

На правах рукописи



КИРИЕНКО Кристина Игоревна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ЗАПРАВКИ
КРИОГЕННЫХ БОРТОВЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ СЖИЖЕННЫМ
ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ**

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на кафедре низких температур.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Горбачев Станислав Прокофьевич

Официальные оппоненты: Жердев Анатолий Анатольевич
доктор технических наук, профессор, декан
факультета «Энергетическое машиностроение»
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана»

Семенов Виктор Юрьевич
кандидат технических наук, доцент, начальник
лаборатории криогенных процессов, процессов
безопасности и процессов разделения газов
ОАО «Криогенмаш»

Ведущая организация: ОАО «НПО «Гелиймаш»

Защита диссертации состоится 17 октября 2014 года в 11:30 на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.17, корп. Т, кафедра инженерной теплофизики им. В. А. Кириллина, комн. Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» www.mpei.ru.

Автореферат разослан «__» сентября 2014 г.

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04
к.т.н.



Ястребов А.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время в мире расширяется использование сжиженного природного газа (СПГ) в качестве газомоторного топлива. Станции заправки автотранспорта сжиженным природным газом размещены в 11 штатах США, а также в Австралии, Чехии, Германии, Великобритании. В последние годы высокими темпами развивается использование СПГ в качестве газомоторного топлива в Китае и Корее, а также в Нидерландах. Намерены использовать СПГ в качестве газомоторного топлива такие страны как Индия, Пакистан, Катар. В России Постановлением правительства предусмотрено в течение 7 лет увеличить использование природного газа в качестве моторного топлива с 350 млн. м³/год до 15 млрд. м³/год и занять лидирующие позиции в мире. Кроме автотранспорта предполагается использовать СПГ в качестве моторного топлива на железнодорожном транспорте, на морском и речном транспорте, для сельскохозяйственной техники, в авиации.

Одной из проблем при эксплуатации транспорта на СПГ является уменьшение длительности заправки и повышение пожаробезопасности при заправке криогенных бортовых топливных систем. Уменьшение длительности позволяет повысить конкурентоспособность СПГ как моторного топлива.

Пожароопасность при заправке транспорта СПГ обусловлена, в первую очередь, возможностью перелива криогенного бака, испарением СПГ, загазованностью территории станции с последующей вспышкой. Поэтому одним из путей повышения пожаробезопасности является переход к бездренажной заправке бортовых систем сжиженным природным газом (без выброса паров СПГ из бака). К сожалению, в настоящее время в РФ отсутствует опыт скоростной и безопасной заправки емкостного оборудования.

Цель работы

Разработать основные положения технологии заправки криогенных бортовых систем сжиженным природным газом, обеспечивающие удовлетворительное время заполнения и требования безопасности.

Основные задачи исследования

- Подготовить и провести испытания по заполнению бака автотранспорта сжиженным природным газом по двухлинейным и однолинейным технологиям в условиях приближенным к реальным;
- По результатам испытаний разработать обобщенную модель процесса заполнения сосуда криогенной жидкостью, позволяющую моделировать заправку бортовых топливных систем как по двухлинейным схемам (с открытым дренажем), так и по однолинейным схемам (с закрытым дренажем) и показать пути повышения эффективности процесса;

– Провести моделирование процессов заполнения криогенных бортовых топливных систем для определения влияния технологических и конструктивных параметров на режим заполнения, а также обоснования новых технических решений.

Достоверность полученных результатов

Достоверность экспериментальных результатов подтверждается их качественным и количественным воспроизведением при близких условиях проведения экспериментов.

Основные уравнения, представленные автором модели, базируются на фундаментальных законах сохранения и уравнениях термодинамики и теплообмена.

Удовлетворительное согласование результатов расчетов и экспериментов, проведенных в условиях приближенных к реальным, позволяет достоверно использовать результаты числового моделирования при разработке технологических регламентов криогенных бортовых топливных систем.

Научная новизна

Впервые в РФ проведен комплекс экспериментов по заправке бака криогенной топливной системы в условиях приближенных к реальным условиям, в том числе заправка теплого бака с открытым дренажем, бездренажная заправка холодного бака, бездренажная заправка теплого бака.

Разработана физико-математическая модель заполнения сосуда криогенной жидкостью, отличающаяся тем, что процессы в замкнутом объеме описываются на основе нестационарной термодинамической модели с учетом теплообмена и смешения потоков между поступающей жидкостью, перегретым паром и стенками сосуда.

Впервые показано, что характер процесса заправки определяется соотношением между расходом жидкости, взаимодействующей с перегретым паром в сосуде, и расходом жидкости, вступающей в непосредственный контакт со стенками сосуда.

Впервые определено влияние на скорость заполнения таких параметров, как условия ввода жидкости в сосуд, размер капель, паросодержание поступающей жидкости, значение начальной температуры стенки.

Основные защищаемые положения:

- Результаты экспериментального исследования процесса заправки криогенных бортовых систем
- Модель заполнения криогенного резервуара.
- Рекомендации по технологии заполнения криогенной бортовой топливной системы сжиженным природным газом.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Впервые проведена экспериментальная отработка технологии бездренажного заполнения холодного и теплого сосуда, как методом передавливания, так и с помощью центробежного насоса, позволившая показать возможность и перспективность этой технологии.

Определены значения давлений подачи и необходимой величины недогрева жидкости для проведения бездренажной заправки.

Предложены технические решения, направленные на повышение скорости заполнения, в том числе, не полное охлаждение стенок бака, уменьшение диаметра отверстий перфорированного коллектора криогенного бака, ограничение контакта капель жидкости со стенкой бака, применение пульсационной заправки.

Результаты работы использовались при разработке стандарта ОАО «Газпром» – СТО Газпром 2-3.6-701-2013 «Криогенные автомобильные газозаправочные станции. Общие технические требования», а также будут использоваться при разработке технологических регламентов криогенного емкостного оборудования в программах ОАО «Газпром» по использованию газомоторного топлива и автономной газификации на базе сжиженного природного газа.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на конференциях и семинарах:

1. IX Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 4-7.10.2011;
2. На XVIII международной научно-практической конференции аспирантов и студентов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2012;
3. На XIX международной научно-практической конференции аспирантов и студентов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2013;
4. На III международной научной конференции «Промышленные газы», Москва, 2013;

Публикации

Основные результаты диссертации отражены в 10 научных трудах, в том числе в 3 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, 7 – в других изданиях.

Структура и объем работы

Основной текст работы изложен на 126 машинописных страницах, содержит 69 рисунков и 5 таблиц, включает Введение, четыре главы, Выводы и

Список использованных источников. Список использованных источников содержит 47 наименований. Работа включает в себя одно приложение на 20 листах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы; сформулирована цель и задачи исследования; приведены результаты, выносимые на защиту; отмечена их практическая значимость и научная новизна.

