

## Перспективы применения комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых устройств двигательных установок космических аппаратов и разгонных блоков

© А.В. Корольков<sup>1</sup>, А.Р. Полянский<sup>2</sup>, В.Б. Сапожников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Мытищи, Московская обл., 141005, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Приведены теоретическое и экспериментальное обоснования перспективности применения материалов нового типа — комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ) в конструкции внутрибаковых устройств (ВБУ) двигательных установок космических аппаратов и разгонных блоков в целях обеспечения многократного запуска ЖРД в условиях практической невесомости. Показано, что работа КПСМ сопровождается явлениями, отсутствующими при использовании ранее применявшихся для этой цели сетчатых материалов — так называемых сетчатых разделителей. Делается вывод о том, что в настоящее время следует считать целесообразным широкое применение КПСМ в конструкции элементов ВБУ, так как в этом качестве свойства КПСМ заметно превосходят характеристики обычных сетчатых разделителей. В результате эффективность ВБУ на основе КПСМ существенно возрастает, что, в конечном итоге, позволяет свести до минимума невырабатываемые остатки топлива в баках и, тем самым, повысить энергомассовую эффективность летательных аппаратов в целом.*

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, многократный запуск, условия действительной невесомости, внутрибаковые устройства

**Введение.** Одной из проблем, появившихся одновременно с началом практического освоения космического пространства в конце 1950-х годов, стало обеспечение многократного запуска ЖРД космических летательных аппаратов (КЛА) в условиях, близких к невесомости. К настоящему времени разработаны многочисленные технические устройства и способы для решения этой проблемы — от применения разделительных диафрагм в топливных баках (ТБ) до использования 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), представляющих собой металлические плетеные сетки [1–4]. Принцип работы этих устройств заключается в том, что для предотвращения прорыва газа наддува в расходные магистрали ТБ при запуске ЖРД в невесомости используются силы поверхностного натяжения (капиллярные силы), величина которых тем больше, чем меньше характерный размер ячеек СР.

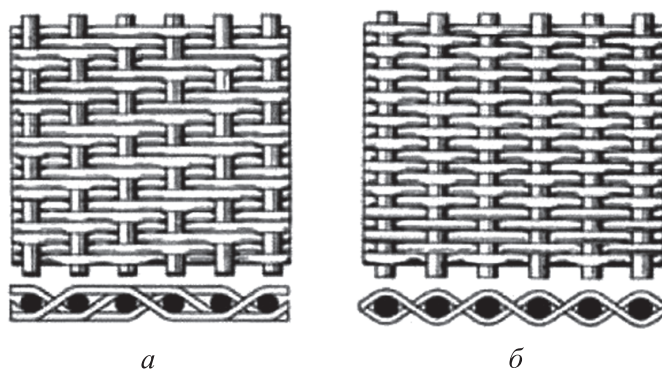
Главными недостатками таких устройств при относительно малом гидравлическом сопротивлении СР являются нестабильность их параметров в процессе работы, технологические проблемы крепления СР в корпусные элементы ВБУ и необходимость наличия опорных каркасов для СР. Кроме того, если газ наддува все-таки проходит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

В начале 1980-х годов коллективом сотрудников НИИ ЭМ МВТУ им. Н.Э. Баумана во главе с профессором В.М. Поляевым был предложен новый вид проницаемых структур — комбинированные пористо-сетчатые металлы (материалы) (КПСМ) [5]. Эти материалы значительно расширили область применения пористых сетчатых металлов (ПСМ), являющихся одним из значительных достижений в области теплообмена научной школы д-ра техн. наук профессора В.М. Поляева.

В настоящее время следует считать целесообразным широкое применение КПСМ в конструкции элементов ВБУ, так как в этом качестве свойства КПСМ заметно превосходят характеристики обычных СР [6–16].

Цель настоящей работы — обоснование справедливости этого утверждения.

Основным отличием СР на основе КПСМ от обычных СР (рис. 1) является объемная (трехмерная) структура пор (рис. 2). Иными словами, СР на основе КПСМ имеют пористую структуру не только в нормальном, но и в тангенциальном (касательном) направлении к поверхности СР. Такая особенность КПСМ обуславливает физическое явление, отсутствующее у обычных двумерных СР.



**Рис. 1.** Образцы плетеных двумерных (плоских) металлических сеток:  
*а* — саржевое плетение (проволоки переплетаются через две);  
*б* — полотняное плетение (проволоки переплетаются через одну)

Суть этого явления, которое авторы настоящей статьи определили как «саморегенерацию», заключается в следующем. Для двумерных (условно будем называть их плоскими) СР работоспособность

