УДК 532.529.5:532.631: 629.7.036.54

ОТДЕЛЕНИЕ ГАЗА ОТ ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОРИСТО-СЕТЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сапожников В.Б.[1], Корольков А.В.[2]

[1]Открытое акционерное общество «ЭКА», Юбилейный, Россия
[2]Общество с ограниченной ответственностью
Научно-технический внедренческий центр «ЭДУКОН», Юбилейный, Россия

АННОТАЦИЯ

Приведено теоретическое и экспериментальное обоснование перспективности применения материалов нового типа – комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ) для отделения газа от жидкости в потоке газожидкостных смесей в условиях практической невесомости в топливных баках космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков. Показано, что работа КПСМ сопровождается явлениями, отсутствующими при использовании ранее применявшихся для этой цели сетчатых материалов. В результате эффективность внутрибаковых устройств (ВБУ) при обеспечении многократного запуска жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в условиях невесомости существенно возрастает. В конечном итоге применение КПСМ в конструкции ВБУ позволяет свести до минимума невырабатываемые остатки топлива в баках и, тем самым, повысить энергомассовое совершенство указанных летательных аппаратов в целом.

ВВЕДЕНИЕ

Задача отделения газа от жидкости в условиях практической невесомости появилась одновременно с началом освоения космического пространства в конце 50-х годов прошлого столетия. Появление этой задачи было обусловлено необходимостью безперебойной подачи жидкого ракетного топлива из баков с целью обеспечения многократного запуска ЖРД космических летательных аппаратов (КЛА) в условиях, близких к невесомости. К настоящему времени разработаны многочисленные технические устройства и способы для решения этой задачи, начиная от применения разделительных диафрагм в топливных баках (ТБ) и заканчивая использованием акустических либо электромагнитных полей для управления положением поверхности раздела «жидкость-газ» при невесомости.

Однако наибольшее распространение при объемах ТБ, превышающих сотни литров, получили внутрибаковые устройства (ВБУ) на основе так называемых сетчатых разделителей (СР). Принцип работы этих устройств заключается в том, что для предотвращения прорыва газа наддува в расходные магистрали ТБ при запуске ЖРД в невесомости используют силы поверхностного натяжения (капиллярные силы), величина которых тем больше, чем меньше характерный размер ячеек СР.

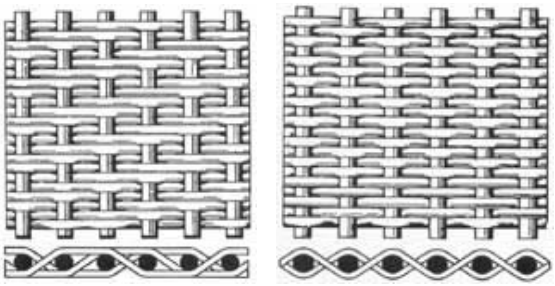
Главными недостатками таких устройств при относительно небольшом гидравлическом сопротивлении СР являются нестабильность их параметров в процессе работы, чувствительность к воздействию вибраций, технологические проблемы крепления СР в корпусные элементы ВБУ, необходимость наличия опорных каркасов для СР. Кроме того, если газ наддува все-таки проходит через СР, эти устройства перестают работать.

В 90-х годах прошлого века коллективом сотрудников НИИ ЭМ МГТУ им. Баумана во главе с профессором В.М. Поляевым было предложено использовать в качестве конструкционного материала для ВБУ новый вид проницаемых

структур - комбинированные пористо-сетчатые металлы (материалы) (КПСМ) [1].

В настоящее время КПСМ планируется широко применять в качестве элементов ВБУ, так как их свойства в этом качестве заметно превосходят характеристики обычных СР.

Основным отличием СР на основе КПСМ от обычных СР является объемная (трехмерная) структура пор. Иначе говоря, СР на основе КПСМ имеют пористую структуру не только в нормальном, но и в тангенциальном (касательном) направлении к поверхности СР (рис. 1).

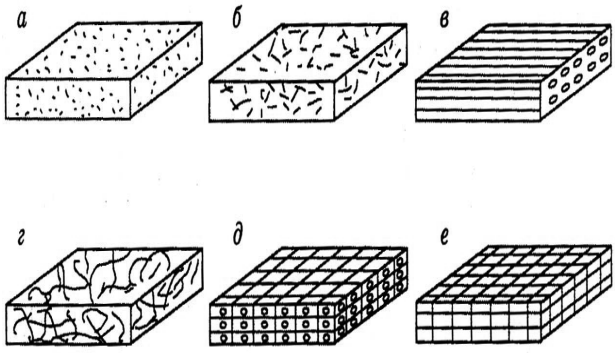


а) б)

Сетки металлические плетеные (плоские):

а) саржевое плетение (проволоки переплетаются через две);

б) полотняное плетение (проволоки переплетаются через одну)



Комбинированные пористо-сетчатые материалы (толщины от 0,16 до 1,5 мм)

Рис.1 Образцы плетеных двумерных (плоских) сеток и трехмерных комбинированных пористо-сетчатых материалов [1].

Такая особенность КПСМ обусловливает физическое явление, отсутствующее у обычных двумерных СР. Суть этого явления, которое мы определили как «саморегенерацию», заключается в следующем. Для двумерных (мы условно будем называть их плоскими) СР работоспособность ВБУ на их основе, которые в дальнейшем будем обозначать как капиллярные заборные устройства (КЗУ), определяется условием:

$$\Delta p_{кап} \geq \Delta p_{м}. \qquad (1)$$

Здесь $\Delta p_{кап} = \frac{4\sigma}{d_э}$ - капиллярная удерживающая способность (КУС) КЗУ, σ - коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела «жидкость-газ», $d_э$ - эквивалентный диаметр ячейки СР.

$\Delta p_{м} = \zeta_{м} \frac{\rho \cdot u^2}{2}$ - потери давления при прохождении жидкости по нормали к поверхности СР, $\zeta_{м}$ - коэффициент гидравлического сопротивления СР, ρ - плотность жидкости, u - скорость газожидкостного потока по нормали к поверхности СР.

В общем случае величину $\zeta_{м}$ находят в виде

$$\zeta_{м} = E + F \cdot \mathrm{Re}^{m}, \qquad (2)$$

где $\mathrm{Re} = \frac{u \cdot d_э}{\nu}$ - число Рейнольдса, ν - кинематическая вязкость жидкости. Коэффициенты E, F и m определяют экспериментально путем проливок образцов СР.

В том случае, если условие (1) не выполняется, газ наддува проникает через СР, а давление во внутренней полости КЗУ (в т. н. «заневоленном» объеме) и снаружи выравнивается. В результате жидкость, находящаяся во внутренней полости КЗУ, перестает удерживаться в «заневоленном» объеме и КЗУ теряет работоспособность.

Для КЗУ, использующих КПСМ, условие (1) также является условием, определяющим их работоспособность. Однако при нарушении условия (1) в КЗУ на основе КПСМ жидкость, находящаяся в контакте с поверхностью КПСМ, за счет трехмерной структуры пор КПСМ под действием сил поверхностного натяжения начинает перемещаться в тангенциальном направлении. В результате участок КПСМ, на котором произошел прорыв газа во внутреннюю полость КЗУ, вновь восстанавливает работоспособность, и отбор жидкости без газа в расходную магистраль топливного бака продолжается.

Указанная особенность КЗУ на основе КПСМ делает их весьма перспективными для применения в качестве ВБУ, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических ап-

паратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета. Кроме того, в случае использования КПСМ корпусные элементы ВБУ могут быть выполнены непосредственно из этих материалов, следовательно, отпадает необходимость наличия для них опорных каркасов. Вместе с тем, оценка работоспособности ВБУ на основе КПСМ применительно к конкретной конструкции, условиям полета летательного аппарата (ЛА), типу и физическим свойствам компонентов жидкого топлива, режимам работы ЖРД остается трудоемкой комплексной научно-исследовательской задачей [2]. Поэтому и с практической и с научной точек зрения исследование процесса отделения газа от жидкости в условиях невесомости с помощью комбинированных пористо-сетчатых материалов представляется актуальным.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТА КЗУ НА ОСНОВЕ КПСМ

Для расчетной оценки эффективности работы ВБУ на основе КПСМ была разработана математическая модель [3] процесса функционирования элемента КЗУ, представляющего собой полый цилиндр со стенками, выполненными из КПСМ (рис. 1).

Допущения.

Жидкость несжимаемая. Течение в трубе одномерное, вязкое с распределенным источником. На внешней поверхности сетки заданное давление (давление наддува). На срезе выходного отверстия давление равно 0.

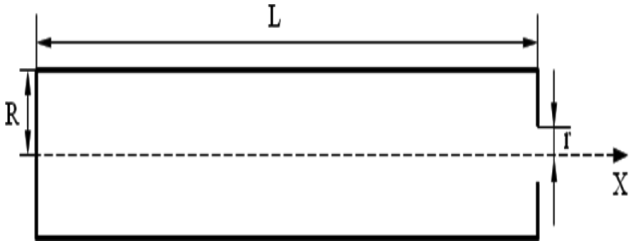


Рис.2 Расчетная схема. Обозначения: L – длина трубы; R – радиус трубы; r – радиус выходного отверстия; λ - коэффициент сопротивления; α - «степень сухости» трубы в данном сечении.

Уравнение движения:

$$u \cdot \frac{du}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} - \lambda \cdot \frac{u^2}{4 \cdot R} \cdot \mathrm{sgn}(u) \qquad (3)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{du}{dx} = (1-\alpha) \cdot \frac{2}{R} \cdot V_{set}(p_{izb} - p(x)) \qquad (4)$$

Здесь $V_{set}(p)$ - функция зависимости скорости протекания жидкости сквозь сетку от перепада давления

$$V_{set}(\Delta p) = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \cdot a \cdot \Delta p}}{2 \cdot a},$$

где $a = \frac{E \cdot \rho}{2}$, $b = \frac{F \cdot \nu \cdot \rho}{2 \cdot d_э}$,

$E, F, d_э$ - характеристики сетки из уравнения (2).

Условия однозначности.

При $x = 0$ $u = 0$;

При $x = L$ $p = 0$.

Для учета сужения канала у выхода из трубы, давление на выходе пересчитывается

$$p = \rho \cdot u_{x=L}^2 \cdot \left(\left(\frac{R}{r} \right)^2 - 1 \right).$$

Конечно-разностные аналоги уравнений движения (3) и неразрывности (4) решают методом «пристрелки» до установления требуемого распределения давлений. Полученное установившееся распределение давлений и скоростей считается неизменным в заданный период времени dt. Текущее состояние (объем отобранной жидкости и уровень заполнения емкости) определяется из начального (заданного) состояния численным интегрированием по времени полного расхода жидкости через заборное устройство методом прямоугольников с фиксированным шагом dt.

Вычислительный эксперимент проводится в условиях точного выполнения балансных соотношений и полной повторяемости.

Для учета перехода модельного элемента КЗУ в режим «саморегенерации» в процессе счета проверялся максимальный перепад давления на стенках. Как только он достигал критического значения $\Delta p_{крит} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_э}$, алгоритм переводился

в режим «подсоса» газа с последующим восстановлением работоспособности КЗУ.

В режиме «подсоса» на выходе из трубы фиксировались давление и объем откачиваемой смеси. Количество отобранной жидкости определялось из геометрических соображений по текущему положению поверхности внутри трубы.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С целью подтверждения адекватности разработанной математической модели реальному процессу была проведена серия физических экспериментов на специальной установке. Многолетние работы по изучению возможностей экспериментальных исследований поведения жидкостей в баках летательных аппаратов (ЛА) в условиях межпланетного, орбитального и суборбитального полетов показали, что одним из наиболее эффективных и доступных инструментов для проведения указанных исследований являются стенды невесомости, использующие принцип реализации условий пониженной весомости при свободном падении испытываемого оборудования. Такие стенды получили название «башен невесомости».

Конструктивно башня невесомости, использованная в работе, представляет собой угловую часть пятиэтажного здания, включая подвальное и чердачное (техническое) помещения (рис. 3). Основными элементами башни невесомости являются:

- испытательный сбрасываемый контейнер (ИК) (поз. 10 на рис. 3), оснащенный экспериментальным оборудованием и необходимой аппаратурой, а также силовыми и измерительными кабелями;

- монтажная площадка (поз. 7) с лебедкой для подъема ИК, электромагнитным замком и вспомогательным оборудованием;

- направляющие тросы (9), обеспечивающие, с одной стороны, удержание ИК в процессе свободного падения (сбрасывания) в нужном положении, а с другой стороны – позволяющие с помощью фрикционных механизмов задавать требуемую величину остаточной перегрузки (ускорения), действующей на исследуемый объект;

- платформа-батут (11) в нижней части башни для торможения ИК в конце падения с целью обеспечения сохранности экспериментального оборудования.

Полная высота свободного падения башни составляет 25 метров, что позволяет получать время невесомости примерно 2,26 секунды.

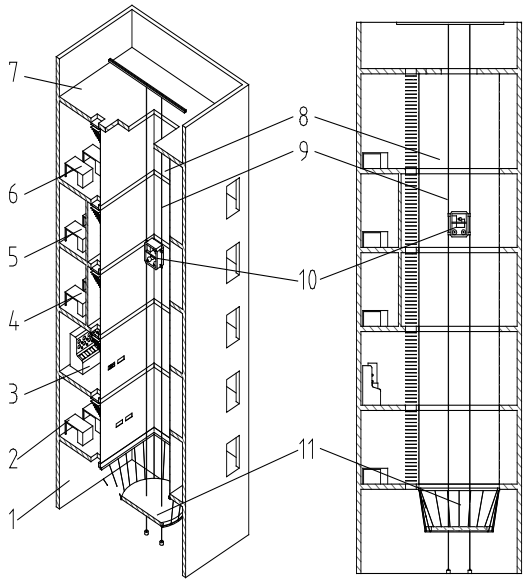


Рис.3 Схема башни невесомости.

На борту ИК смонтирована экспериментальная установка. Установка позволяет моделировать процесс отделения газа от жидкости при опорожнении расходной емкости с заданным расходом в условиях невесомости, которые реализуются в свободном падении ИК. В состав установки входит расходная емкость с модельной жидкостью. Внутри емкости находится элемент КЗУ, представляющий собой полый цилиндр со стенками, выполненными из КПСМ. На выходе из расходной емкости установлен датчик сплошности потока модельной жидкости, фиксирующий наличие или отсутствие газа в потоке модельной жидкости. Кроме того в составе установки предусмотрен датчик, который измеряет перепад давления между давлением во внутренней полости элемента КЗУ и давлением наддува в расходной емкости. Для регистрации параметров в состав включен светолучевой осциллограф типа М071-4М.

В ходе проведения эксперимента регистрируются следующие параметры (рис. 4):

1 – момент открытия электроклапана на расходной магистрали для слива модельной жидкости;

© Сапожников В.Б., Корольков А.В.

2 – остаточное ускорение на борту ИК;
3 – давление наддува расходной емкости;
4 – перепад давления между давлением во внутренней полости элемента КЗУ и давлением наддува в расходной емкости;
5 - момент прорыва газа в расходную магистраль (сигнал датчика сплошности).

По результатам расшифровки осциллограммы определяют момент прорыва газа, а также подсчитывают объём слитой жидкости и остаток жидкости в модели на момент прорыва.

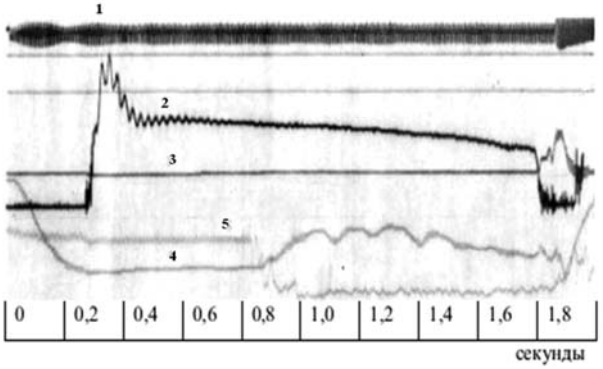


Рис.4 Типовая осциллограмма эксперимента.

Всего было проведено 35 серий экспериментов при различных (от 0,5 до 0,08 м/с^2) значениях остаточных ускорений на борту ИК. В качестве модельных жидкостей использовались дистиллированная вода, хладоны R113 и R114, а также 96% и 40% растворы этилового спирта в воде. Избыточное давление наддува расходной емкости менялось от 10 до 30 кПа.

Можно отметить хорошее совпадение результатов расчета практически для всех вариантов, реализованных в физических экспериментах, до момента «прорыва» газа. На осциллограмме одного из экспериментов (рис. 4) хорошо видно, как после прорыва газа во внутреннюю полость КЗУ начинается работа элемента КЗУ в режиме «саморегенерации». Перепад давления на стенке КЗУ (параметр 4 на рис. 4) после прорыва газа вновь начинает расти и отбор жидкости продолжается.

Отбор жидкости в вычислительном и физическом экспериментах осуществлялся до момента исчезновения контакта наружной поверхности цилиндра с жидкостью.

На графике рис. 5 в качестве примера показаны зависимости объема отобранной жидкости от времени при разных давлениях наддува и разных значениях остаточного ускорения.

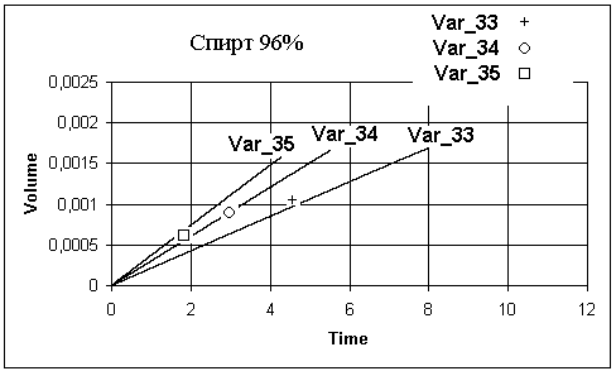


Рис.5 Расчетные и экспериментальные данные по работе КПСМ в режиме сепарации газожидкостной смеси.

Точками указаны объемы отобранной жидкости в момент «прорыва» газа в эксперименте. Сплошные линии показывают динамику изменения объемов отобранной жидкости без учета режима «саморегенерации».

На рисунке 6 показано, как меняются объемы жидкости и газа, отбираемые с помощью модельного элемента КЗУ, при его работе в режиме «саморегенерации» для одного из рассмотренных вариантов. Из данных рисунка видно, что даже после того, как газ наддува прорывается во внутреннюю полость модельного КЗУ, процесс обора жидкости не прекращается. При этом точки перегиба кривых F и G соответствуют моменту прорыва газа во внутреннюю полость модельного элемента КЗУ. По времени и по количеству отобранной жидкости расчетные и экспериментальные данные практически совпадают.

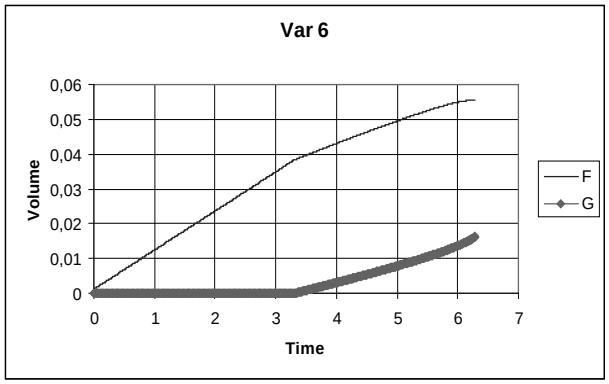


Рис.6 Изменение количества отобранных жидкости (F) и газа (G) по времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования подтверждают высокую эффективность работы ВБУ на основе КПСМ и перспективность использования КПСМ для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск ЖРД КЛА в условиях практической невесомости. Показано, что работа КПСМ, в отличие от плетеных сеток, после однократного прохождения газа во внутреннюю полость ВБУ сопровождается восстановлением их работоспособности. В результате эффективность ВБУ существенно возрастает, что, в конечном итоге, позволяет свести до минимума невырабатываемые остатки топлива в баках и, тем самым, повысить энергомассовую эффективность КЛА в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / Багров В. В., Курпатенков А. В., Поляев В. М. и др. Под ред. д. т. н., проф. В. М. Поляева.-М.:УНПЦ «Энергомаш», 1997.- 328 с.: ил.
2. Bagrov, V. V., Kurpatenkov, A. V. and Polyaev, V. M. (1997), Kapillyarnye sistemy otbora zhydkosti iz bakov kosmicheskih letatelnyh apparatov [Capillary systems of liquid intake from spacecrafts' fuel tanks], UNPC "Energomash", Moscow, Russia.
3. 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. URL: http:// engjournal.ru/ catalog/machin/rocket/707.html.
4. Sapozhnikov, V.B., Krylov, V. I., Novikov, Yu. M., Yagodnikov, D. A. (2013), "Ground-based working-off of capillary KPSM based phase separators for the fuel tanks of liquid-propellant engines of final steps of carrier rockets, upper-stage of rockets and spacecrafts", Inzhenernyy zhurnal: nauka I innovatsyi, no. 4. URL: http:// engjournal.ru/ catalog/ machin/rocket/707.html
5. Сапожников В.Б., Корольков А.В. Расчетно-теоретическая и экспериментальная оценка работоспособности комбинированных пористо-сетчатых материалов в качестве капиллярных заборных устройств топливных баков жидкостных ракетных двигательных установок // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 13-15 ноября 2012 г. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. – с. 220-221.
6. Sapozhnikov, V.B., Korolkov, A. V. (2012), "Design-theoretical and experimental evaluation of KPSM working-capacity as a capillary intake devices for the fuel tanks of liquid-propellant spacecraft engines", Tezisy dokladov [Abstracts of reports], 11-ya Mezhdunarodnaya konferentsya "Aviatsya I kosmonavtika" [11th Int. Conf. "Aviation and astronautics", Moscow, November 13-15, 2012, pp. 220-221.]

© Сапожников В.Б., Корольков А.В.