В **главе 1** приведен аналитический обзор современных технологических схем криогенных бортовых топливных систем, а также способов их заполнения сжиженным природным газом.

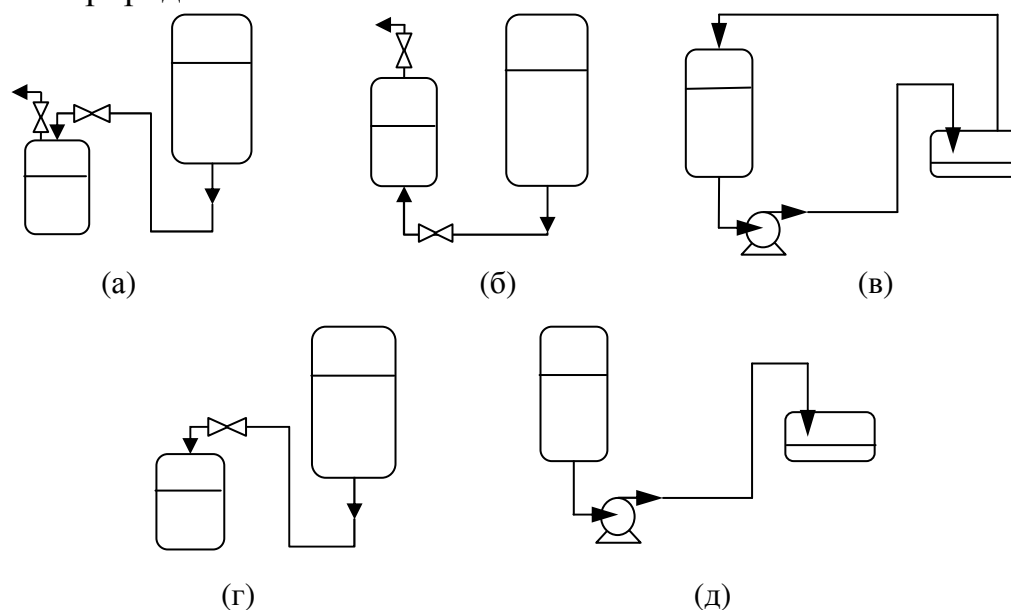


Рисунок 1. Технологические схемы заправки криогенных бортовых топливных систем.
Двухлинейные схемы с открытым газосбросом: а – заправка «сверху»; б – заправка «снизу»; в – заправка с рециркуляцией пара (с криогенным центробежным насосом).
Однолинейные схемы с закрытым газосбросом: г – методом передавливания; д – с использованием насоса

До последнего времени при заправке и дозаправке КБТС сжиженным природным газом использовалась двухлинейная технология (рис.1 а, б, в). Основная проблема ее заключается в том, что возможно переполнение криогенного бака с выбросом жидкости через дренажные коммуникации на территорию заправочной станции с последующей загазованностью и возникновением аварийной ситуации, поэтому заправка без дренажа по однолинейной схеме (рис.1 г, д) представляется очень перспективной.

Анализ литературных источников показывает, что основные подходы к расчетам захолаживания и заполнения криогенного оборудования, к заправке криогенных бортовых топливных систем, основанные на полном охлаждении стенок сосуда в процессе заправки, не являются продуктивными, поскольку не обеспечивают необходимой длительности заправки. Бездренажная заправка

емкостного оборудования практически не исследована, хотя эта технология позволяет заправлять емкостное оборудование при повышенном давлении, и исключает перелив жидкости при заправке.

В главе 2 дается описание экспериментальной установки (рис. 2), методики эксперимента, а также приведены результаты экспериментального исследования процесса заполнения криогенного сосуда.

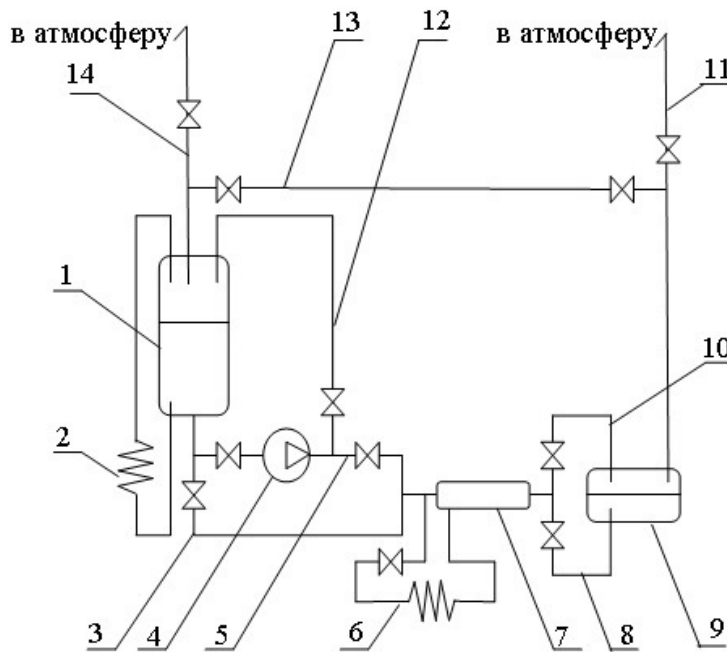


Рисунок. 2. Блок-схема экспериментальной установки.
 1 – технологический резервуар;
 2 – испаритель-самонадува питающего резервуара;
 3 – линия выдачи жидкости методом передавливания;
 4 – криогенный насос;
 5 – линия выдачи жидкости с помощью насоса;
 6 – испаритель подогревателя;
 7 – подогреватель жидкости;
 8 – линия заправки КБТС снизу;
 9 – криогенный бак;
 10 – линия заправки КБТС сверху;
 11 – дренаж криогенного бака;
 12 – байпасная линия насоса;
 13 – линия циркуляции пара;
 14 – дренаж питающего резервуара.

Давление в баке измерялось датчиком давления Метран-100-ДД-1440-К-02-МП1-t8-050-25кПа-25-42-ШР22/В52-01, погрешность которого не превышает $\pm 0,1\%$, от калиброванного диапазона значений и манометрами МПЗ-У-1.6 МПа, класс точности которых 1.5. Температура определялась платиновыми термометрами сопротивления ЧЭПТ-38-100П с классом допуска В, совместно с микропроцессорным измерителем-регулятором ТРМ202-Щ1.РР, масса жидкости в баке измерялась весовым способом на электронных весах МЕРА ВТП-0.6-О, класс точности которых по ГОСТ 29329-92 – средний.

В процессе экспериментов варьировались расход жидкости (за счет повышения давления в расходном резервуаре) и температура жидкости на входе в бак за счет подогрева жидкости в специальном теплообменнике жидкость – газ.

