

Экспериментальные исследования функционирования цилиндрических фазоразделителей капиллярных систем отбора жидкости космических летательных аппаратов при внешнем обтекании жидким компонентом

© А.В. Новиков, Е.А. Андреев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию функционирования капиллярных систем отбора жидкости (КСОЖ) топливных баков при обтекании этих разделителей жидким компонентом. Приведена теоретическая модель, описывающая данный процесс. На основании проведенного анализа на проливном экспериментальном стенде были смоделированы реальные условия эксплуатации, например движения жидкого компонента в объеме топливных баков, приводящие к возникновению дополнительных динамических нагрузок на КСОЖ. Сравнительный анализ экспериментальных данных и ранее полученных результатов теоретического исследования процесса внешнего обтекания жидким компонентом решеток цилиндрических фазоразделителей КСОЖ показал хорошую сходимость результатов.

Ключевые слова: космические летательные аппараты, капиллярные системы отбора жидкости, модельные испытания, проливной стенд, фазоразделитель

Одной из важных задач при эксплуатации жидкостных ракетных двигателей в условиях практической невесомости является обеспечение сплошности жидкости на входе в заборные магистрали [1–7].

В настоящее время для решения этой задачи широко используются капиллярные системы отбора жидкости (КСОЖ), типовыми элементами которых являются совокупности — пучки, решетки и т. д. — цилиндрических трубчатых пористых фазоразделителей.

Работе КСОЖ посвящен большой комплекс как экспериментальных, так и теоретических исследований [1–13]. Вместе с тем влияние отдельных факторов реального полета на их функционирование до сих пор недостаточно хорошо изучено. Например, в космических летательных аппаратах (КЛА) происходят движения жидкого компонента в объеме топливных баков, что приводит к увеличению перепада давления на фазоразделителях КСОЖ и нарушению расчетной гидравлики течения жидкости. Поэтому актуальными являются экспериментальные исследования процесса отбора компонента с учетом происходящих процессов и оценка применимости существующих теоретических моделей в таких условиях.

В работах [1, 2] представлены математическая модель и результаты теоретического исследования процесса внешнего обтекания жидким компонентом решеток цилиндрических фазоразделителей КСОЖ. Расчетная схема исследуемого процесса показана на рис. 1.

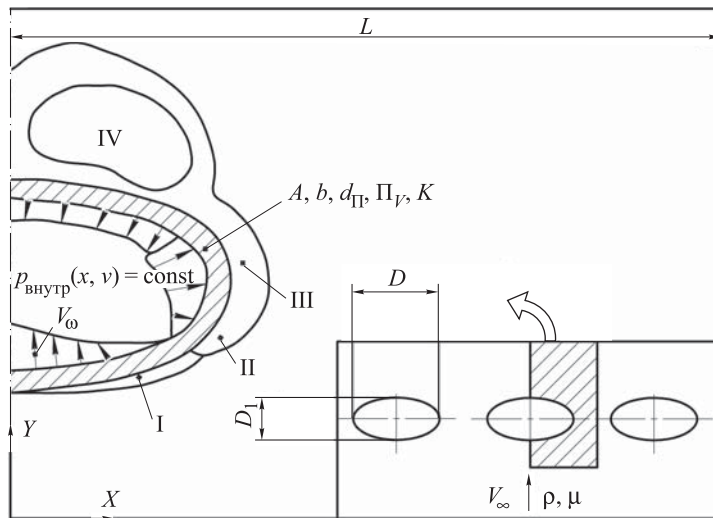


Рис. 1. Расчетная схема обтекания решеток цилиндрических фазоразделителей:
 I–IV — зоны различных течений (ламинарная, переходная, турбулентная
 и с отрывом пограничного слоя)

В соответствии с принятой расчетной схемой течения поперек потока жидкости, направленного вдоль оси Y , расположен фронт решетки полых проницаемых цилиндрических фазоразделителей. Полости фазоразделителей целиком заполнены жидкостью. На рис. 1 также указаны основные геометрические характеристики поля течения, такие как V_∞ — скорость вдува (отсоса) в пограничный слой, $p_{\text{внутр}}$ — статическое давление во внутренней полости, ρ и μ — соответственно плотность и вязкость.

