

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ В МАКЕТЕ БАКА РАКЕТЫ

В. И. Трушляков¹, В. А. Урбанский¹, А. Н. Павленко²,
В. Е. Жуков², Е. Ю. Сухорукова²

¹Омский государственный технический университет
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

Разработана программа, методика проведения эксперимента и обработки результатов эксперимента. Созданы экспериментальный стенд и метрологическое обеспечение, в качестве модельной жидкости рассмотрен жидкий азот (ЖА). Получена база данных параметров процессов теплообмена (давление, температуры) на режимах наддува емкости газом гелием до 2 атм., заданном внешнем тепловом нагружении, сбросе давления после достижения 4 атм. до 1 атм. Приведена методика обработки результатов измерений давления и температуры с принятыми допущениями и ограничениями.

Ключевые слова: жидкий азот, кондуктивный нагрев, испарение, кипение, объемное вскипание, наддув, газ гелий, массовая скорость испарения.

Введение

Исследование процесса испарения криогенной жидкости в замкнутой емкости при различных вариантах теплового нагружения и давления наддува необходимо для оценки возможности различных вариантов использования полученной парогазовой смеси, в том числе для использования при работе системы наддува ракеты-носителя при работе жидкостного ракетного двигателя, на пассивных участках полета для использования в качестве рабочего тела в реактивных системах управления, для предотвращения взрыва ступеней на орбитах, снижения площадей районов падения и т. д.

Работы, направленные на исследование теплообмена, выявление различных способов его интенсификации, на изучение механизмов нестационарных процессов при интенсивных фазовых переходах, в том числе при кипении и испарении криогенных жидкостей, в настоящее время весьма интенсивно ведутся в ряде ведущих зарубежных и отечественных НИИ и университетах.

В работе [1] получены экспериментальные данные о времени ожидания и температуре кипения, скорости распространения и структуре фронтов испарения и кипения при различной плотности теплового потока, как в насыщенной жидкости, так и в условиях переохлаждения.

В работе [2] проведен анализ экспериментальных данных по теплообмену при интенсивном испарении в стекающих пленках ЖА. Обобщение опытных данных показало, что в предкризисных режимах при высоких тепловых потоках наблюдается интенсификация теплообмена в условиях испарения при двух исследованных граничных условиях на теплоотдающей поверхности (постоянная температура стенки либо постоянный тепловой поток на стенку).

В работе [3] проведены экспериментальные исследования влияния температуры горячего гелия на прогрев жидкого кислорода в баке удлинением ~ 5 в условиях аэродинамического нагрева. Максимальный прогрев верхнего слоя кислорода в баке в рассмотренных условиях не превышал 3 К.

В работе [4] на основании теории подобия приведено определение параметров экспериментального стенда для исследования процесса парообразования криогенной жидкости при конвективном нагреве, за счет ввода теплоносителя.

В работе [5] численным методом исследуется вскипание метастабильной жидкости в сильно перегретом слое на поверхности нагревателя.

В экспериментах [6–7] исследовались прямые переходы от однофазной конвекции к режиму пленочного кипения криогенной жидкости (третий кризис теплоотдачи).

В работе [8] проведены экспериментальные исследования переходных процессов кипения ЖА на плоских поверхностях. Получены экспериментальные данные для каждого типа кипения (пузырьковый, пленочный, переходный) ЖА. Определены константы эмпирических формул для согласования с результатами экспериментов.

В работе [9] приведены экспериментальные исследования кипения ЖА в закрытой емкости в зависимости от различных тепловых потоков, давления и начальной объемной доли жидкости. Выявлены три отдельных периода кипения: разгерметизация, переходный и установившийся периоды.

В работах [10, 11] приведены результаты экспериментальных исследований температурного расщепления и самонадува в баке с криогенной жидкостью. Получены зависимости температурного расщепления в криогенной емкости от изменения давления.

Таблица 1. Сравнение критериев подобия системы бака окислителя РН типа «Союз 2.1в» и ЭЁ
 Table 1. Comparison of similarity criteria of the oxidizer tank of «Soyuz 2.1v» and EV

$Nu_{PH} \div Nu_{ЭЁ}$	$Pr_{PH} \div Pr_{Эс}$	$\frac{L_{PH}}{D_{PH}} \div \frac{L_{ЭЁ}}{D_{ЭЁ}}$
198,5 \div 202,5	0,75 \div 0,75	2,76 \div 2,9

В работе [12] приведен анализ результатов экспериментальных исследований различных типов кипения (пузырьковый, пленочный и переходный) жидкого водорода, метана и кислорода. Выявлен корреляционный метод, согласующийся с экспериментальными данными различных авторов.

1. Постановка задачи

Экспериментальные исследования нестационарных процессов испарения криогенной жидкости, происходящих в экспериментальной емкости (ЭЁ) в зависимости от давления наддува и внешнего теплового нагружения включают в себя решение ряда научно-технических проблем:

- разработку и обоснование программы проведения эксперимента;
- создание экспериментального стенда (ЭС) и экспериментальной емкости (ЭЁ) с учетом подобия процессов тепло- и массообмена, происходящих в баке ступени ракеты на различных этапах полета и в наземной ЭЁ; и выбора состава метрологического обеспечения эксперимента;
- создание методики обработки полученных результатов.

Полученная экспериментальная база данных по параметрам парогазовой смеси (ПГС) как функции давления наддува и внешнего теплового нагружения будет использована для последующей разработки инженерной методики для оценки возможности различных вариантов использования полученной ПГС в баке ступени ракеты-носителя для использования при работе системы наддува при работе жидкостного ракетного двигателя, на пассивных участках полета ступени РН для использования в качестве рабочего тела в реактивной системе управления, для предотвращения взрыва ступеней на орбитах, снижения площадей районов падения и т. д.

2. Разработка и обоснование программы и порядка проведения эксперимента

Программа экспериментов

Целями экспериментов являются:

- определение зависимости массовой скорости испарения ЖА от динамики изменения давления в экспериментальной емкости при кондуктивном нагреве стенки емкости с наддувом газом гелием;
- определение динамики изменения профиля температуры внутри емкости и на ее внешней стенке на фиксированных уровнях по высоте емкости.