Основные режимы процесса заполнения, отработанные в ходе экспериментального исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные режимы процесса заполнения

№	Схема	Жидкость	Давление источника, P_1 , МПа	Начальное давление в баке P_{V0} , МПа	Температура жидкости на входе T_1 , К	Начальная масса жидкости в баке, M_0 , кг
1	Сверху с открытым дренажом, теплый бак	Азот	0,45	0,1	78	0
2	Сверху с открытым дренажом, теплый бак	Азот	0,55	0,1	81	0
3	Снизу с открытым дренажом, теплый бак	Азот	0,74	0,42	82	4,1
4	Снизу с открытым дренажом, теплый бак	Азот	0,72	0,5	84	7,5
5	Сверху без дренажа, холодный бак	Азот	0,52	0,25	78	11,5
6	Сверху без дренажа, холодный бак	Азот	0,52	0,25	87	8
7	Однолинейная схема, теплый бак	Азот	1	0,1	87	0
8	Однолинейная схема, теплый бак	Азот	1	0,15	90/87	2
9	Однолинейная схема, теплый бак	СПГ	1,2	0,1	136	0
10	Сверху без дренажа, холодный бак	СПГ	0,75	0,45	136	3,8

Испытания проводились в два этапа.

На первом этапе отрабатывалась технология заполнения КБТС методом передавливания криогенной жидкости из технологического резервуара через трубопровод в криогенный бак, на втором этапе для заполнения использовался специальный криогенный центробежный насос производительностью около 4 м³/час жидкости.

Испытания проводились на жидком азоте. Были осуществлены технологии заполнения теплого и холодного бака сверху и снизу, а также бездренажная технология заполнения холодного бака сверху.

В процессе испытаний все оборудование и системы стенда работали удовлетворительно и обеспечивали проведение таких операций, как подъем и поддержание давления в расходном резервуаре, захолаживание заправочных и дренажных коммуникаций, подогрев жидкости в процессе заполнения, обратный слив жидкости из криогенного бака в расходный резервуар.

На втором этапе отрабатывалась технология заполнения КБТС с помощью криогенного центробежного насоса. Испытания проводились на жидком азоте и на сжиженном природном газе.

В результате испытаний было показано, что при заполнении криогенных баков жидким азотом по двухлинейной схеме с открытым дренажом

длительность процесса составляет 3 – 5 минут для холодного бака и до 10 минут для теплого бака. Длительность однолинейной бездренажной технологии заполнения холодного бака составляет примерно 5 минут.

В главе 3 приводится методика расчета заполнения криогенного сосуда, в основу которой положены экспериментальные данные. Учитывая предыдущий опыт, предлагается использовать модель с сосредоточенными параметрами, изменяющимися только по времени для объема с переменной массой рабочей среды с учетом взаимодействий между стенкой сосуда, газом в паровом пространстве и жидкостью, поступающей в сосуд.

Физико-математическая модель процесса заполнения сосуда криогенной жидкостью. В общем виде процесс заполнения резервуара криогенной жидкостью можно представить следующим образом. В сосуд, заполненный перегретым паром, сверху через перфорированный коллектор поступает криогенная жидкость (рис. 3), температура которой равна или ниже равновесной температуры. В сосуде происходит сложный теплообмен между поступающей жидкостью, перегретым паром и стенкой сосуда, который сопровождается фазовыми переходами (испарение жидкости на стенке или конденсация пара на каплях жидкости), а также смешением потоков пара с различной температурой в объеме сосуда. В зависимости от технологии заполнения пар из сосуда может выводиться (заполнение с открытым дренажем) или выход пара отсутствует (бездренажная технология заполнения). Кроме того, криогенная жидкость может подаваться в сосуд как сверху, так и снизу.

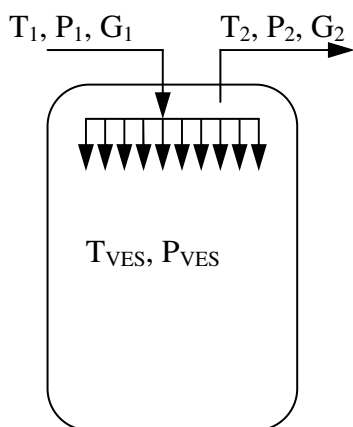


Рисунок 3. Схема заполнения криогенного резервуара

Расход жидкости на входе определяется разностью давлений в технологическом резервуаре и в сосуде и гидравлическим сопротивлением заправочной коммуникации, а расход пара из сосуда – разностью давлений в сосуде и во внешней среде и гидравлическим сопротивлением дренажной коммуникации. Поскольку расход жидкости при заправке является основным параметром, то определение давления в баке в переходном процессе является основной задачей расчета.

В процессе заполнения часть поступающей жидкости испаряется в результате теплообмена со стенками сосуда и перегретым паром, часть жидкости переходит в пар в процессе вскипания, давление в паровом пространстве повышается из-за увеличения массы пара и уменьшения объема парового пространства. При повышении

давления в сосуде расход поступающей жидкости снижается и с учетом ее испарения накопление жидкости может прекратиться. В результате решения задачи необходимо определить время заполнения сосуда, т.е. скорость накопления жидкости в сосуде, а также влияние режимных и конструктивных параметров на процесс заполнения.

Несмотря на различные технологии, целесообразно разработать общую модель процесса заполнения сосуда, на основании которой отдельные технологии могут рассматриваться как частные задачи.

Как показал предварительный анализ, характер протекания процесса существенно зависит от того, как взаимодействует поток поступающей жидкости со стенкой сосуда. На практике одна часть потока жидкости, поступающей в сосуд сверху, попадает на стенку сосуда, испаряется и насыщенный пар смешивается с перегретым паром. Другая часть потока, охлаждает перегретый пар за счет нагревания и испарения поступающей жидкости с низкой температурой, но, с другой стороны, пар нагревается за счет теплообмена со стенкой сосуда. Поскольку неизвестно, как распределяется расход жидкости между этими потоками, то предложено рассматривать две модели процесса: первая модель (модель А) – весь поток жидкости взаимодействует с перегретым паром; вторая модель (модель Б) – весь поток жидкости попадает на стенку сосуда и испаряется.

Физическая картина процессов, происходящих в баке для модели А, представлена на рис. 4.