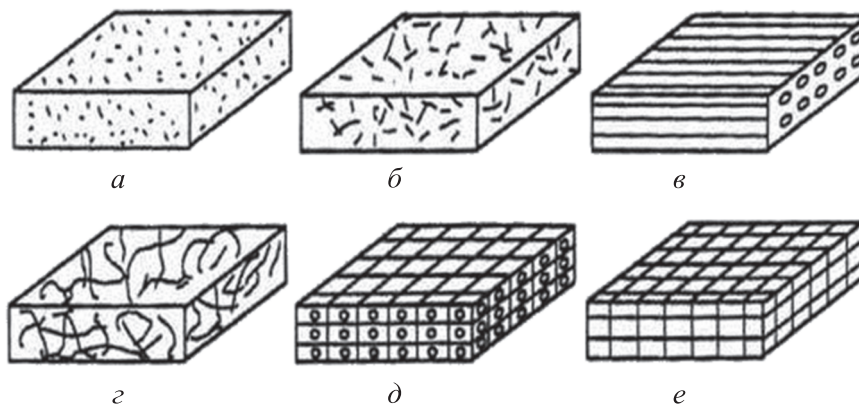
ВБУ на их основе, которые в дальнейшем будем обозначать как капиллярные заборные устройства (КЗУ), обуславливается тем, что

$$\Delta p_{\text{кап}} \geq \Delta p_{\text{сопр}}, \quad (1)$$

где  $\Delta p_{\text{кап}} = \frac{4\sigma}{d_{\text{экв}}}$  — капиллярная удерживающая способность (КУС)

КЗУ ( $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела «жидкость — газ»,  $d_{\text{экв}}$  — эквивалентный диаметр ячейки СР);

$\Delta p_{\text{сопр}} = \zeta_{\text{сопр}} \frac{\rho u^2}{2}$  — потери давления при прохождении жидкости по нормали к поверхности СР ( $\zeta_{\text{сопр}}$  — коэффициент гидравлического сопротивления СР;  $\rho$  — плотность жидкости;  $u$  — скорость потока по нормали к поверхности СР).



**Рис. 2.** Образцы трехмерных комбинированных пористо-сетчатых материалов толщиной от 0,16 мм до 1,5 мм:  
*a* — порошковые сферические; *b* — порошковые игольчатые; *в* — сетчатые двуслойные;  
*г* — порошковые стержневые; *д* — сетчатые трехслойные; *е* — сетчато-порошковые

В общем случае величина коэффициента местного гидравлического сопротивления  $\zeta_{\text{м}} = E + F \text{Re}^m$ , где  $\text{Re} = u d_3 / \nu$  — число Рейнольдса,  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости; коэффициенты  $E$ ,  $F$  и  $m$  определяются экспериментально путем проливок образцов СР.

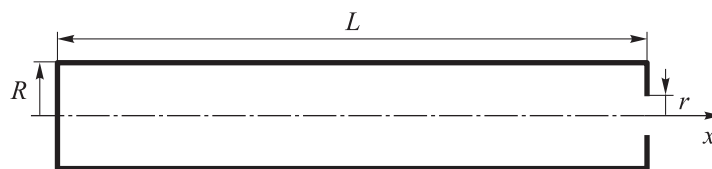
В случае, когда условие (1) не выполняется, газ наддува проникает через СР, а давление во внутренней полости КЗУ (в так называемом «заневоленном» объеме) и снаружи выравнивается. В результате жидкость, находящаяся во внутренней полости КЗУ, перестает удерживаться в «заневоленном» объеме и КЗУ теряет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

Для КЗУ, использующих СР на основе КПСМ, условие (1) также является условием, определяющим их работоспособность. Однако

при нарушении условия (1) в СР 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 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 аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета.

**Математическая модель КЗУ.** Для оценки эффективности работы таких ВБУ была разработана математическая модель процесса функционирования элемента КЗУ, представляющего собой полый цилиндр со стенками, выполненными из КПСМ (рис. 3).



**Рис. 3.** Расчетная схема и обозначения элемента КЗУ:

$L$  — длина трубы;  $R$  — радиус трубы;  $r$  — радиус выходного отверстия

**Допущения.** Принято, что жидкость несжимаемая; течение в трубе одномерное, вязкое с распределенным источником; на внешней поверхности сетки заданное давление (давление наддува); на срезе выходного отверстия давление равно нулю.

Уравнение движения:

$$u \frac{du}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} - \lambda \frac{u^2}{4R} \operatorname{sgn}(u). \quad (2)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{du}{dx} = (1 - \alpha) \frac{2}{R} V_{\text{set}}(p_{\text{izb}} - p(x)), \quad (3)$$

где  $V_{\text{set}}(p)$  — функция зависимости скорости протекания жидкости сквозь сетку от перепада давления,

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

Здесь  $a = \frac{E\rho}{2}$ ,  $b = \frac{F\nu\rho}{2d_3}$ ,  $E, F, d_3$  — характеристики сетки.

Условия однозначности:

$$u = 0 \text{ при } x = 0;$$

$$p = 0 \text{ при } x = L.$$

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

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

Конечно-разностные аналоги уравнений решаются методом «пристрелки» до установления требуемого распределения давлений. Полученное установившееся распределение давлений и скоростей считается неизменным в течение заданного периода 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 проводился в условиях точного выполнения балансных соотношений и полной повторяемости.

