На правах рукописи

Славин Максим Владимирович

УДК 536.24, 621.594

Разработка и исследование технологии заправки автотранспорта сжиженным природным газом

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2006

Диссертация выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Жердев А. А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Филин Н. В.

кандидат технических наук, доцент Семенов В. Ю.

Ведущая организация: ООО "ВНИИГАЗ"

Защита диссертации состоится « 25 » октября 2006 г. в 15 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д.212.141.16 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус факультета «Энергомашиностроение».

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан « ___ » сентября 2006 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д212.141.16,
кандидат технических наук, доцент Глухов С. Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В настоящее время из-за сложившейся в крупных городах неблагоприятной экологической обстановки и истощения на Земле запасов нефти ведется поиск альтернативных автомобильных топлив, способных решить эти взаимосвязанные проблемы. Обзор литературных данных показывает, что в ближайшее время наиболее вероятно развитие следующих видов альтернативных топлив: водород (сжиженный, сжатый или получаемый на борту транспортного средства (ТС)), диметиловый эфир, метанол, природный газ (сжиженный или сжатый).

На данный момент для всех вышеперечисленных веществ имеются сложности в цепи "производство – стационарное хранение – доставка потребителю – хранение на борту ТС – получение энергии в двигателе". В мире параллельно ведутся научные разработки по внедрению этих топлив, и окончательный выбор в пользу какого-либо из них не сделан. В работе сделана попытка решения некоторых проблем, связанных с использованием сжиженного природного газа на транспорте.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью является создание термодинамически обоснованной технологии заправки автомобильных ТС сжиженным природным газом (СПГ), сравнимой по трудоемкости с заправкой бензобака и учитывающей требования минимального воздействия на окружающую среду.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

- теоретическое исследование последовательности происходящих в баке процессов и оценка вклада каждого из них в суммарные потери жидкости и продолжительность заправки;
- создание модели захолаживания криогенного бака, позволяющей оптимизировать время заправки и потери жидкости;
- теоретическое исследование заправки насыщенной жидкостью и заправки жидкостью с температурой ниже равновесной при давлении заправки (недогретой жидкостью);
- теоретическое исследование методов утилизации паров СПГ.
- разработка и создание экспериментального стенда на основе криогенного бака для исследования процесса заправки;
- экспериментальное исследование термодинамических параметров процесса заправки бака.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

– произведена оценка влияния коэффициента теплоотдачи при контакте криогенной жидкости и образующегося пара со стенками бака на продолжительность захолаживания;
- проведен анализ четырех моделей определения температурного напора "газ-стенка" при захолаживании бака;

- проведен теоретический анализ схем заправки бака с открытым и закрытым дренажом;
- проведен теоретический анализ четырех схем утилизации дренируемого пара;
- получены новые результаты экспериментального исследования заправки криогенного бака при различных давлениях на входе жидкости.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

– предложена аналитическая методика оценки продолжительности захолаживания криогенного бака;
- разработаны рекомендации по снижению времени заправки и дренажных потерь в процессе захолаживания бака и в процессе накопления в нем жидкости;
- обоснована предпочтительность различных методов получения недогретой жидкости для заправочных станций различной мощности;
- на основе криогенного бака объемом 0.2 $м^3$ создана экспериментальная система для определения термодинамических параметров процесса заправки бака (давление, температура, расход дренируемого пара);
- разработаны практические рекомендации по оптимальному конструктивному исполнению различных элементов бака и заправочной станции.

РЕКОМЕНДАЦИИ К ВНЕДРЕНИЮ

Созданный экспериментальный стенд задействован в ООО "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - ВНИИГАЗ", для изучения термодинамических параметров процесса заправки бака.

ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ обеспечивалась:

- применением аттестованных измерительных средств и апробированных методик измерения;
- хорошей повторяемостью полученных результатов измерений;
- использованием классических термодинамических зависимостей.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:

- предложенная модель захолаживания криогенного бака;
- рекомендации по снижению времени заправки и дренажных потерь в процессе захолаживания бака и в процессе накопления в нем жидкости;
- результаты аналитического исследования заправки криогенного бака равновесной и недогретой жидкостью.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

– конференции МЭИ "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" 28.02-01.03 2002 г;

– научно-техническом семинаре кафедры "Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения" МГТУ им. Н. Э. Баумана 28.12 2005 г;
– научно-техническом семинаре ООО "ВНИИГАЗ" 15.03 2006 г.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА заключается в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в разработке моделей захолаживания и заполнения криогенного бака.

ПУБЛИКАЦИИ: По теме диссертационной работы опубликовано 3 печатные работы.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ: Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и содержит 94 стр. основного текста, 52 рис., 4 табл.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ подчеркивается актуальность проблемы поиска альтернативных автомобильных топлив и дается сравнение различных путей решения этой проблемы.

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена обзору литературных данных и постановке задач исследования. Проанализированы существующие проблемы перевода автотранспорта на СПГ, определены основные технические требования к бортовым топливным системам. Анализ литературных источников показывает, что у созданных на данный момент в России КБТС имеются уязвимые места с точки зрения специфических ограничений, налагаемых автотранспортным средством.

Главным выводом литературного обзора является необходимость создания технологии заправки, обоснованной с точки зрения малого времени заправки, минимальных потерь жидкости, ограниченного сброса газа в окружающую среду и возможности коммерческого учёта количества заправленного СПГ. Заправочная станция должна быть рассчитана на заправку топлива при различных начальных условиях в криогенном баке автомобиля, в т. ч. при высоком давлении в баке или заправке теплого бака.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена исследованию процесса захолаживания криогенного бака. Для иллюстрации происходящих в баке процессов при его заправке на рис. 1 представлена типичная экспериментальная кривая роста массы жидкости m в зависимости от времени τ при заполнении теплого криогенного бака.

Из рис. 1 следует, что в течение некоторого времени накопления массы содержимого бака не наблюдается, то есть вся поступающая жидкость испаряется на стенках внутреннего сосуда, охлаждая их. Затем процесс роста массы проходит переходный участок, после чего накопление жидкости происходит линейно. Разделим процесс заправки теплого сосуда на две

стадии:

- захолаживание бака, характеризующееся отсутствием роста массы m и интенсивным охлаждением стенок внутреннего сосуда;
- накопление жидкости, характеризующееся линейным ростом m и стабилизацией температуры стенок внутреннего сосуда.