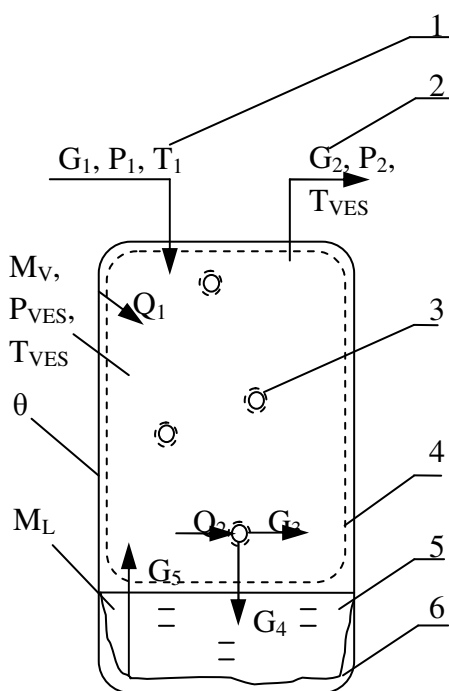


Рисунок 4. Физическая картина процесса заполнения (модель А)

1 – входящий поток;

2 – выходящий поток;

3 – капля жидкости;

4 – контрольный объем;

5 – накопленная жидкость;

6 – паровая пленка;

M_V и M_L – массы пара и жидкости в баке соответственно;

P_1, T_1 – давление и температура входного потока;

P_{VES}, T_{VES} – давление и температура пара в баке;

P_2 – давление дренажа; θ – температура стенки;

G_1 – расход входящего потока; G_2 – расход выходящего потока; G_3 – расход пара при испарении капли; G_4 – расход жидкости, не испарившейся части капли; G_5 – расход пара, при пленочном кипении жидкости;

Q_1 – тепловой поток от стенки к газу; Q_2 – тепловой поток от пара к капле жидкости

Рассматриваются процессы, происходящие только в паровом пространстве сосуда. В паровое пространство через перфорированный

коллектор в виде капель входит жидкость с расходом G_1 с температурой T_1 , которая может быть как ниже равновесной температуры пара T_s в сосуде, так и выше. Если $T_s < T_1$, то часть жидкости вскипает при поступлении в паровое пространство сосуда из-за снижения давления, образуя поток пара G_{1V} , который смешивается с перегретым паром. Тепло от стенок сосуда (Q_1) путем естественной конвекции подводится к пару, который в свою очередь передает тепло (Q_2) каплям оставшейся части жидкости (G_{1L}) путем вынужденной конвекции. Капля воспринимает тепло теплопроводностью. Разность тепловых потоков на границе капли расходуется на частичное или полное ее испарение, при этом поток испарившейся жидкости (G_3) смешивается с перегретым паром. Неиспарившаяся доля жидкости (G_4) стекает в нижнюю часть сосуда, где продолжается ее испарение путем пленочного кипения на стенке сосуда с расходом G_5 , который также смешивается с паром в паровом пространстве сосуда. Из парового пространства через дренажную коммуникацию выходит пар с расходом G_2 .

Математическая модель процесса включает уравнения сохранения массы и энергии и уравнение состояния.

Уравнения сохранения массы

$$\frac{dM_V}{d\tau} = G_{1V} - G_2 + G_3 + G_5$$

$$\frac{dM_L}{d\tau} = G_{1L} - G_3 - G_5$$

Если в качестве термодинамической системы принять паровое пространство сосуда (границы системы соответствуют линии контакта пар-жидкость и пар-стенка), то для случая однофазной среды, уравнение сохранения энергии имеет вид:

$$M_V c_V \frac{dT_{VES}}{d\tau} = \sum_{n=1}^n \dot{Q} - \eta \frac{c_V T_{VES}}{v} \dot{V} + \sum_{k=1}^n (\eta c_V T_{VES} - \Delta h_k) G_k$$

а если среда двухфазная, то:

$$M_V c_V \frac{dT_{VES}}{d\tau} = \sum_{n=1}^n \dot{Q} - \left(\frac{h'' - h'}{v'' - v'} \right) \dot{V} + \sum_{k=1}^n \left[\frac{v''(h_k - h') + v'(h'' - h_k)}{v'' - v'} \right] G_k$$

Уравнение состояния для парового пространства можно представить, как:

$$P_{VES} V = M_V R T_{VES}$$

За счет отведенного тепла стенка сосуда охлаждается и ее температуру можно определить из зависимости

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\alpha_1 \frac{F_w}{M_w c_w} (\theta - T_{VES})$$

Решая систему обыкновенных нелинейных уравнений методом Рунге-Кутты четвертой степени, определяем давление и температуру газа в емкости, скорость накопление массы жидкости в сосуде, изменение температуры стенки.

Физическая картина процессов, происходящих в баке для модели В, представлена на рис. 5.

Как и для модели А, вскипающий поток жидкости поступает через перфорированный коллектор в виде капель с расходом G_1 с температурой T_1 . Если $T_s < T_1$, то часть жидкости вскипает при поступлении в паровое пространство сосуда из-за снижения давления, образуя поток пара G_{1V} , который смешивается с перегретым паром. В отличие от модели А, оставшаяся часть жидкости (G_{1L}) попадает на стенку сосуда не взаимодействуя с паром. На стенке жидкость испаряется путем пленочного кипения, и пар также поступает в паровое пространство (G_3), где смешивается с перегретым паром. При этом, с одной стороны, температура перегретого пара снижается, поскольку в объем поступает более холодный газ, а с другой стороны, из-за увеличения массы газа в паровом пространстве давление пара возрастает.

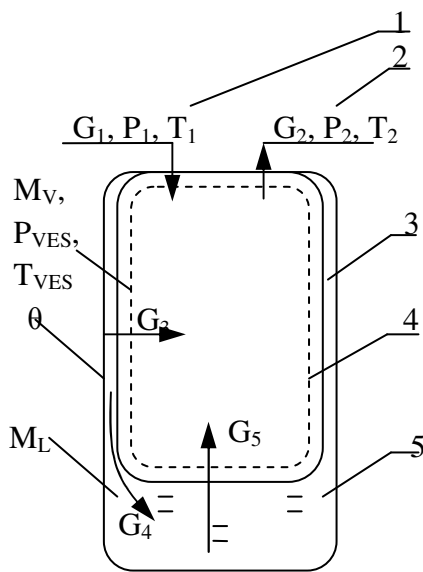


Рисунок 5. Физическая картина процесса заполнения (модель В)

1 – входящий поток;

2 – выходящий поток;

3 – пленка жидкости;

4 – контрольный объем;

5 – накопленная жидкость;

6 – паровая пленка;

M_V и M_L – массы пара и жидкости в баке соответственно;

P_1, T_1 – давление и температура входного потока;

P_{VES}, T_{VES} – давление и температура пара в баке;

P_2 – давление дренажа; θ – температура стенки;

G_1 – расход входящего потока; G_2 – расход выходящего потока; G_3 – расход пара от испарения на стенке; G_4 – неиспарившаяся часть жидкости; G_5 –

расход пара, при пленочном кипении жидкости в нижней части сосуда

Уравнения массового баланса и уравнение энергии могут быть представлены в виде:

$$\frac{dM_L}{d\tau} = G_{1L} - G_3 - G_5$$

$$\frac{dM_V}{d\tau} = G_{1V} + G_3 + G_5 - G_2$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\alpha_1 \frac{F_w}{M_w c_w} (\theta - T_s)$$

$$M_V c_V \frac{dT_{VES}}{d\tau} = \eta c_V T_{VES} \frac{\rho''}{\rho'} (G_{1L} - G_3 - G_5) + [\eta c_V T_{VES} - c_P (T_{VES} - T_s)] (G_{1V} + G_3 + G_5) - \eta c_V T_{VES} G_2$$

Решение системы уравнений аналогично предыдущему случаю и позволяет определить основные параметры процесса заправки.