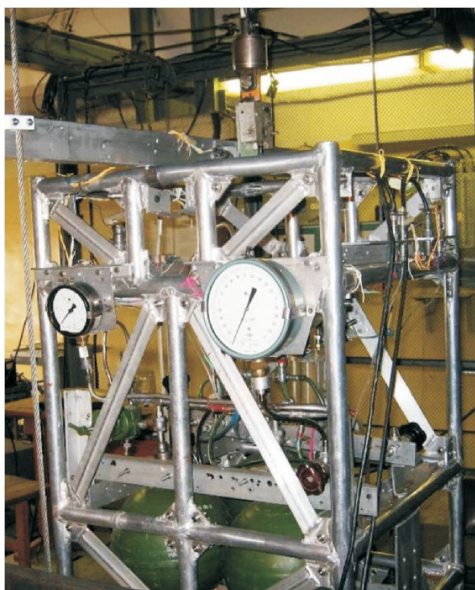
Для учета перехода модельного элемента КЗУ в режим «саморегенерации» в процессе счета проверялся максимальный перепад давления на стенках. Как только он достигал критического значения  $\Delta p_{\text{крит}} = 4\sigma/d_3$ , алгоритм переводился в режим «подсоса» газа с последующим восстановлением работоспособности 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.

**Экспериментальная установка.** Для подтверждения адекватности разработанной математической модели реальному процессу была проведена серия физических экспериментов на модельной экспериментальной установке (стенде), основной составной частью которой является испытательный контейнер (рис. 4). Контейнер представляет собой пространственную ферменную конструкцию в виде параллелепипеда, изготовленную из труб и уголков из алюминиевого сплава.

Внутри контейнера смонтированы:

- модель элемента ВБУ (см. рис. 3);
- два шаровых баллона для сжатого воздуха;

- один шаровой баллон — ресивер;
- приемная емкость для модельной жидкости, сливаемой в процессе эксперимента из модели бака;
- электроклапан, перекрывающий сливную магистраль;
- редуктор, обеспечивающий в ресивере требуемое давление наддува;
- манометр для контроля давления в шаровых баллонах;
- манометр для измерения давления в ресивере;
- датчик контроля давления в ресивере;
- датчик регистрации перепада давления на сетке КЗУ;
- датчик сплошности для регистрации момента прорыва газа при проведении эксперимента;
- датчик перегрузки, регистрирующий перегрузку в ходе проведения эксперимента;
- гидравлические и пневматические магистрали и запорные краны, обеспечивающие функционирование экспериментальной установки;
- штепсельные разъемы для подключения силовых и управляющих кабелей.



**Рис. 4.** Общий вид испытательного контейнера

В центре верхней стенки контейнера закреплен бомбовый электрозамок для сброса контейнера.

Положение контейнера при проведении эксперимента (в «полете») стабилизируется с помощью двух направляющих тросов.

Высота сбрасывания (свободного полета) контейнера в экспериментах варьировалась от 12 до 20 м, т. е. время свободного падения составляло от 1,57 до 2,02 с. В конце свободного падения контейнер приземляется на батут.

Основной составной частью испытательного контейнера является модель фрагмента топливного бака (далее — модель), представляющая собой изготовленное из оргстекла полушарие, герметично закрытое сверху плоской крышкой из оргстекла. Внутри модели бака смонтирована модель элемента КЗУ. На сливном патрубке модели установлен датчик сплошности, состоящий из осветителя и светодиода. Рядом с этим датчиком установлен патрубок для подключения датчика перепада давления на КЗУ. В верхней части модели имеется патрубок для подсоединения пневмомагистрали, через которую осуществляется наддув, обеспечивающий вытеснение жидкости из модели при проведении эксперимента. Там же установлен дренажный кран для сброса давления при заправке модели рабочей (модельной) жидкостью.

Модель топливного бака соединена трубопроводом с приемной емкостью, которая перед проведением эксперимента заправляется рабочей жидкостью, затем перекачивающейся в модель бака. В ходе эксперимента в приемную емкость переливается рабочая жидкость из модели бака. В магистрали, соединяющей сливной патрубок модели бака с приемной емкостью, установлен электроклапан, при проведении эксперимента открывающийся по сигналу от блока автоматики.

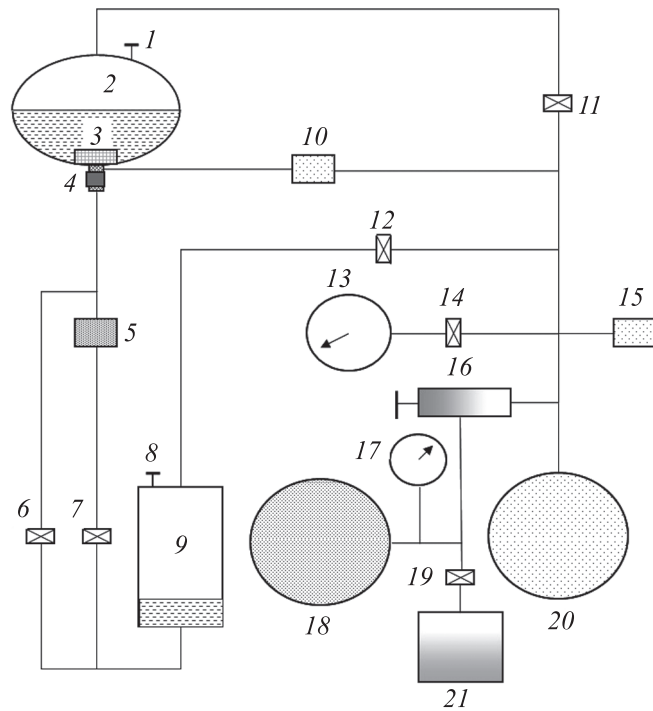
Приемная емкость представляет собой цилиндр из оргстекла. В ее крышке находится патрубок с трубопроводом, через который осуществляется ее заправка рабочей жидкостью или наддув при перекачивании жидкости из приемной емкости в модель бака. Кроме того, в крышке предусмотрен дренажный кран для сброса давления перед проведением эксперимента. В днище приемной емкости имеется патрубок, к которому подсоединен трубопровод, идущий от сливного патрубка модели бака.