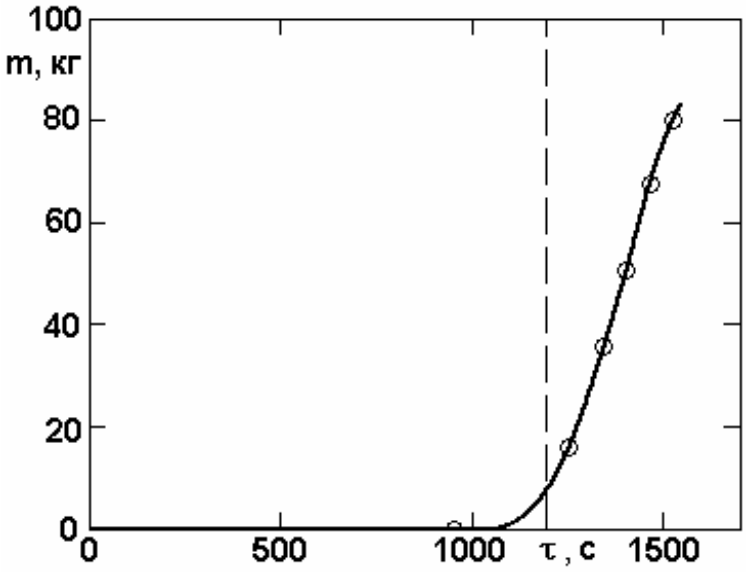

Рисунок 1. Процесс накопления жидкости

Момент перехода от первой стадии ко второй будем определять как пересечение финального линейного участка $m(\tau)$ с осью абсцисс (штриховая линия на рис. 1).

Анализ литературных данных показывает, что предложенные ранее модели заправки криогенного сосуда достаточно трудоемки и не позволяют быстро оценить время захолаживания сосуда. Ниже представлена модель захолаживания, основанная на том факте, что основную практическую ценность представляют два параметра процесса охлаждения: количество жидкости, необходимое для охлаждения бака, и длительность этапа охлаждения.

Для создания модели захолаживания будем использовать допущение о том, что параметры газа и температура стенки внутреннего сосуда не имеют пространственного распределения. Такое допущение несправедливо при медленной заправке стационарных криогенных емкостей, поэтому будем предполагать, что описываются процессы для малых баков с достаточно высокой скоростью заправки. Разделим процесс заправки теплого сосуда на три этапа:

I. Входящая жидкость охлаждает газ в баке – этот этап заканчивается при достижении средней температуры в баке уровня температуры насыщения;
II. В емкости происходит сложный процесс теплообмена, включающий в себя испарение капель жидкости и нагрев газа в пристеночной области;
III. Тепловой поток от стенок снижается настолько, что расход входящей жидкости превышает скорость ее испарения – в баке происходит накопление жидкости.

Таким образом, процесс захолаживания состоит из этапов I и II, а накопление массы жидкости соответствует этапу III. Можно показать, что

продолжительность первого этапа заправки описанного бака СПГ имеет порядок 1 с. Это объясняется тем, что теплообмен между стенками и газом на этом этапе столь незначителен, что почти вся энтальпия входящей жидкости идет на охлаждение газа и понижение давления в баке.

Изменение давления в ходе II и III этапов описывается предложенной В.Е. Филимоновым зависимостью

$$m \cdot c_v \cdot \frac{dP}{d\tau} \cdot \frac{dT_s}{dP} = Q + \frac{v''\cdot(h_{вх} - h') + v'\cdot(h'' - h_{вх})}{v'' - v'} \cdot G_{вх} - \frac{v''\cdot(h_{вых} - h') + v'\cdot(h'' - h_{вых})}{v'' - v'} \cdot G_{вых} \quad (1)$$

где c_v – изохорная теплоемкость парожидкостной смеси, P – давление в криогенном баке, T_s – равновесная температура, Q – теплоприток от стенок бака к его содержимому, v' и v'' – удельные объемы жидкой и паровой фаз, h' и h'' – энтальпии жидкой и паровой фаз, $h_{вх}$, $h_{вых}$ – энтальпии входящей жидкости и дренируемого пара, $G_{вх}$, $G_{вых}$ – массовые расходы входящей жидкости и дренируемого пара.

Можно показать, что численное решение данного уравнения для процесса захолаживания дает неустойчивое решение. Это связано с тем, что в процессе захолаживания левая часть уравнения (1) на порядки меньше каждого из слагаемых в правой части из-за малой массы системы m. Таким образом, левая часть уравнения (1) на порядок ниже теплопритока Q и она может быть принята равной нулю, и итоговая система уравнений состоит из уравнения сохранения энергии для стенки, уравнения сохранения массы и уравнения энергии

$$d\theta/d\tau = -Q/M_б \cdot c_{ст}(\theta) \qquad dm/d\tau = G_{вх} - G_{вых}$$

$$m \cdot c_v(x_б(m,P),P) \cdot \frac{dP}{d\tau} \cdot \frac{dT_s}{dP} = Q + \frac{v''\cdot(h_{вх} - h') + v'\cdot(h'' - h_{вх})}{v'' - v'} \cdot G_{вх} - \frac{v''\cdot(h_{вых} - h') + v'\cdot(h'' - h_{вых})}{v'' - v'} \cdot G_{вых} \quad (2)$$

которые при $T_{вых} > T_s$ дополняются условиями $dm/d\tau = 0$, $dP/d\tau = 0$. Здесь θ – температура стенки внутреннего сосуда, $M_б$ и $c_{ст}$ – масса и теплоемкость внутреннего сосуда.

Динамика охлаждения внутреннего сосуда учитывает контакт со стенками жидкой и паровой фазы: $Q = (\alpha \cdot (F - F_{ж}) + \alpha_{ж} \cdot F_{ж}) \cdot (\theta - T_{вых})$, где $F_{ж}$ – площадь контакта жидкости со стенками, $\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи по жидкости. Изохорная теплоемкость содержимого бака c_v является функцией паросодержания и давления в баке: $c_v(x_б, P)$, где $x_б$ – массовое паросодержание содержимого бака.

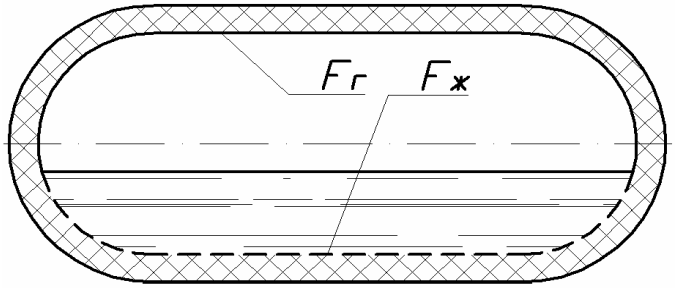

Рисунок 2. Расчетная схема распределения жидкой фазы в сосуде

Для определения $F_{ж}$ воспользуемся предположением о том, что вся жидкая фаза контактирует со стенками в

нижней части сосуда (см. рис. 2), и что выноса жидкой фазы в дренаж не происходит – в этом случае $F_{ж}$ вычисляется как функция от (m, P) из геометрических соображений. Также будем считать, что жидкая фаза начинает выпадать в момент снижения $T_{вых}$ до уровня температуры насыщения.