По результатам проведенных расчетов в [1–3] сделан вывод, что при обтекании пористых цилиндров потоком жидкости в полостях этих цилиндров возникает понижение давления, негативно влияющее на работоспособность КСОЖ. Получено соотношение для расчета падения давления в полостях фазоразделителей, вызываемого внешним обтеканием этих фазоразделителей.

Для однорядной решетки проницаемых цилиндров расчетные соотношения согласно [1] принимают вид

$$\begin{aligned} \bar{p}_1 &= 1,52 \frac{\text{Re}^{0,12} l^{0,65}}{\bar{K}^{0,07}} \left(\frac{0,64}{\bar{L}^{1,5}} + 0,9 \right); \\ C_{y1} &= 0,24 \frac{\text{Re}^{0,25} l^{0,56}}{\bar{K}^{0,14}} \left(\frac{0,214}{\bar{L}^{0,59}} + \frac{0,8}{\bar{L}^{0,017}} \right); \\ C_y &= 0,12 \frac{\text{Re}^{0,12} l^{0,7}}{\bar{K}^{0,14}} \left(\frac{0,2}{\bar{L}^{0,28}} + 0,8 \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{p}_1 = 2(p_0 - p_0) / (\rho V_\infty^2)$ — безразмерное давление; C_{y1} , C_y — коэффициенты сопротивления решетки проницаемых и непроницаемых препятствий соответственно; $\bar{L} = (L - D) / D$, L — размер ячейки поперек потока; $l = D / D_1$ (D — длина оси эллиптического сечения препятствия, ориентируемой поперек набегающего потока, D_1 — другая ось эллиптического сечения); $K = 11,2$ — коэффициент, зависящий от пористости материала стенки [14]; $\bar{K} = K \cdot \frac{A^2}{\Pi_V^3} \cdot b \cdot D$ (A — удельная поверхность, b и Π_V — толщина и пористость материала стенки).

Оценки, проведенные на основе анализа соотношения (1), показали, что пульсации давления в полостях КСОЖ, вызываемые плесканием жидкости в баках КЛА при их маневрах, могут достигать до 30 % капиллярной удерживающей способности фазоразделяющих экранов. Это выводит фактор гидродинамического взаимодействия плещущейся жидкости и элементов КСОЖ в объеме топливного бака в разряд факторов, требующих дополнительного экспериментального исследования.

Для изучения взаимодействия плоского стационарного потока жидкости с решеткой полых проницаемых цилиндров круглого сечения ($l = 1$) создан экспериментальный проливной стенд и разработана методика проведения такого исследования.

Проливной стенд относится к классу гидравлических экспериментальных установок, решающих задачи исследования течений жидкости, ограниченных твердыми стенками. Стенд предназначен для проверки работоспособности предложенной в [1] математической модели и применимости результатов численного моделирования к расчетному случаю течения. Пневмогидросхема (ПГС) проливного стенда представлена на рис. 2.

Исходя из задач экспериментального исследования, ПГС обеспечивает:

- подачу, регулировку и измерение расхода модельной жидкости через рабочий участок в потребном диапазоне расходов;
- поддержание постоянного заданного расхода модельной жидкости во время измерений параметров течения в рабочем участке (не менее 30 с на верхней границе диапазона измерения расхода);
- постоянную очистку модельной жидкости и газа наддува от частиц размером более 5 мкм для предотвращения загрязнения пористого материала фазоразделителей.

Рабочий участок установки, входящий в состав ПГС, обеспечивает реализацию расчетной картины течения работы [1]: натекание ста-

ционарного потока жидкости на решетку круговых цилиндрических фазоразделителей с переменным шагом и фронтом, ориентированным нормально потоку.