В состав пневмогидравлической системы стенда (рис. 5) входят два шаровых баллона для сжатого воздуха суммарной вместимостью 16 л, шаровый баллон — ресивер вместимостью 8 л, редуктор, электроклапан, два манометра, пневмо- и гидромагистрали, шесть запорных вентилях. Для измерения давления наддува и перепада давления на сетке внутрибакового заборного устройства на стенде установлены датчики давления типа МДДФ-9. Перегрузка при проведении эксперимента измеряется акселерометром типа МП-15.

В ходе проведения эксперимента регистрируются следующие параметры:

- момент сброса контейнера;
- момент включения электроклапана;

- давление наддува в модели бака;
- перепад давления на сетке внутрибакового заборного устройства;
- момент прорыва газа через сливной патрубок модели;
- количество рабочей жидкости, слитой из модели бака в приемную емкость;
- величина перегрузки.



**Рис. 5.** Пневмогидравлическая схема экспериментальной установки:

1 — дренажный кран; 2 — модель фрагмента бака; 3 — модель элемента КЗУ; 4 — датчик сплошности; 5 — электроклапан; 6 — вентиль заправки; 7 — вентиль слива; 8 — дренажный кран; 9 — сливная емкость; 10 — датчик перепада давления; 11 — вентиль наддува; 12 — вентиль перекачки; 13 — образцовый манометр; 14 — запорный вентиль; 15 — датчик давления; 16 — редуктор; 17 — манометр; 18 — ресивер; 19 — запорный вентиль; 20 — ресивер; 21 — компрессор

Для регистрации перечисленных параметров используется светолучевой осциллограф типа Н-115. Типовая осциллограмма эксперимента приведена на рис. 6.

Перед проведением эксперимента контейнер поднимается в исходное положение с помощью электролебедки. Включение и выключение необходимых приборов во время эксперимента осуществляются блоком автоматики, в состав которого входят четыре пары управляющих электромагнитных реле времени типа ЭМРВ-27Б1 и исполнительных реле типа 8Э12 и 8Э14, с помощью которых включаются и



выключаются протяжка осциллографа, осветитель датчика сплошности, замок сброса контейнера и электроклапана.

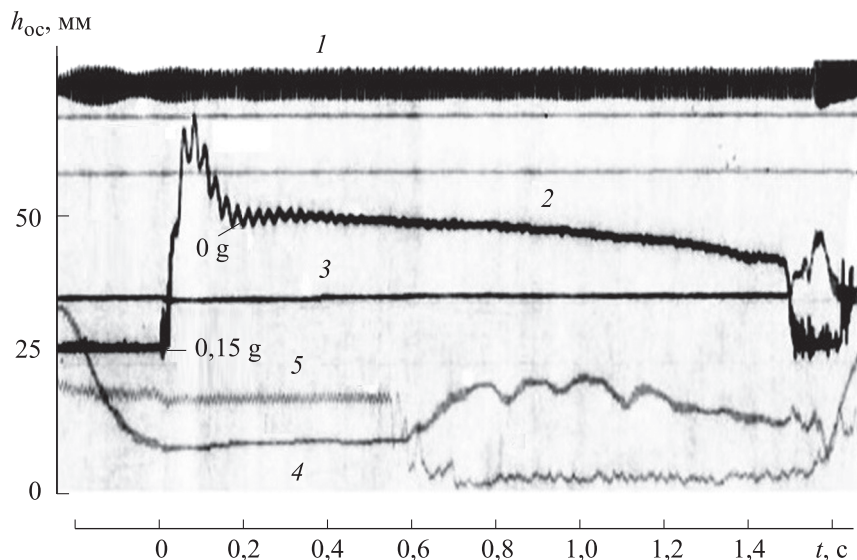


Рис. 6. Образец типовой осциллограммы:

1 — электроклапан; 2 — датчик перегрузки; 3 — датчик давления;  
4 — датчик перепада давления; 5 — датчик сплошности

Функционирование всех входящих в состав стенда электроприборов обеспечивает блок коммутации, соединенный электрокабелями с испытательным контейнером.

Разные потребители испытательного стенда получают питание от двух источников:

- выпрямителя ВСА 111К — электроклапан, осветитель датчика сплошности, цепи реле блока автоматики и электрозамка;
- стабилизированного блока питания Б-5-44 — датчики давления и датчик перегрузки (акселерометр).

В процессе эксперимента были использованы следующие измерительные и регистрирующие средства:

манометр класса по 2,5 ГОСТ 2405–72 с диапазоном измерений  $0 \dots 10 \text{ кгс/см}^2$ , ценой деления  $0,2 \text{ кгс/см}^2$ ;

манометр класса 0,6 по ГОСТ 6400–89 с диапазоном измерений  $0 \dots 4 \text{ кгс/см}^2$ , ценой деления  $0,02 \text{ кгс/см}^2$ ;

датчик перегрузки МП-15 с напряжением питания 6 В, диапазоном измерений  $-0,15 \dots +0,45\text{g}$ ;

датчик давления МДДФ-9 с напряжением питания 15 В, диапазоном измерений  $0,1 \dots 0,5 \text{ кгс/см}^2$ ;

электроклапан Д426-700;

пневморедуктор АР-003А;

светолучевой 12-канальный осциллограф Н-115 с шириной фотоленты 120 мм, емкостью кассеты 25 м, скоростью протяжки 0,5...10 000 мм/с.