Основным недостатком системы уравнений (2) является невозможность аналитически определить время захолаживания – это связано с тем, что производные переменных m, P нельзя принять равными нулю при наличии накопления жидкости. Для упрощения системы уравнений воспользуемся экспериментальными данными.

На рис. 3 представлены типичные экспериментальные кривые изменения давления в баке P и расхода через дренажную линию $G_{вых}$. Данные результаты получены при заправке бака жидким азотом при следующих условиях:

- начальные условия: температура стенки $\theta_{нач}$ = 300 К, температура газа в баке $T_{нач}$ = 300 К, давление в баке $P_{нач}$ = 1.5 бара;
- давление на входе в заправочную линию P_1 = 3.5 бара.

Отметим следующие особенности представленных на рис. 3 графиков:

1. во время захолаживания давление в баке P остается практически постоянным (рис. 3 б);
2. во время захолаживания наблюдается слабый рост дренажного расхода $G_{вых}$ (рис. 3 а). Это связано с тем, что дренажный расход при охлаждении стенки бака намного больше дренажного расхода при заправке холодного бака, что приводит к появлению звукового течения в дренажной линии, т. е. $G_{вых}$ ограничивается не гидравлическим сопротивлением дренажной линии, а ее критическим сечением.

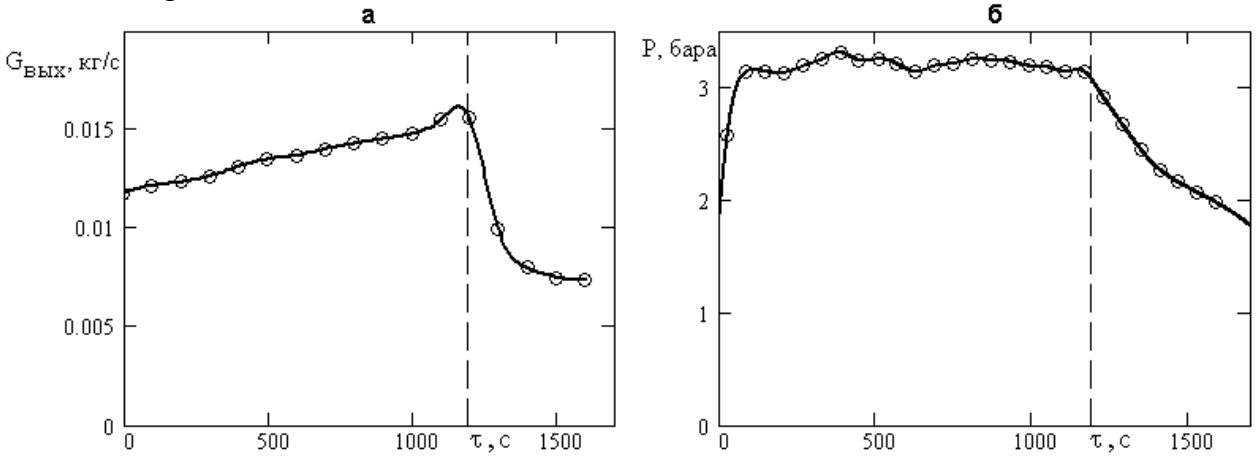

Рисунок 3. Экспериментальные данные при заправке бака жидким азотом
а – расход через дренажную линию, б – давление

Если принять расход через выходную линию постоянным, то система уравнений (2) преобразуется в следующие уравнения:

$$M_б \cdot c_{ст} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \begin{cases} -G \cdot \left(c_{рг} \cdot \left(T_{вых} - T_s\right) + \left(h'' - h_{вх}\right)\right) & при \quad T_{вых} > T_s \\ -G \cdot \left(h'' - h_{вх}\right) & при \quad T_{вых} = T_s \end{cases}$$

$$M_б \cdot c_{ст} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = -\alpha \cdot F \cdot \left(\theta - T_{вых}\right)$$

Если $c_{ст}$ и $c_{рг}$ принять постоянными и равными соответствующим среднеинтегральным теплоемкостям, а расход G определить из уравнения $G_{вх}(P) = G_{вых}(P, T_s) = G$, то уравнения интегрируются. Зависимость температуры выходящего газа от времени является ломаной функцией:

$$T_{вых}(\tau) = \begin{cases} \dfrac{\theta_{нач} - T_s + \dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}}}{1 + \dfrac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F}} exp\left(\dfrac{-G \cdot c_{рг} \cdot \tau}{M_б \cdot c_{ст} \cdot \left(1 + \dfrac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F}\right)}\right) + T_s - \dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}} & при \quad \tau < \tau_T \\ T_s & при \quad \tau \geq \tau_T \end{cases} \quad (3)$$

где время τ_T соответствует моменту достижения $T_{вых}(\tau)$ температуры насыщения:

$$\tau_T = \frac{M_б \cdot c_{ст}}{G \cdot c_{рг}} \cdot \left(1 + \frac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F}\right) \cdot ln\left(\frac{\theta_{нач} - T_s + \dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}}}{\dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}} \cdot \left(1 + \dfrac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F}\right)}\right)$$

Температура стенки до момента времени τ_T падает экспоненциально, а после τ_T – линейно:

$$\theta(\tau) = \begin{cases} \left(\theta_{нач} - T_s + \dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}}\right) \cdot exp\left(\dfrac{-G \cdot c_{рг} \cdot \tau}{M_б \cdot c_{ст} \cdot \left(1 + \dfrac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F}\right)}\right) + T_s - \dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}} & при \quad \tau < \tau_T \\ \dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}} \cdot \left(\left(1 + \dfrac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F}\right) \cdot \left(1 + ln\left(\dfrac{\theta_{нач} - T_s + \dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}}}{\dfrac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}} \cdot \left(1 + \dfrac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F}\right)}\right)\right) - \left(1 + \dfrac{G \cdot c_{рг}}{M_б \cdot c_{ст}} \cdot \tau\right)\right) + T_s & при \quad \tau \geq \tau_T \end{cases}$$

.

