонентах топлива с повышенными техническими характеристиками, таких как КВРБ (сверхнизкие, водородные температуры) или ракета-носитель на компонентах сжиженный природный газ-кислород – более «мягкие» криогенные температуры, но более высокие технические требования. С другой стороны - тем, что, опыт, накопленный в отрасли при создании аналогичных криогенных систем (например, Энергия – Буран) частично

утрачен. Кроме того, в связи с развитием вычислительной техники, математическое моделирование становится полноправным элементом создания и отработки элементов конструкции. Поэтому работа соискателя является актуальной как развитие методов прогнозирования внутрибаковых процессов при бездренажном хранении криогенных компонентов топлива.

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 128 листов, включая 53 рисунка, 8 таблиц и список литературы из 105 наименований.

Во введении дано краткое описание исследуемой в работе проблемы и обосновывается актуальность ее изучения. Перечислены некоторые перспективные изделия ракетно-космической отрасли, в которых планируется применять криогенные компоненты топлива. В качестве основной проблемы выделена проблема роста давления в криогенных топливных баках при бездренажном хранении. Изложены основные цели и задачи диссертационной работы, дано обоснование ее научной новизны и практической ценности.

В первой главе приведен обзор найденной автором литературы по исследованиям тепломассообмена при бездренажном хранении низкокипящих веществ. В обзор включены работы по экспериментальному изучению бездренажного хранения и по методам математического моделирования различных физических процессов, сопровождающих хранение, таким как конвекция в жидкой и паровой фазе, тепломассообмен на границе фаз, теплообмен со стенками баков. Рассмотрены известные на сегодняшний день численные методы моделирования свободно-конвективных течений.

Во второй главе приведена постановка рассматриваемой соискателем задачи о сопряженном тепломассопереносе при бездренажном хранении криогенного компонента топлива в баке. Сформулированы основные допущения при описании внутрибаковых процессов, например,

гомобаричность в правой «подушке», наличие постоянного гравитационного поля, перпендикулярность плоскости поверхности контактного разрыва пар – жидкость гравитационному полю, отсутствие парожидкостной смеси в зонах контакта жидкой фазы с твердыми стенками и газовой фазой. Предлагаемая физико-математическая модель процессов при хранении криожидкостей состоит из модели течения в газовой фазе - уравнения Навье-Стокса в допущении гомобаричности, модели течения в жидкости в приближении Бусинеска и модели теплопереноса в стенке бака в виде классического уравнения теплопроводности. Все модели связаны через граничные условия. Тепловые потоки к наружным стенкам баков считаются заданными. Параметры на стыке – пар-жидкость соответствуют кривой насыщения. Учитывается отличие газа от совершенного. Сформулированы некоторые особенности теплофизических свойств криогенных веществ, указывающие на необходимость аккуратного выбора моделей для задания этих свойств в расчетах. Приведено описание численных методов, использованных соискателем в расчетах.

Третья глава посвящена исследованию тепломассообмена в паровой подушке бака. Материал представлен в виде решения нескольких упрощенных задач. В первом разделе рассматривается задача о прогреве слоя водородного пара. Для данной задачи приводится сравнение численных решений, полученных для разных видов уравнения состояния (совершенный и несовершенный газ), при нескольких вариантах соотношений для теплофизических свойств газа. Во втором разделе проведены исследования применимости модели Бусинеска для описания конвекции в газе при больших перепадах температуры. На примере задачи о стационарной конвекции газообразного водорода в квадратной ячейке показана зависимость толщины пограничного слоя от относительного перепада температуры. В последнем разделе проведено численное моделирование нестационарной конвекции паров водорода в вертикальном цилиндрическом сосуде со стенкой конечной толщины при заданном внешнем тепловом воздействии. Проиллюстрировано влияние тепловых характеристик стенки

на скорость роста давления, интенсивность конвекции и величину температурного расслоения в сосуде.

Четвертая глава посвящена численному моделированию бездренажного хранения криогенных веществ в баках и сравнению с экспериментальными данными. Приведены результаты систематических численных расчетов роста давления и температурного расслоения в баках. Показано влияние начальной неоднородности температуры пара и предложены способ ее моделирования. Показан определяющий вклад нагрева бака сверху в рост давления в нем.

На основе продемонстрированного хорошего совпадения расчетных и имеющихся в распоряжении автора экспериментальных данных может быть сделан вывод, что предложенная физико-математическая модель хорошо описывает условия бездренажного хранения водорода и азота в экспериментах.

В заключении сформулированы наиболее важные выводы и результаты диссертационной работы, которые обоснованы в тексте диссертации.

