

Рис. 3. ДН антенны до и после подавления сигнала в кластере

A. S. Pershin, E. Yu. Uzolin

#### ADAPTIVE MULTI BEAM ANTENNA JSC «ISS»

*The article presents one of the embodiments of adaptive antennas, allowing effectively suppress interference in a given direction, while maintaining the basic signal.*

*Keywords: spacecraft, adaptive multi beam antenna, cluster.*

© Першин А. С., Узолин Е. Ю., 2011

УДК 629.7.023.001

В. Б. Сапожников, Я. П. Гришко, А. В. Корольков, В. А. Большаков, Ю. М. Новиков,  
С. Б. Константинов, М. Б. Мартынов

#### ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОРИСТО-СЕТЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ ВНУТРИБАКОВЫХ УСТРОЙСТВ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ВЕРХНИХ СТУПЕНЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ И РАЗГОННЫХ БЛОКОВ

*Приводится теоретическое и экспериментальное обоснование перспективности применения материалов нового типа – комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ) в конструкции внутрибаковых устройств (ВБУ) двигательных установок с целью обеспечения многократного запуска ЖРД космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков в условиях практической невесомости. Показано, что работа КПСМ сопровождается явлениями, отсутствующими при использовании ранее применявшихся для этой цели сетчатых материалов. 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: жидкостной ракетный двигатель, многократный запуск, условия практической невесомости, внутрибаковые устройства.*

Одной из проблем, появившихся одновременно с началом практического освоения космического пространства в конце 50-х годов прошлого столетия, стала проблема обеспечения многократного запуска ЖРД космических летательных аппаратов (КЛА) в услови-

ях, близких к невесомости. К настоящему времени разработаны многочисленные технические устройства и способы для решения этой проблемы, начиная от применения разделительных диафрагм в топливных баках (ТБ) и заканчивая использованием акустиче-

ских 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) [1]. 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, необходимость наличия опорных каркасов для СР. Кроме того, если газ наддува все-таки проходит через СР, эти устройства перестают работать.

В 1990-х годах коллективом сотрудников НИИ ЭМ МГТУ им. Баумана (в кооперации) было предложено использовать в качестве конструкционного материала ВБУ новый вид проницаемых структур – комбинированные пористо-сетчатые металлы (материалы) (КПСМ) [2]. Эти материалы значительно расширили область применения пористых сетчатых металлов (ПСМ), являющихся одним из значительных достижений в области теплообмена научной школы доктора технических наук, профессора В. М. Поляева.

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. Такая особенность КПСМ обуславливает 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:

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

где  $\Delta p_{\text{кап}} = \frac{4\sigma}{d_3}$  – капиллярная удерживающая способность (КУС) КЗУ;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела «жидкость–газ»;  $d_3$  – эквивалентный диаметр ячейки СР.

Тогда найдем, потери давления при прохождении жидкости по нормали к поверхности СР:

$$\Delta p_m = \zeta_m \frac{\rho \cdot u^2}{2},$$

где  $\zeta_m$  – коэффициент гидравлического сопротивления СР;  $\rho$  – плотность жидкости;  $u$  – скорость потока по нормали к поверхности СР.

В общем случае величина примет вид

$$\zeta_m = E + F \cdot \text{Re}^m,$$

где  $\text{Re} = \frac{u \cdot d_3}{\nu}$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Коэффициенты  $E$ ,  $F$  и  $m$  определяются 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 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.

Для оценки эффективности работы таких ВБУ нами была разработана математическая модель процесса функционирования элемента КЗУ, представляющего собой полый цилиндр со стенками, выполненными из КПСМ (рис. 1).

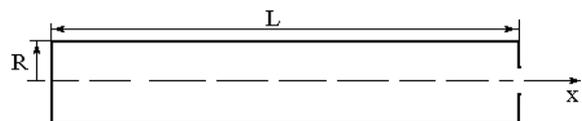


Рис. 1. Расчетная схема и обозначения:  
 $L$  – длина трубы;  $R$  – радиус трубы;  $r$  – радиус выходного отверстия;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления;  $\alpha$  – «степень сухости» трубы в данном сечении

**Допущения.** Жидкость несжимаемая. Течение в трубе одномерное, вязкое с распределенным источ-

ником. На внешней поверхности сетки заданное давление (давление наддува), а на срезе выходного отверстия давление равно 0.