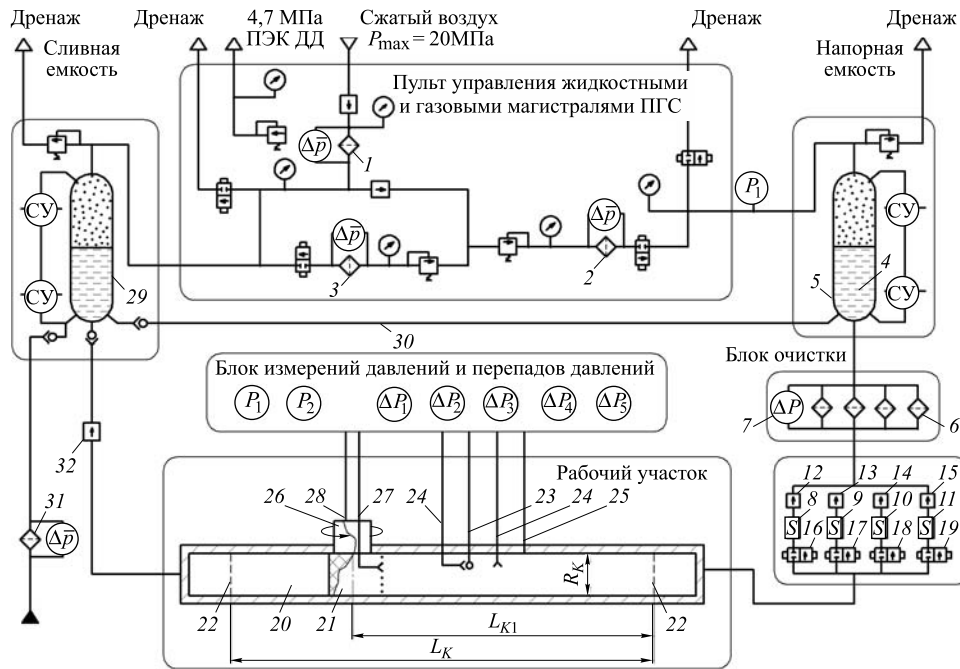


Рис. 2. Пневмогидросхема проливного стенда

Пневмогидросистема проливного стенда работает по вытеснительной схеме подачи жидкости и включает в себя: пульт управления жидкостными и газовыми магистралями ПГС, блок напорной емкости, блок сливной емкости, блок регуляторов расхода жидкости, блок измерений расхода жидкости, блок измерений давления и перепадов давлений, экспериментальный рабочий участок.

Пульт управления магистралями ПГС предназначен для редуцирования газа высокого давления и коммутации потоков сжатого газа и выдачи давлений газа, необходимых для работы всех систем стенда.

Фильтры 1 (см. рис. 2) грубой очистки и фильтры 2, 3 тонкой очистки обеспечивают фильтрацию газа наддува от частиц более 5 мкм. Напорная емкость 5 с сигнализаторами уровня (СУ) и модельной жидкостью 4 снабжена предохранительным клапаном и предназначена для создания вынужденного движения жидкости через рабочий участок. Блок очистки жидкости с батареей фильтров 6 обеспечивает тонкость фильтрации жидкости 5 мкм. Загрязнение фильтров 6 контролируется датчиком перепада давления 7.

В блок измерений расхода жидкости входят датчики турбинного типа 8–11, включенные параллельно для измерений расходов с по-

требной точностью. Запорные элементы 12–15 и отсечные клапаны 16–19 позволяют осуществлять раздельную и совместную работу датчиков расхода в зависимости от необходимого расхода.

Рабочий участок представляет собой плоский щелевой канал 20 с установленной поперек его плоскости решеткой тонкостенных проницаемых круговых цилиндрических фазоразделителей 21. Перфорированные пластины 22 предназначены для выравнивания потока жидкости по сечению рабочего участка.

Геометрия отдельного фазоразделителя 21 аналогична геометрии натурального фазоразделителя КСОЖ реальной конструкции топливного бака.

Система трубок замера 23–25 полного и статического давления предназначена для определения компонент локальной скорости в непосредственной близости от фронта решетки фазоразделителей для проверки соответствия картины течения расчетному случаю.

Поворотное устройство 26 служит для вращения центрального элемента решетки фазоразделителей при замере распределения статических давлений по контуру этого элемента с помощью трубки статического давления 27. Для измерений давления в полости фазоразделителя служит трубка 28.

Сливная емкость 29, снабженная сигнализаторами уровня СУ и предохранительным клапаном, служит для приема в ходе эксперимента модельной жидкости, прошедшей через рабочий участок.

Заправка стенда модельной жидкостью ведется в сливную емкость 29 через фильтр 31 с толщиной фильтрации 5 мкм. Байпасная магистраль имеет номер 30. Регулятор расхода 32 служит для точной регулировки расхода жидкости через рабочий участок.