Время снижения температуры стенки θ до уровня T_s составляет

$$\tau_\theta = \frac{M_б \cdot c_{ст}}{G \cdot c_{рг}} \cdot \left[\left(1 + \frac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F} \right) \cdot \left(1 + ln \left(\frac{\theta_{нач} - T_s + \frac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}}}{\frac{h'' - h_{вх}}{c_{рг}} \cdot \left(1 + \frac{G \cdot c_{рг}}{\alpha \cdot F} \right)} \right) \right) - 1 \right] \qquad (4)$$

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ исследуется процесс накопления жидкости в криогенном баке при заправке насыщенной и недогретой жидкостью (рис. 4). Исследование процесса накопления жидкости производилось для заправки насыщенной и недогретой жидкостью.

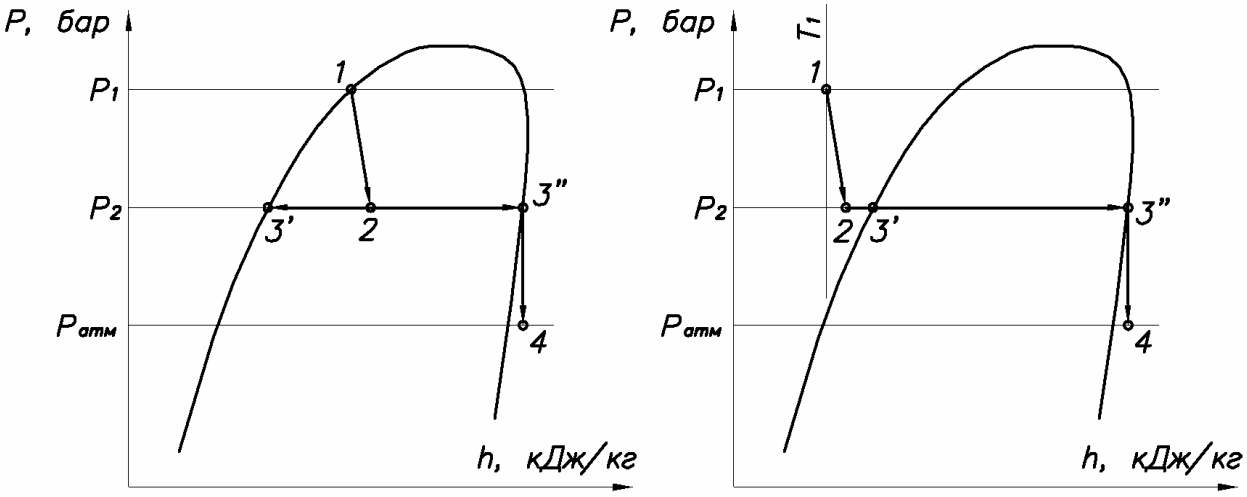

Рисунок 4. Заправка насыщенной и недогретой жидкостью

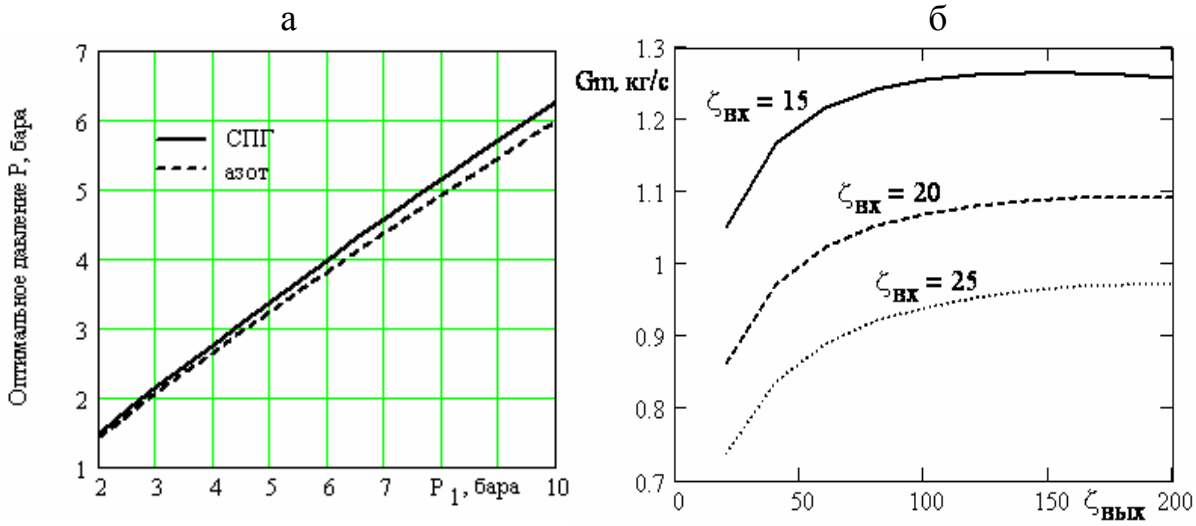

Рисунок 5. Оптимальное значение *P* для наполнения насыщенной жидкостью

Для заправки насыщенной жидкостью показано, что условием максимальной скорости заправки является соответствие давления в баке

уравнению $\frac{d}{dP}\left[\frac{r(P)\cdot(P_1-P)}{r(P)\cdot(v'(P_1)+v'(P))+(h'(P_1)-h'(P))\cdot(v''(P)+v'(P))}\right]=0$.

Основным достоинством данного уравнения является то, что оно не содержит конструктивных характеристик бака и зависит только от свойств жидкости и давления P_1 на входе в заправочную линию. Эту же зависимость можно представить графически, что сделано на рис. 5а для азота и СПГ. Применительно к конструктивным характеристикам бака данная зависимость выражается в том, что, зная гидравлическое сопротивление входной линии можно подобрать такое сопротивление выходной линии, при котором скорость заправки будет максимальной (рис. 5б).

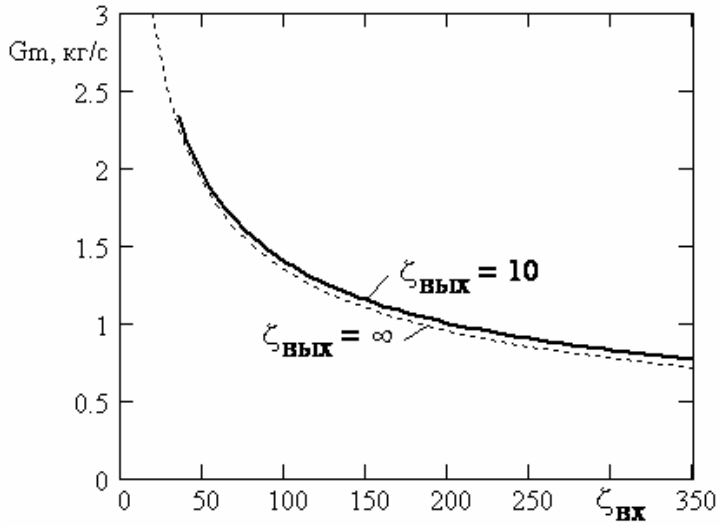

Рисунок 6. Скорость заправки при открытом и закрытом дренаже

Для недогретой жидкости показано, что скорости заправки при закрытом и открытом дренаже практически не различаются (рис. 6). Это связано с тем, что количество удаляемого пара настолько мало, что даже при бездренажной заправке оно полностью конденсируется поступающим недогретой жидкостью практически без изменения скорости заправки.