Порядок проведения эксперимента

Порядок проведения эксперимента включал следующую последовательность действий:

- заполнение емкости ЖА через заливную горловину до заданного уровня жидкости (в данных экспериментах — (340–360) мм от нижнего отбора давления);

- закрытие заливной горловины крышкой с манометром-индикатором;
- закрытие клапана на патрубке;
- открытие вентиля наддува гелием;
- создание заданного избыточного давления (в данных экспериментах 0,2 МПа);
- включение источника постоянного тока на заданную мощность (в данных экспериментах мощность тепловыделения соответствовала плотности теплового потока на боковой стенке 5000 Вт/м²;
- при достижении в емкости заданной величины давления (в данных экспериментах 0,3–0,4 МПа) производится открытие клапана патрубка;
- при изменении величины тока через нагреватель боковой поверхности в пределах 10% от первоначального значения (вследствие увеличения сопротивления из-за разогрева части боковой поверхности, не соприкасающейся с жидкостью) производится отключение источника тока;
- завершение эксперимента спустя три–пять минут после отключения источника тока.

3. Создание экспериментального стенда и экспериментальной емкости и выбора состава метрологического обеспечения эксперимента

3.1. *Обоснование проектно-конструкторских параметров ЭС, ЭЁ из условия подобия процессов тепло-и массообмена, происходящих на борту ступени ракеты-носителя.*

Согласно [13], подобными являются процессы одной физической природы, имеющие подобные условия однозначности (геометрическое подобие, подобие начальных и граничных условий, равенство критериев подобия) и численно одинаковые одноименные определяющие критерии.

Параметры ЭЁ определяются из равенства критериев подобия системы бака окислителя РН типа «Союз 2.1в» и ЭЁ:

$$\begin{aligned} Nu_{PH} &\sim Nu_{ЭЁ}, \\ Pr_{PH} &\sim Pr_{Эс}, \\ \frac{L_{PH}}{D_{PH}} &\sim \frac{L_{ЭЁ}}{D_{ЭЁ}}, \end{aligned}$$

где индекс «РН» — бак окислителя РН типа «Союз 2.1в»; D — диаметр емкости; L — длина цилиндрической части емкости; Nu — число Нуссельта; Pr — число Прандтля.

В табл. 1 приведено сравнение критериев подобия системы бака окислителя РН типа «Союз 2.1в» и ЭЁ.

Как следует из приведенных в табл. 1 результатов оценок критериев подобия Нуссельта, Прандтля, геометрического критерия для реальной ступени ракеты и экспериментальной установки близки.

3.2. *Описание разработанных ЭС, ЭЁ и их функционирование.*

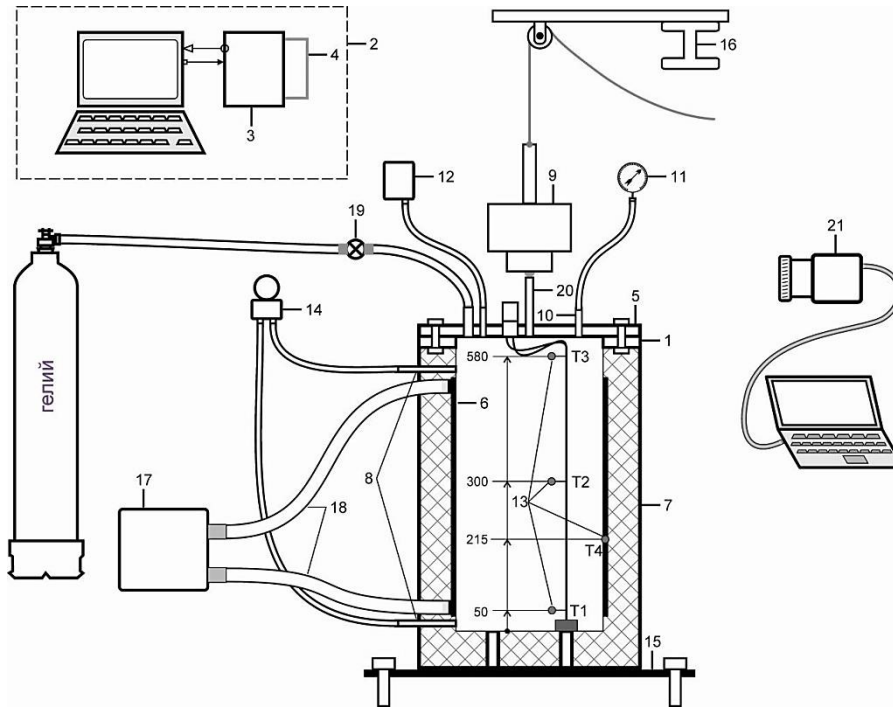


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — экспериментальная емкость; 2 — компьютерный комплекс; 3 — кейт LTR; 4 — аналого-цифровой преобразователь LTR114; 5 — верхний фланец; 6 — электрический нагревательный элемент; 7 — теплоизоляция; 8 — отборы давления дифференциального датчика давления; 9 — рабочий клапан для сброса давления; 10 — заливная горловина ЖА; 11 — манометр для визуального контроля давления; 12 — датчик абсолютного давления (ДА) для передачи на измерительную станцию; 13 — датчики температуры; 14 — дифференциальный датчик давления (ДДД); 15 — станина; 16 — кронштейн крепления; 17 — источник питания для нагревательных элементов; 18 — электрические кабели; 19 — линия подачи гелия; 20 — патрубок сброса парогазовой смеси; 21 — видеочкамера

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental bench: 1 — vessel; 2 — computer complex; 3 — LTR crate; 4 — ADC LTR114; 5 — top flange; 6 — heating element; 7 — thermal insulation; 8 — pressure taps; 9 — operating valve; 10 — filler neck; 11 — manometer; 12 — absolute pressure sensors; 13 — temperature sensors; 14 — differential pressure sensor; 15 — frame; 16 — mounting bracket; 17 — power source; 18 — copper bars; 19 — helium pressure line; 20 — nozzle; 21 — video camera

Схематичное изображение экспериментального стенда для проведения исследований приведено на рис. 1. Емкость из нержавеющей стали имеет наружный диаметр 219 мм, толщину стенки 3 мм, высоту 650 мм. Расчет толщины стенки обечайки на давление 1 МПа по методике [14] показал запас прочности, равный 5,2. Внутренний объем емкости составляет 23 л.