Блоки измерений давления и перепадов давлений представляют собой два независимых канала для измерения давления и пять каналов для измерений перепада давления. На рис. 3 изображена схема расстановки датчиков давления (P), перепада давления (ΔP), температуры (t , °C) и расхода (Q) на рабочем участке проливного стенда.

Конструкция центрального элемента решетки фазоразделителей представлена на рис. 4. Центральный фазоразделитель представляет перфорированную трубу 1 кругового сечения, обернутую двумя слоями тканой металлической сетки — подложечным 4 и основным 11. Подложечный слой служит для создания равномерно проницаемой структуры по контуру фазоразделителя независимо от дискретности перфорации трубы. Гидравлическое сопротивление подложечного слоя пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением слоя 11, поэтому характеристики слоя 4 не учитываются при обработке результатов эксперимента.

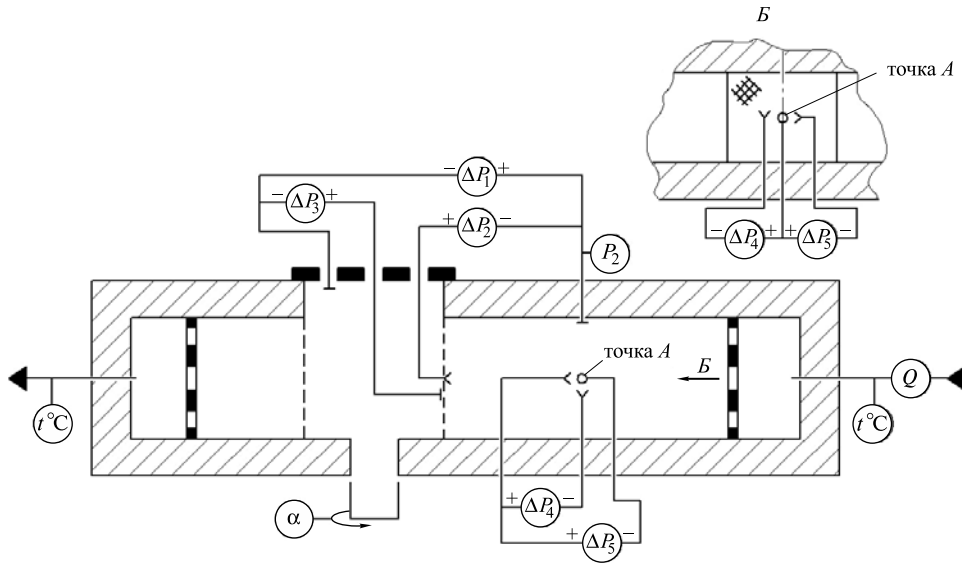


Рис. 3. Схема расстановки датчиков на рабочем участке проливного стнда:
 α — угловой азимут точки контура цилиндра, отсчитываемый от лобовой точки

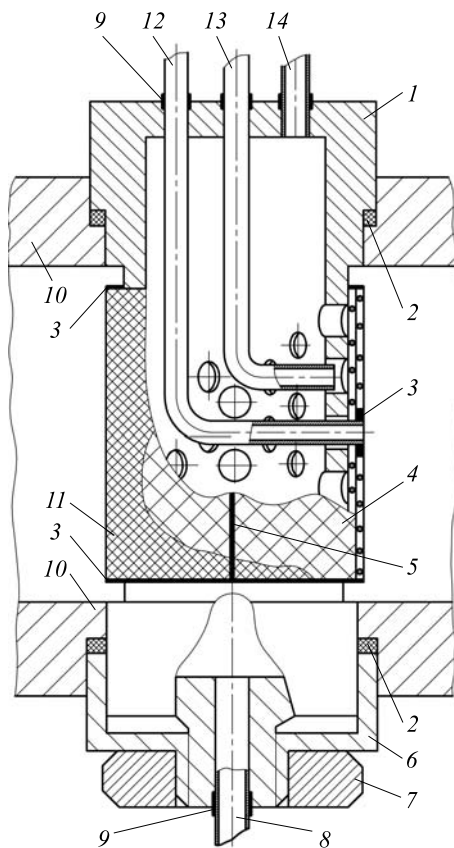


Рис. 4. Конструкция центрального элемента решетки фазоразделителей

Фазоразделитель прикрепляют к стенкам 10 щелевого канала рабочего участка с помощью уплотнительных колец 2, поджимной втулки 6 и гайки 7. Во внутренней полости фазоразделителя расположена трубка 12 для измерений статического давления на поверхности фазоразделителя и трубка 13 для измерений давления под слоем 4. Трубки 8 и 14 служат для измерений давления в полости фазоразделителя и дренажа газа из этой полости при подготовке к эксперименту.

