

Научная статья
УДК 629.7.063.6:51-72: 532.22: 532.521.1
DOI: [10.34759/trd-2022-127-07](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-07)

О МЕТОДИКЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЯ ВНУТРИБАКОВОГО УСТРОЙСТВА КАПИЛЛЯРНОГО ТИПА

**Лев Григорьевич Александров¹, Сергей Борисович Константинов²✉,
Александр Вадимович Марков³, Илья Вячеславович Платов⁴**

^{1,2,3,4}АО «НПО Лавочкина»,

Химки, Московская область, Россия

¹aia@laspase.ru

²konstantinov@laspase.ru✉

Аннотация. Для двигательных установок многоразового включения космических аппаратов условием нормального функционирования является подача компонентов жидкого ракетного топлива в расходные магистрали без нарушения сплошности потока. В статье рассматривается методика проведения контрольных испытаний фазоразделителя внутрибакового устройства капиллярного типа на этапе полной готовности топливного бака. Одним из важнейших этапов при создании топливных баков является их наземная экспериментальная отработка, проводимая в условиях, близких к условиям эксплуатации.

Основная цель таких испытаний состоит в подтверждении соответствия технических характеристик бака заданным в техническом задании на его разработку требуемым значениям. За критерий оценки качества фазоразделителя выбран коэффициент работоспособности, представляющий собой отношение капиллярной удерживающей способности сетчатого поля материала фазоразделителя к гидравлическому сопротивлению фазоразделителя потоку проходящей через него жидкости, содержащей газы включения.

Приведенная в статье методика определения работоспособности капиллярного фазоразделительного устройства на этапе контрольных испытаний готового топливного бака позволяет гарантированно обеспечить требуемые показатели работоспособности внутрибакового устройства капиллярного типа на этапе заводских наземных испытаний, что повышает качество готовой продукции. Результатом такой работы является решение о соответствии испытываемого опытного образца бака заданным требованиям и возможности его натурной эксплуатации в составе двигательной установки космического аппарата.

Ключевые слова: капиллярная удерживающая способность, металлическая сетка, комбинированный пористый сетчатый материал, гидравлическое сопротивление, коэффициент работоспособности

Для цитирования: Александров Л.Г., Константинов С.Б., Марков А.В., Платов И.В. О методике подтверждения работоспособности фазоразделителя внутрибакового устройства капиллярного типа // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-07](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-07)

Original article

ABOUT THE METHOD OF CONFIRMING THE OPERABILITY OF THE PHASE SEPARATOR OF AN IN-TANK CAPILLARY DEVICE

Lev G. Alexandrov¹, Sergey B. Konstantinov²✉,

Alexander V. Markov³, Ilya V. Platov⁴

^{1,2,3,4}Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin,
Khimki, Moscow region, Russia

¹aia@laspace.ru

²konstantinov@laspace.ru✉

Abstract. For propulsion systems of space craft multiple burns engine, the condition for normal operation is the supply of liquid propellant components to the consumable lines without disturbing the continuity of the flow. The article discusses the method of conducting control tests of the phase separator of the capillary-type in-tank device at the stage of full readiness of the fuel tank. One of the most important stages in the creation of fuel tanks is their ground experimental testing, carried out under conditions close to operating conditions.

The main purpose of such tests is to confirm the compliance of the technical characteristics of the tank with the required values specified in the technical specification for its development. As a criterion for assessing the quality of the phase separator, the efficiency coefficient was chosen, which is the ratio of the capillary holding capacity of

the mesh field of the phase separator material to the hydraulic resistance of the phase separator to the flow of liquid passing through it and containing gas inclusions.

The methodology given in the article for determining the operability of a capillary phase separation device at the stage of control tests of a finished fuel tank makes it possible to guarantee the required performance indicators of an in-tank capillary device at the stage of factory ground tests, which improves the quality of finished products. The result of this work is a decision on the compliance of the tested prototype tank with the specified requirements and the possibility of its full-scale operation as part of the propulsion system of the spacecraft.

Keywords: capillary holding capacity, metal mesh, combined porous mesh material, hydraulic resistance, efficiency coefficient

For citation: Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Markov A.V., Platov I.V. About the method of confirming the operability of the phase separator of an in-tank capillary device.