Во фланце установлен патрубок для сброса ПГС внутренним диаметром 16 мм, вентиль для подкачки гелия, заправочный патрубок для азота, арматура для подключения датчика абсолютного давления, герметичный разъем для термометров, измеряющих температуру внутри емкости. Заправочный патрубок герметично закрывается крышкой с манометром-индикатором давления внутри емкости.

Открытие патрубка для сброса ПГС из емкости осуществляется шаровым клапаном на вертикальном подвесе. Усилие поджатия клапана обеспечивается стальным грузом, рассчитанным на избыточное давление в емкости 0,5 МПа. При превышении данного давления в емкости клапан открывается и осуществляет сброс давления до величины 0,5 МПа, выполняя функцию предохранительного клапана. Принудительное поднятие клапана посредством подвесного троса обеспечивает открытие патрубка для сброса ПГС в любой необходимый момент времени.

На боковой поверхности емкости смонтированы два последовательно соединенных плоских нагревательных элемента. Нагревательный элемент разработан змеевидной формы для предотвращения формирования магнитных полей от протекающего через нагревательный элемент тока. Между соседними проводящими элементами расстояние составляло 2 мм, что меньше толщины стенки емкости. Форма нагревателя изготовлена на станке лазерной резки из нержавеющей стали толщиной 0,45 мм, погрешность реза составляет $\pm 0,1$ мм. На обе стороны нагревательного элемента нанесено защитное электроизоляционное покрытие. Итоговая толщина нагревательного элемента с покрытием составила 0,55 мм.

Для исключения короткого замыкания на корпус емкости в результате нештатных ситуаций (разрушение покрытия) проведена дополнительная электроизоляция корпуса емкости с помощью фторопластовой ленты толщиной 40 мкм. Также в районе места стяжки нагревательного элемента проложена полоса из текстолита толщиной 0,5 мм (рис. 2а). На рис. 2б представлены закрепленные на корпусе емкости две части нагревательного элемента. Включение частей нагревательного элемента в цепь последовательное.

Для измерения температуры внешней стороны боковой стенки емкости в нагревательных элементах предусмотрены вырезы диаметром 6 мм (рис. 2в).

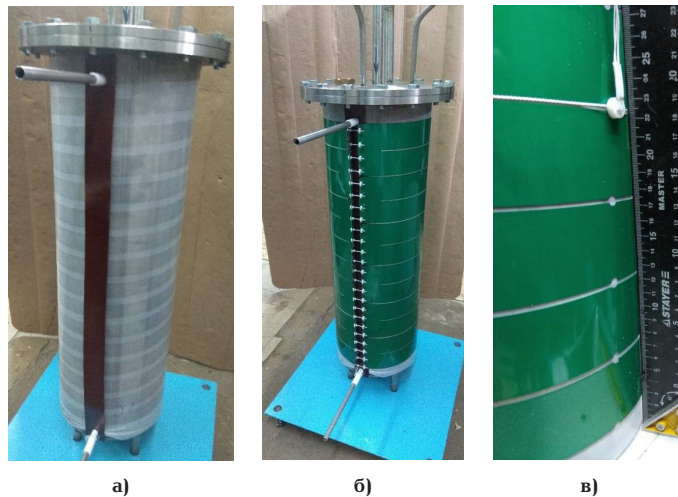


Рис. 2. Корпус: а) дополнительная электроизоляция емкости фторопластовой лентой; б) нагревательный элемент, закрепленный на корпусе емкости; в) установленный на внешней стенке емкости тонкопленочный платиновый термометр
 Fig. 2. Vessel body: a) additional electrical insulation of the vessel with fluoroplastic tape; б) heating element, mounted on the vessel body; в) thin-film platinum thermometer, mounted on the outer wall of the vessel

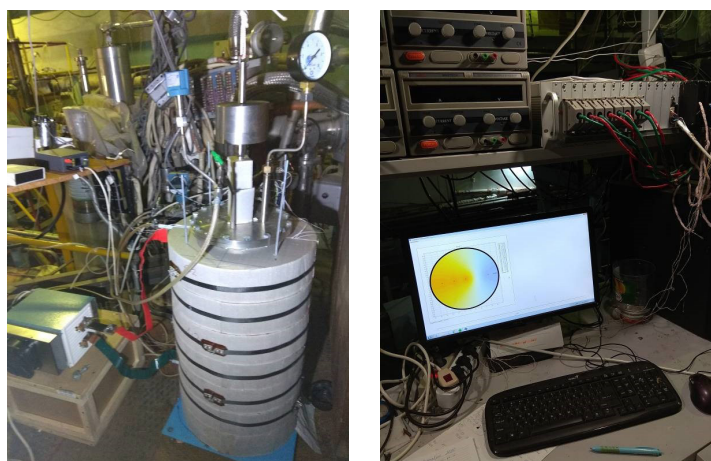


Рис. 3. Экспериментальный стенд в собранном виде
 Fig. 3. Experimental stand in assembled form

В данном месте устанавливается тонкопленочный платиновый термометр, поджимаемый фторопластовой пробкой. В данных экспериментах установлен один термометр на внешней стенке на расстоянии 215 мм от внутренней стенки дна емкости.

Для измерения температуры ЖА и пара внутри емкости изготовлена штанга с тремя тонкопленочными платиновыми термометрами, которые могут устанавливаться на различных расстояниях от дна емкости. В данных экспериментах термометры устанавливались на расстояниях 50 мм, 300 мм, 580 мм.

На рис. 3 представлен экспериментальный стенд в собранном виде.

4. Методики обработки полученных результатов

4.1. Экспериментальная методика определения массовой скорости испарения жидкости на основе измерений давления.

