

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО
ПОРИСТО-СЕТЧАТОГО МАТЕРИАЛА КАК ФАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЯ****Н.И. Авраамов¹****А.В. Корольков²****В.А. Маслов²****В.Б. Сапожников¹**

korolkov@mgul.ac.ru

maslov@mgul.ac.ru

sapojnikov47@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, Московская обл.,
Российская Федерация**Аннотация**

Комбинированный пористо-сетчатый материал, имеющий объемные капиллярные свойства, используется в качестве разделителя фаз во внутрибаковых заборных устройствах капиллярного типа. Объемные капиллярные свойства позволяют обеспечить ненулевой поток жидкости во внутреннее пространство внутрибакового заборного устройства после достижения критического давления. Благодаря этому свойству удается уменьшить объем остатка топлива в топливных баках двигателя космического аппарата. Построена математическая модель внутрибакового заборного устройства капиллярного типа с разделителем фаз из комбинированного пористо-сетчатого материала. Использовано представление о комбинированном пористо-сетчатом материале как о совокупности «плотно уложенных» поперечных и продольных капилляров. Математическая модель имитирует работу внутрибакового заборного устройства после достижения давлением наддува критического значения. Определены частота и объем порций жидкости, поступающей во внутреннее пространство внутрибакового заборного устройства, а также объем невырабатываемого остатка топлива в топливном баке

Ключевые слова

Математическая модель, комбинированный пористо-сетчатый материал, объемные капиллярные свойства, фазоразделитель, внутрибаковые заборные устройства, критическая удерживающая способность, невырабатываемый остаток топлива

Поступила 20.09.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Капиллярное фазоразделительное устройство (ФУ) представляет собой внутрибаковую конструкцию, отделяющую сетчатым материалом с капиллярными свойствами некоторый объем жидкости около заборного устройства от основного объема. Фазоразделительное устройство предназначено для обеспечения сплошности потока жидкого топли-

ва в двигательную установку космического аппарата в условиях, близких к невесомости [1, 2].

Сетчатые материалы как фазоразделители характеризуются капиллярной удерживающей способностью (КУС) — максимальным (критическим) давлением p_k , при котором фазоразделитель выполняет свою функцию. Капиллярная удерживающая способность определяется экспериментально и интерпретируется как удерживающая способность плоской сетки с ячейками диаметром $d_{эфф}$ [3]:

$$p_k = \frac{4\sigma}{d_{эфф}}.$$

Комбинированные пористо-сетчатые материалы (КПСМ) в настоящее время используются в самых различных технологических процессах [4, 5]. В космической отрасли перспективны разработки капиллярных топливозаборных устройств из КПСМ для космических аппаратов [6]. Комбинированные пористо-сетчатые материалы обладают объемными капиллярными свойствами. Использование таких материалов в качестве фазоразделителей вместо тонких сеток позволяет обеспечить ненулевой поток жидкости в засеточное пространство ФУ после достижения давлением наддува критического значения.

Комбинированные пористо-сетчатые материалы имеют продольную КУС $P_{рег}$ (по аналогии с обычной поперечной КУС — P_k), которую можно определить экспериментально.

На рис. 1 показана схема эксперимента по определению продольной КУС материала из КПСМ. Образец медленно погружается ребром в жидкость, пока не появится жидкость на верхнем срезе. В этот момент фиксируется высота h положения верхнего среза относительно поверхности жидкости, тогда продольная КУС ($P_{рег}$) вычисляется по формуле

$$P_{рег} = \rho gh.$$

По аналогии с обычной поперечной КУС можно смоделировать продольную КУС с помощью продольных капилляров с эффективным диаметром $d_{рег}$:

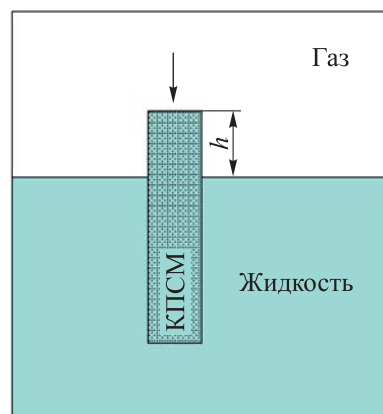


Рис. 1. Схема определения продольной КУС материала из КПСМ

$$P_{reg} = \frac{4\sigma}{d_{reg}}.$$

Прорыв газа сквозь КПСМ произойдет лишь в том случае, если перепад давления превысит значения обеих КУС, поэтому можно считать, что $P_k \geq P_{reg}$.