Характеристики гальванометров, используемых в осциллографе, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики гальванометров, используемых в осциллографе

Регистрируемый параметр	Тип гальванометра	Чувствительность, мм/мА	Собственная частота, Гц	Внутреннее сопротивление, Ом
Сигнал датчика сплошности	М017-150	1245	150	45
Сигнал датчика давления наддува	М017-400	135	400	30
Сигнал датчика перепада давления	М017-400	135	400	30
Сигнал срабатывания электроклапана	М017-300	243	300	30
Сигнал датчика перегрузки	М017-400	135	400	30

**Анализ результатов.** По результатам расшифровки осциллограммы определяется момент прорыва газа, рассчитываются объемы слитой жидкости и остатка жидкости в модели на момент прорыва. Расшифровка приведенного выше образца типовой осциллограммы одного из экспериментов (см. рис. 6) выглядит следующим образом:

– в момент времени  $t = -0,2$  с перед срабатыванием замка сброса контейнера подают команду на открытие электроклапана расходной магистрали (на осциллограмме сигнал 1-го гальванометра), в результате чего к моменту времени  $t = 0$  (сброс контейнера) расход модельной жидкости выходит на установившийся режим (на осциллограмме сигнал 4-го гальванометра);

– в момент времени  $t = 0$  происходит сброс контейнера и датчик перегрузки (на осциллограмме сигнал 2-го гальванометра) фиксирует начало свободного падения контейнера и показывает изменение перегрузки от 0,15g до нуля. Затем в процессе падения контейнера в результате аэродинамического сопротивления остаточная перегрузка на борту контейнера плавно возрастает и в конце падения в момент времени  $t = 1,52$  с достигает 0,044g (на данной осциллограмме масштаб сигнала 2-го гальванометра — датчика перегрузки составляет 0,006g на 1 мм).

На осциллограмме (см. рис. 6) хорошо видно, как после прорыва газа в момент времени  $t = 0,57$  с во внутреннюю полость КЗУ (сигнал

5-го гальванометра — датчика сплошности) начинается работа элемента КЗУ в режиме «саморегенерации». В этот момент остаточная перегрузка составляет примерно 0,06g. Перепад давления на стенке КЗУ (параметр 4 на рис. 6) после прорыва газа вновь начинает расти и отбор жидкости продолжается.

Отбор жидкости в вычислительном и физическом экспериментах осуществлялся до момента исчезновения контакта сетчатого устройства с жидкостью. На графике (рис. 7) в качестве примера показаны зависимости объема отобранной жидкости от времени (в табл. 2 приведены параметры для вариантов эксперимента № 33–35). Точками на рисунке указаны объемы отобранной жидкости в момент «прорыва» газа в эксперименте.

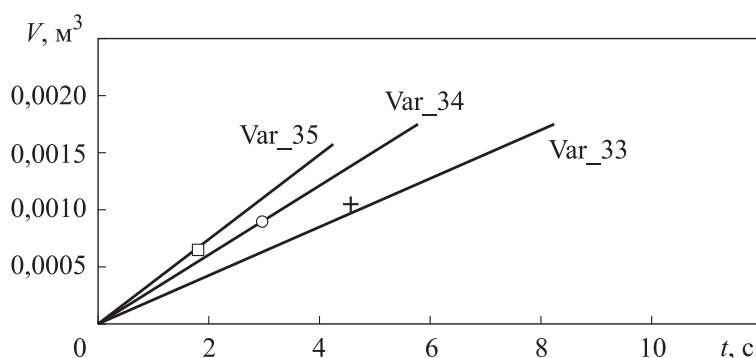


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные данные по работе КПСМ в режиме сепарации газожидкостной смеси при наддуве  $0,1 \cdot 10^5$ ;  $0,2 \cdot 10^5$ ;  $0,3 \cdot 10^5$  Па

Таблица 2

Параметры экспериментов № 33–35

Вариант №	Давление наддува, атм	dh, мм	$M_{\text{прор}}$ , с	Объем жидкости, л	$V_{\text{остат.}}$ , л		$V_{\text{отобр.}}$ , л	$V_{\text{остат.}}$ , л
					Эксперимент	Расчет		
33	0,1	-4,8	4,6	1,1	1,54	31	1,6948	1,2552
34	0,2	-5,2	3	0,92	1,69	35	1,6653	1,2547
35	0,3	-3,7	1,8	0,6	1,93	41	1,5864	1,2536

Следует отметить хорошее совпадение результатов расчета практически для всех вариантов, реализованных в физических экспериментах, до момента «прорыва» газа (рис. 8).

На рис. 9 показано, как изменяются объемы жидкости и газа, отбираемые с помощью модельного элемента КЗУ при его работе в режиме «саморегенерации», для одного из рассмотренных вариантов. На рис. 9 видно, что даже после того как газ наддува прорывается во внутреннюю полость модельного КЗУ, процесс отбора жидкости не прекращается.