Принятые допущения:

1. Плотность жидкого азота принята постоянной, независимо от типа парообразования (испарение

с поверхности, пузырьковое кипение, пленочное кипение).

2. На перепад давления влияет столб сплошной жидкости без учета паров жидкости, газа наддува.

3. Не учитывается тепло, вносимое газом наддувом гелием в емкость.

4. Объем ЖА в емкости определяется по формуле объема прямоугольного цилиндра с равными площадями оснований.

5. Внешний тепловой поток от окружающей среды полностью идет на нагрев и испарение жидкости.

Определение скорости испарения ЖА в цилиндрической емкости проводилось по динамике изменения перепада гидростатического давления в нижней и верхней части емкости. Перепад давления ΔP обусловлен высотой столба жидкости над нижним отбором давления и определяется из соотношения [15]:

$$\Delta P(t) = \rho \cdot g \cdot h(t), \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения; $h(t)$ — высота столба жидкости.

Таблица 2. Данные тарировки
Table 2. Calibration data

Давление, Па	99525	140561	199423	260324	323617,8
Температура насыщения, К	77,22	80,29	83,69	86,43	88,74
Сопротивление термометра, Ом	19,77	21,06	22,56	23,79	24,86

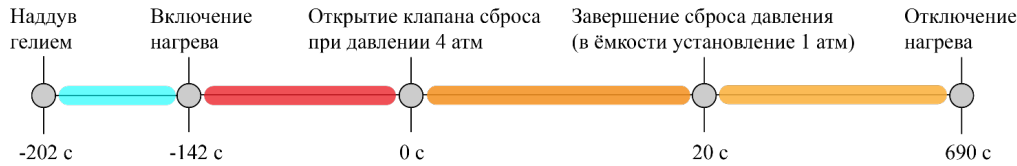


Рис. 4. Циклограмма эксперимента
Fig. 4. Experiment cyclogram

Динамика изменения перепада гидростатического давления в емкости определяется по показаниям дифференциального датчика давления Метран ДД-500.

По изменению гидростатического давления от времени определяется количество испарившейся жидкости. Массовая скорость испарения жидкости $dm(t)/dt$ определяется из зависимости $m(t)$ по формуле (2):

$$\frac{dm(t)}{dt} = S \frac{\Delta P(t)}{g}, \quad (2)$$

где S — площадь поперечного сечения емкости.

Как видно из формулы (2), изменение массы ЖА во времени (скорость испарения) пропорционально изменению перепада давления между нижним и верхним отборами давления (показания дифференциального датчика давления).

До момента включения нагревателя принимается, что внешний тепловой поток от окружающей среды ушел на нагрев и испарение ЖА, тогда по изменению уровня ЖА в емкости внешний тепловой поток определяется по формуле:

$$Q_{внеш} = \rho \cdot S \cdot L \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad (3)$$

где L — теплота парообразования жидкости.

Общий тепловой поток, от внешней окружающей среды и нагревателя ушедший на нагрев и испарение ЖА с учетом потерь тепла на нагрев стенок емкости, определяется по формуле (4):

$$W_{\Sigma} = Q_{внеш} \cdot \Delta t_{внеш} + Q_{учм} \cdot \Delta t_{учм} - C_{рсм} m_{см} \Delta T_{см}, \quad (4)$$

где $\Delta t_{внеш}$ — время эксперимента; $Q_{учм}$ — количество теплоты, пришедшее от нагревателя; $\Delta t_{учм}$ — время работы нагревателя; $C_{рсм}$ — теплоемкость стенки емкости; $m_{см}$ — масса стенок емкости; $\Delta T_{см}$ — изменение температуры стенки.

Температура внутри сосуда на уровне 50, 300 и 500 мм от дна сосуда и на внешней боковой стенке сосуда измерялась миниатюрными тонкопленочными платиновыми резисторами номиналом 100 Ом,

предназначенными для измерения температуры газообразных, жидких и твердых сред в диапазоне $(-200...+540)$ °С. Датчики характеризуются повышенной линейностью характеристики преобразования во всем диапазоне измеряемых температур, высокой точностью и малыми габаритными размерами. Поскольку в сертификате о калибровке указан диапазон температур от $(-50$ до $+50)$ °С, то данные термометры были проверены в диапазоне до температур жидкого азота непосредственно в сосуде. Заполненный наполовину сосуд закрывался, и за счет внешних теплопритоков поднималось давление до 0,4 МПа. Затем делался частичный сброс давления и выдерживалось время в течение 10 с. По данным [16] рассчитывалась температура насыщения азота и по этой температуре тарировался термометр. Данные тарировки приведены в табл. 2. Кроме данных тарировки в табл. 2 включена точка, соответствующая -50 °С, взятая из сертификата о калибровке.

По данным табл. 2 сделана аппроксимация полиномом второй степени, который использовался в экспериментах для определения температуры по показаниям тонкопленочных платиновых термометров.

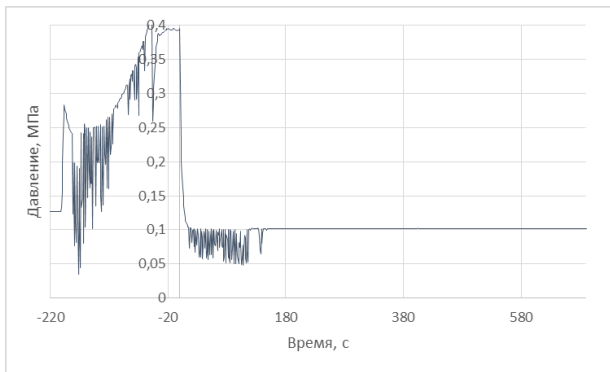
$$T(R) = 0,0027R^2 + 2,142R + 33,913.$$

Сопротивление датчиков температуры определялось по вольт-амперной характеристике, которая измерялась по 4-проводной схеме с величиной измерительного тока 400 мкА. Стабильность измерительного тока поддерживалась прецизионным генератором тока REF200. Падение напряжения на датчиках температуры и величина измерительного тока измерялись 24-битовым АЦП LTR114.