В работе рассмотрены частные случаи, заправки КБТС по различным технологиям.

Заполнение «теплого» сосуда криогенной жидкостью «сверху» с открытым дренажем. На рис. 6 представлены изменение массы жидкости и давления в сосуде при заполнении сверху с открытым дренажем.

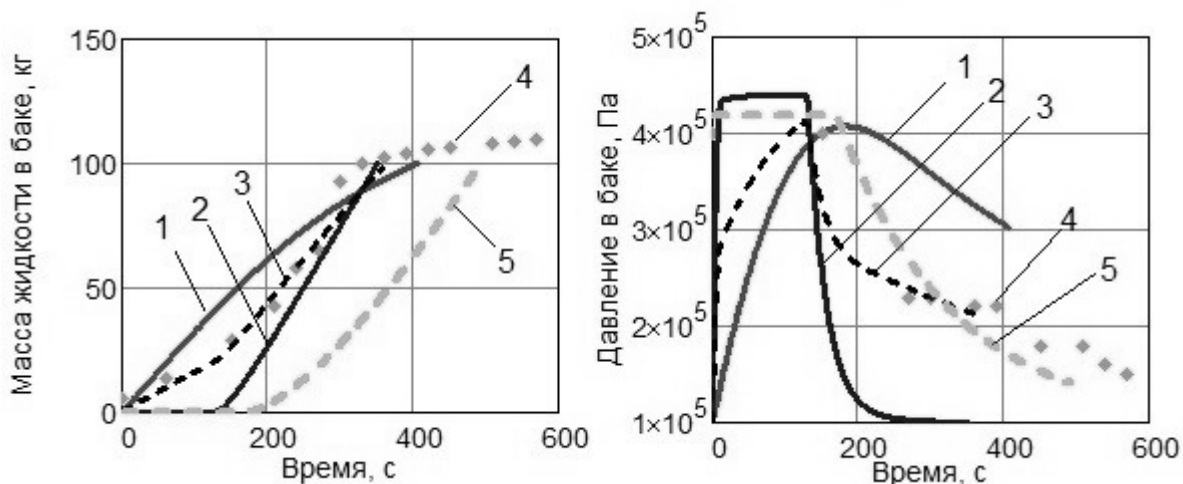


Рисунок 6. Зависимости массы жидкости и давления в баке от времени при заполнении теплого бака «сверху» с открытым дренажем

1 – Расчет по модели А; 2 – Расчет по модели В; 3 – Суперпозиция двух моделей; 4 - Экспериментальные данные; 5 – Расчет по модели полного охлаждения стенок

При расчетах по модели А давление в баке постепенно повышается, достигает экстремума и при снижении температуры стенок и уменьшении теплового потока от стенок к газу падает. По модели В за счет интенсивного испарения жидкости на теплых стенках сосуда давление резко повышается, вся поступающая жидкость испаряется (давление в баке при этом постоянно). При дальнейшем снижении температуры стенок сосуда и уменьшении теплового потока от них к газу, жидкость испаряется не полностью и начинается накопление жидкости в сосуде. Давление пара в сосуде при этом снижается.

Длительность заполнения бака удовлетворительно согласуется с расчетным временем. Для удобства сравнения принимается время накопления жидкости до 100 кг. К Длительность заполнения в эксперименте составила 330 с., расчетное время по модели А – 385 с., по модели В – 350 с., суперпозиция двух моделей в соотношении 50 % жидкости попадает на стенки сосуда, а 50 % – взаимодействует с паром дает время заполнения 360 с. Если проводить заполнение с полным охлаждением стенок, то расчетная длительность заправки составит 495 с.

Сравнение расчетных зависимостей по моделям А и В с экспериментальными данными показывает, что в реальном процессе реализуются оба механизма теплообмена, положенные в основу рассмотренных

моделей, однако, остается неясным, в каком соотношении находятся потоки жидкости.

Заполнение «холодного» сосуда криогенной жидкостью «сверху» с закрытым дренажем. На рис. 7 представлено сравнение экспериментальных данных с расчетом при заправке холодного бака без дренажа.