Крепление слоев 4 и 11 к трубе 1 осуществляется с помощью продольного 5 и кольцевых 3 паяных швов. Трубки 8, 12–14 крепят к трубе 1 с помощью герметичных сварных швов 9.

Конструкция боковых фазоразделителей решетки не содержит трубок 12 и 13, а в остальном — аналогична конструкции центрального элемента.

Наряду с маятниковым стендом [8] в состав лаборатории по изучению процессов, протекающих в КСОЖ, входит проливной стенд, рабочий участок которого показан на рис. 5.

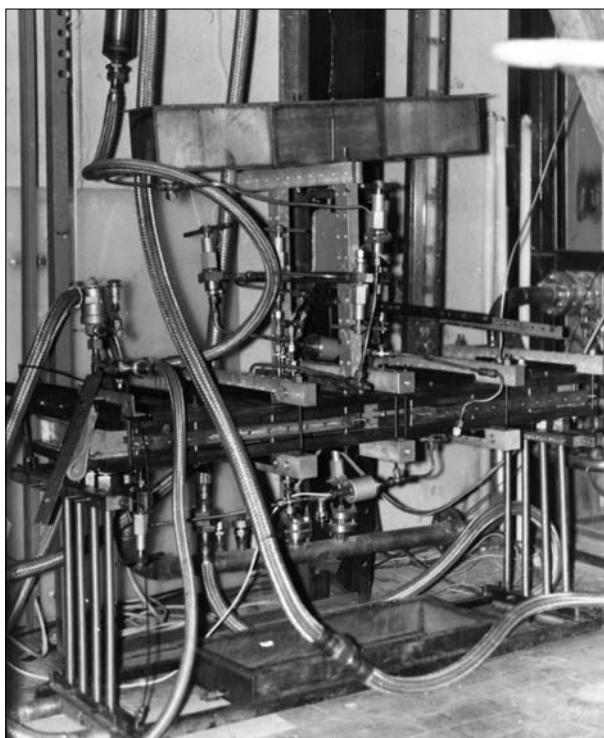


Рис. 5. Рабочий участок проливного стенда

На рис. 6 представлен внешний вид центрального элемента решетки фазоразделителей.

На созданном проливном стенде в соответствии с разработанной методикой была проведена серия экспериментов. На рис. 7 изобра-

жена характерная осциллограмма проведения эксперимента на этом стенде, нумерация каналов соответствует расстановке датчиков на схеме, приведенной на рис. 3.