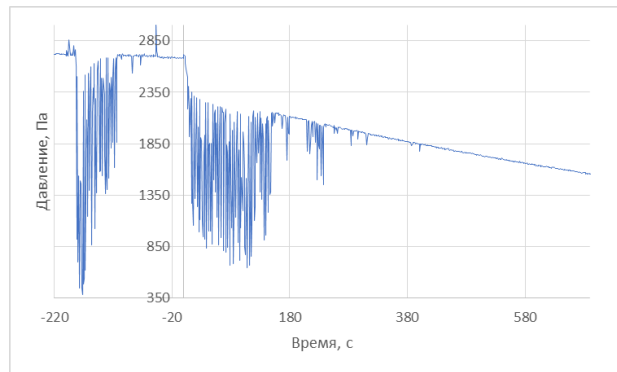
5. Результаты проведенных экспериментальных исследований

Результаты опытов испарения жидкого азота с наддувом емкости газом гелием

На рис. 4 представлена циклограмма эксперимента испарения ЖА с наддувом газом гелием. Нулевой точкой отчета принят момент открытия клапана сброса. Повышение давления в емкости достигается на первом этапе за счет наддува газом гелием, подача которого начинается за 202 с до открытия клапана



а)



б)

Рис. 5 Графики изменений давления в емкости: а) по показаниям датчика абсолютного давления (рис. 1, поз. 12); б) по показаниям датчика дифференциального давления (рис. 1, поз. 14)
 Fig. 5 Graphs of pressure changes in the tank: а) according to the readings of the absolute pressure sensor (fig. 1, item 12); б) according to the readings of the differential pressure sensor (fig. 1, item 14)

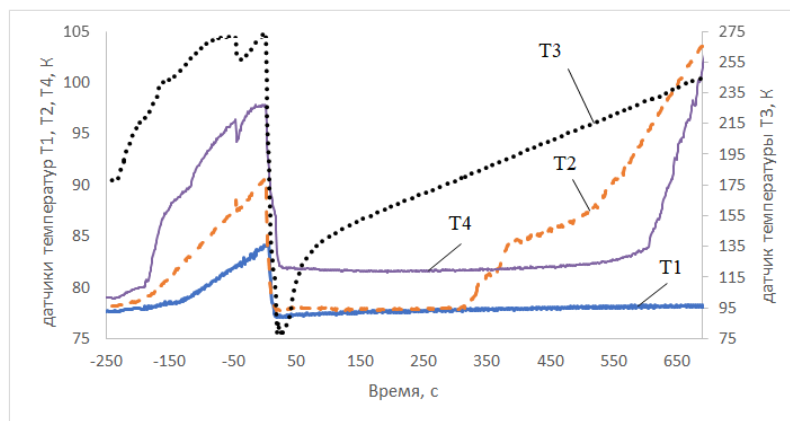


Рис. 6. Графики изменения по времени температуры внутри емкости (Т1–Т3) и на внешней стенке емкости на расстоянии 215 мм от дна емкости (Т4)
 Fig. 6. Graphs of temperature change over time inside the tank (T1–T3) and on the outside wall of the tank at a distance of 215 mm from the bottom of the tank (T4)

сброса и заканчивается при достижении давления в сосуде 0,27 МПа. Далее повышение давления в сосуде продолжается за счет внешних теплопритоков и включения нагревателя. Открытие клапана сброса осуществляется при достижении в сосуде давления 0,4 МПа.

На рис. 5 представлены графики изменений давления в емкости: а) по показаниям датчика абсолютного давления (рис. 1, поз. 12), б) по показаниям датчика дифференциального давления (рис. 1, поз. 14).

Как видно на рис. 5а, в момент надува теплого газа гелия в сосуд наблюдается импульсное повышение давления в сосуде до величины 0,27 МПа. Быстрое охлаждение гелия приводит к снижению давления в сосуде, что проявляется в экспоненциальном спаде графика давления.

Как следует из рис. 5, в момент подачи газа надува ($t = -202$ секунда) и с момента открытия клапана сброса давления (0 секунда) заметен колебательный характер показаний датчиков абсолютного давления и датчика дифференциального давления, который одновременно у двух датчиков не может быть вызван помехами и ошибками аппаратуры. Данные колебания могут быть вызваны интенсивным кипением ЖА (пузырьковым кипением), образованием большого количества пузырьков во всем объеме ЖА и их схлопывании во время отрыва от поверхности ЖА, что приводит к резкому возрастанию давления, за счет

выброса газа и последующего снижения за счет его охлаждения. Пульсации давления в сосуде приводят к забросу жидкости в нижнюю импульсную трубку датчика дифференциального давления, что приводит к колебательным явлениям и показаниям датчика, отличающимся от истинных в меньшую сторону.

Прямые участки на графиках рис. 5 характеризуются существенной стабилизацией термодинамических параметров и теплообменными процессами, близкими к квазистационарным условиям.

На рис. 6 представлены графики изменения температур (рис. 1, поз. 13).

Как видно на графике, до момента закрытия клапана ($t < -239$ с) термометры T1, T2 и T4 показывают практически одинаковую температуру, соответствующую температуре ЖА при атмосферном давлении. Термометры T1 и T2 находятся непосредственно в жидкости, а термометр T4 находится от жидкости через стенку. Термометр T3 находится в паровой области в верхней части емкости, в непосредственной близости от верхнего фланца, и его температура 178 К показывает наличие сильной температурной неоднородности в емкости в паровой области. Закрытие клапана и надув гелием до давления 0,27 МПа приводят к росту давления в емкости. При этом за счет внешних теплопритоков, добавленного теплого гелия, а с момента времени $t = -142$ с и тепловыделения нагревателя начинается прогрев ЖА и