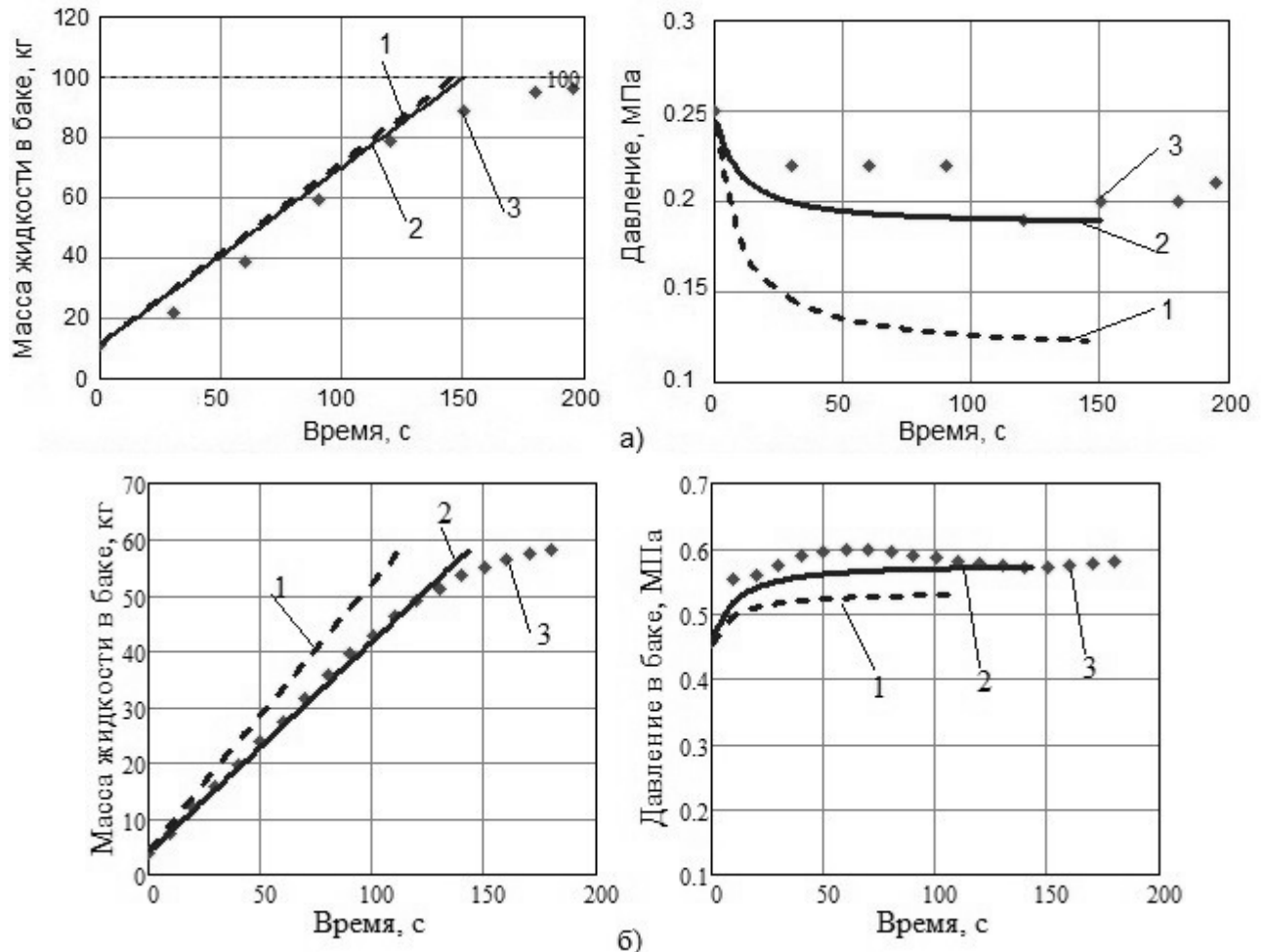


Рисунок 7. Зависимости массы жидкости и давления в баке от времени при заполнении холодного бака без дренажа (а – азот; б - СПГ)

1 – Расчет по модели без поправки; 2 – Расчет по модели с поправкой;

3 - Экспериментальные данные

В процессе заполнения «холодного» сосуда без дренажа имеют место два противоположных процесса: с одной стороны, давление в сосуде возрастает из-за уменьшения парового пространства при накоплении жидкости, с другой стороны, давление снижается из-за конденсации пара на каплях поступающей жидкости. Поэтому конечное давление в сосуде может, как увеличиваться (рис. 7а), так и снижаться (рис. 7б) по отношению к начальному давлению в зависимости от температуры жидкости на входе.

Как показал анализ процесса, даже при идеальном теплообмене теплоемкость стенок в данном случае практически не влияет на процесс заполнения. В то же время, необходимо учитывать, что нагревание капли жидкости и, соответственно, количество теплоты, которое она может

воспринять, определяется нестационарной теплопроводностью от поверхности капли к центру.

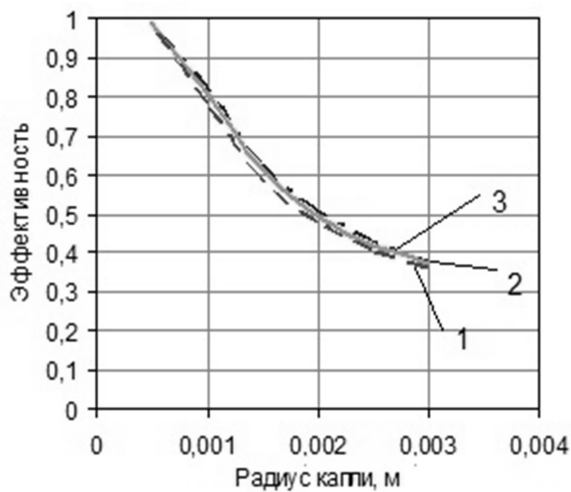


Рисунок 8. Зависимость эффективности процесса от радиуса капли при разных температурах входящей жидкости
 1 – $T_1 = 135$ К; 2 – $T_2 = 125$ К;
 3 – $T_3 = 115$ К

Эффективность этого процесса определяется как

$$\theta = \frac{T_m - T_s}{T_1 - T_s} \leq 1$$

Условие $\theta = 1$ соответствует случаю, когда жидкость в процессе теплообмена с паром нагревается от температуры T_1 до температуры T_s . В действительности, из-за ограниченного значения теплопроводности жидкости последняя нагревается до некоторой средней температуры жидкости T_m и тогда $\theta < 1$.

Чем меньше размер капли, тем выше ее средняя температура и тем выше эффективность процесса заполнения, т.е.

меньше длительность заправки и ниже давление в сосуде в конце заправки (рис. 7а и 7б).

Зависимость эффективности капли от ее размера представлены на рис. 8.

Заполнение «теплого» сосуда криогенной жидкостью «сверху» с закрытым дренажем. Процесс бездренажного заполнения теплого сосуда разделим на два этапа: первый этап – заполнение бака жидкостью, второй этап – сброс пара из бака в питающий резервуар.

На первом этапе жидкость направляется в бак, вентиль газосброса которого закрыт. В результате частичного испарения поступающей жидкости из-за теплообмена со стенками сосуда и сложным взаимодействием жидкость - пар - стенка давление в баке возрастает. Процесс заправки в этом случае можно рассчитать на основе приведенной выше физико-математической модели. При достижении в баке величины давления равной давлению подачи, заправка прекращается, и пары через дренаж сбрасываются на свечу или в паровое пространство питающего резервуара. Когда давление в баке снизится до минимального значения, заправка повторяется (рис. 9). На следующем этапе величина максимального пика давления меньше, чем на предыдущем, поскольку стенки бака несколько охладились. Начиная с некоторого этапа, величина пика давления ниже давления подачи и начинается заполнение бака.

Период от начала подачи жидкости в криогенный бак до конца сброса пара можно принять за один цикл.

Анализ показывает, что результаты экспериментов (рис. 9) находятся, как правило, между теоретическими значениями, определенными по моделям А и В. Очевидно, что в эксперименте проявляются в той или иной степени обе модели. Так, первый пик давления для модели А наступает позже, чем в эксперименте и позже, чем для модели В. Это обусловлено тем, что согласно модели А капли жидкости охлаждают пар, а не стенки резервуара. Из-за этого не происходит интенсивного испарения жидкости, образуется меньшее количество пара и давление растёт медленнее. Накопление массы жидкости в баке по модели А идет быстрее, чем по модели В, так как по второй модели вся жидкость попадает на стенки и большее ее количество испаряется.