Рис. 6. Центральный элемент решетки фазоразделителей

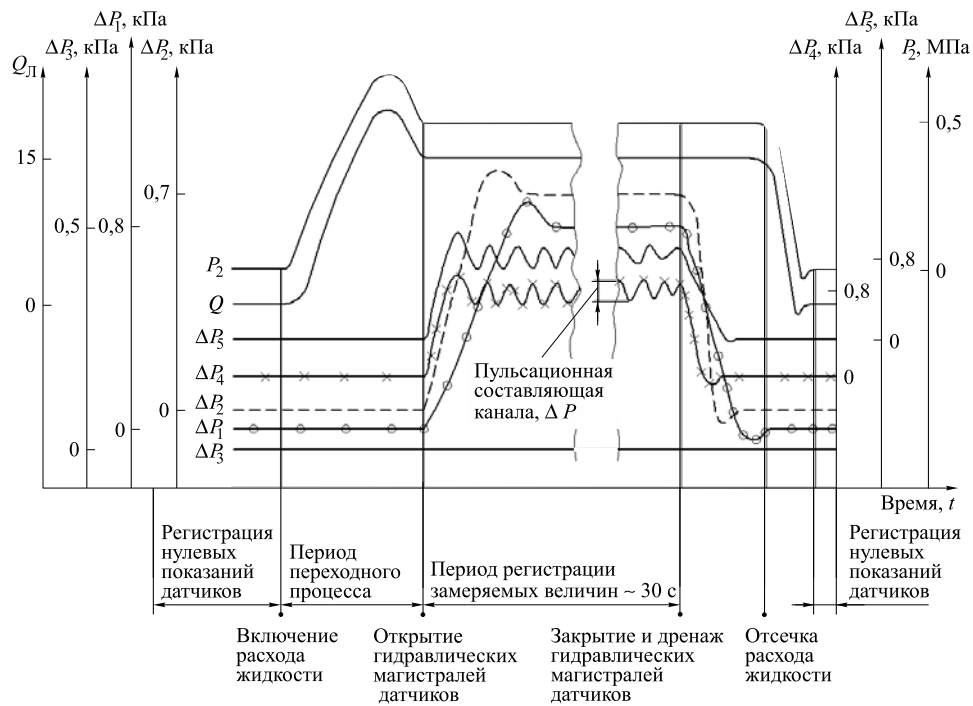


Рис. 7. Характерная осциллограмма проведения эксперимента

Обработка результатов экспериментов проводилась в соответствии с разработанной математической моделью и выявленными влияющими параметрами работы [1].

Для того чтобы сделать вывод о применимости критериальной зависимости (1) при расчете характеристик течений исследуемого типа, была выполнена серия экспериментальных исследований течений при переменных значениях влияющих критериев в следующих диапазонах: $Re = (0,5 \dots 1,3) \cdot 10^5$; $\bar{\xi} = (0,2 \dots 1,6) \cdot 10^7$; $\bar{L} = 0,5 \dots 6$, где $\bar{\xi}$ — относительная проницаемость, $\bar{\xi} = M_c b D$, $M_c = \frac{A^2}{\Pi_\nu} = 2,5 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{12}$ — комбинированный параметр, характеризующий удельное (на единицу толщины) гидросопротивление материала стенки. Результаты этих исследований представлены на рис. 8 и 9.

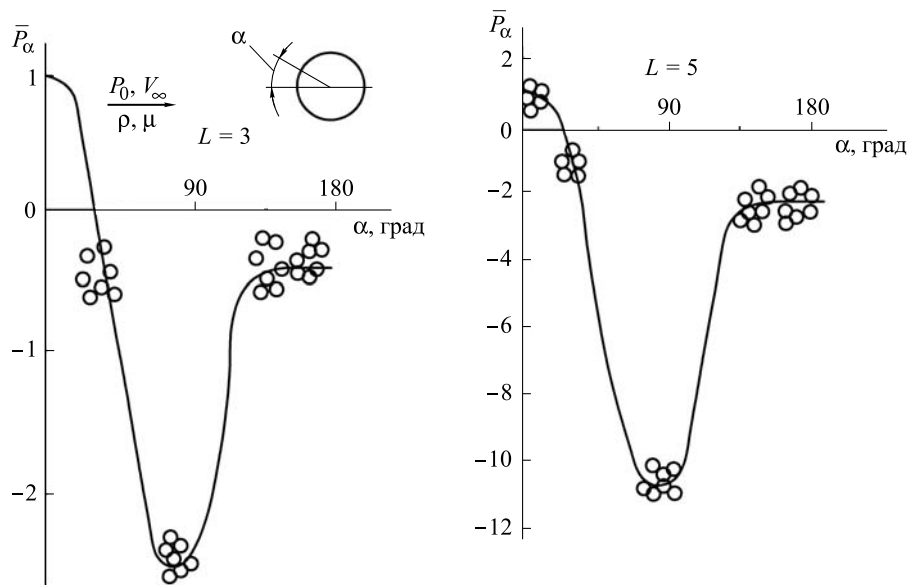


Рис. 8. Распределение статического безразмерного давления по внешнему контуру фазоразделителя

На рис. 8 показано распределение статического безразмерного давления по внешнему контуру фазоразделителя для двух степеней загроможденности потока \bar{L} , на рис. 9 — зависимости безразмерного давления в полости фазоразделителя от влияющих критериев.

Критерием погрешности аппроксимации соотношением (1) экспериментальных данных может служить среднее квадратическое отклонение σ_p результатов эксперимента от соотношения (1) по величине \bar{p} .