Показано, что на процесс заправки с закрытым дренажом оказывает влияние начальное давление в баке. При высоком начальном давлении процесс заправки может практически остановиться, т. е. накопления жидкости не происходит, тогда как при низком начальном давлении и прочих равных условиях заправки идет достаточно быстро (рис. 7).

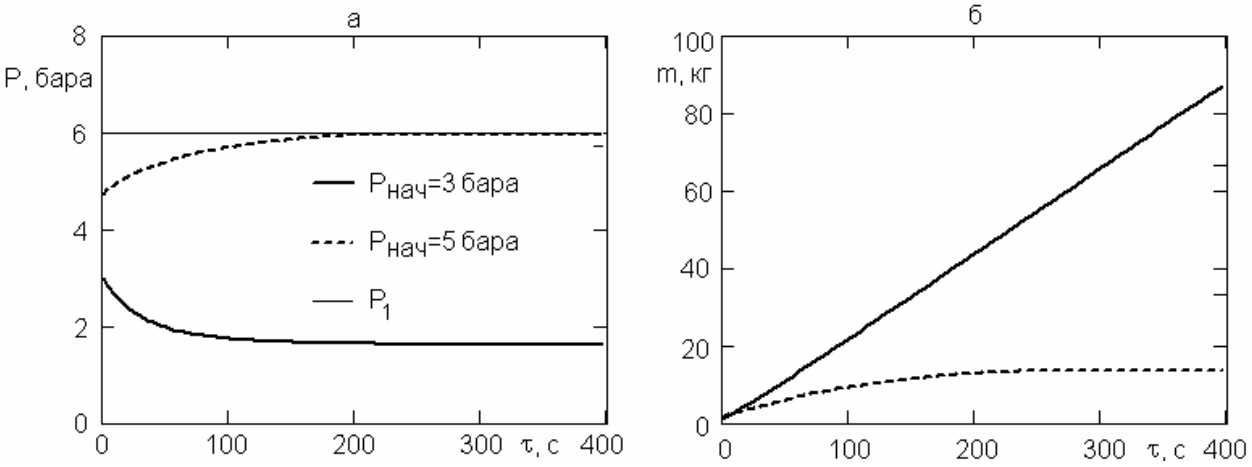

Рисунок 7. Влияние начального давления в баке на процесс заправки

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ дается описание созданной экспериментальной установки. Исследование процесса заправки (рис. 8) производилось путем заправки жидким азотом и сжиженным природным газом установленного на весах 11 криогенного бака 5. Передавливание жидкости осуществлялось предварительным наддувом заправочной емкости. Масса содержимого бака m измерялась с помощью весов 11, давление в баке P – манометром 7, а расход $G_{вых}$ и температура $T_{вых}$ – расходомером и термометром на дренажной линии. При заполнении жидким азотом дренируемый газ выпускался в атмосферу непосредственно на месте заправки, при заполнении СПГ – выпускался на свечу, удаленную на 25 м.

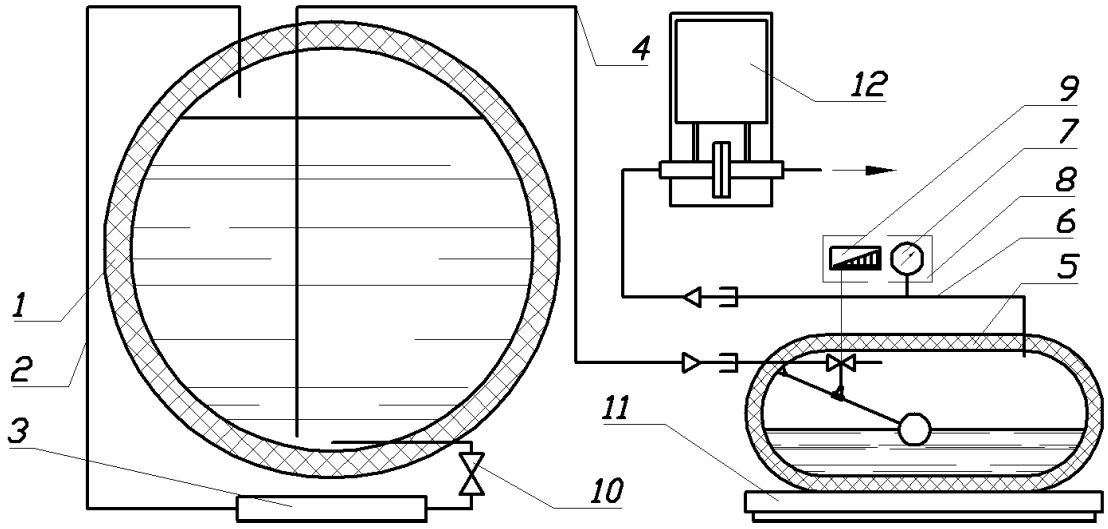

Рисунок 8. Схема эксперимента
1 – заправочная емкость, 2 – контур наддува, 3 – теплообменник наддува, 4 – заправочная линия, 5 – криогенный бак, 6 – дренажная линия, 7 – манометр, 8 – панель бака, 9 – указатель уровня, 10 – вентиль наддува, 11 – весы, 12 – расходомер

Для сравнения базовой модели захолаживания с экспериментальными данными в выражении для $G_{вых}$ учитывается возможность критического течения в выходной линии:

$$G_{вых}(P,T_{вых}) = min\left(\begin{array}{c} f_{крит}\cdot v_s(T_{вых},P)\cdot \rho_г(T_{вых},P) \\ \pi\cdot d_{вых}^2\cdot\sqrt{\dfrac{\rho_г\left(\dfrac{P_{атм}+P}{2},T_{вых}\right)\cdot(P-P_{атм})}{8\cdot\zeta_{вых}}} \end{array} \right)$$

Решение системы уравнений (2) для жидкого азота показано на рис. 9 пунктирными линиями. Соответствующие экспериментальные значения показаны сплошными линиями. Заполнение бака азотом производилось из цистерны типа ЦТК, на рис. 9г также показаны значения равновесной температуры T_s, вычисленные по данным на рис. 9б. Из рис. 9 следует, что

уточненная система уравнений (2) отражает такие особенности процесс заправки, как:

- переходный участок роста массы (рис. 9а);
- падение давления в сосуде в конце захолаживания (рис 9*б*);
- рост расхода через дренажную линию (рис 9в).