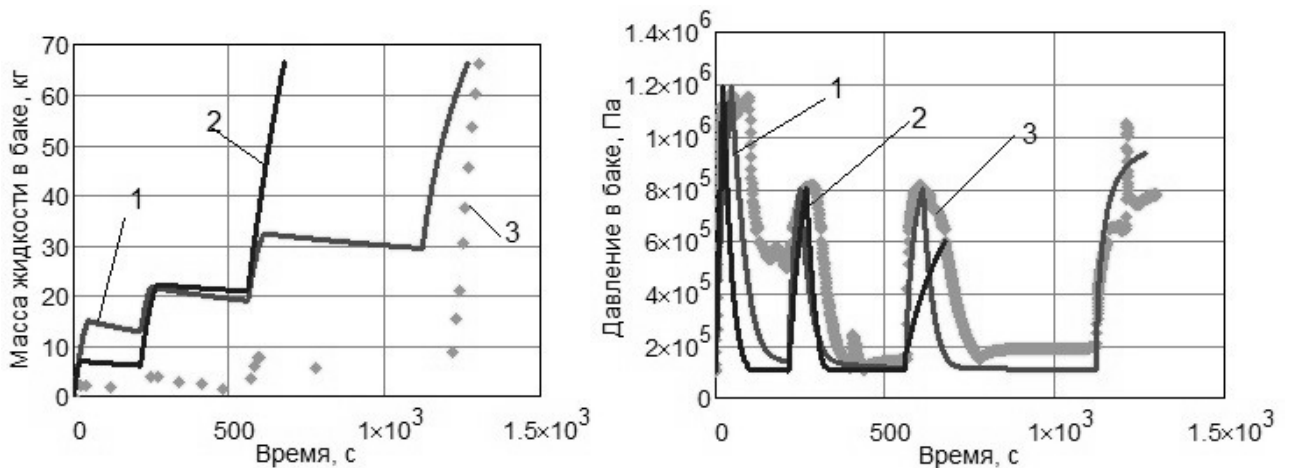


Рисунок 9. Зависимости массы жидкости и давления в баке от времени в процессе заполнения теплого бака по однолинейной схеме на СПГ

1 – Расчет по модели А; 2 – Расчет по модели В; 3 – Экспериментальные данные

Сравнение предложенных моделей с экспериментом показывает, что на их основе удовлетворительно описываются процессы, происходящие в баке. Их можно использовать для дальнейшего моделирования процесса заполнения. Необходимо при этом учитывать, что на процесс заполнения оказывают влияние температура жидкости на входе и организация движения потоков капель в баке. Варьируя эти параметры, можно определить оптимальные условия для осуществления процесса заполнения теплого бака без дренажа.

В главе 4 рассмотрено влияние на длительность заполнения паросодержания входящего потока (в том числе, парообразование при вскипании поступающей жидкости), наличия теплого газа в заправочных коммуникациях, начальной температуры стенки бака, гидравлического сопротивления заправочных и дренажных коммуникаций.

Влияние эффекта вскипания жидкости на длительность заправки. Рассмотрим верхнюю заправку теплого сосуда с открытым дренажем (рис. 10). Давление в питающем резервуаре 0,7 МПа (равновесная температура $T_S=146$ K), давление на выходе из дренажной коммуникации 0,1 МПа, ($T_S=111$ K). По мере движения жидкости по заправочным коммуникациям

равновесное давление и температура жидкости снижаются, и происходит парообразование (вскипание), причем при поступлении жидкости в сосуд массовое паросодержание потока равно 8%. При этом возрастает гидравлическое сопротивление заправочных коммуникаций и увеличивается расход пара через дренажные коммуникации. На рис. 10а показано изменение давления в баке и увеличение длительности заполнения с учетом эффекта вскипания. Видно, что при паросодержании 8% длительность заполнения бака увеличивается с 200 до 600 секунд, а потери жидкости при заправке увеличились с 3.4 до 16.5 кг, что составляет 23.6 % от заправленной массы жидкости в бак.

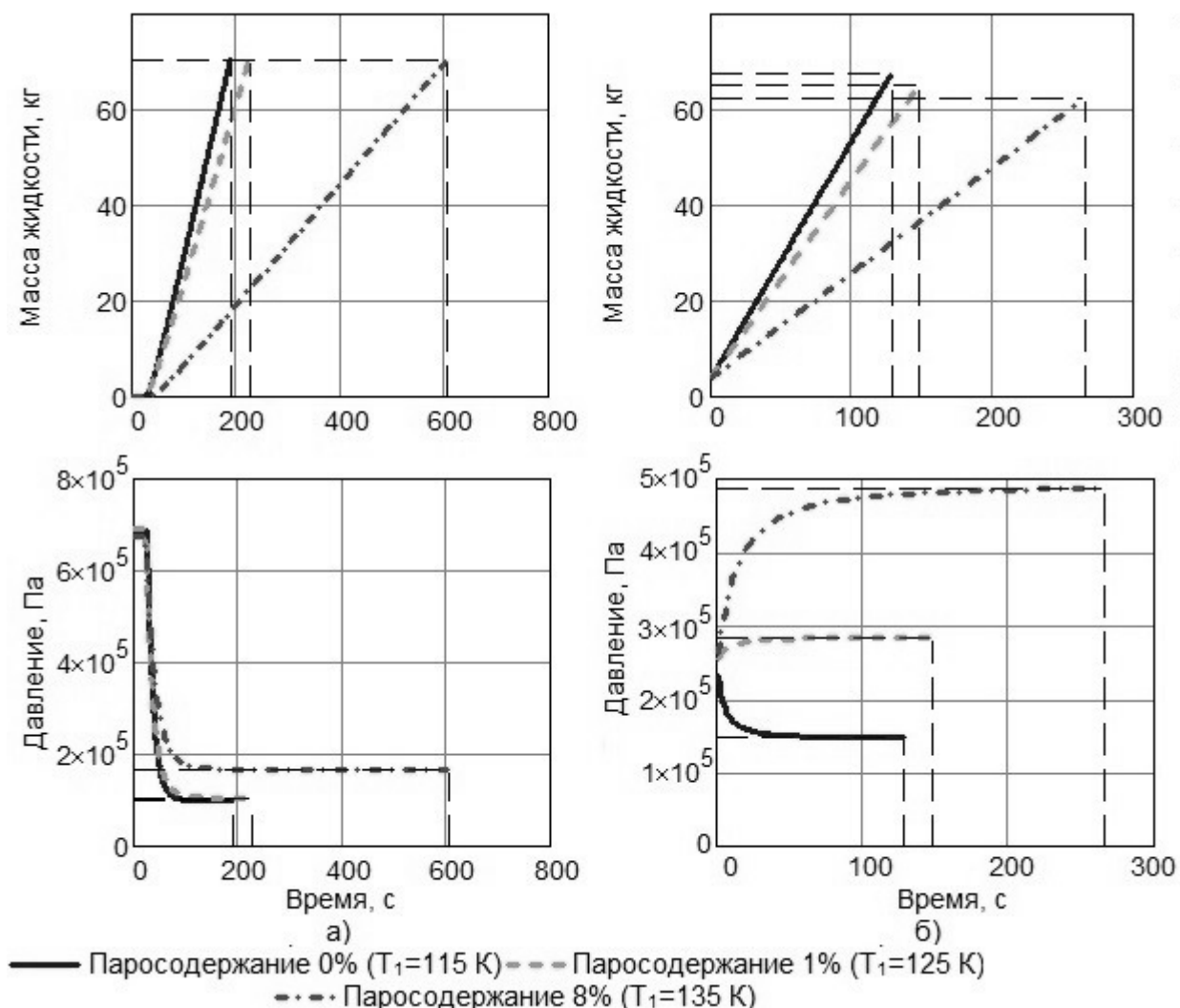


Рисунок 10. Зависимости массы жидкости накопленной в баке и давления в баке от времени при различной температуре жидкости на входе: а) теплого бака сверху с открытым дренажом; б) холодного бака без дренажа

На рис. 10б показано влияние вскипания жидкости при бездренажной заправке холодного бака (начальное давление в криогенном баке 0,25 МПа, начальная температура стенок равна равновесной температуре в баке 123,8 К). Видно, что при заправке жидкостью с паросодержанием 8% повышается

давление в баке с 0,25 до 0,5 МПа, длительность заправки увеличивается с 130 до 260 с., а масса заправленной жидкости снижается с 68 до 62 кг (10%).