Потерю давления в потоке газа при прохождении газа сквозь сухой фазоразделитель (любой, как тонкий, так и из КПСМ) со скоростью w можно определить экспериментально и представить как

$$\Delta P_g = \xi_g(w) \frac{\rho_g w^2}{2}, \quad (1)$$

т. е. по аналогии с потерей давления в потоке жидкости [3]

$$\Delta P = \xi(w) \frac{\rho w^2}{2}. \quad (2)$$

Математическая модель цилиндрического внутрибакового заборного устройства. Рассмотрим модель цилиндрического внутрибакового заборного устройства капиллярного типа [7] (т. е. ФУ) с объемным фазоразделителем толщиной h из КПСМ вместо

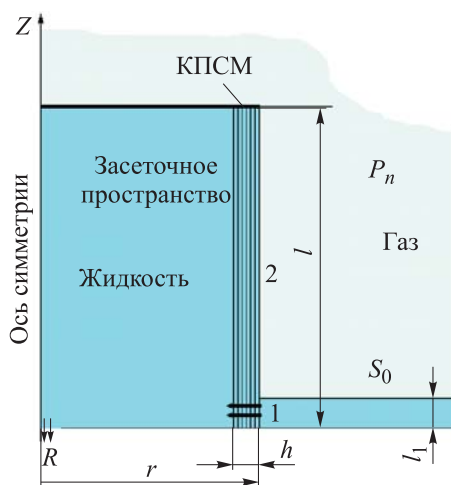


Рис. 2. Модель цилиндрического ФУ с объемным фазоразделителем из КПСМ

тонкого сетчатого материала внутри цилиндрического топливного бака (рис. 2). Сверху ФУ закрыто непроницаемой стенкой, отбор жидкости осуществляется с заданным постоянным расходом R через отверстие в днище ФУ.

При штатной работе ФУ фазоразделитель из КПСМ заполнен жидкостью, а его внешняя поверхность контактирует с жидкостью в зоне 1 и с газом в зоне 2 (см. рис. 2). Площадь S_1 (площадь зоны контакта КПСМ с жидкостью) определяет скорость тече-

ния жидкости сквозь КПСМ $w = R/S$ и потерю давления P_n (давление наддува) в соответствии с соотношением (2). По мере отбора жидкости из топливного бака уровень жидкости вне ФУ уменьшается, также уменьшается и площадь зоны 1 контакта с жидкостью. Для обеспечения задан-

ного расхода требуется увеличить скорость течения жидкости в засеточное пространство и, в соответствии с соотношением (2), увеличить давление наддува P_n . Наступает момент, когда давление наддува достигает критического значения P_k .

Математическая модель КПСМ. Для анализа поведения ФУ с фазоразделителем из КПСМ при достижении давлением наддува критического значения воспользуемся абстрактной моделью КПСМ, в соответствии с которой КПСМ представляет собой совокупность плотно уложенных поперечных и продольных капилляров с диаметрами $d_{эфф}$ и $d_{рег}$ [8, 9].

Если образовался поток газа сквозь фазоразделитель из КПСМ в засеточное пространство, то должно выполняться равенство давлений на границе раздела сред внутри КПСМ. В частности, во внешнем продольном капилляре КПСМ суммарное давление $P_n + P_{рег}$, а в газовом потоке устанавливается некоторое давление $P_3 \leq P_n$ (ускорение газа сопровождается уменьшением давления в потоке). Таким образом, для устойчивости потока необходимо выполнение равенства

$$P_n + P_{рег} = P_3$$

или

$$P_n + P_{рег} \leq P_n. \quad (3)$$

Но это возможно лишь при отсутствии продольных капиллярных сил ($P_{рег} = 0$), т. е. на обычных тонких сетках. Отметим, что у всех сетчатых фазоразделителей (как тонких сеток, так и КПСМ) потеря давления в потоке газа ΔP_g (1) во много раз меньше потери давления в потоке жидкости ΔP (2), поэтому после прорыва газа сквозь обычную сетку в засеточное пространство поступает практически только газ.

В соответствии с (3) устойчивое течение газа сквозь фазоразделитель из КПСМ невозможно. В случае достижения критического давления возникает циклический процесс поступления газа в засеточное пространство порциями, определяемыми временем вытеснения жидкости из объема КПСМ (первая фаза) и временем заполнения объема КПСМ жидкостью (вторая фаза).

Оценка времени вытеснения жидкости из объема КПСМ. Фазоразделитель из КПСМ имеет толщину, поэтому при достижении давлением наддува критического значения газ не сразу поступает в засеточное пространство. Сначала происходит процесс вытеснения жидкости из объема КПСМ. Если в процессе вытеснения в каком-то локальном месте образо-

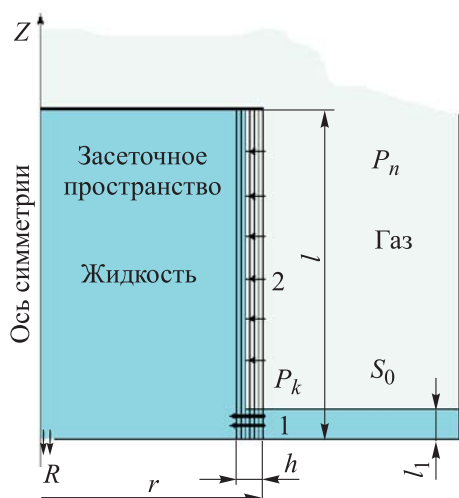


Рис. 3. Схема вытеснения жидкости из объема КПСМ при достижении критического перепада давления на фазоразделителе

сти жидкости в баке (не меняется во времени); $l_1(0)$ — уровень жидкости в баке; $V_0 = S_0 l_1(0)$ — объем жидкости вне ФУ; $w_l(0)$ — скорость вытеснения жидкости из КПСМ в зоне 2.

Через t секунд после достижения давлением критического значения площадь зоны 1 уменьшилась в соответствии с понижением уровня жидкости $l_1(t)$. За время dt уменьшение объема жидкости вне ФУ равно объему жидкости, перетекшей за время dt через зону 1:

$$(l_1(t + dt) - l_1(t))S_0 = - S_1(t)w dt,$$

откуда

$$\frac{dl_1(t)}{dt} S_0 = -S_1(t)w. \quad (4)$$

Учитывая, что

$$S_1(t) = l_1(t) \cdot 2\pi r, \quad (5)$$

получаем дифференциальное уравнение относительно функции $l_1(t)$

$$\frac{dl_1(t)}{dt} = -2\pi r \frac{w}{S_0} l_1(t)$$

и его решение с учетом начального значения при $t = 0$ и $l_1(t) = l_1(0)$

$$l_1(t) = l_1(0) \exp(2\pi r (w / S_0) t), \quad (6)$$

вался прорыв газа в засеточное пространство, а соседние продольные капилляры заполнены жидкостью, то за счет дисбаланса давлений капиллярными силами прорыв будет ликвидирован. Поэтому вытеснение происходит по всей площади контакта фазоразделителя с газом, последовательно осушая продольные капилляры целиком (рис. 3).

Пусть перепад давления достиг критического значения в момент $t = 0$. В этот момент $S_1(0)$ — площадь зоны 1; w — скорость течения жидкости при критическом перепаде давления сквозь толщу КПСМ (не меняется во времени); S_0 — площадь поверхности жидкости в баке (не меняется во времени); $l_1(0)$ — уровень жидкости в баке; $V_0 = S_0 l_1(0)$ — объем жидкости вне ФУ; $w_l(0)$ — скорость вытеснения жидкости из КПСМ в зоне 2.

или в силу (5)

$$S_1(t) = 2\pi r l_1(0) \exp\left(-2\pi r \frac{w}{S_0} t\right).$$

Балансовое соотношение

$$R = S_1(t)w + 2\pi r(l - l_1(t))w_l(t) \quad (7)$$

позволяет увязать изменение скорости вытеснения жидкости из КПСМ $w_l(t)$ с изменением площади зоны 1:

$$w_l(t) = \frac{R - S_1(t)w}{2\pi r(l - l_1(t))}. \quad (8)$$

Определить время полного осушения объема КПСМ можно, решив интегральное уравнение

$$h = \int_0^{\Delta t_1} w_l(t) dt \quad (9)$$

относительно Δt_1 .

Учитывая, что $l_1(t) = l$ в (8), после интегрирования (9) получаем соотношение

$$V_{\text{КПСМ}} = R\Delta t_1 + l_1(0)S_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{w}{S_0} \cdot 2\pi r \Delta t_1\right)\right). \quad (10)$$

Величина в левой части — объем КПСМ

$$V_{\text{КПСМ}} = 2\pi r l h.$$

Приближение 1. Ввиду малости показателя степени можно заменить экспоненту в соотношении (10) единицей. Тогда

$$\Delta t_1 = \frac{V_{\text{КПСМ}}}{R}. \quad (11)$$

В первом приближении время осушения КПСМ постоянно и равно объему КПСМ, деленному на расход.

Приближение 2. Если экспоненту в (10) оценить более точно:

$$\exp\left(-\frac{w}{S_0} \cdot 2\pi r \Delta t_1\right) \approx 1 - \frac{w}{S_0} \cdot 2\pi r \Delta t_1,$$

то получим второе приближение для Δt_1 :

$$\Delta t_1 = \frac{V_{\text{КПСМ}}}{R - l_1(0)w \cdot 2\pi r}. \quad (12)$$

Второе приближение учитывает поток жидкости через зону 1, поэтому осушение занимает больше времени, однако в последующих циклах, когда уровень жидкости $l_1(0)$ уменьшается, время Δt_1 стремится к постоянному значению (11).

Выбор того или иного приближения времени вытеснения жидкости из КПСМ зависит от значений определяющих параметров функционирования рассматриваемой конструкции. Однако в большинстве случаев можно пользоваться более простым соотношением (11).

Оценка времени заполнения жидкостью объема КПСМ. В течение всего периода времени Δt_1 в газовой фазе сохраняется давление P_k , но газ в засеточное пространство не поступает. В момент $t = \Delta t_1$ газ прорывается

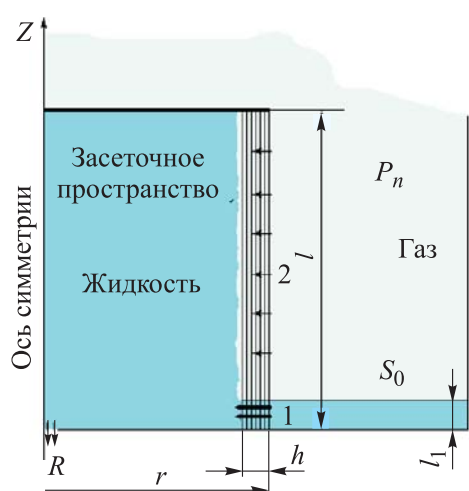


Рис. 4. Прорыв газа в засеточное пространство

сквозь фазоразделитель во внутреннюю часть ФУ (рис. 4). Ввиду отсутствия контакта жидкости с поперечными капиллярами исчезают капиллярные силы, компенсирующие перепад давлений между внутренней и внешней областями ФУ. В результате распада разрыва давления образуется волна сжатия внутри ФУ, волна разрежения в объеме КПСМ и формируется течение газа внутрь ФУ с перепадом давления P_g в соответствии с соотношением (1). Формирование течения происходит очень быстро. Характерное время форми-

рования течения оценивается величиной l/a , где l — длина продольных пор (максимальный размер) КПСМ, a — скорость звука в газе. Потеря давления P_g при прохождении газа сквозь КПСМ существенно меньше P_k и P_{reg} , поэтому после установления давления P_g поток жидкости в засеточное пространство через зону 1 практически прекращается, а поступает только газ через зону 2.

Однако продольные капилляры в зоне 2 осушены, а в зоне 1 содержат жидкость (см. рис. 4). Капиллярная сила на границе раздела сред в капилляре $2\sigma/r$ не уравновешена давлением наддува P_g . Поэтому возникает процесс заполнения продольных капилляров жидкостью (саморегенерация). Если не учитывать силы вязкого трения, можно считать течение жидкости вдоль капилляров при заполнении капилляров квазистацио-

нарным. На поверхности раздела сред в капиллярах действует давление $(2\sigma/r) - P_g$, которое подсасывает жидкость из зоны 1 и уравнивается давлением, создаваемым ускорением жидкости при входе в капилляр $\rho u^2/2$, откуда

$$u = 2\sqrt{\frac{\sigma}{r\rho}}. \quad (13)$$

За время

$$\Delta t_2 = \frac{l}{u} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{r\rho}{\sigma}}$$

произойдет заполнение объема КПСМ жидкостью. В течение всего периода времени Δt_2 в засеточное пространство поступает только газ. Объем газа V_g , поступившего внутрь ФУ за время Δt_2 , определяется расходом

$$V_g = R\Delta t_2. \quad (14)$$

Таким образом, в момент времени $t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ завершается первый цикл поступления газа в засеточное пространство, вновь начинается фаза вытеснения жидкости из объема КПСМ длительностью Δt_1 с новым значением $l_1(0)$ (разумеется, если пользоваться вторым приближением), затем фаза заполнения объема КПСМ жидкостью, длительностью Δt_2 и т. д.

За каждый цикл в засеточное пространство проникает объем газа (14) и объем жидкости, равный объему КПСМ

$$V_{\text{КПСМ}} = 2\pi r l h.$$

В момент $t = 0$ объем жидкости вне ФУ составляет

$$V_0 = S_0 l_1(0).$$

За один цикл этот объем уменьшается на величину $V_{\text{КПСМ}}$. Через $k = \left[\frac{V_0}{V_{\text{КПСМ}}} \right]$ (прямоугольные скобки означают взятие целой части от значения выражения в скобках) циклов, т. е. через $t = \left[\frac{V_0}{V_{\text{КПСМ}}} \right] (\Delta t_1 + \Delta t_2)$ секунд вся жидкость окажется внутри ФУ. За это время в ФУ поступит $V_g = \left[\frac{V_0}{V_{\text{КПСМ}}} \right] R\Delta t_2$ кубических метров газа. В конечном итоге из ФУ будет отобрана вся жидкость, кроме жидкости, находящейся в объеме КПСМ. Таким образом, невырабатываемый остаток — $V_{\text{КПСМ}}$.

Сравнение с плоской сеткой. Каким был бы невырабатываемый остаток, если в ФУ использовалась бы обычная тонкая сетка? В момент $t = 0$ ФУ заполнено жидкостью (рис. 5, а). Как только произошел прорыв газа внутрь ФУ, сетчатый плоский фазоразделитель перестает работать как фазоразделитель. Газ практически беспрепятственно проникает внутрь ФУ, а жидкость вытекает в топливный бак (рис. 5, б).

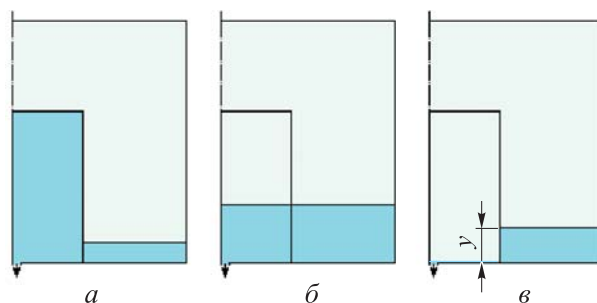


Рис. 5. Работа тонкой сетки в предлагаемой модели цилиндрического ФУ в цилиндрическом топливном баке

Отбор жидкости из ФУ (без учета образования воронок) будет происходить до тех пор, пока статическое давление уровня жидкости в баке не станет меньше, чем потеря давления на сетке при скорости течения через сетку, обеспечивающей заданный расход R (рис. 5, в):

$$y = \xi(w) \frac{w^2}{2g},$$

где $w = R / (2\pi r y)$.

Зависимость коэффициента потери давления от скорости описывается соотношением $\xi(w) = A + B \text{Re}^m$, где $\text{Re} = \frac{w d_{\text{эфф}}}{\nu}$, а константы A , B и m определяются экспериментально. Величину h находят из уравнения

$$y^3 = \left(A + B \left(\frac{R d_{\text{эфф}}}{\nu \cdot 2\pi r y} \right)^m \right) \frac{R^2}{8\pi^2 r^2 g}, \quad (15)$$

а невырабатываемый остаток составляет $y S_0$.

Пример. Рассмотрим сетку с условным названием «0_11», константы $A = 0,26$, $B = 2,97$, $m = -0,7$; $d_{\text{эфф}} = 0,000050$ м; жидкость — окислитель; $\nu = 0,000000301$ м²/с. Условимся считать, что $R = 0,1$ м; $g = 9,8$ м/с²; $R = 0,00006$ м³/с; $S_0 = 0,01$ м².

Из решения уравнения (15) получаем $y \approx 0,00035$ м, а невырабатываемый остаток составляет 0,035 л.

Заключение. На примере работы цилиндрического внутрибакового заборного устройства для ФУ из КПСМ определен режим поступления газа в засеточное пространство после достижения давлением наддува критического значения, дано физическое описание процесса саморегенерации, оценено время вытеснения жидкости из объема КПСМ и время заполнения жидкостью объема КПСМ. Определены объемы невыработываемых остатков топлива как при использовании в качестве фазоразделителей КПСМ, так и при использовании обычных плоских сетчатых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Большаков В.А., Новиков Ю.М., Партола И.С. Средства обеспечения сплошности жидких компонентов топлива в системе питания РБ «Бриз-М» с дополнительным (сбрасываемым) топливным баком. *XXXIV Научные чтения, посвященные научному наследию и развитию идей К.Э. Циолковского*. Калуга, 1999, с. 78–86.
- [2] Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С. и др. Математическая модель капиллярного заборного устройства торового бака. *Лесной вестник*, 2007, № 2, с. 35–39.
- [3] Корольков А.В., 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. 313–319.
- [4] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Инженерная школа МГТУ им. Н.Э. Баумана: Комбинированные пористые сетчатые металлы. Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе. *Безопасность жизнедеятельности*, 2005, № 11, с. 53–56.
- [5] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Первые итоги реализации концепции создания высоконадежных фильтров из КПСМ для объектов повышенной опасности и других объектов различных отраслей экономики РФ. *Безопасность жизнедеятельности*, 2002, № 12, с. 7–10.
- [6] Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М. и др. 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, с. 130–142.
DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-130-142
- [7] Партола И.С. Результаты проектирования и отработки капиллярных заборных устройств торового топливного бака РБ «Бриз-М». *Сб. док. 1-й Междунар. науч.-техн. конф. «Аэрокосмические технологии»*. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПО «Машиностроение». 2004, с. 19–22.

[8] Новиков Ю.М., Большаков В.А., Партола И.С. Первая длинномерная конструкция капиллярного заборного устройства из КПСМ: подтверждение надежности и высокой эффективности по результатам эксплуатации в составе дополнительного топливного бака разгонного блока «Бриз-М» ракетного космического комплекса «Протон-М»/«Бриз-М». *Ракетно-космические двигательные установки. Материалы Всерос. науч.-техн. конф.* М., МГОУ, 2013, с. 17–19.

[9] 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, с. 106–113.

DOI: 10.18698/0536-1044-2015-11-106-113

Авраамов Николай Иванович (1947–2019) — канд. техн. наук, работал в НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Корольков Анатолий Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Прикладная математика, информатика и вычислительная техника» Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, Московская обл., 141005, Мытищи, 1-я Институтская ул., д. 1).

Маслов Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная математика, информатика и вычислительная техника» Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, Московская обл., 141005, Мытищи, 1-я Институтская ул., д. 1).

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Авраамов Н.И., Корольков А.В., Маслов В.А. и др. 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

MATHEMATICAL SIMULATION OF USING A COMBINATION OF MESH AND POROUS MATERIALS AS A PHASE SEPARATOR

N.I. Avraamov¹

A.V. Korolkov²

V.A. Maslov²

V.B. Sapozhnikov¹

korolkov@mgul.ac.ru

maslov@mgul.ac.ru

sapozhnikov47@mail.ru

¹ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

² **Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischki, Moscow Region, Russian Federation**

Abstract

A combination of mesh and porous materials featuring bulk capillary properties is used as a phase separator in in-tank capillary inlet devices. These bulk capillary properties ensure a non-zero fluid flow into the interior of the in-tank inlet device after critical pressure has been reached. This quality makes it possible to reduce residual propellant volume in spacecraft engine tanks. We developed a mathematical simulation of an in-tank capillary inlet device comprising a phase separator made of a combination of mesh and porous materials. We represented a combination of mesh and porous materials as an array of “closely packed” transverse and longitudinal capillaries. Our mathematical simulation describes the operation of an in-tank inlet device after the critical manifold pressure has been reached. The fluid enters the interior of the in-tank inlet device one portion at a time. We determined the volume and arrival frequency of these portions and estimated the residual propellant volume in the propellant tank

Keywords

Mathematical simulation, combination of mesh and porous materials, bulk capillary properties, phase separator, in-tank inlet devices, critical retention capacity, residual propellant

Received 20.09.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Bol'shakov V.A., Novikov Yu.M., Partola I.S. [Means ensuring the continuity of the liquid components in the “Breeze-M” RB fuel supply system with additional (resets) in fuel tank]. *XXXIV Nauchnye chteniya, posvyashchennye nauchnomu naslediyu i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo* [34th scientific readings dedicated to scientific heritage and the development of K.E. Tsiolkovsky ideas]. Kaluga, 1999, pp. 78–86 (in Russ.).
- [2] Korol'kov A.V., Men'shikov V.A., Partola I.S., et al. Mathematical model of capillary internal device of toroidal fuel tank. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2007, no. 2, pp. 35–39 (in Russ.).
- [3] Korol'kov A.V., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. [Principal theory of development and experimental testing capillary intake devices with minimal fuel residues]. *Nauchno-tehnicheskie razrabotki OKB-23 — KB “Salyut”* [Research and technologies of OKB-23 — KB “Salyut”]. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 2006, pp. 313–319 (in Russ.).
- [4] Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A. Engineering school of BMSTU: combined porousmeshed metals. Efficient, safe and environmentally friendly products based on them. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2005, no. 11, pp. 53–56 (in Russ.).
- [5] Novikov Yu.M., Bol'shakov V.A. The first results of implementation of the concept of creating super-reliable CPMM filter for high-risk facilities and other objects of various branches of the Russian economy. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2002, no. 12, pp. 7–10 (in Russ.).

[6] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., et al. Current state and prospects of capillary fuel-intake units made of combined porous metals-mesh for long lifetime spacecraft. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 6, pp. 130–142 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-130-142

[7] Partola I.S. [The results of design and development of capillary intake devices for US “Breeze-M” toroidal fuel tank]. *Sb. dok. 1 Mezhd. nauch.-tekhn. konf. “Aerokosmicheskie tekhnologii”* [Proc. 1st Int. Sci.-Tech. Conf. “Aerospace Technologies”]. Moscow, Bauman MSTU Publ., NPO “Mashinostroenie” Publ., 2004, pp. 19–22 (in Russ.).

[8] Novikov Yu.M., Bol’shakov V.A., Partola I.S. [First long construction of capillary intake device from CPMM: proving reliability and high efficiency according to exploitation results of additional fuel tank of “Proton-M”/“Breeze-M” aerospace rocket complex]. *Raketno-kosmicheskie dvigatel’nye ustanovki. Materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Rocket-space propulsion systems. Proc. Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, MGOU Publ., 2013, pp. 17–19 (in Russ.).

[9] Novikov Yu.M., Bol’shakov V.A., Partola I.S. Stability of parameters of long capillary fuel intake devices made of combined porous mesh metals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2015, no. 11, pp. 106–113 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2015-11-106-113

Avraamov N.I. (1947–2019) — Cand. Sc. (Eng.), worked in Scientific Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Korolkov A.V. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Applied Mathematics, Computer Science and Computing, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University (1-ya Institutskaya ul. 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005 Russian Federation).

Maslov V.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Applied Mathematics, Computer Science and Computing, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University (1-ya Institutskaya ul. 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005 Russian Federation).

Sapozhnikov V.B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Avraamov N.I., Korolkov A.V., Maslov V.A., et al. Mathematical simulation of using a combination of mesh and porous materials as a phase separator. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 4–16 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-4-16