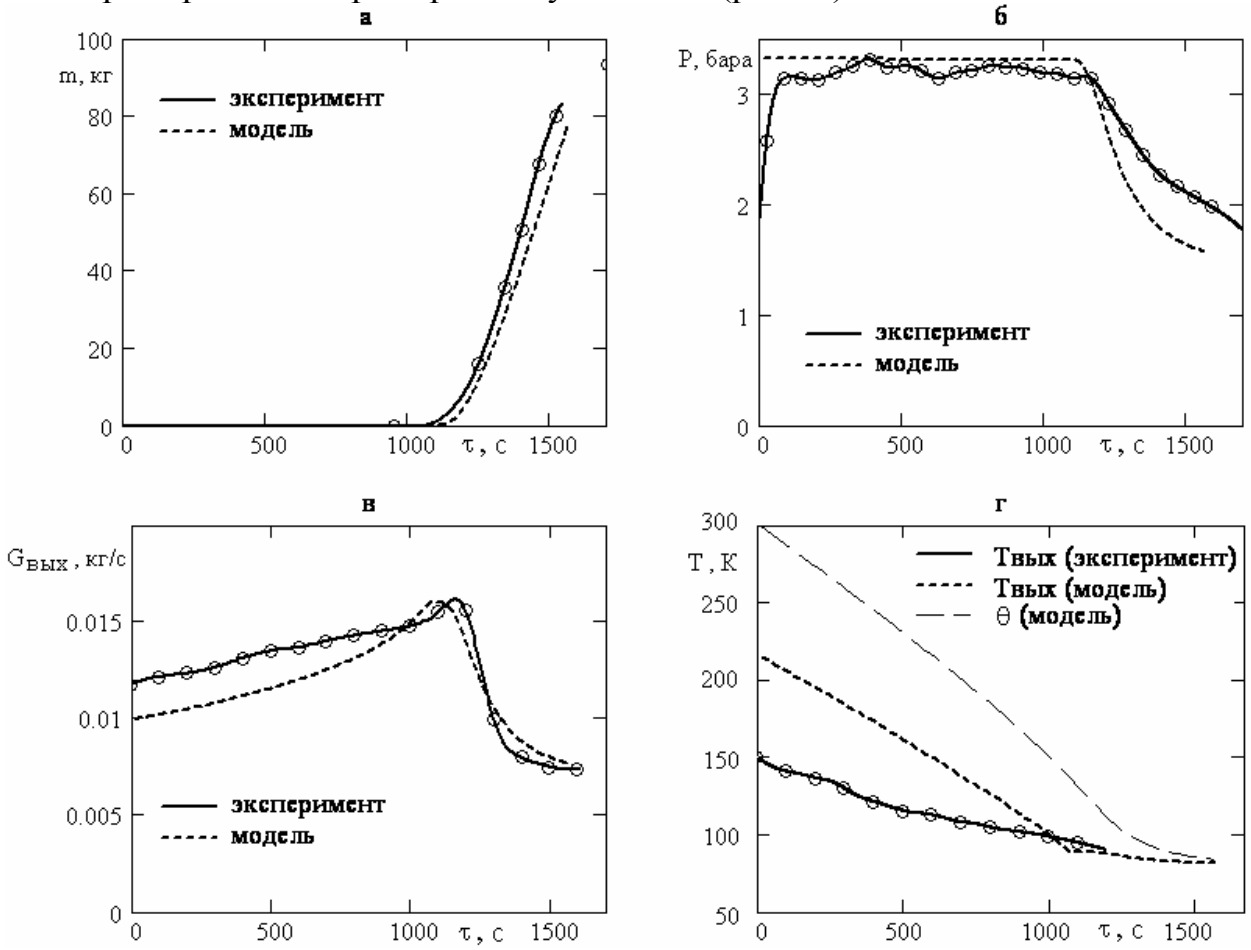

Рисунок 9 – решение системы уравнений (2) для заправки бака азотом
а – масса жидкости, б – давление, в – расход через дренаж, г – температура дренируемого газа

В соответствии со схемой определения времени захолаживания на рис 1, время захолаживания на рис. 9а составляет 1140 с, что на 7% ниже экспериментального значения (1214 с). Коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении жидкости $\alpha_{ж}$ (см рис. 10) сравним с коэффициентом теплоотдачи для газа, поэтому эта величина не оказывает существенного влияния на время захолаживания. Основным фактором, приводящим к погрешности определения времени захолаживания по уравнениям (2), является несоответствие температуры выходящего газа экспериментальным данным. Расчетная температура выходящего газа выше экспериментальной (рис. 9г), поэтому расчетное время захолаживания ниже экспериментального.