Научная новизна работы

В диссертации А.О. Городнова предложена физико-математическая модель и численные методы для расчета параметров пара, жидкости и стенки бака при заданном внешнем тепловом воздействии в режиме бездренажного хранения. Адекватность предложенной методики подтверждена хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных. Исследованы вопросы отличий конвекции при больших перепадах температуры от конвекции Буссинеска. Проведено исследование применимости модели совершенного газа для описания теплопередачи в паре в условиях перепадов температур, характерных для бездренажного хранения. Продемонстрировано значительное влияние теплоемкости и теплопроводности стенки бака с фиксированной толщиной на температуру, скорость роста давления и интенсивность конвекции в паре при бездренажном хранении. Представлены

результаты численного моделирования бездренажного хранения водорода и азота.

Практическая значимость работы заключается в создании метода моделирования бездренажного хранения криогенных веществ в баках (физико-математическая модель и численный метод). Метод допускает уточнение физико-математической модели и может быть легко встроен в решение комплексной задачи прогнозирования температурных режимов криогенных систем. В целом, предложенный метод является составной частью решения комплексной задачи создания и отработки криогенных баков перспективных изделий ракетно-космической отрасли.

Особенно острой является проблема тепломассообмена в баке водорода проектируемых разгонных блоков (РБ) на компонентах топлива кислород-водород. Представленные в диссертации исследования относятся к активному участку полета, когда жидкий водород поджат к днищу, и его свободная поверхность плоская, но такие участки продолжаются относительно недолго. На длительных пассивных участках полета для уменьшения нагрева продольная ось РБ поворачивается направлением на Солнце. Для стабилизации движения РБ приводится во вращение относительно продольной оси до достижения стационарного вращения, в котором объем жидкого водорода принимает форму тора с цилиндрической свободной поверхностью жидкости. В качестве пожелания рекомендуется развитие предложенных в диссертации методов на исследование режимов тепломассообмена в таких длительных и особо ответственных пассивных участках полета перспективных РБ.

Достоверность результатов работы подтверждается сравнением с данными экспериментов, а также использованием хорошо апробированных подходов к моделированию свободно-конвективных течений. Основные результаты диссертации опубликованы достаточно полно в рецензируемых изданиях, в том числе из перечня ВАК, а также доложены на нескольких конференциях.

Замечания по диссертационной работе


1. Небрежность оформления текста диссертации.
2. В главе 2 при формулировке задачи:
 - 2.1. В уравнениях для паровой подушки, в частности, в уравнении переноса тепла (2.2.1), в явном виде отсутствует тепловой эффект, связанный с переходом орто-пара состояний водорода.
 - 2.2. В уравнениях движения жидкости и пара используются одно и то же значение реперной температуры.
 - 2.3. При постановке задачи о прогреве стенки бака отсутствует упоминание о ее толщине.
3. В главе 2 предложены два метода численного решения сформулированной задачи: - консервативный и не полностью консервативный с разделением задачи на тепловую и динамическую. Приведены сравнения результатов расчетов по консервативному методу с результатами других авторов, сравнение результатов расчетов по консервативному методу и неконсервативному не приведены. Использование для описания зависимостей теплофизических характеристик от температуры аппроксимаций высоких порядков в неконсервативных методах расчетов могут приводить к появлению «паразитных источников членов».
4. В главе 3 представлены результаты исследования нестационарных процессов до значений чисел Fo , не превышающих 0,2. Расчеты для больших значений позволили бы сделать выводы о допустимости использования представлений о «регулярном режиме» для таких сложных процессов тепло- массообмена.
5. В главе 4 при сравнении результатов расчетов с результатами маломасштабных экспериментов при моделировании форма цилиндрического бака с полусферическими или оживальными днищами заменялась на чисто цилиндрическую, воспроизводилась высота уровня жидкости, но при этом не моделировались ни масса жидкости и площадь поверхности теплового воздействия. Возможно именно с этим связан

опережающий по сравнению с экспериментом рост давления от времени. Использование такого моделирования не вызвано требованиями метода и не обосновано.

Сделанные замечания не умаляют общую ценность диссертационной работы. В целом диссертация А.О. Городнова представляет собой высококвалифицированную, вполне законченную в части поставленных целей научную работу, выполненную на актуальную тему, а ее результаты имеют народно-хозяйственное и оборонное значение.


Диссертационная работа А.О. Городнова «Моделирование тепломассообмена при бездренажном хранении криогенных топлив», удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 01.10.2018) «О порядке присуждения ученых степеней». Автор диссертации, Городнов Анатолий Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв обсужден и согласован на заседании подсекции № 2-2 научно-технического совета АО «ЦНИИмаш» (протокол № 7 от 26.04.2021).

Ведущий научный сотрудник отдела  Сенкевич Е.А.
20011 к.ф.-м.н.

Начальник отдела 20024, д.ф.-м.н.  Бужинский В.А.

Подписи Сенкевич Е.А. и Бужинского В.А. удостоверяю,

И.о. главного ученого секретаря АО «ЦНИИмаш»  В.Ю. Ключников
д.т.н., с.н.с.

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения». Адрес: 141070, Московская обл., г.о. Королев, ул. Пионерская, д. 4. e-mail: corp@tsniimash.ru. Телефон: +7(495)513-59-51
Веб-сайт: <http://www.tsniimash.ru>