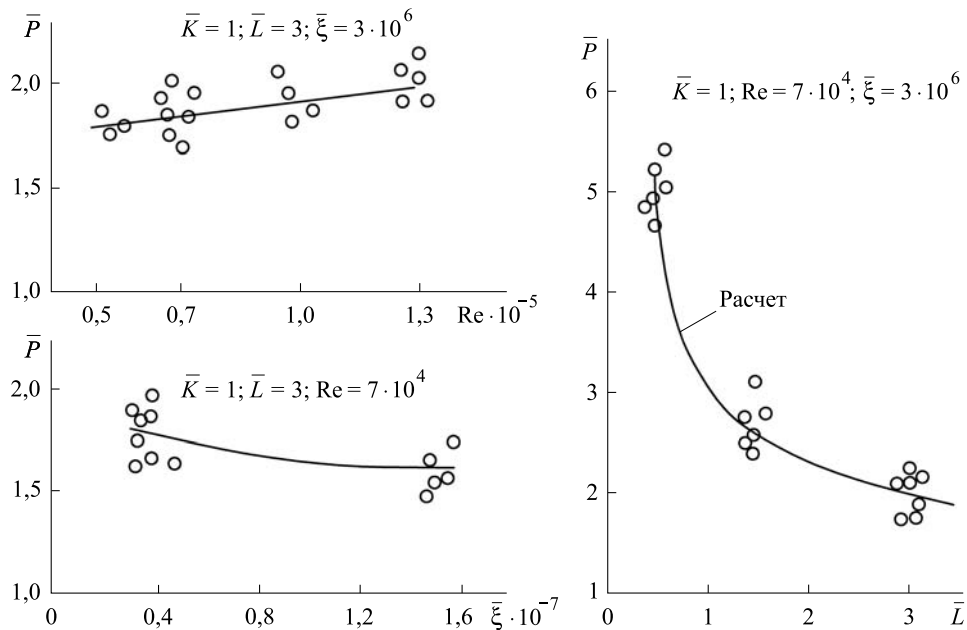


Рис. 9. Зависимость безразмерного давления в полости фазоразделителя от влияющих критериев

В серии экспериментов (см. рис. 9) $\sigma_p = 6,6 \cdot 10^{-3}$, что при доверительной вероятности 0,95 соответствует относительной погрешности, равной 0,16.

Таким образом, применимость зависимости (1) для расчета внутреннего давления в фазоразделителях КСОЖ при внешнем обтекании их жидким компонентом была экспериментально подтверждена. Следовательно, можно рекомендовать указанную зависимость как для расчета КСОЖ с цилиндрическими фазоразделителями, так и для других систем (например, фильтрующих), использующих решетки полых проницаемых цилиндров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М., Синцов А.Л., Сухоставец В.Ф. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов*. В.М. Поляев, ред. Москва, УНПЦ «Энергомаш», 1997.
- [2] Петражицкий Г.Б., Сухоставец В.Ф., Новиков А.В. Взаимодействие потока вязкой несжимаемой жидкости с полыми проницаемыми препятствиями. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1990, № 5, с. 46–50.
- [3] Гончаров Д.А., Пожалостин А.А., Кокушкин В.В. Экспериментально-аналитический метод определения коэффициента сопротивления разделителя слоев жидкости в баке. *Наука и образование*, 2015, № 4. DOI: 10.7463/0415.0763626
- [4] Кудрявцев В.М. *Основы теории и расчета ЖРД*. Москва, Высшая школа, 1993.

- [5] 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 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 6 (105), с. 130–142.
- [6] Новиков А.Е., Реш Г.Ф., Иванов М.Ю. Методика моделирования выработки топлива из баков летательных аппаратов в условиях воздействия знакопеременных перегрузок. *Наука и образование*, 2013, № 2. DOI: 10.7463/0213.0533503
- [7] Гончаров Д.А., Пожалостин А.А., Кокушкин В.В. Моделирование осесимметричных колебаний упругого бака с жидкостью с учетом сил поверхностного натяжения посредством механического аналога. *Наука и образование*, 2015, № 6. DOI: 10.7463/0615.0779724
- [8] Новиков А.В., Сухов А.В., Андреев Е.А. Экспериментальное исследование гидродинамических процессов в топливных баках с капиллярными системами отбора жидкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 1 (61). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1576
- [9] Гончаров Д.А. Осесимметричные колебания двухплотностной жидкости в цилиндрическом баке. *Наука и образование*, 2012, № 4. DOI: 77-30569/362856
- [10] Александров Л.Г., Кузьмин О.А., Макаров В.П. Двигательная установка реактивной системы управления межорбитальным космическим буксиром «ФРЕГАТ». *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2014, № 1, с. 47–49.
- [11] Асюшкин В.А., Викуленков В.П., Ишин С.В. Итоги создания и начальных этапов эксплуатации межорбитальных космических буксиров типа «ФРЕГАТ». *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2014, № 1, с. 3–9.
- [12] Новиков Ю.М., Большаков В.А., Партола И.С. Стабильность параметров, созданных из комбинированных пористых сетчатых металлов длинномерных капиллярных устройств для забора компонентов топлива. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 11 (668), с. 106–113.
- [13] 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, вып. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-707
- [14] Armour J.C., Cannon J.N. Fluid Flow Through Woven Screens. *AIChE J.*, 1968, vol. 14, no. 3, pp. 415–420.