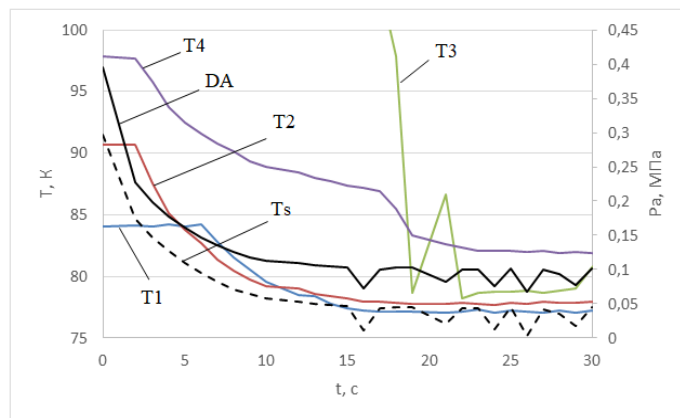


Рис. 7. Графики изменения во времени температуры и давления внутри емкости после открытия клапана. Расстояние термометров от дна емкости: T1 — 50 мм; T2 — 300 мм; T3 — 580 мм; T4 — 215 мм (внешняя стенка); T_s — температура равновесия, соответствующая давлению в емкости; DA — показания датчика абсолютного давления в емкости

Fig. 7. Graphs of changes in time of temperature and pressure inside the tank after opening the valve. Distance of thermometers from the tank bottom: T1 — 50 mm; T2 — 300 mm; T3 — 580 mm; T4 — 215 mm (outside wall); T_s — temperature of equilibrium corresponding to pressure in the tank; DA — reading of absolute pressure sensor in the tank

парового пространства. При этом наблюдается градиент температуры по высоте емкости (термометр T2, который установлен вблизи границы раздела фаз, существенно теплее термометра T1, находящегося в 50 мм от дна емкости). К моменту открытия клапана ($t = 0$ с) показания термометров T1 и T2 составляют 84 и 90,7 К соответственно. После открытия клапана происходит скачкообразный сброс давления в системе, что приводит к значительной метастабильности ЖА и, как следствие, объемному вскипанию жидкости. В данном режиме происходит интенсивное парообразование, формирование пенного слоя с меньшей плотностью, чем чистая жидкость, существенный подъем уровня жидкости в сосуде. В данном режиме может происходить существенный вынос каплеобразной жидкой фазы через патрубок. Показания термометра T3, находящегося в области парогазовой смеси, регистрируют интенсивный процесс парообразования в сосуде в интервале первых 30 секунд после открытия клапана. Температура в верхней части сосуда изменяется от 275 К до 78 К в течение 20 секунд, затем начинается быстрый рост температуры, что свидетельствует о стабилизации переходного процесса и формировании градиента температуры в парогазовой области. Давление в сосуде устанавливается на уровне 0,1 МПа, температура жидкости (термометры T1 и T2) соответствует равновесной температуре при данном давлении (77,8 К), температура стенки (T4) равна 81,6 К, что соответствует температурному напору 3,8 К и коэффициенту теплоотдачи 1300 Вт/м²К. Для ЖА в большом объеме данные параметры соответствуют режиму неразвитого кипения. На рис. 7 показана динамика изменения температур и давления в емкости на протяжении первых 30 секунд после открытия клапана в крупном временном масштабе. Также на диаграмме построена кривая, соответствующая температуре насыщения для давления в емкости в данный момент времени.

Как следует из рис. 7, на момент открытия клапана показания термометра T2, находящегося на расстоянии 300 мм выше дна емкости, были незначительно (порядка 1 К) ниже температуры насыщения, в то время как в глубине емкости (термометр T1, 50 мм выше дна) была существенно (порядка 7 К) недогрета до температуры насыщения. Сброс давления в емкости привел к быстрому (в течение 10 с) охлаждению

ЖА по всему объему емкости до температуры равновесия с давлением пара. Такой процесс характерен для объемного вскипания перегретой жидкости. В результате такого процесса освобождается значительное количество пара, определяемое количеством тепла, запасенного на стадии перегрева жидкости и расходуемого на фазовый переход. Образовавшийся пар имеет температуру равновесия. На диаграмме видно, что на 19-й секунде после открытия клапана термометр T3, находящийся в верхней части емкости в паровой области, снизил свои показания до уровня температуры насыщения.

Интенсивное испарение жидкости при объемном вскипании ЖА на первых 20 секундах после открытия клапана привело к изменению показаний датчика дифференциального давления на 375 Па. Это соответствует испарению 1,34 кг ЖА на временном интервале 20 с. После стабилизации давления в сосуде на уровне 0,1 МПа массовая скорость испарения ЖА линейно изменялась со временем от значения 0,0052 кг/с до 0,0047 кг/с во временном интервале от 300 до 600 с после открытия клапана.

7. Выводы

1. Разработана программа, методика проведения эксперимента и обработки результатов эксперимента.
2. Создан экспериментальный стенд и метрологическое обеспечение, в качестве модельной жидкости рассмотрен жидкий азот.
3. Параметры экспериментальной емкости определены из условий теории подобия процессов тепло- и массообмена, происходящих на борту ступени ракеты и наземной экспериментальной емкости с учетом критериев Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта.
4. Получена база данных процессов тепло- и массообмена (давление, температуры) на режимах наддува емкости газом гелием до 4 атм, заданном внешнем тепловом нагружении, сбросе давления после достижения 4 атм до 1 атм.

8. Обсуждение полученных результатов

1. Принятые допущения по методике обработки результатов измерения давления касаются только режима испарения с поверхности или пленочного

кипения ЖА. При наступлении режима объемного вскипания эти допущения неприемлемы.

2. Метрологическое обеспечение стенда показывает высокую достоверность полученных измерений процесса тепло- и массообмена в экспериментальной емкости.

Благодарности

Исследования проведены в рамках государственного задания № 2019-0251 от 02.03.2020 г. «Исследование процессов испарения жидкостей в топливных баках ракет-носителей для повышения экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с жидкостными ракетными двигателями».

Список источников

1. Pavlenko A. N., Tairov A. A., Zhukov V. E., Levin A. A., Tsoi A. N. Investigation of Transitional Processes at Liquid Boiling under Non-Steady Heat Release // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20, no. 4. P. 1–27.

2. Павленко А. Н. и др. Теплообмен и кризисные явления при интенсивном испарении в стекающих волновых пленках жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 1. С. 93–105.