Уравнение движения имеет вид

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

Уравнение неразрывности выглядит следующим образом:

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

где  $V_{set}(p)$  – функция зависимости скорости протекающей 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  $a = \frac{E \cdot \rho}{2}$ ,  $b = \frac{F \cdot v \cdot \rho}{2 \cdot d_3}$ ,  $E, F, d_3$  – характеристики сетки.

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 решаются методом «пристрелки» до установления требуемого распределения давлений. Полученное установившееся распределение давлений и скоростей считается неизменным 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 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

$$\Delta p_{\text{крит}} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_3},$$

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.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели реальному процессу была

проведена серия физических экспериментов на модельной экспериментальной установке с использованием башни (стенда) невесомости.

В состав стенда входит испытательный контейнер (рис. 2). Контейнер представляет собой пространственную ферменную конструкцию в виде параллелепипеда, изготовленную из труб и уголков из алюминиевого сплава.

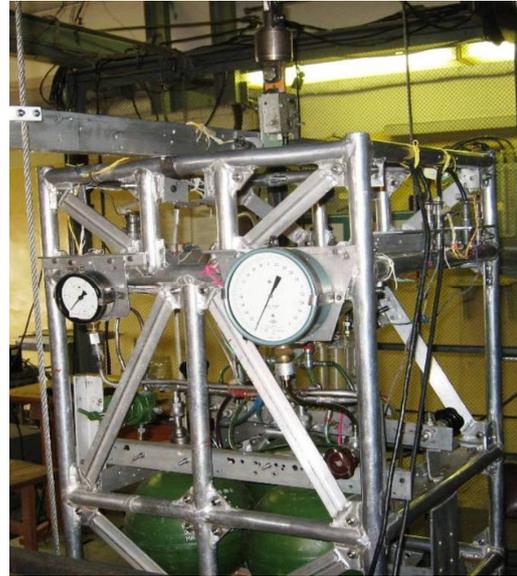


Рис. 2. Общий вид испытательного контейнера

В центре верхней стенки контейнера закреплён бомбовый электрозамок для осуществления сброса контейнера.

Положение контейнера при проведении эксперимента (в «полёте») стабилизируется при помощи двух направляющих тросов.

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 датчиком сплошности 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 приёмной ёмкостью. Перед проведением эксперимента приёмная ёмкость заправляется рабочей жидкостью, которая затем перекачивается в модель бака. В ходе проведения эксперимента в приёмную ёмкость переливается рабочая жидкость из модели бака. В магистрали, соединяющей сливной патрубок

модели бака с приёмной ёмкостью, установлен электроклапан, который при проведении эксперимента открывается по сигналу от блока автоматики.

В состав пневмогидравлической системы стенда (рис. 3) входят два шаровых баллона для сжатого воздуха суммарной ёмкостью 16 литров, шаровый баллон – ресивер ёмкостью 8 литров, редуктор, электроклапан, два манометра, пневмо- и гидромагистраль, 6 запорных вентилей. 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 приёмную ёмкость;
- величина перегрузки.