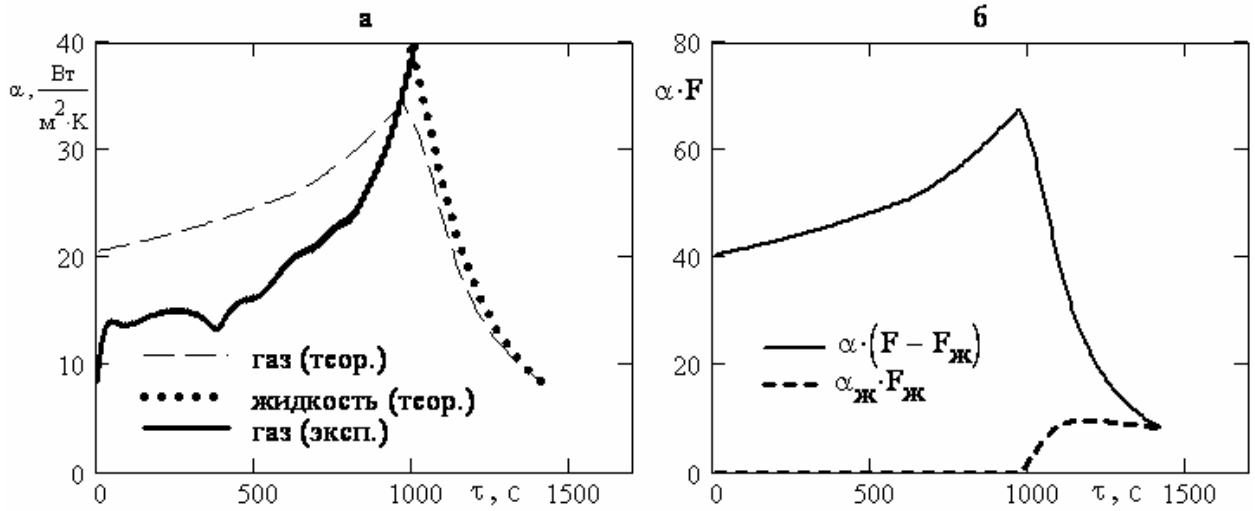

Рисунок 10 – теплообмен газа/жидкости со стенками для заправки бака азотом: а – коэффициенты теплоотдачи, б – произведение коэффициентов теплоотдачи по газу и жидкости на площади контакта газа и жидкости соответственно

Экспериментальный интегральный коэффициент теплоотдачи в процессе захолаживания был определен из (2):

$$\alpha_э = \frac{\frac{v''\cdot\left(h_{вых}\left(T_{вых.э}\right)-h'\right)+v'\cdot\left(h''-h_{вых}\left(T_{вых.э}\right)\right)}{v''-v'}\cdot G_{вых.э}-\frac{v''\cdot\left(h_{вх}-h'\right)+v'\cdot\left(h''-h_{вх}\right)}{v''-v'}\cdot G_{вх}\left(P_э\right)}{F\cdot\left(\theta-T_{вых.э}\right)}$$

В связи с тем, что в экспериментах температура стенки не измерялась, для вычисления $\alpha_э$ (рис. 10а) использовались теоретические значения θ (рис. 9г); для температуры $T_{вых.э}$ и давления $P_э$ использовались экспериментальные данные. Из рис. 10а следует, что использование зависимостей для естественной конвекции для определения коэффициента теплоотдачи дало завышенные значения α. На рис. 11 показаны результаты расчета и экспериментальной заправки бака СПГ. Эксперимент проводился при следующих условиях: начальные условия: температура стенки $\theta_{нач}$ = 300 К, температура газа в баке $T_{нач}$ = 300 К, давление в баке $P_{нач}$ = 1.5 бар; давление на входе в заправочную линию P_1 = 6 бар. Ошибка определения времени захолаживания составляет 5% (267 с. в эксперименте, 280 с. теоретически).

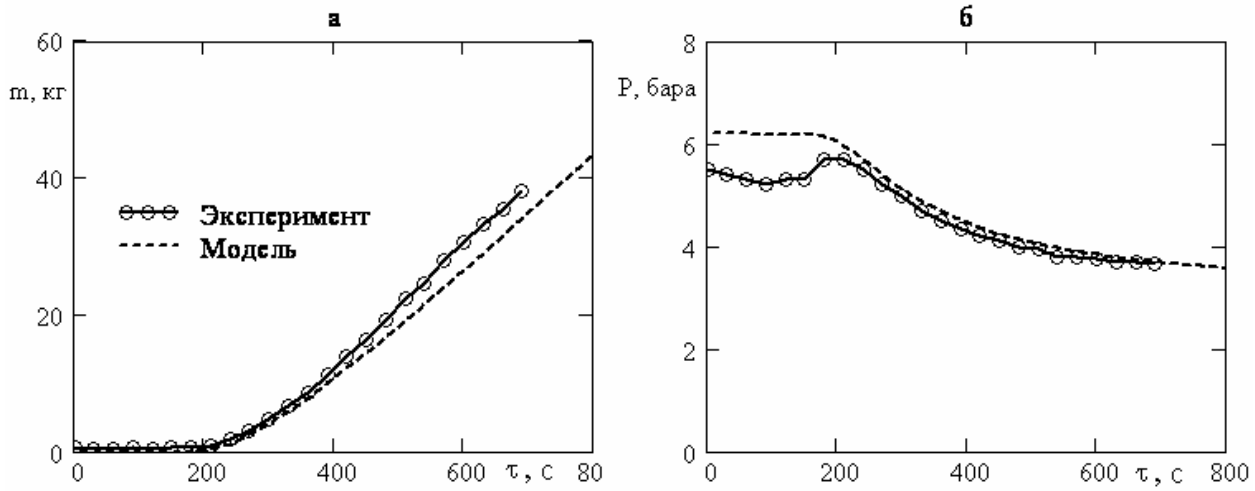

Рисунок 11. Решение системы (2) для заправки бака СПГ
а – масса жидкости, б – давление