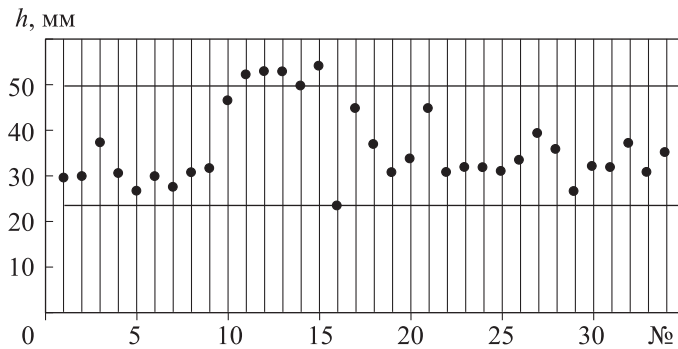


Рис. 8. Уровни жидкости в кювете в момент прорыва газа в эксперименте (№ — номер варианта)

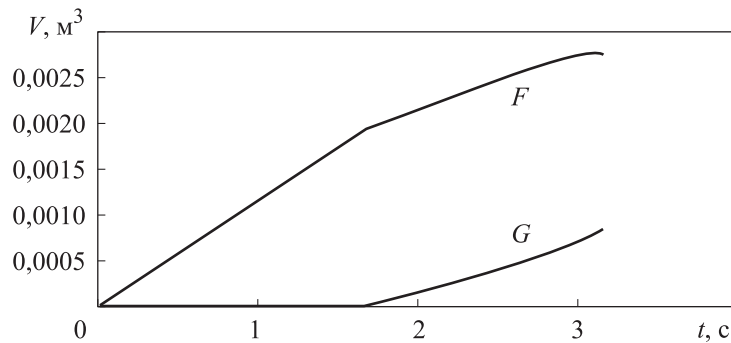


Рис. 9. Изменение количества отобранной жидкости  $F$  и газа  $G$  по времени при работе модельного элемента КЗУ в режиме «саморегенерации»

**Заключение.** Таким образом, выполненные расчетно-экспериментальные исследования показывают высокую эффективность работы КЗУ с применением СР на основе КПСМ и перспективность их использования для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск ЖРД космических аппаратов и разгонных блоков в условиях свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета. Результаты проведенных исследований подтверждают обоснованность предложения о более широком применении КПСМ в конструкции элементов ВБУ, так как в этом качестве свойства КПСМ заметно превосходят характеристики обычных сетчатых разделителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М. и др. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов*. В.М. Поляев, ред. Москва, УНПЦ «Энергомаш», 1997, 328 с.
- [2] *ГОСТ 3187–76. Сетки проволочные тканые фильтровые. Технические условия*. Москва, Изд-во стандартов, 1976, 7 с.

- [3] ГОСТ 6613–86. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. Москва, Изд-во стандартов, 1986, 12 с.
- [4] Давыдов С.А. Численный расчет взаимодействия свободной поверхности жидкости с сетчатой разделительной перегородкой. В сб. научных трудов: «Математическое моделирование в механике жидкости и газа». Днепропетровск, ДГУ, 1992, с. 72–77.
- [5] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарошкин В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 64 с.
- [6] Сапожников В.Б., Меньшиков В.А., Партола И.С., Корольков А.В. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2006, № 2 (63), с. 78–88.
- [7] Корольков А.В., Партола И.С., Сапожников В.Б. Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива. В сб.: *Научно-технические разработки ОКБ-23 — КБ «Салют»*. Выпуск 1. Москва, Воздушный транспорт, 2006, с. 313–320.
- [8] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Расчетная оценка работоспособности внутрибаковых капиллярных заборных устройств при действии отрицательных ускорений. *К.Э. Циолковский и будущее космонавтики. Материалы XLVI Научных чтений памяти К.Э. Циолковского: Тезисы докладов*. Калуга, 2011, с. 106–107.
- [9] Гришко Я.П., Большаков В.А., Константинов С.Б., Корольков А.В., Новиков Ю.М., Мартынов М.Б., Сапожников В.Б. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых устройств двигательных установок космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнёва*, 2011, вып. 3 (36), с. 122–126.
- [10] Сапожников В.Б., Крылов В.И., Новиков Ю.М., Ягодников Д.А. Наземная отработка капиллярных фазоразделителей на основе комбинированных пористо-сетчатых материалов для топливных баков жидкостных ракетных двигателей верхних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-707>
- [11] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Отделение газа от жидкости в потоке газожидкостной смеси в условиях невесомости с помощью комбинированных пористо-сетчатых материалов. В сб.: *Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии*. Выпуск 1 (14). Днепропетровск, «НПВК Триакон», 2014, с. 60–65.
- [12] Александров Л.Г., Богданов А.А., Большаков В.А., Константинов С.Б., Новиков Ю.М., Сапожников В.Б. К вопросу разработки ВБУ КТ из КПСМ для КА дальнего космоса: результаты этапа экспериментальной отработки базовой конструкции ВБУ КТ. *Ракетно-космические двигательные установки: Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции (Москва, октябрь 2015)*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, ИИУ МГОУ, 2015, с. 50–58.
- [13] 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 суще-