3. Митиков Ю. А., Волошин М. Л. Результаты физического моделирования прогрева жидкого кислорода в цилиндрическом баке ракеты-носителя // Холодильная техника и технология. 2015. № 51, вып. 4. С. 60–64.

4. Трушляков В. И., Лесняк И. Ю., Урбанский В. А. К задаче выбора проектных характеристик экспериментального стенда // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 4. С. 49–58. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-49-58.

5. Актершев С. П., Овчинников В. В. Моделирование вскипания метастабильной жидкости при наличии фронтов испарения // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. № 1. С. 77–82.

6. Fauser J., Mitrovic J. Some features of boiling fronts on heated surfaces // Proc. 11th IHTC, Kyongju, Korea. 1998. Vol. 2. P. 377–382.

7. Tsukamoto O., Uyemura T. Observation of bubble formation mechanism of liquid nitrogen subjected to transient heating // Advances in Cryogenic Engineering. 1980. Vol. 25. P. 476–482. DOI: 10.1007/978-1-4613-9856-1_57.

8. Nguyen L.-D., Kim M., Chung K. [et al.]. Transient pool boiling of liquid nitrogen (a safe analogue of LNG) on AISI 304 stainless steel flat surfaces // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 176. 121450. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121450.

9. Perez F., Al Ghafri S.Z.S., Gallagher L. [et al.]. Measurements of boil-off gas and stratification in cryogenic liquid nitrogen with implications for the storage and transport of liquefied natural gas // Energy. 2021. Vol. 222. 119853. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119853.

10. Kang M., Kim J., You H. [et al.]. Experimental investigation of thermal stratification in cryogenic tanks // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Vol. 96. P. 371–382. DOI: 10.1016/j.expthermfluidsci.2017.12.017.

11. Seo M., Jeong S. Analysis of self-pressurization phenomenon of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model // Cryogenics. 2010. Vol. 50. P. 549–555. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2010.02.021.

12. Baldwin M., Ghavami A., Ghiaasiaan S. M. Flow boiling in liquid hydrogen, liquid methane and liquid oxygen: A review of available data and predictive tools // Cryogenics. 2021. Vol. 116. 103298. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103298.

13. Кутателадзе С. С., Боришанский Б. М. Справочник по теплопередаче. Москва: ГЭИ, 1958. 418 с.

14. ГОСТ 34233.4-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. Введ. 2018–08–01. Москва: Стандартинформ, 2018. 46 с.

15. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая физика. Москва: Наука 1982. 584 с.

16. Веркин Б. И., Кириченко Ю. А., Русанов К. В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. Киев: Наукова думка, 1987. 264 с.

ТРУШЛЯКОВ Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск. SPIN-код: 2910-2159

AuthorID (РИНЦ): 9914

AuthorID (SCOPUS): 56454317700

ResearcherID: D-7270-2015

Адрес для переписки: vatrushlyakov@yandex.ru

УРБАНСКИЙ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение», ОмГТУ, г. Омск. SPIN-код: 2487-9142

AuthorID (РИНЦ): 978934

Адрес для переписки: vladurba95@gmail.com

ПАВЛЕНКО Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор (Россия), член-корреспондент РАН отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

SPIN-код: 1782-1359

AuthorID (РИНЦ): 36973

AuthorID (SCOPUS): 56249696100

ResearcherID: J-7370-2013

Адрес для переписки: pavl@itp.nsc.ru

ЖУКОВ Владимир Егорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

SPIN-код: 4290-8818

AuthorID (РИНЦ): 28238

AuthorID (SCOPUS): 9043159100

ResearcherID: A-7751-2014

Адрес для переписки: zhukov@itp.nsc.ru

СУХОРУКОВА Екатерина Юрьевна, кандидат технических наук, научный сотрудник Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

AuthorID (SCOPUS): 57226480233

ResearcherID: T-3689-2018

Адрес для переписки: styuardessa@yandex.ru

Для цитирования

Трушляков В. И., Урбанский В. А., Павленко А. Н., Жуков В. Е., Сухорукова Е. Ю. Экспериментальные исследования нестационарных процессов испарения криогенной жидкости в макете бака ракеты // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 4. С. 89–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-89-98.

Статья поступила в редакцию 20.10.2021 г.

© В. И. Трушляков, В. А. Урбанский, А. Н. Павленко, В. Е. Жуков, Е. Ю. Сухорукова

EXPERIMENTAL STUDIES OF UNSTEADY PROCESSES OF CRYOGENIC LIQUID EVAPORATION IN ROCKET TANK MODEL

V. I. Trushlyakov¹, V. A. Urbansky¹, A. N. Pavlenko²,
V. E. Zhukov², E. Yu. Sukhorukova²

¹Omsk State Technical University,
Russia, 644050, Omsk, Mira Ave., 11

²Institute of Thermal Physics named after S. S. Kutateladze,
Siberian Branch of the RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Akademik Lavrentev Ave., 1

The program and the methodology of the experiment and the results of the experiment have been developed. The experimental bench and metrological support have been created, liquid nitrogen (LN) has been considered as a model liquid. A database of heat and mass exchange process parameters (pressure, temperature) under the modes of tank inflation with helium gas up to 2 atm., given external thermal loading, pressure relief after reaching 4 atm. up to 1 atm. The technique of processing the results of pressure and temperature measurements with the assumptions and limitations is given.

Keywords: liquid nitrogen, conductive heating, evaporation, boiling, volumetric boiling, pressurization, helium gas, mass evaporation rate.

Acknowledgments

The studies have carried out within the framework of the state assignment No. 2019-0251 of 03.02.2020 «Investigation of the processes of evaporation of liquids in the fuel tanks of launch vehicles to improve the environmental safety and economic efficiency of launch vehicles with liquid propellant rocket engines».