Влияние начальной температуры стенки сосуда на параметры бездренажной заправки. Как было показано выше, бездренажная заправка холодного бака (начальная температура стенок равна равновесной температуре жидкости) реализуется относительно просто. Но бездренажную заправку теплого бака (начальная температура стенок равно 300 К) удалось провести только пульсационным способом. Естественным является вопрос, при каких параметрах (начальной температуре стенки и давлении подачи) можно осуществить бездренажную заправку. На рис. 11 представлены значения первого пика давления (рис. 9б) в зависимости от начальной температуры стенки бака. Предполагается, что если давление подачи жидкости выше, чем величина первого пика давления, то процесс заправки продолжается.

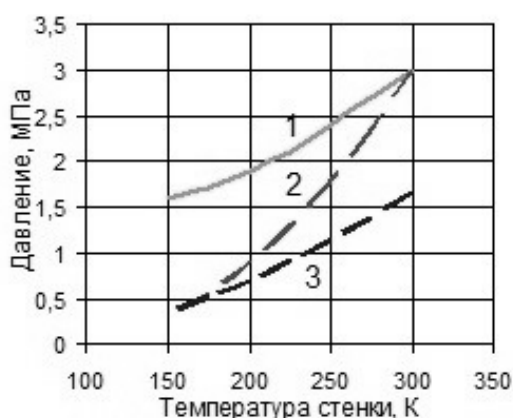


Рисунок 11. Зависимость максимального давления в баке от температуры стенки бака для бездренажной технологии заполнения: 1 – Давление за насосом; 2 – Модель А; 3 – Модель В

около 2 МПа давление в баке после заправки составит около 0,8 МПа. С понижением температуры стенки резервуара уменьшается и требуемое давление подачи. Таким образом, результаты расчетов позволили впервые определить условия бездренажной заправки теплого резервуара в одну фазу.

Как указывалось выше, с помощью разработанной модели можно проводить численное моделирование по влиянию других факторов на процесс заправки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

На основании работы можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментально показана возможность заправки КБТС, как методом перекачивания, так и с помощью насоса, при этом установлено, что:

- за счет неполного охлаждения стенок сосуда можно сократить время его заправки по двухлинейной схеме (с открытым дренажом) в три-четыре раза;
- бездренажная заправка холодного бака может быть реализована при подаче жидкости с недогревом 5 – 10 К по отношению к состоянию насыщения в сосуде;
- бездренажная заправка теплого бака (температура стенок бака 300 К) может быть реализована только с промежуточным сбросом давления;
- бездренажная заправка холодного бака может проходить как при снижении, так и при повышении давления в сосуде в зависимости от температуры поступающей жидкости.

2. Разработанная физико-математическая модель заполнения сосуда криогенной жидкостью, отличающаяся тем, что процессы в замкнутом объеме описываются на основе нестационарной термодинамической модели с учетом теплообмена и смешения потоков между поступающей жидкостью, перегретым паром и стенками бака, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными и позволяет анализировать различные схемы заправки (заправки по двухлинейной и однолинейной технологиям, «сверху» и «снизу», теплого и холодного бака).

3. Характер процесса заправки во многом определяется соотношением между расходом жидкости, взаимодействующей с перегретым паром в сосуде, и расходом жидкости, вступающей в непосредственный контакт со стенками сосуда. На практике это соотношение носит случайный характер и поэтому расчетные значения параметров заправки находятся в некотором интервале возможных значений.

4. На основании моделирования показано:

- вскипание криогенной жидкости в коммуникациях и в сосуде во время заправки может привести к увеличению длительности переходного процесса в несколько раз;
- уменьшение радиуса капель жидкости поступающей в сосуд с 5 до 0,5 мм сокращает длительность бездренажной заправки на 15 – 20 %.
- бездренажную заровку теплого бака в одну фазу (без промежуточного сброса давления) можно осуществить при начальной температуре стенок бака около 200 К и давления подачи около 2 МПа, при этом давление в баке после заправки составит 0,7 – 0,8 МПа.

5. За счет правильной организации процесса заправки криогенной бортовой топливной системы можно заправлять автотранспортные средства сжиженным природным газом за времена соизмеримые с заправками автотранспорта традиционными видами топлива и обеспечивать достаточную безопасность процесса, используя бездренажную технологию.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Экспериментальная проверка технологий заправки криогенных бортовых топливных систем // Транспорт на альтернативном топливе – 2013. № 3 (33). – с. 37-42.
2. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Современные криогенные бортовые топливные системы для автотранспорта и технологии их заправки // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. № 6 (36). – с. 41-44.
3. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Учет влияния теплообмена на бездренажную заправку // Вестник МЭИ. – 2013. №5. – с. 48-53

В других изданиях

4. Горбачев С.П., Коледова К.И., Красноносова С.Д. Термодинамические модели заправки резервуара криогенной жидкостью // Технические газы – 2001. - № 5 – с. 32-40.
5. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Исследование процессов бездренажной заправки топливного бака криогенной жидкостью // Технические газы. – 2013. №6. – с. 64-70
6. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Особенности заправки резервуара криогенной жидкостью // Новые технологии в газовой промышленности: сб. тез. IX Всеросс. конф. молод. уч., спец. и студ., Москва, 2011, с. 26.
7. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Заправки резервуара криогенной жидкостью // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сб. тез. XVIII Междунар. науч.-прак. конф. асп. и студ., Москва, 2012, т.4, с. 72-73.
8. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Моделирование процесса бездренажной заправки криогенного резервуара // Повышение эффективности, надежности и безопасности работы энергетического оборудования ТЭС и АЭС: сб. тез. Нац. конф., Москва, 2012, с. 204-205.
9. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Влияние теплообмена на бездренажную заправку холодного криогенного резервуара // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сб. тез. XIX Междунар. науч.-прак. конф. асп. и студ., Москва, 2013, т.4, с. 54.
10. Горбачев С.П., Кириенко К.И. Экспериментальная проверка технологий заправки криогенных бортовых топливных систем // Промышленные газы: сб. док. III Междунар. Науч. Конф., Москва, 2013, с. 42-43.