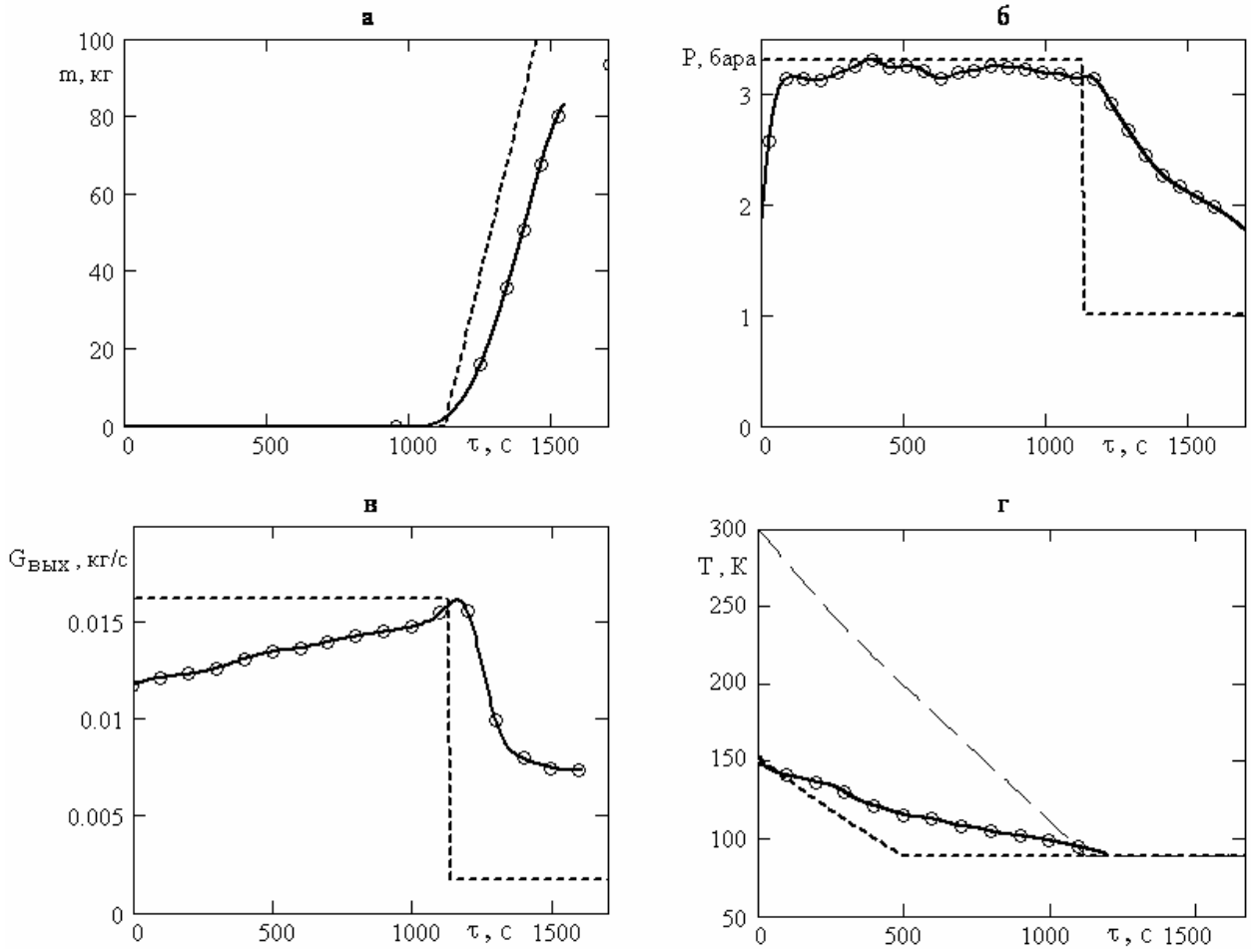

Рисунок 12. Демонстрация аналитической модели для заправки бака азотом
а – масса жидкости, б – давление, в – расход через дренаж, г – температура дренируемого газа

На рис. 12 представлены результаты моделирования заправки бака жидким азотом в соответствии с (3). Из рис. 12 следует, что теоретическое

изменение температуры выходящего газа не соответствует экспериментальным данным. Тем не менее, сравнение двух параметров, обладающих наибольшей практической ценностью для описания процесса захолаживания показало хорошую точность модели при определении балансовых показателей процесса захолаживания бака:

- время захолаживания 1214 с в эксперименте и $\tau_\theta = 1121$ с теоретически (4) (ошибка 8%);
- масса жидкости для охлаждения 16.6 кг в эксперименте и 18.2 кг теоретически (ошибка 10%).

Сравнение аналитической модели с экспериментальными кривыми роста массы содержимого бака m и изменения давления в нем P, при заправке бака СПГ представлены на рис. 13. Ошибка определения времени захолаживания составляет 5% (267 с. в эксперименте, 240 с. теоретически).

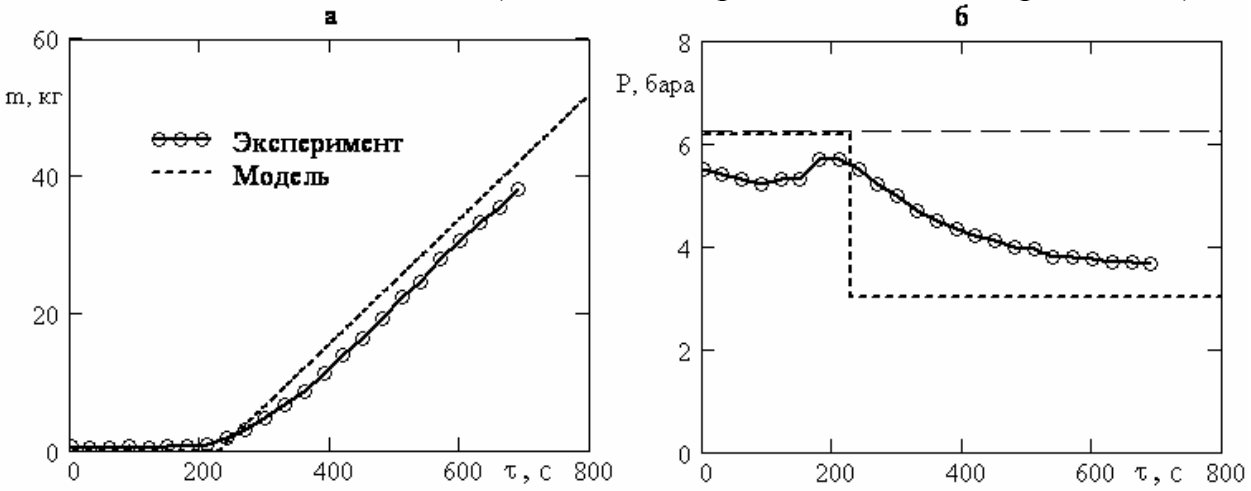

Рисунок 13. Сравнение аналитической модели заправки бака СПГ
а – масса жидкости, б – давление

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе проведения диссертационного исследования получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Проведен теоретический анализ схем заправки бака с открытым и закрытым дренажом;
2. Проведен теоретический анализ четырех схем утилизации дренируемого пара;
3. Разработаны рекомендации по снижению времени заправки и дренажных потерь в процессе захолаживания бака при значениях критерия Био для изоляции $Bi = \alpha \cdot \delta / \lambda << 1$.
4. Обоснована предпочтительность четырех различных методов получения недогретой жидкости для заправочных станций различной мощности;

5. На основе криогенного бака объемом 0.2 м^3 создана экспериментальная система для определения термодинамических характеристик процесса заправки бака;
6. Предложена и опробована новая модель захолаживания криогенного бака, позволяющая оценить с точностью около 10% затраты времени и криогенной жидкости на захолаживание;
7. Проанализированы результаты экспериментального исследования заправки криогенного бака при различных давлениях на входе жидкости;

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Жердев А. А., Славин М. В. Авторефрижератор с гибридным двигателем на сжиженном природном газе // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. - 2002. - Специальный выпуск "Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения". - С. 46-54.
2. Горбачёв С. П. Жердев А. А., Славин М. В. Влияние недогрева СПГ на длительность заправки бортовой топливной системы // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. - 2005. - Специальный выпуск "Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения". - С. 129-137.
3. Горбачёв С. П., Попов В. П., Славин М. В. Определение времени захолаживания криогенного бака // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 2006. - №5. - С. 43-54.