References

1. Pavlenko A. N., Tairov A. A., Zhukov V. E., Levin A. A., Tsoi A. N. Investigation of Transitional Processes at Liquid Boiling under Non-Steady Heat Release // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2011. Vol. 20, no. 4. P. 1 – 27. (In Engl.).
2. Pavlenko A. N. [et al.]. Teploobmen i krizisnyye yavleniya pri intensivnom isparenii v stekayushchikh volnovykh plenkach zhidkosti [Heat transfer and crisis phenomena with intense boiling in the falling wave liquid films] // *Teplofizika i aeromekhanika. Teplophysics and Aeromechanics*. 2006. Vol. 13, no. 1. P. 93 – 105. (In Russ.).
3. Mitikov Yu. A., Voloshin M. L. Rezul'taty fizicheskogo modelirovaniya progreva zhidkogo kisloroda v tsilindricheskom bake rakety-nositelya [Results of physical modeling of liquid oxygen heating in a cylindrical tank of a launch vehicle] // *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya. Refrigeration Engineering and Technology*. 2015. No. 51, Issue 4. P. 60 – 64. (In Russ.).
4. Trushlyakov V. I., Lesnyak I. Yu. A. K zadache vybora proyektnykh kharakteristik eksperimental'nogo stenda [To selection problem of design characteristics of experimental stand] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 4. P. 49 – 58. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-49-58. (In Russ.).
5. Aktershev S. P., Ovchinnikov V. V. Modelirovaniye vskipaniya metastabil'noy zhidkosti pri nalichii frontov ispareniiya [Modelling of boiling up of a metastable liquid with appearance of

the evaporation fronts] // *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii. Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*. 2013. No. 1. P. 77 – 82. (In Russ.).

6. Fauser J., Mitrovic J. Some features of boiling fronts on heated surfaces // *Proc. 11th IHTC, Kyongju, Korea*. 1998. Vol. 2. P. 377 – 382. (In Engl.).
7. Tsukamoto O., Uyemura T. Observation of bubble formation mechanism of liquid nitrogen subjected to transient heating // *Advances in Cryogenic Engineering*. 1980. Vol. 25. P. 476 – 482. DOI: 10.1007/978-1-4613-9856-1_57. (In Engl.).
8. Nguyen L.-D., Kim M., Chung K. [et al.]. Transient pool boiling of liquid nitrogen (a safe analogue of LNG) on AISI 304 stainless steel flat surfaces // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 176. 121450. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121450. (In Engl.).
9. Perez F., Al Ghafri S.Z.S., Gallagher L. [et al.]. Measurements of boil-off gas and stratification in cryogenic liquid nitrogen with implications for the storage and transport of liquefied natural gas // *Energy*. 2021. Vol. 222. 119853. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119853. (In Engl.).
10. Kang M., Kim J., You H. [et al.]. Experimental investigation of thermal stratification in cryogenic tanks // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018. Vol. 96. P. 371 – 382. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.12.017. (In Engl.).
11. Seo M., Jeong S. Analysis of self-pressurization phenomenon of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model // *Cryogenics*. 2010. Vol. 50. P. 549 – 555. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2010.02.021. (In Engl.).
12. Baldwin M., Ghavami A., Ghiaasiaan S. M. Flow boiling in liquid hydrogen, liquid methane and liquid oxygen: A review of available data and predictive tools // *Cryogenics*. 2021. Vol. 116. 103298. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2021.103298. (In Engl.).
13. Kutateladze S. S., Borishanskiy B. M. *Spravochnik po teploperedache [Handbook of Heat Transfer]*. Moscow, 1958. 418 p. (In Russ.).
14. GOST 34233.4-2017. *Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet na prochnost' i germetichnost'*

flantsevykh soyedineniy [Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. Strength and leak-tightness calculation of flange joints]. Moscow, 2018. 46 p. (In Russ.).

15. Gibbs J. W. Termodinamika. Statisticheskaya fizika [Thermodynamics, Statistical Physics]. 1982. 584 p. (In Russ.).

16. Verkin B. I., Kirichenko Y. A., Rusanov K. V. Teploobmen pri kipenii kriogenykh zhidkostey [Heat exchange in boiling cryogenic liquids]. Kiev, 1987. 264 p. (In Russ.).

TRUSHLYAKOV Valeriy Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aviation and Rocketry Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, Russia.

SPIN-code: 2910-2159

AuthorID (RSCI): 9914

AuthorID (SCOPUS): 56454317700

ResearcherID: D-7270-2015

Correspondence address: vatrushlyakov@yandex.ru

URBANSKY Vladislav Alexandrovich, Graduate Student of Aviation and Rocketry Department, OmSTU, Omsk, Russia.

SPIN-code: 2487-9142

AuthorID (RSCI): 978934

Correspondence address: vladurba95@gmail.com

PAVLENKO Aleksandr Nikolayevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of RAS of Power Engineering, Mechanical Engineering, Mechanics and Control Processes Department, Institute of Thermophysics named after S. S. Kutateladze SB RAS, Novosibirsk, Russia.

SPIN-code: 1782-1359

AuthorID (RSCI): 36973

AuthorID (SCOPUS): 56249696100

ResearcherID: J-7370-2013

Correspondence address: pavl@itp.nsc.ru

ZHUKOV Vladimir Egorovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Thermophysics named after S. S. Kutateladze SB RAS, Novosibirsk, Russia.

SPIN-code: 4290-8818

AuthorID (RSCI): 28238

AuthorID (SCOPUS): 9043159100

ResearcherID: A-7751-2014

Correspondence address: zhukov@itp.nsc.ru

SUKHORUKOVA Ekaterina Yuryevna, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Institute of Thermophysics named after S. S. Kutateladze SB RAS, Novosibirsk, Russia.

AuthorID (SCOPUS): 57226480233

ResearcherID: T-3689-2018

Correspondence address: styuardessa@yandex.ru

For citations

Trushlyakov V. I., Urbansky V. A., Pavlenko A. N., Zhukov V. E., Sukhorukova E. Yu. Experimental studies of unsteady processes of cryogenic liquid evaporation in rocket tank model // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 4. P. 89–98. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-89-98.

Received October 20, 2021.

© V. I. Trushlyakov, V. A. Urbansky, A. N. Pavlenko, V. E. Zhukov, E. Yu. Sukhorukova