Trudy MAI, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-07](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-07)

Введение

Для двигательных установок (ДУ) многоразового включения космических аппаратов (КА) условием нормального функционирования ДУ является подача компонентов жидкого ракетного топлива в расходные магистрали ДУ без нарушения сплошности потока [1-4]. Обеспечение выполнения этого условия является комплексной задачей, решение которой зависит от целого ряда факторов, таких как физико-химические свойства компонентов жидкого топлива, геометрии

топливных баков, форм и материалов внутрибаковых устройств, текущего гравитационного состояния, конвективных, капиллярных и термокапиллярных процессов. [5-10].

Практическое применение внутрибакового устройства капиллярного типа (ВБУ КТ) в двигательной установке КА разработки и изготовления «НПО им. С.А. Лавочкина» состоялось в 1997 г. [11]. С тех пор возможности применения топливных баков с внутрибаковым устройством капиллярного типа (ВБУ КТ) рассматривались в целом ряде научно-технических проектов по исследованию окрестностей планет Солнечной системы [12]. Ряд базовых конструктивных решений для топливных баков с ВБУ КТ адаптировались для предлагаемых условий космического полёта в соответствии с задачами миссий.

Одним из важнейших этапов при создании топливных баков КА с ВБУ КТ является их наземная экспериментальная отработка, проводимая в условиях, близких к условиям эксплуатации. Основная цель таких испытаний состоит в подтверждении соответствия технических характеристик бака заданным в техническом задании на его разработку требуемым значениям. Результатом такого контроля является решение о соответствии испытываемого опытного образца бака заданным требованиям и возможности его натурной эксплуатации в составе двигательной установки КА.

Выбор критериев работоспособности баков с ВБУ КТ

Для топливных баков КА существует ряд характеристик, подтверждение которых является обязательным при наземной экспериментальной отработке. К этим

характеристикам относятся: объем топливной полости, давления испытаний на прочность и разрушение, стойкость конструкции бака к внешним механическим воздействиям, работоспособность внутрибакового устройства в части обеспечения сплошности подаваемого к двигателям жидкого компонента топлива в условиях действия малой гравитации. Особенность последней из указанных характеристик рассмотрим на примере анализа работоспособности фазоразделительного устройства топливного бака с ВБУ КТ, представленного на рисунке 1 [13]. На увеличенном фрагменте рис. 1 изображён фазоразделитель капиллярного типа, являющийся составляющим элементом ВБУ КТ бака и представляющий собой конструкцию, выполненную в основном из пористого материала – комбинированного пористо-сетчатого материала (КПСМ) [14]. КПСМ изготавливается из набора мелкоячеистых металлических сеток, сваренных между собой путём прокатки этого набора сеток в вакууме и при высокой температуре [15].

Набор металлических сеток, как и однослойная сетка, характеризуется гидравлическим сопротивлением (ГС) и капиллярной удерживающей способностью (КУС). На стадии проектирования фазоразделителя, когда расчётным путём затруднительно точно определить его гидравлическое сопротивление потоку жидкости, содержащей газы в виде пузырей, выбор капиллярной структуры его сепарирующих элементов проводится на основе применения коэффициента работоспособности [10], получаемого экспериментально:

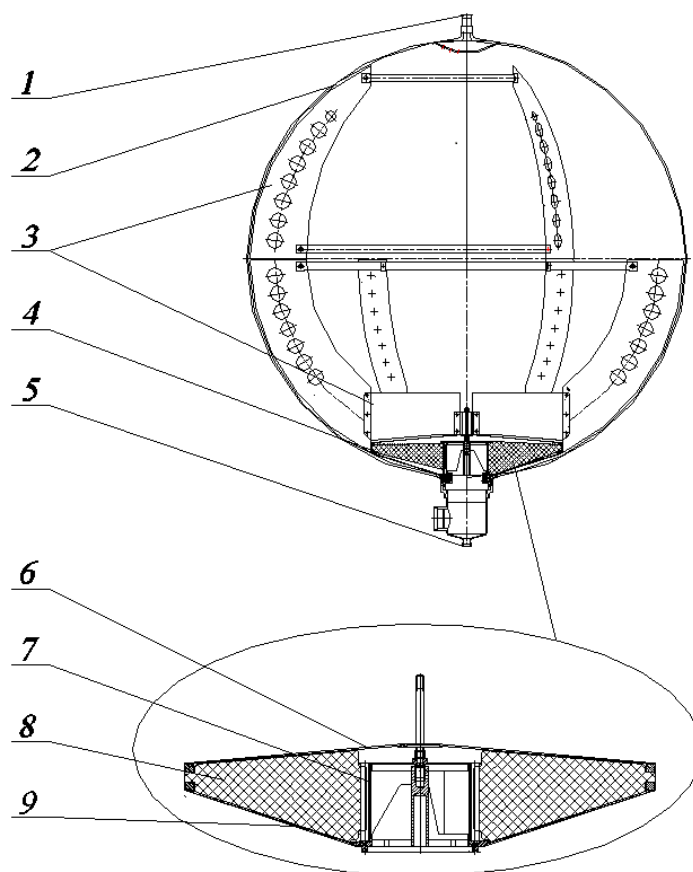
$$\omega_{сэ} = \frac{\Delta P_{кучсэ}}{\Delta P_{Гсэ}} \gg 1, \quad (1)$$

где $\omega_{сэ}$ – коэффициент работоспособности сепарирующего элемента; $\Delta P_{куч\ сэ}$ – минимальное значение перепада давления на границе «газовый пузырь – сепарирующий элемент», препятствующее прохождению газового пузыря через сепарирующий элемент; $\Delta P_{гсэ}$ – гидравлическое сопротивление сепарирующего элемента (сетки или КПСМ) потоку.

При выборе численного значения критерия работоспособности по экспериментальным результатам, полученным на образце сепарирующего элемента фазоразделителя, следует иметь в виду, что для фазоразделителя в целом также справедливо оценивать его работоспособность по критерию работоспособности, который записывается выражением:

$$\omega_{фр} = \frac{\Delta P_{куч\ сэ}}{\Delta P_{гфр}} \gg 1, \quad (2)$$

где $\omega_{фр}$ – коэффициент работоспособности фазоразделителя; $\Delta P_{куч\ сэ}$ – минимальное значение перепада давления на границе «газовый пузырь-сепарирующий элемент», препятствующее прохождению газового пузыря через внешний сепарирующий элемент фазоразделителя; $\Delta P_{гфр}$ – гидравлическое сопротивление фазоразделителя потоку жидкости, проходящему через него.



1 – штуцер наддувный; 2 – оболочка бака; 3 – перегородки ВБУ КТ;
 4 – фазоразделитель; 5 – штуцер топливный; 6 – внешний верхний сетчатый экран; 7 – внутренний сетчатый экран; 8 – лепесток; 9 – внешний нижний сетчатый экран.

Рисунок 1. Эскиз топливного бака с ВБУ КТ

Для сравнимости результатов, полученных экспериментально на образце сепарирующего элемента и в целом на фазоразделителе, удельный расход жидкости – расход, приходящийся на единицу площади испытуемого объекта – у образца сепарирующего элемента и у сепарирующей поверхности фазоразделителя должны быть одинаковы. Для используемой в примере конструкции фазоразделителя полное его сопротивление потоку запишется выражением:

$$\Delta P_{\text{гфр}} = \Delta P_{\text{гсэ1}} + \Delta P_{\text{г1}} + \Delta P_{\text{гсэ2}} + \Delta P_{\text{гвых}}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{гсэ1}}$ – гидравлическое сопротивление внешнего сетчатого экрана; $\Delta P_{\text{г1}}$ – гидравлическое сопротивление участка между внешним сетчатым экраном и внутренним сетчатым экраном; $\Delta P_{\text{гсэ2}}$ – гидравлическое сопротивление внутреннего экрана; $\Delta P_{\text{гвых}}$ – гидравлическое сопротивление участка между внутренним экраном и выходом из фазоразделителя.

Условие работоспособности внутреннего сепарирующего экрана запишется выражением, аналогичным выражению (2), но с учётом выражения (3):

$$\omega_{\text{сэ2}} = \frac{\Delta P_{\text{кучсэ2}}}{\Delta P_{\text{гсэ2}} + \Delta P_{\text{гвых}}} \gg 1, \quad (4)$$

С учётом вышеизложенного при изготовлении КПСМ сепарирующего элемента следует стремиться к созданию пористой структуры с максимальным значением коэффициента работоспособности сепарирующего элемента $\omega_{\text{сэ}}$, т.к. в дальнейшем он будет «использован» на компенсацию суммы гидравлических сопротивлений внутренних элементов фазоразделителя, на что и указывают зависимости (3) и (4).

Гидравлическое сопротивление и капиллярная удерживающая способность фазоразделителя

ГС фазоразделителя потоку жидкости в собранном топливном баке описывается известной формулой Бернулли для местных гидравлических сопротивлений [16]:

$$\Delta P_{\text{гфр}} = \zeta_{\text{гфр}} \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot U^2}{2}, \quad (5)$$

где $\zeta_{\text{гфр}}$ – коэффициент местного сопротивления; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; U – скорость набегающего на поверхность фазоразделителя потока жидкости в направлении, перпендикулярном его сепарирующей поверхности.

Как правило, экспериментальные данные по измерению местного ГС представляют в виде зависимости гидравлического сопротивления от расхода жидкости (массового или объёмного). Используя выражение для массового расхода жидкости $\dot{m} = \rho_{\text{ж}} \cdot U \cdot S_{\text{фр}}$, где $S_{\text{фр}}$ – площадь сепарирующей поверхности фазоразделителя и подставив его в выражение (5), получим выражение:

$$\Delta P_{\text{гфр}} = \zeta_{\text{гфр}} \cdot \frac{\dot{m}^2}{2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot S_{\text{фр}}^2} \quad (6)$$

Таким образом, для однозначного соответствия правой и левой частей выражения (6) в испытаниях необходимо измерять перепад давления на фазоразделителе и соответствующий ему расход жидкости через фазоразделитель. Во многих случаях проводить измерения на жидкостях, являющихся компонентами топлив, не представляется возможным по требованиям промышленной безопасности. Поэтому применяют «модельные» среды, а полученные на них результаты пересчитывают на «натурные» компоненты. В качестве «модельной» жидкости для измерения ГС фазоразделителя удобно использовать этиловый спирт, т.к. он после испытаний легко удаляется из пористой структуры фазоразделителя термовакuumной сушкой бака. Если выражение (6) записать для «модельной» и «натурной» жидкостей, а потом поделить одно выражение на другое, то получим выражение:

$$\frac{\Delta P_{\text{ГФРМ}}}{\Delta P_{\text{ГФРН}}} = \frac{\rho_{\text{Н}} \cdot \dot{m}_{\text{М}}^2}{\rho_{\text{М}} \cdot \dot{m}_{\text{Н}}^2} \quad (7)$$

где «н» и «м» - индексы, обозначающие «натурную» и «модельную» жидкости.

Следует отметить, что коэффициенты сопротивления $\zeta_{\text{ГФР}}$ и площадь $S_{\text{ФР}}$ в формуле (6) для «натурной» жидкости и «модельной» принимались равными, т.к. в обоих случаях конструкция фазоразделителя одна и та же. Из выражения (7) получим значение расхода модельной жидкости, при котором сопротивления фазоразделителя на «модельной» и «натурной» жидкостях равны:

$$\dot{m}_{\text{М}} = \dot{m}_{\text{Н}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{М}}}{\rho_{\text{Н}}}} \quad (8)$$

Таким образом, установив при испытаниях готового бака расход модельной жидкости из него равный расходу, вычисляемому по выражению (8) для моделируемого «натурного» режима, получим измеряемый перепад давления на фазоразделителе на «модельной» жидкости, равный перепаду давления на фазоразделителе в «натурных» условиях эксплуатации, т.е.: $\Delta P_{\text{ГФРМ}} = \Delta P_{\text{ГФРН}}$.

В представленной на рисунке 1 конструкции фазоразделителя имеются два сепарирующих экрана: внешний (верхний и нижний) экран и внутренний экран. При изготовлении фазоразделителя КУС его сепарирующих экранов должны быть установлены в ходе приёмо-сдаточных испытаний и занесены в его паспорт. При этом в качестве «модельной» жидкости должен использоваться всё тот же этиловый спирт, что и при испытаниях фазоразделителя на ГС в готовом топливном баке. В силу того, что после монтажа ВБУ КТ в корпус топливного бака необходимо

убедиться в отсутствии дефектов сетчатого поля фазоразделителя, требуется проведение испытаний фазоразделителя на подтверждение требуемого значения КУС внешних сепарационных экранов. Использование для определения КУС внешних сепарационных экранов метода «пузырька» в случае нахождения фазоразделителя в замкнутом пространстве не представляется возможным по вполне очевидным причинам: отсутствию возможности визуализации процесса появления пузырьков газа на поверхности сепарационного экрана и сложности учёта влияния гидростатического столба смачивающей жидкости на результаты испытаний.

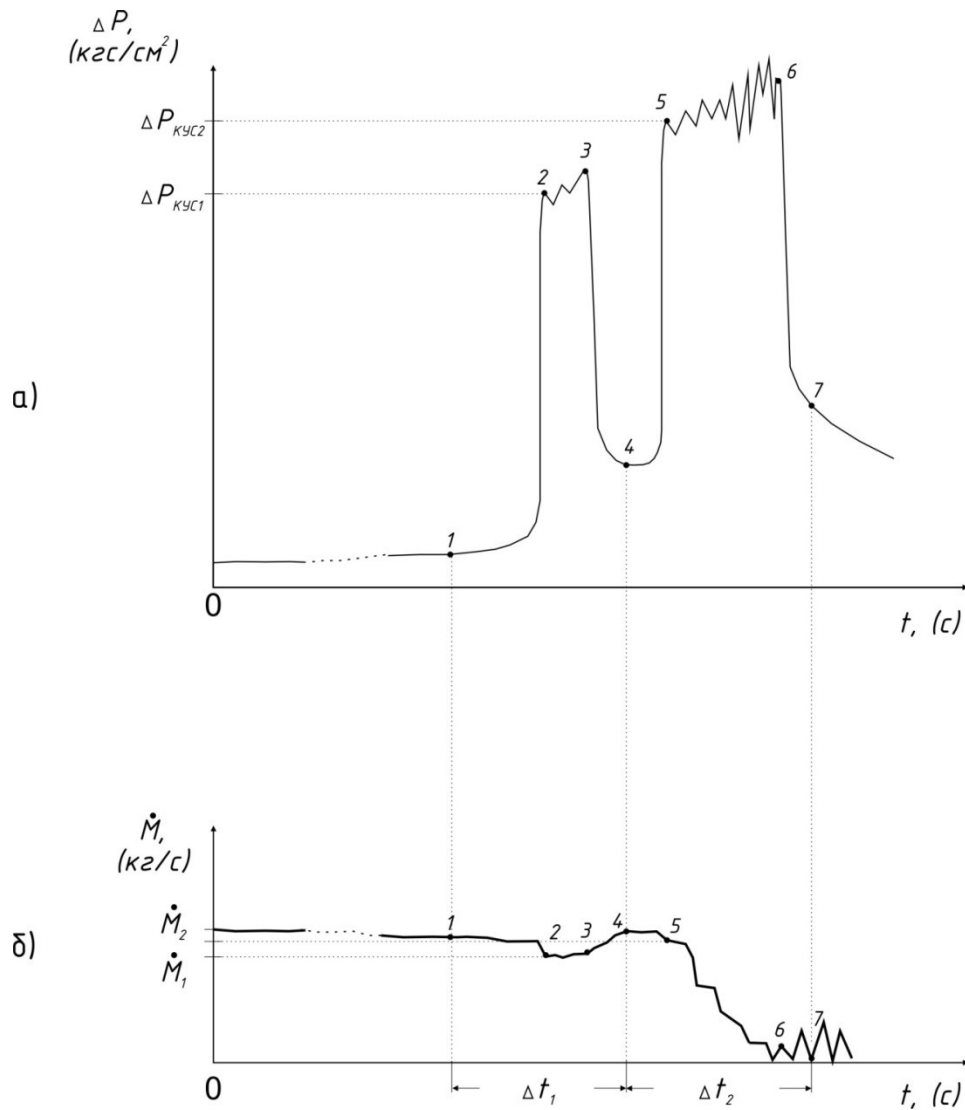
Экспериментальное определение ГС и КУС фазоразделителя в баке

На проливочном стенде АО «НПО Лавочкина» реализован следующий способ определения ГС и КУС фазоразделителя в топливном баке. Конструкция стенда должна учитывать его модификацию для дальнейших исследований динамических процессов, которые могут быть реализованы на базе современных достижений [17,18] и учёта собственных характеристик стенда [19]. После монтажа на проливочном стенде бак заполняется таким количеством модельной жидкости, которое обеспечивает полную смачиваемость фазоразделительного устройства. В процессе опорожнения бака ведется контроль и фиксация разности давлений между наддувным и топливным штуцерами бака, а также расход модельной жидкости через фазоразделительное устройство. При обработке экспериментальных данных получают зависимости перепада давления фазоразделительного устройства и расхода модельной жидкости во времени, схематически представленные на рисунке 2.

Первым этапом контрольных испытаний готового бака на работоспособность являются испытания на ГС фазоразделительного устройства, т.к. его ГС определяется в области значений массовых расходов модельной жидкости, рассчитанных для соответствующей области значений массовых расходов натурной жидкости по выражению (8). Эти значения расходов могут быть значительны и для определения КУС сепарирующих экранов фазоразделительного устройства не приемлемы, т.к. вносят ошибку в полученные экспериментально значения КУС за счёт динамического воздействия потока на результаты испытаний [4]. Затем проводятся испытания фазоразделительного устройства на КУС его сепарирующих экранов. При этом резкое увеличение перепада давления фазоразделительного устройства на участке 1-2 свидетельствует о подходе границы раздела «газ-жидкость» в баке к верхней поверхности внешнего экрана. Как только газ полностью обволакивает поверхность верхней части внешнего экрана, то начинается прорыв его дискретных объёмов во внутреннюю полость фазоразделительного устройства, о чём свидетельствует колебательный характер перепада давления и уменьшение показаний расходомера. Дискретность поступлений объёмов газа внутрь фазоразделителя на участке 2-3 графика изменения перепада давления во времени объясняется характерной особенностью сепарирующего экрана из КПСМ [20]. Значительное и резкое уменьшение перепада давления фазоразделительного устройства на участке 3-4-5 графика с ростом показаний расхода свидетельствует о прорыве газа через большую часть внешнего экрана и занятии газом внутреннего объёма устройства. На участке 5-6 графика подъём значений перепада давления

фазоразделительного устройства характеризуется прохождением дискретных объёмов газа уже через сепарирующую поверхность внутреннего экрана. При этом снижается расход жидкости через фазоразделитель. В момент времени, отмеченный на графиках точкой 6, газ прорывается через внутренний сепарирующий экран фазоразделителя. Фазоразделительное устройство полностью утрачивает свои сепарирующие свойства.

Анализ представленных на рисунке 2 зависимостей позволяет считать значения перепадов давлений в точках 2 и 5 в качестве капиллярных удерживающих способностей внешнего и внутреннего сепарирующих экранов фазоразделительного устройства в полностью готовом к эксплуатации топливном баке с ВБУ КТ.



ΔP_{KUC1} – значение КУС первого экрана ФУ, ΔP_{KUC2} – значение КУС второго экрана ФУ, \dot{M}_1 – значение расхода спирта соответствующего КУС первого экрана ФУ, \dot{M}_2 – значение расхода спирта соответствующего КУС второго экрана ФУ, 1 - 7 – характерные точки на графиках

Рисунок 2. Вид графиков: а) – значение разности давлений между сливным и наддувным штуцером баков в период времени прохождения границы раздела между жидкостью и газом через ФУ; б) – значение расхода спирта через сливной штуцер баков в период времени прохождения границы раздела между жидкостью и газом через ФУ.

Полученные в результате испытаний фазоразделителя в собранном топливном баке значения КУС сетчатых экранов и гидравлического сопротивления фазоразделителя позволяют после пересчёта результатов на «натурные» компоненты топлива, используя зависимость (2), получить реальное значение коэффициента работоспособности $\omega_{\text{фр}}$ фазоразделителя, которое должно быть более 1.

Заключение

Приведенная в статье методика определения работоспособности капиллярного фазоразделительного устройства на этапе контрольных испытаний готового топливного бака позволяет гарантированно обеспечить требуемые показатели работоспособности ВБУ КТ на этапе заводских наземных испытаний, что повышает качество готовой продукции.

Список источников

1. Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М., Крылов В.И., Ягодников Д.А. Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. № 6(105). С. 130-142.
2. Сапожников В.Б., Меньшиков В.А., Партола И.С., Корольков А.В. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для

внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2006. № 2(63). С. 78-88.

3. Сапожников В.Б., Корольков А.В. Математическое моделирование процесса опорожнения топливного бака летательного аппарата в условиях орбитального полета // Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development (Moscow, 17 – 19 November 2014): Abstracts of International Scientific Conference, Moscow, VMSTU, 2014, pp. 80-81.

4. Корольков А.В., Сапожников В.Б., Ефремов Н.В. Динамика жидкости в фазоразделительном устройстве в период опорожнения топливного бака космического аппарата // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2018. Т. 25. № 3. С. 255-258.

5. Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Математическая модель капиллярного заборного устройства торового бака // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2007. № 2. С. 35–39.

6. Партола И.С. Результаты проектирования и отработки капиллярных заборных устройств торового топливного бака РБ “Бриз-М” // Первая международная научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии», посвященная 90-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея: сборник докладов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 19–22.

7. Корольков А.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива: Научно-технические разработки ОКБ-23–КБ “Салют”. - М.: Воздушный транспорт, 2006. С. 313–320.
8. Авдучевский В.С., Корольков А.В., Купцова В.С., Савичев В.В. Исследование тепловой гравитационной конвекции в переменном поле вектора малых ускорений // Прикладная механика и техническая физика. 1987. Т. 1. С 54-59.
9. Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М. и др. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов. - М.: УНПЦ «Энергомаш», 1997. - 328 с.
10. Сапожников В.Б. Крылов В.И., Новиков Ю.М., Ягодников Д.А. Наземная отработка капиллярных фазоразделителей на основе комбинированных пористо-сетчатых материалов для топливных баков жидкостных ракетных двигателей верхних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 4. С. 41.
11. Новиков Ю.М., Большаков В.А., Александров Л.Г. и др. Проницаемые структуры на основе комбинированного пористого сетчатого металла и сварочная технология производства изделий из них для двигательных установок космических летательных аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. № 1. С. 44-51.
DOI: [10.26162/LS.2021.51.1.006](https://doi.org/10.26162/LS.2021.51.1.006)
12. Платов И.В., Симонов А.В. Разработка двигательной установки на базе двигателей малой тяги и схемы полёта космических аппаратов к центру Солнечной

- системы // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19. № 3. С. 517-525. DOI: [10.31772/2587-6066-2018-19-3-517-525](https://doi.org/10.31772/2587-6066-2018-19-3-517-525)
13. Александров Л.Г., Богданов А.А., Большаков В.А., Константинов С.Б. и др. Топливный бак и его заборное устройство. Патент РФ 2 657 137 С2, 08.06.2019.
14. Третьяков А.Ф. Применение металлических пористых материалов для изготовления изделий с заданными свойствами // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Т. 17. № 9. С. 423-430.
15. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы: справочник. – М.: Metallurgy, 1987. - 335 с.
16. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1992. - 672 с.
17. Юй Чжаокай, Темнов А.Н. Механический аналог малых колебаний жидкости в условиях, близких к невесомости // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168991&eng=N>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-05)
18. Берников А.С., Петров Ю.А., Сергеев Д.В., Штокал А.О. Амортизация автоматических космических аппаратов при посадке на планеты и их спутники с учетом упругости конструкции посадочного устройства // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162657>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-10)
19. Санчугов В.И., Рекадзе П.Д. Расчёт гидродинамических характеристик стендовых систем // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167005>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-10)
20. Александров Л.Г., Константинов С.Б., Корольков А.В. и др. Топливный бак с

капиллярным внутрибаковым устройством космической двигательной установки // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. № 4. С. 15-21. DOI: [10.26162/LS.2021.54.4.003](https://doi.org/10.26162/LS.2021.54.4.003)

References

1. Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, 2015, no. 6(105), pp. 130-142.
2. Sapozhnikov V.B., Men'shikov V.A., Partola I.S., Korol'kov A.V. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, 2006, no. 2(63), pp. 78-88.
3. Sapozhnikov V.B., Korol'kov A.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa oporozhneniya toplivnogo baka letatel'nogo apparata v usloviyakh orbital'nogo poleta, *Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development. Abstracts of International Scientific Conference, Moscow, BMSTU, 2014*, pp. 80-81.
4. Korol'kov A.V., Sapozhnikov V.B., Efremov N.V. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 255-258.
5. Korol'kov A.V., Men'shikov V.A., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa. Lesnoi vestnik*, 2007, no. 2, pp. 35–39.
6. Partola I.S. *Pervaya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Aerokosmicheskie tekhnologii», posvyashchennaya 90-letiyu so dnya rozhdeniya*

akademika V.N. Chelomeya: sbornik dokladov. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2004, pp. 19–22.

7. Korol'kov A.A., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Teoreticheskie osnovy razrabotki i eksperimental'noi otrabotki kapillyarnykh zabornykh ustroystv s minimal'nymi ostatkami topliva: Nauchno-tekhnicheskie razrabotki OKB-23–KB “Salyut”* (Principal Theory of Development and Experimental Testing Capillary Intake Devices with Minimal Fuel Residues), Moscow, Vozdushnyi transport, 2006, pp. 313–320.

8. Avduevskii V.S., Korol'kov A.V., Kuptsova V.S., Savichev V.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1987, vol. 1, pp 54-59.

9. Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M. et al. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (The Capillary System for Fluid Intake from the Spacecraft Tanks), Moscow, UNPTs «Energomash», 1997, 328 p.

10. Sapozhnikov V.B. Krylov V.I., Novikov Yu.M., Yagodnikov D.A. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013, no. 4, pp. 41.

11. Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A., Aleksandrov L.G. et al. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2021, no. 1, pp. 44-51. DOI: [10.26162/LS.2021.51.1.006](https://doi.org/10.26162/LS.2021.51.1.006)

12. Platov I.V., Simonov A.V. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 517-525. DOI: [10.31772/2587-6066-2018-19-3-517-525](https://doi.org/10.31772/2587-6066-2018-19-3-517-525)

13. Aleksandrov L.G., Bogdanov A.A., Bol'shakov V.A., Konstantinov S.B. et al. *Patent RU 2 657 137 S2*, 08.06.2019.

14. Tret'yakov A.F. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2019, vol. 17, no. 9, pp. 423-430.

15. Belov S.V. *Poristye pronitsaemye materialy: spravochnik* (Porous permeable materials. Handbook), Moscow, Metallurgiya, 1987, 335 p.
16. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Handbook of hydraulic resistances), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 672 p.
17. Yui Chzhaokai, Temnov A.N. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168991&eng=N>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-05)
18. Bernikov A.S., Petrov Yu.A., Sergeev D.V., Shtokal A.O. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162657>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-10)
19. Sanchugov V.I., Rekadze P.D. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167005>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-10)
20. Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Korol'kov A.V. et al. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2021, no. 4, pp. 15-21. DOI: [10.26162/LS.2021.54.4.003](https://doi.org/10.26162/LS.2021.54.4.003)

Статья поступила в редакцию 01.12.2022

Статья после доработки 03.12.2022

Одобрена после рецензирования 09.12.2022

Принята к публикации 26.12.2022

The article was submitted on 01.12.2022; approved after reviewing on 09.12.2022; accepted for publication on 26.12.2022