Статья поступила в редакцию 13.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новиков А.В., Андреев Е.А. Экспериментальные исследования функционирования цилиндрических фазоразделителей капиллярных систем отбора жидкости космических летательных аппаратов при внешнем обтекании жидким компонентом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-2-1730>

Новиков Артур Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований течения жидкости и газа в сложных структурных средах. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Андреев Евгений Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области двухфазных течений в газовом тракте ракетных двигателей и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Experimental investigation of functioning of cylindrical phase separators found in spacecraft capillary fluid drainage systems subjected to external fluid flow

© A.V. Novikov, E.A. Andreev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article deals with experimental studies of how capillary fluid drainage systems (CFDS) of fuel tanks function when the liquid fuel component flows around their phase separators. We present a theoretical model describing this process. Based on the analysis conducted, we used a flow loop facility to simulate actual operation conditions, for example, the liquid component motion over the fuel tank volume creating extra dynamic load on the CFDS. Comparative analysis of experimental data and previously obtained theoretical investigation results concerning the process of the liquid component flowing around the cylindrical phase separator grates showed good convergence of results.

Keywords: spacecraft, capillary fluid drainage systems, simulated service testing, flow loop facility, phase separators

REFERENCES

- [1] 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 fluid drainage systems for spacecraft tanks]. Polyayev V.M., ed. Moscow, UNPTs Energomash [Research, Education and Manufacturing Centre of Power Engineering] Publ., 1997.
- [2] Petrazhitskiy G.B., Sukhostavets V.F., Novikov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1990, no. 5, pp. 46–50.
- [3] Goncharov D.A., Pozhalostin A.A., Kokushkin V.V. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2015, no. 4. DOI: 10.7463/0415.0763626
- [4] Kudryavtsev V.M. *Osnovy teorii i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Foundations of liquid rocket engine theory and parameter calculation]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1993.
- [5] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 6 (105), pp. 130–142.
- [6] Novikov A.E., Resh G. F., Ivanov M. Yu. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2013, no. 2. DOI: 10.7463/0213.0533503
- [7] Goncharov D.A., Pozhalostin A.V., Kokushkin V.V. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2015, no. 6. DOI: 10.7463/0615.0779724
- [8] Novikov A.V., Sukhov A.V., Andreev E.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 1 (61). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-1-1576

- [9] Goncharov D.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 4. DOI: 77-30569/362856
- [10] Aleksandrov L.G., Kuzmin O.A., Makarov V.P. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina (Herald of the Lavochkin Science and Production Association)*, 2014, no. 1, pp. 47–49.
- [11] Asyushkin V.A., Vikulenkov V.P., Ishin S.V. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina (Herald of the Lavochkin Science and Production Association)*, 2014, no. 1, pp. 3–9.
- [12] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A., Partola I.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 11 (668), pp. 106–113.
- [13] Sapozhnikov V.B., Krylov V.I., Novikov Yu.M., Yagodnikov D.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-707
- [14] Armour J.C., Cannon J.N. *AIChE J.*, 1968, vol. 14, no. 3, pp. 415–420.

Novikov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 scientific publications in the field of experimental and theoretical studies of gas and fluid flows in structurally complex media. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Andreev E.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 scientific publications in the field of two-phase flows in rocket engine gas paths and diagnostic methodology for rocket and jet engine work cycles. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru