

Методика контроля качества сетчатых фазоразделителей в составе топливных баков космических жидкостных ракетных двигательных установок

© Л.Г. Александров, С.Б. Константинов

АО «НПО Лавочкина», Химки, 141400, Российская Федерация

Рассмотрена методика подтверждения качества изготовления капиллярного фазоразделительного элемента внутрибакового заборного устройства топливных баков космической жидкостной ракетной двигательной установки на этапе приемо-сдаточных испытаний баков. В качестве оценочного параметра неизменности капиллярной структуры использовано постоянство значения капиллярной удерживающей способности пористо-сетчатого материала сепарационных экранов капиллярного фазоразделительного устройства на всех этапах производства и испытаний топливного бака с внутрибаковым капиллярным заборным устройством. Рассмотрены стадии опорожнения внутрибакового заборного устройства от жидкости при экспериментальном определении значений капиллярной удерживающей способности сепарационных экранов двухступенчатого фазоразделительного устройства в составе топливного бака. Приведена гидравлическая схема испытаний и рекомендован подход к выбору жидкости, используемой при испытаниях. На основании полученных экспериментальных данных представлены расчетные зависимости по вычислению значений капиллярной удерживающей способности пористо-сетчатых материалов сепарационных экранов фазоразделительного устройства. Проанализированы результаты испытаний.

Ключевые слова: пористый сетчатый материал, характеристики, методика, размер пор, фазоразделитель, капиллярная удерживающая способность, капиллярные заборные устройства, гидравлические испытания

Введение. Соблюдение высоких требований безопасности, предъявляемых к изделиям космической техники, определяет необходимость проведения контроля качества выпускаемых изделий на всех стадиях их производства — от исходных материалов до контроля технических параметров готового изделия. Не являются исключением в этом смысле и элементы конструкции капиллярного заборного устройства (КЗУ) топливных баков, например, фазоразделительные устройства (ФУ), пронизываемая капиллярная структура которых выполняет функцию отделения возможных газовых включений от потока жидкого компонента ракетного топлива. Важными характеристиками мелкопористых пронизываемых материалов, выполняемых в виде тонких плоских листов, изготовленных из набора мелкоячеистых металлических тканых сеток [1–3], являются максимальные значения размеров открытых (сквозных) пор и их количество на единице площади плоского листа. Контролем этих характеристик при исследовании образцов мелкопористых материалов занимается порометрия, методы которой на практике

реализуются применением разнообразного лабораторного и промышленного оборудования [4]. Контроль указанных характеристик в пористых проницаемых структурах готового изделия, как правило, представляет собой прикладную техническую задачу, решению одной из которых посвящена настоящая статья.

Цель исследования — определение целостности сетчатых экранов ФУ в собранном топливном баке с КЗУ путем проведения сравнительного анализа значений капиллярной удерживающей способности (КУС) сетчатых экранов ФУ по результатам автономных испытаний ФУ после его изготовления, а также испытаний ФУ в составе КЗУ после изготовления топливного бака.

Объект исследований. Фазоразделительное устройство КЗУ топливного бака [5–8], изображенного на рис. 1, является объектом исследования. В конструкцию ФУ входит внешний сетчатый экран, составленный из двух усеченных конусов — верхнего и нижнего, смыкающихся друг с другом большими основаниями через цилиндрическую проставку, а также цилиндрический внутренний сетчатый экран, размещенный внутри объема, ограниченного внешним сетчатым

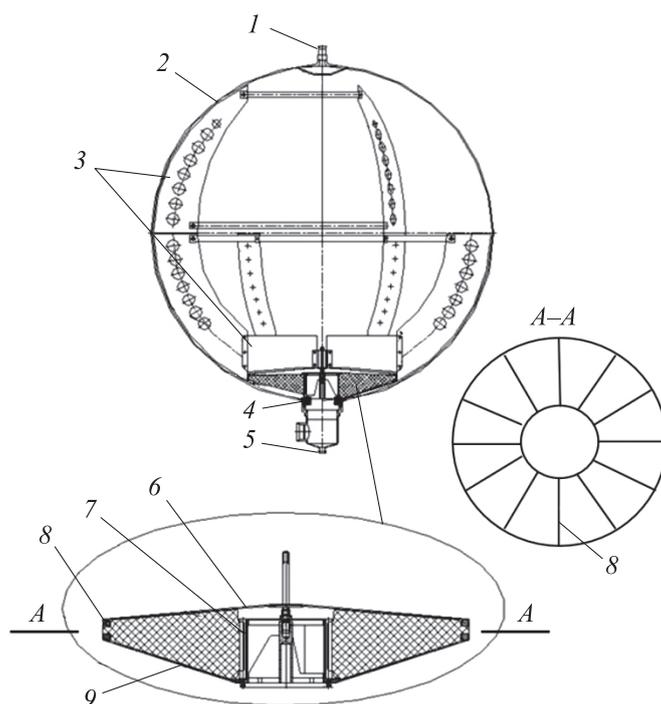


Рис. 1. Эскиз топливного бака с внутрибаковым устройством капиллярного типа (ВБУ КТ):

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

экраном таким образом, что нижняя часть внутреннего экрана соединена с меньшим основанием нижнего конуса внешнего экрана, а верхняя часть внутреннего экрана закрыта крышкой. Между внешним и внутренним сетчатыми экранами равномерно по окружности расположены 12 сетчатых лепестков.

Внешний сетчатый экран предотвращает попадание газовых пузырей, содержащихся в топливном компоненте, в топливные магистрали, идущие к двигателям, а внутренний сетчатый экран способствует повышению полноты выработки топливного компонента из бака при работе космических жидкостных ракетных двигательных установок (КЖРДУ) в условиях действия малой гравитации.

Методика определения КУС сетчатых экранов ФУ в составе КЗУ собранного топливного бака. В связи с тем что ФУ находится в замкнутом пространстве топливного бака с непрозрачной оболочкой и окружен элементами ВБУ КТ, применение метода «точка пузырька» по ГОСТ Р 50516-93 для определения КУС экранов ФУ, как это происходит при его автономных испытаниях после изготовления, невозможно из-за затрудненности визуального наблюдения. Поэтому в рассматриваемом случае для определения КУС сетчатых экранов был применен метод слива модельной жидкости из топливного бака через установленный в нем ФУ.

Принципиальная схема испытательного оборудования для определения КУС и гидравлического сопротивления (ГС) ФУ представлена на рис. 2. При сливе значение расхода модельной жидкости выбирается из условия, чтобы скорость изменения уровня жидкости в баке не превышала значения 10 мм вод. ст./с. Если указанное ограничение не соблюдается, на результаты измерений может влиять динамическая составляющая гидравлического потока, уменьшая измеряемые значения КУС [3, 9]. В качестве модельных используются жидкости с высокой смачивающей способностью, определяемой малыми и стабильными значениями коэффициента поверхностного натяжения и угла смачивания.

Кроме того, при использовании метода слива применяемая модельная жидкость должна смачивать внешний сетчатый экран так, чтобы значение КУС смоченного экрана было больше, чем гидростатическое давление столба модельной жидкости, заключенной внутри его оболочки. Для топливного бака в целом, учитывая, что определение КУС экранов ФУ является конечной контрольной операцией, при выборе используемой модельной жидкости следует учитывать требование ее полного удаления из капиллярных структур ФУ после испытаний. К таким жидкостям относятся спирты.

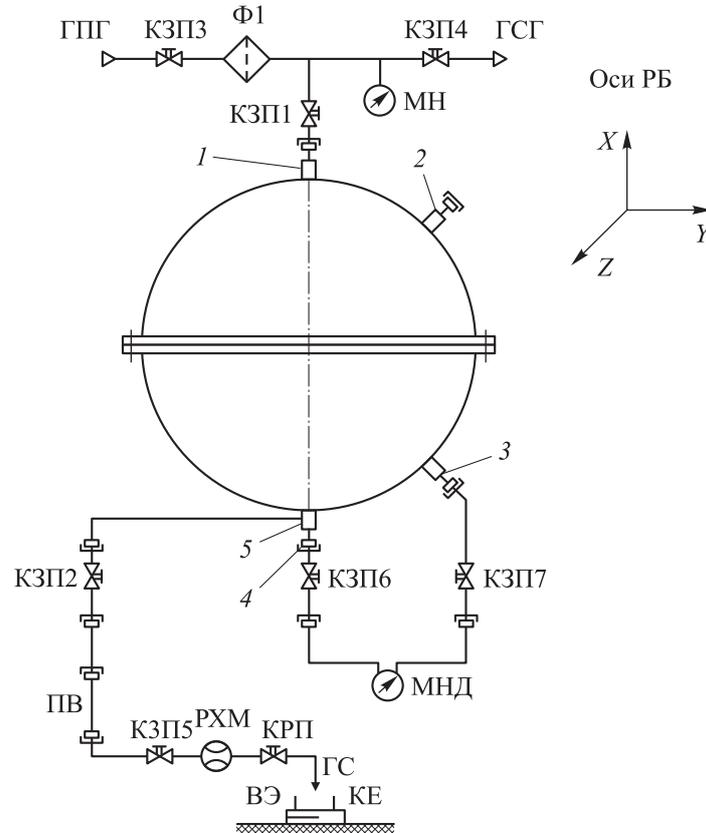


Рис. 2. Принципиальная схема определения КУС и ГС ФУ:

1 — наддувный штуцер; 2 — верхний технологический штуцер; 3 — нижний технологический штуцер; 4 — технологический штуцер крышки; 5 — расходный штуцер

Определение гидравлического сопротивления ФУ. Испытания ФУ в составе КЗУ топливного бака начинаются с определения значения его гидравлического сопротивления в потоке проходящей через него жидкости с расходом, на котором в дальнейшем будет определяться значение КУС сетчатых экранов. На рис. 3 представлена принципиальная схема измерения гидравлического сопротивления ФУ на этапе слива жидкости из топливного бака, когда ФУ полностью погружено в жидкость. Граница раздела «газ — жидкость» обозначена линией $N-N$. Верхняя точка внешнего сетчатого экрана находится на пересечении оси X и линии $M-M$. Штуцер отбора давления жидкости на внешнем контуре ФУ обозначен как $1I$, а штуцер отбора давления в жидкости за ФУ — как $2I$. Срез штуцера $2I$ находится на уровне установочной плоскости ФУ в бак.

Для точек 1 и 2 , определяющих показания преобразователя разности давлений МНД (манометр — напоромер дифференциальный), записаны выражения действующих давлений:

$$P_1 = P_6 + H_N; \quad (1)$$

$$P_2 = P_6 - \Delta P_{\text{тр.э}} + H_N, \quad (2)$$

где P_6 — давление вытеснительного газа в баке; $\Delta P_{\text{тр.э}}$ — гидравлическое сопротивление трения первого и второго экранов ФУ, т. е. $\Delta P_{\text{тр.э}} = \Delta P_{\text{тр.э1}} + \Delta P_{\text{тр.э2}}$; $H_N = \rho_{\text{ж}} h_N g$ — давление гидростатического столба жидкости плотностью $\rho_{\text{ж}}$ и высотой h_N ; g — ускорение свободного падения.

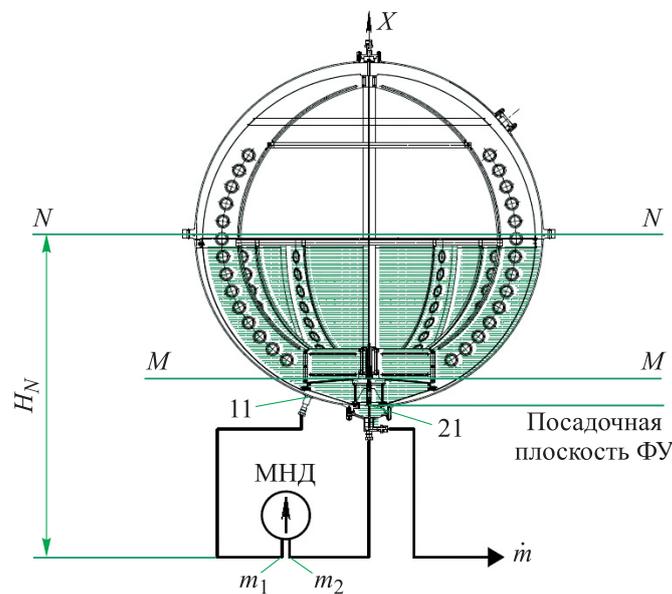


Рис. 3. Этап определения ГС ФУ

Разность выражений (1) и (2) дает результат измерений преобразователем разности давлений МНД:

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{\text{тр.э}}. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что в этом варианте опорожнения бака преобразователь разности давлений измеряет только перепад давления на ФУ, вызванный его гидравлическим сопротивлением потоку протекающей через него жидкости.

Определение КУС внешнего экрана. На начальном этапе опорожнения топливного бака модельная жидкость остается только внутри ФУ, удерживаемая от вытекания наружу капиллярными силами, которые действуют в объеме внешнего сетчатого экрана, изготовленного из комбинированного пористо-сетчатого материала [8, 9], и ее объем полностью равен внутреннему объему ФУ (рис. 4).

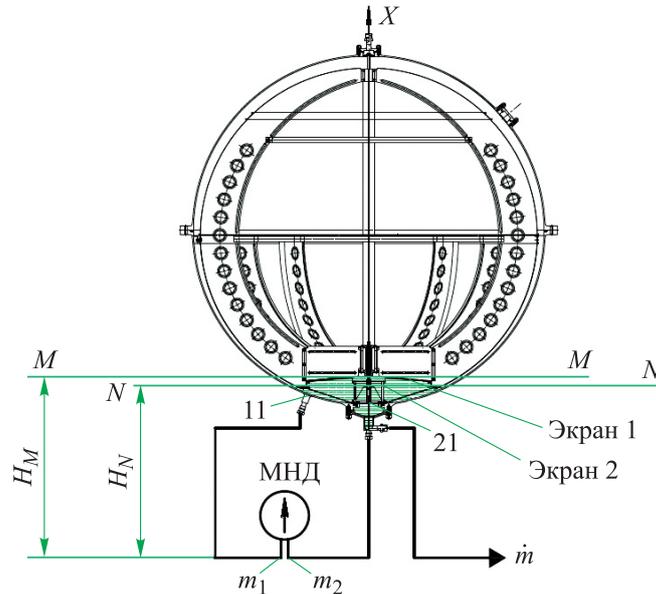


Рис. 4. Этап определения КУС внешнего экрана ФУ
(\dot{m} — расход жидкости из бака)

Находящийся снаружи ФУ газ при отборе жидкости из бака с расходом \dot{m} начинает в виде отдельных пузырьков поступать внутрь ФУ под внешний экран (в дальнейшем обозначаемый индексом э1).

Если расход жидкости из ФУ такой, что капиллярным силам, действующим во внешнем экране, удастся «залечить» смачивающей жидкостью место прохождения газового пузырька через экран [9, 10], то запасенная ранее в ФУ жидкость не вытекает из устройства наружу через внешний экран, а удерживается в его объеме. Для точек 11 и 12, определяющих показания преобразователя разности давлений МНД, выражения действующих давлений записываются так:

$$P_1 = P_6 + H_{11}; \quad (4)$$

$$P_2 = P_6 - \Delta P_{\text{КУС э1}} - \Delta P_{\text{тр. э2}} + H_M, \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{тр. э2}}$ — сопротивление трения внутреннего экрана.

Вычитая выражение (5) из (4), получаем

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{\text{КУС э1}} + \Delta P_{\text{тр. э2}} - (H_M - H_{11}). \quad (6)$$

По определению, за КУС капиллярного экрана принимается значение минимального перепада давления на капиллярном экране, при котором пузырек вытеснительного газа проникает через смоченный жидкостью экран. Значение $\Delta P_{\text{КУС э1}}$ выразится из зависимости (6) в следующем виде:

$$\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 1} = (P_1 - P_2) - \Delta P_{\text{тр. } \varepsilon 2} + (H_M - H_{11}), \quad (7)$$

где $(P_1 - P_2)$ — значение разности давлений, выдаваемое преобразователем разности давлений МНД; $\Delta P_{\text{тр. } \varepsilon 2}$ — определяется при полном погружении ФУ в смачивающую жидкость на расходе, имеющем минимальное значение.

Следует учесть, что из приведенного ранее определения $\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 1}$ ее максимальное значение ожидаемо будет при положении уровня жидкости в ФУ вблизи точки M , поэтому справедливо записать

$$(H_N - H_{11}) \approx (H_M - H_{11}),$$

где $(H_M - H_{11})$ — значение, получаемое из конструктивных параметров топливного бака и ФУ.

В окончательном виде выражение (7) имеет вид

$$\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 1} = (P_1 - P_2)_{\varepsilon 1} - \Delta P_{\text{тр. } \varepsilon 2} + (H_M - H_{11}). \quad (8)$$

Значение $\Delta P_{\text{тр. } \varepsilon 2}$ можно найти из результатов испытаний ФУ, а значение $(H_M - H_{11})$ определяется конструктивными параметрами топливного бака и измерительного участка преобразователя разности давлений МНД.

Определение КУС внутреннего экрана. Случай, когда внутренний объем между первым и вторым экранами ФУ освобождается от смачивающей его жидкости и пузырьки вытесняющего газа начинают проходить через второй экран, представлен на рис. 5.

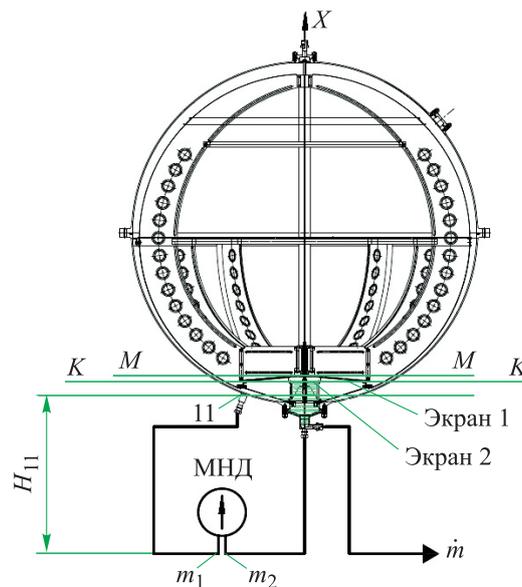


Рис. 5. Этап определения КУС внутреннего экрана ФУ

Для точек 11 и 12, определяющих показания преобразователя разности давлений МНД, выражения действующих давлений можно записать так:

$$P_1 = P_6 + H_{11}; \quad (9)$$

$$P_2 = P_6 - \Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 1} - \Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 2} + H_K, \quad (10)$$

где H_K — значение гидростатического давления столба жидкости от верхней точки второго экрана (уровень $K-K$) до преобразователя разности давлений МНД.

Разность выражений (8) и (9) дает следующий результат:

$$(P_1 - P_2)_{\varepsilon 2} = H_{11} - H_K + \Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 1} + \Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 2}. \quad (11)$$

Решив уравнение (10) относительно $\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 2}$, получаем:

$$\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 2} = (P_1 - P_2)_{\varepsilon 2} - \Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 1} + (H_K - H_{11}). \quad (12)$$

В выражении (12) для вычисления значения $\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 2}$ используется параметр $\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 1}$, который находим из выражения (8). Однако на этапе определения КУС второго экрана (внутреннего) сумма слагаемых из выражения (8)

$$\Delta P_{\text{тр. } \varepsilon 2} + (H_M - H_{11}) = 0,$$

так как течения жидкости через второй экран не происходит, и $H_M = H_{11}$, т. е. снаружи внутреннего экрана газ. Окончательно выражение (12) примет вид

$$\Delta P_{\text{КУС } \varepsilon 2} = (P_1 - P_2)_{\varepsilon 2} - (P_1 - P_2)_{\varepsilon 1} + (H_K - H_{11}), \quad (13)$$

где $(P_1 - P_2)_{\varepsilon 1}$ — показания МНД на этапе определения КУС внешнего экрана.

Результаты экспериментального определения КУС ФУ. Пример изменения во времени значения перепада давления на ФУ при опорожнении топливного бака представлен на рис. 6. В качестве модельной жидкости использовался этиловый спирт.

До момента времени τ_1 от начала слива модельной жидкости с массовым расходом, значение которого ограничено требованием минимальной скорости движения уровня модельной жидкости в баке, ФУ полностью погружено в модельную жидкость. Согласно рис. 3, на этом этапе слива модельной жидкости преобразователь разности давлений МНД регистрирует значение перепада давления на ФУ, которое равно гидравлическому сопротивлению ФУ, вызванному трением потока жидкости при протекании через капиллярные структуры устройства. С момента времени τ_1 начинается плавный рост перепада

давления на ФУ. Этот этап слива жидкости представлен на рис. 4, когда верхняя часть внешнего экрана выходит из окружающей его с внешней стороны смачивающей жидкости. Увеличение перепада давления на ФУ связано с уменьшением в процессе слива площади смоченной поверхности внешнего экрана, через которую жидкость снаружи проникает внутрь ФУ через внешний экран, при сохранении первоначально заданного значения секундного расхода модельной жидкости через устройство.

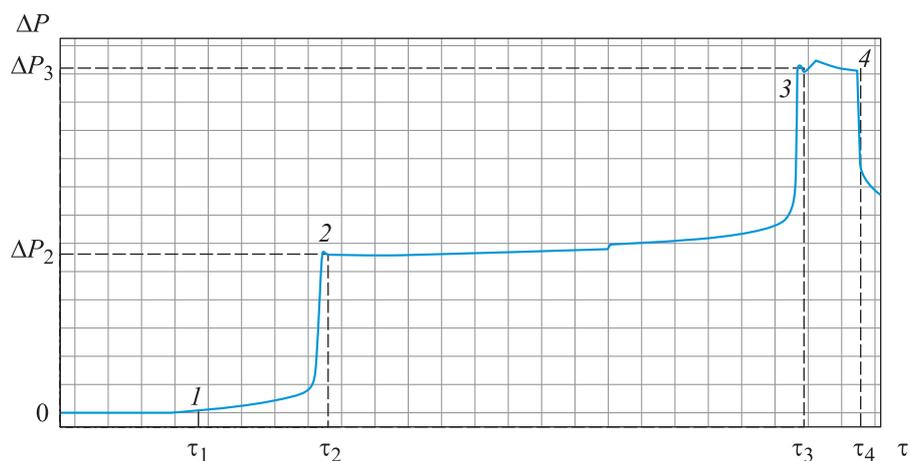


Рис. 6. Зависимость перепада давлений ΔP между сливным и наддувным штуцерами бака от времени τ в процессе слива

В момент времени τ_2 жидкость снаружи внешнего экрана полностью вырабатывается, и через него в пространство между внешним и внутренним экранами ФУ начинает поступать газ наддува. Ввиду малости расхода жидкости, капиллярных свойств материала экранов (пористо-сетчатый материал с объемной структурой) газ наддува в виде отдельных пузырей поступает через верхнюю область верхнего конуса внешнего экрана. Перепад давления на смоченной жидкостью внешнем экране поддерживается на некотором уровне значений (ΔP_2), установившемся в точке 2 графика, характерном для проявления КУС внешнего экрана. Истинное значение КУС внешнего экрана определяется выражением (8). С учетом конструктивных параметров ФУ и измерительной схемы, входящих в вычисление значений H_M и H_{11} по выражению (8), значение КУС близко к значению КУС, полученному для внешнего экрана на этапе автономных испытаний после изготовления ФУ.

В интервале времени слива ($\tau_2 - \tau_3$) идет опорожнение пространства между внешним и внутренним экранами. При этом внешний экран

остаётся смоченным модельной жидкостью, и значение перепада давления на ФУ изменяется мало. В прозрачном участке сливного трубопровода ПВ, расположенном между выходным штуцером из бака и расходомером РХМ, не видно пузырьков газа. Значение объема вытекшей из ФУ жидкости за этот интервал времени измеряется и соответствует геометрическим расчетам объема этой полости. В конце длительности рассматриваемого интервала времени (τ_3) модельная жидкость перестает обтекать внутренний экран, и начинает работать КУС внутреннего экрана, о чем свидетельствует резкое увеличение значения перепада давления (ΔP_3) на ФУ, представляющего собой сумму значений КУС внешнего и внутреннего экранов. Пузырьки газа (в точке 3 графика) начинают проникать внутрь объема, ограниченного поверхностью внутреннего экрана, и вскоре появляются в прозрачном участке ПВ сливной магистрали. Значение КУС внутреннего экрана с учетом данных испытаний, конструктивных параметров ФУ и измерительной схемы ($H_K - H_{11}$) согласно выражению (13) также близко к результату определения КУС внутреннего экрана, полученному при автономных испытаниях ФУ на этапе его изготовления.

Заключение. Рассмотрен метод определения качества сборки в топливном баке элемента капиллярного заборного устройства в виде многоступенчатого фазоразделительного устройства из пористого сетчатого материала, реализованный методом слива модельной жидкости. Даны рекомендации по выбору физических параметров модельной жидкости с учетом порометрических характеристик сетчатого материала, что позволяет последовательно в процессе испытаний контролировать качество фазоразделительных экранов устройства, определяемое сравнительным анализом результатов измерения значений капиллярной удерживающей способности сетчатых экранов до монтажа фазоразделительного устройства в топливный бак и после. На примере представленного результата испытаний показаны стадии процесса слива модельной жидкости из топливного бака с КЗУ, подтверждающие обсуждаемую в физическую модель слива.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белов С.В. *Пористые проницаемые материалы: справочник*. Москва, Металлургия, 1987, 335 с.
- [2] Челомей В.Н., Полухин Д.А., Миркин Н.Н. [и др.]. *Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями*. В.Н. Челомей, ред. Москва, Машиностроение, 1978, 240 с.
- [3] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М. Синцов А.Л., Сухоставец В.Ф. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических аппаратов*. Москва, УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997, 328 с.

- [4] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Марков А.В., Новиков Ю.М., Платов И.В. О практических методах определения порометрических характеристик тонких образцов из комбинированного пористо-сетчатого материала. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-1-2244
- [5] Александров Л.Г., Богданов А.А., Большаков В.А., Константинов С.Б. [и др.]. *Топливный бак и его заборное устройство*. Патент RU 2 657137 С2 с приоритетом от 26.03.2018, бюл. № 9.
- [6] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Топливный бак с капиллярным внутриваковым устройством космической двигательной установки. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2021, № 4, с. 15–21.
- [7] Новиков Ю.М., Александров Л.Г., Богданов А.А., Большаков В.А., Константинов С.Б., Новиков М.Ю. Проницаемые структуры на основе пористо-сетчатого металла и сварочная технология производства изделий из них для двигательных установок космических аппаратов. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2021, № 1, с. 44–51.
- [8] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Платов И.В., Новиков Ю.М., Большаков В.А., Партола И.С. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкциях фазоразделительных и фильтрующих устройств космических жидкостных ракетных двигательных установок: современное состояние и проблемы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-3-2259
- [9] Авраамов Н.И., Корольков А.В., Маслов В.А., Сапожников В.Б. Математическая модель комбинированного пористо-сетчатого материала как фазоразделителя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 4–16. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-4-16
- [10] Корольков А.В., Королькова Л.В., Сапожников В.Б., Маслов В.А. Оценка объема жидкости в телесных углах транспортных желобов топливного бака космического аппарата. *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2018, т. 22, № 2, с. 120–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-120-124

Статья поступила в редакцию 12.11.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Александров Л.Г., Константинов С.Б. Методика контроля качества сетчатых фазоразделителей в составе топливных баков космических жидкостных ракетных двигательных установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 2. EDN WKGNHT

Александров Лев Григорьевич — канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор, АО «НПО Лавочкина». e-mail: aia@laspace.ru

Константинов Сергей Борисович — канд. техн. наук, доцент, главный специалист, АО «НПО Лавочкина». e-mail: KonstantinovSB@laspace.ru

Quality control technique of mesh phase separators in fuel tanks of space liquid rocket propulsion units

© L.G. Alexandrov, S.B. Konstantinov

Lavochkin Science and Production Association JSC, Khimki, 141400, Russian Federation

The paper considers the methodology for confirming the quality of manufacture of capillary phase separation element of the infill fuel tank intake device of the space liquid rocket propulsion unit during the acceptance-delivery stage of the tanks tests. The stability of the capillary structure is estimated by the constant value of the capillary retention capacity of the mesh material of the separation screens of the capillary phase separation device at all stages of production and testing of the fuel tank with an internal capillary intake device. The stages of emptying the internal tank intake device from liquid during experimental determination of the values of the capillary retention capacity of the separation screens of a two-stage phase separation device in the composition of a fuel tank are considered. The hydraulic test scheme is provided and the approach to the selection of the fluid used in the tests is recommended. The calculated dependencies on calculation of capillary retention capacity values of porous-mesh materials of separation screens of the gas separation device based on experimental data are presented. Test results are analyzed.

Keywords: porous mesh, characteristics, method, pore size, phase separator, capillary retention capacity, capillary intake devices, hydraulic tests

REFERENCES

- [1] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: Spravochnoe izdanie* [Porous permeable materials: Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 335 p.
- [2] Chelomey V.N., Polukhin D.A., Mikrin N.N. et al. *Pnevmogidravlicheskiye sistemy dvigatel'nykh ustanovok s zhidkostnymi raketnymi dvigatelyami* [Pneumo-hydraulic propulsion systems with liquid rocket engines]. V.N. Chelomey, ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 240 p.
- [3] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M., Sintsov A.L., Sukhostavets V.F. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Capillary systems of liquid extraction from the spacecraft tanks]. V.M. Polyayev, ed. Moscow, UNPTs "ENERGOMASH" Publ., 1997, 328 p.
- [4] Alexandrov L.G., Konstantinov S.B., Markov A.V., Novikov Yu.M., Platov I.V. On practical methods to determine porometric characteristics of thin samples made from combined porous mesh material. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-1-2244
- [5] Alexandrov L.G., Bogdanov A.A., Bolshakov V.A., Konstantinov S.B. et al. *Toplivnyi bak i ego zabornoe ustroystvo* [Fuel tank and its intake device]. Patent of RF No. 2657137 for the invention. Publication date: 26.03.2018, bull. no. 9.
- [6] Alexandrov L.G., Konstantinov S.B., Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. *Toplivnyi bak s kapillyarnym vnutribakovym ustroystvom kosmicheskoy dvigatel'noy ustanovki* [Space vehicle fuel tank with propellant management device]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2021, no. 4 (54), pp. 15–21.
- [7] Novikov Yu.M., Alexandrov L.G., Bogdanov A.A., Bolshakov V.A., Konstantinov S.B., Novikov M.Ju. Permeable structures on the basis of combined porous

- mesh metal and welding production technology of products made of them for space vehicle propulsion systems. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2021, no. 1, pp. 44–51.
- [8] Alexandrov L.G., Konstantinov S.B., Platov I.V., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A., Partola I.S. Use of combined porous mesh material in phase separation and filtering devices design for space liquid propellant rocket propulsion systems: current state and problems. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 3.
DOI: 10.18698/2308-6033-2023-3-2259
- [9] Avraamov N.I., Korolkov A.V., Maslov V.A., Sapozhnikov V.B. Matematicheskaya model kombinirovannogo poristo-setchatogo materiala kak fotorazdelitelya [Mathematical simulation of using a combination of mesh and porous materials as a phase separator]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 4–16.
DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-4-16
- [10] Korolkov A.V., Korolkova L.V., Sapozhnikov V.B., Maslov V.A. Estimation of the volume of fluid in the solid angles of the transport chutes of the fuel tank of a spacecraft. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 2, pp. 120–124.
DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-120-124

Alexandrov L.G., Cand. Sc. (Eng.), Leading Design Engineer, Department of Propulsion Systems, Lavochkin Association JSC; author of about 30 scientific publications. Research interests: hydrodynamics and heat transfer in aerial vehicles power plants. e-mail: aia@laspace.ru

Konstantinov S.B., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Chief Specialist, Department of Advanced Scientific Research and Development, Lavochkin Association JSC; author of about 40 scientific publications. Research interests: design of space equipment and systems. e-mail: KonstantinovSB@laspace.ru