- ствования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 6 (105), с. 130–142.
- [14] Авраамов Н.И., Лоханов И.В., Новиков А.В., Сапожников В.Б., Ягодников Д.А. Экспериментальное и методическое обеспечение исследования гидродинамических процессов в топливных баках с капиллярными системами отбора криогенных компонентов. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2017, № 1 (35), с. 36–42.
- [15] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Корольков А.В., Сапожников В.Б. Топливный бак с капиллярным внутривакуумным устройством космической двигательной установки. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2021, № 4 (54), с. 15–21.
- [16] Сапожников В.Б., Полянский А.Р., Корольков А.В. Расчет минимального запаса топлива, находящегося в контакте с внутривакуумным устройством, для обеспечения работы жидкостного ракетного двигателя в условиях невесомости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 3.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-3-2063>

Статья поступила в редакцию 28.02.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Корольков А.В., Полянский А.Р., Сапожников В.Б. Перспективы применения комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкции внутривакуумных устройств двигательных установок космических аппаратов и разгонных блоков. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 3.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-3-2260>

**Корольков Анатолий Владимирович** — д-р физ.-мат. наук, профессор Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидрогазодинамика при течении жидкостей и газов в структурно-сложных средах. Автор более 100 научных публикаций. e-mail: an\_korolkov@mail.ru

**Полянский Александр Ромилович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидрогазодинамика течений в энергетических установках. Автор более 90 научных публикаций. e-mail: korolev100-rd@mail.ru

**Сапожников Владимир Борисович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидродинамика в топливных баках и пневмогидравлических системах двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями. Автор около 250 научных публикаций. e-mail: sapozhnikov47@mail.ru

## **Prospects of introducing combined porous mesh materials in the in-tank device structures of the spacecraft and upper stage propulsion systems**

© A.V. Korolkov<sup>1</sup>, A.R. Polyansky<sup>2</sup>, V.B. Sapozhnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mytishchi Branch, Bauman Moscow State Technical University,  
Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper presents theoretical and experimental substantiation of the prospects to use materials of the new type, i.e. the combined porous-mesh materials (CPMM), in the in-tank devices (ITD) structures of spacecraft propulsion systems and upper stages to ensure multiple liquid-propellant rocket engine start in practical zero gravity. It is shown that CPMM operation was accompanied by phenomena that were missing, when using mesh materials previously used for this purpose, the so-called mesh separators (MS). It is concluded that at present it should be considered expedient to widely introduce CPMM in the ITD structure elements, since in this capacity the CPMM properties are noticeably superior to those of conventional MS. As a result, the ITD efficiency based on CPMM increases significantly, which finally makes it possible to minimize unusable fuel residues in the tanks and, thereby, increase the energy-mass efficiency of the aerial vehicle as a whole.*

**Keywords:** liquid-propellant rocket engine, multiple start, conditions of actual weightlessness, in-tank devices

### 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 systems of liquid extraction from the spacecraft tanks]. V.M. Polyayev, ed. Moscow, UNPTs "ENERGOMASH" Publ., 1997, 328 p.
- [2] *GOST 3187–76. Setki provolochnye tkannye filtrovannye. Tekhnicheskie usloviya* [Wire weaved cloth with nets. Specifications]. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 1976, 7 p.
- [3] *GOST 6613–86. Setki provolochnye tkannye s kvadratnymi yacheykami* [Square meshed woven wire cloths. Specifications]. Moscow, Izdatelstvo Standartov Publ., 1986, 12 p.
- [4] Davydov S.A. Chislennyi raschet vzaimodeystviya svobodnoy poverkhnosti zhidkosti s setchatoy razdelitelnoy peregorodkoy [Numerical calculation of interaction between liquid free surface and mesh partition wall]. In: *Sb. nauchnykh trudov "Matematicheskoe modelirovanie v mekhanike zhidkosti i gaza"* [Collection of scientific papers "Mathematical modeling in fluid and gas mechanics"]. Dnepropetrovsk, DGU Publ., 1992, pp. 72–77.
- [5] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristye setchatye materialy* [Porous mesh materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [6] Sapozhnikov V.B., Menshikov V.A., Partola I.S., Korolkov A.V. Razvitie idey professora V.M. Polyayeva po primeneniyu poristo-setchatykh materialov dlya vnutribakovykh ustroystv, obespechivayuschikh mnogokratnyi zapusk zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Development of the ideas of Professor V.M. Polyayev on the use of porous mesh materials for in-tank devices that provide multiple liquid

- rocket engines starting]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2006, no. 2 (63), pp. 78–88.
- [7] Korolkov A.V., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. Teoreticheskie osnovy razrabotki i eksperimentalnoy otrabotki kapillyarnykh zabornykh ustroystv s minimalnymi ostatkami topliva [Theoretical foundations of development and experimental testing of capillary sampling devices with minimal remnants of fuel]. In: *Nauchno-tekhnicheskie razrabotki OKB-23 — KB «Saliut». Vypusk 1* [Scientific and technical development of SDB-23 — DB “Salyut”. Issue 1]. Moscow, Vozdushnyi Transport Publ., 2006, pp. 313–319.
- [8] Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. Raschetnaya otsenka rabotosposobnosti vnutribakovykh kapillyarnykh zabornykh ustroystv pri deystvii otritsatelnykh uskoreniy [Calculation assessment of the performance of intra-tank capillary intake devices exposed to negative accelerations]. In: *K.E. Tsiolkovskiy i budushee kosmonavtiki. Materialy XLVI Nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo: Tezisy dokladov* [K.E. Tsiolkovsky and the future of cosmonautics. Materials of the XLVI Scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky: Abstracts of reports]. Kaluga, 2011, pp. 106–107.
- [9] Grishko Ya.P., Bol'shakov V.A., Konstantinov S.B., Korolkov A.V., Novikov Yu.M., Martynov M.B., Sapozhnikov V.B. Primenenie kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v konstruktsii vnutribakovykh ustroystv dvigatelnykh ustanovok kosmicheskikh apparatov, verkhnikh stupeney raket-nositeley i razgonnykh blokov [Application of the combined porous-meshy materials in intratank devices construction of propulsion installations of spacecraft, top steps of carrier rockets and upper-stage rockets]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. M.F. Reshetneva — The Siberian Aerospace Journal*, 2011, no. 3 (36), pp. 122–126.
- [10] Sapozhnikov V.B., Krylov V.I., Novikov Yu.M., Yagodnikov D.A. Nazemnaya otrabotka kapillyarnykh fazorazdeliteley na osnove kombinirovannykh poristosetchatykh materialov dlya toplivnykh bakov zhidkostnykh raketnykh dvigateley verkhnikh stupeney raket-nositeley, razgonnykh blokov i kosmicheskikh apparatov [Ground tests of capillary phase separators based on combined porous mesh material for fuel tanks of liquid propellant engine in propulsion installations of space crafts, top steps of carrier rockets and upper-stage rockets]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 4. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-707>
- [11] Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. Otdelenie gaza ot zhidkosti v potoke gazozhidkostnoy smesi v usloviyakh nevesomosti s pomoschyu kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov [Separation of gas from liquid in the liquid-gas mixture flow in the zero-gravity by means of combined porous-mesh materials]. In: *Sovremennaya nauka: idei, issledovaniya, rezultaty, tekhnologii. Vypusk 1 (14)* [Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies, Issue 1(14)]. Dnepropetrovsk, NPVK Triakon Publ., 2014, pp. 60–65.
- [12] Alexandrov L.G., Bogdanov A.A., Bolshakov V.A., Konstantinov S.B., Novikov Yu.M. K voprosu razrabotki VBU KT iz KPSM dlya dalnego kosmosa: rezultaty etapa eksperimentalnoy otrabotki bazovoy konstruktsii VBU KT [To the issue of the ST IBD development from CPMM for the deep space spacecraft: results of the experimental testing stage of the ST IBD basic design]. In: *Raketno-kosmicheskije dvigatelnye ustanovki: Sb. materialov Vserossiyskoy naychno-tekhnicheskoy konferentsii (Moskva, oktyabr 2015)* [Rocket and space propulsion systems: coll. materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference (Moscow, October 2015)]. Moscow, IIU MGOU Publ., 2015, pp. 50–58.



- [13] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razrabotki kapillyarnykh toplivozabornykh ustroystv iz kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov dlya kosmicheskikh apparatov s dlitelnyim srokom aktivnogo suschestvovaniya [Current state and prospects of capillary fuel-intake units made of combined porous metals-mesh for long lifetime spacecraft]. *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.
- [14] Avraamov N.I., Lokhanov I.V., Novikov A.V., Sapozhnikov V.B., Yagodnikov D.A. Eksperimentalnoe i metodicheskoe obespechenie issledovaniya gidrodinamicheskikh protsessov v toplivnykh bakakh s kapillyarnymi sistemami otbora kriogennykh komponentov [Experimental and methodical assurance of studies of hydro-dynamic processes in propellant tanks with capillary cryogenic components management systems]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2017, no. 1 (35), pp. 36–42.
- [15] Alexandrov L.G., Konstantinov S.B., Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. Toplivnyi bak s kapillyarnym vnutribakovym ustroystvom kosmicheskoy dvigatelnoy 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.
- [16] Sapozhnikov V.B., Polyansky A.R., Korolkov A.V. Raschet minimalnogo zapasa topliva, nakhodyaschegosya v kontakte s vnutribakovym ustroystvom, dlya obespecheniya raboty zhidkostnogo raketnogo dvigatelya v usloviyakh nevesomosti [Calculation of minimum supply of fuel in contact with the intertank device to ensure the operation of a liquid-propellant rocket engine in zero gravity]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 3. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-3-2063>

**Korolkov A.V.**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Mytishchi Branch, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 100 scientific publications. Research interests: hydrogasdynamics during liquids and gases flow in the structurally complex media. e-mail: [an\\_korolkov@mail.ru](mailto:an_korolkov@mail.ru)

**Polyansky A.R.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 90 scientific publications. Research interests: hydrogasdynamics of flows in the power plants. e-mail: [korolev100-rd@mail.ru](mailto:korolev100-rd@mail.ru)

**Sapozhnikov V.B.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 250 scientific publications. Research interests: hydrodynamics in fuel tanks and pneumohydraulic systems of propulsion systems with liquid rocket engines. e-mail: [sapojnikov47@mail.ru](mailto:sapojnikov47@mail.ru)