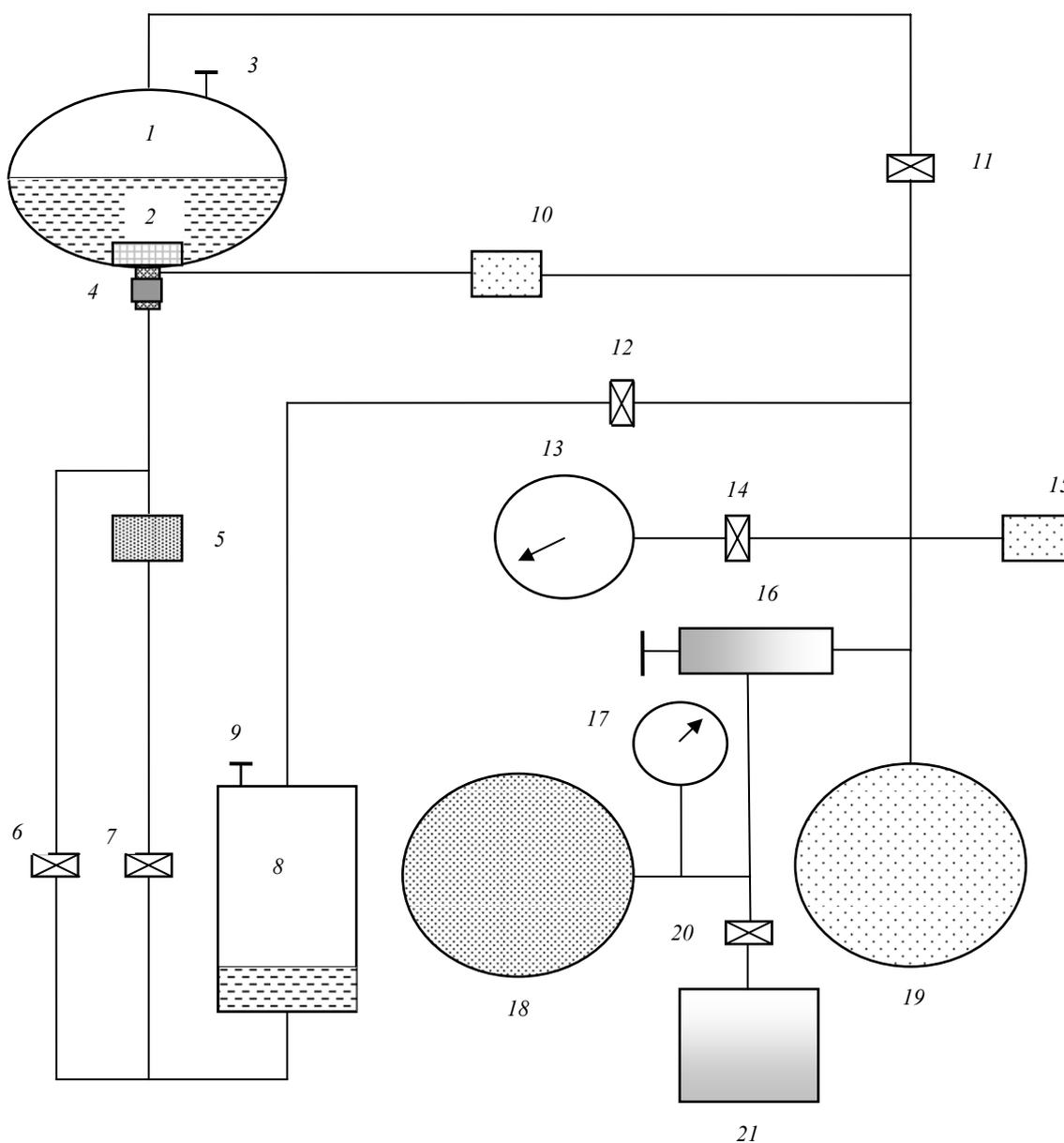


Рис. 3. Пневмогидравлическая схема экспериментальной установки:

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

Для регистрации перечисленных параметров используется светолучевой осциллограф типа Н-115.

По результатам расшифровки осциллограммы определяется момент прорыва газа, подсчитывается объём слитой жидкости и остаток жидкости в модели на момент прорыва.

После прорыва газа во внутреннюю полость КЗУ начинается работа элемента КЗУ в режиме «саморегенерации». Перепад давления на стенке 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. Всего было выполнено 35 серий экспериментов с различными модельными жидкостями (хладон-113, хладон-114, спирт этиловый 96 %, водный раствор этилового спирта 40 %, вода дистиллированная). На рис. 4 в качестве примера показаны зависимости объёма отобранной жидкости от времени для 33, 34 и 35 серий экспериментов. Точками указаны объёмы отобранной жидкости в момент «прорыва» газа в эксперименте.

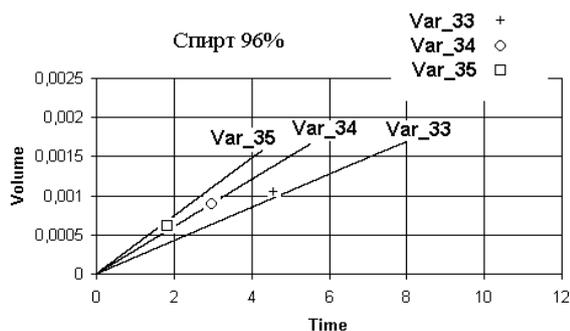


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные данные по работе КПСМ в режиме сепарации газожидкостной смеси, наддув (0,1; 0,2; 0,3)·10<sup>5</sup> Па

Можно отметить хорошее совпадение результатов расчета практически для всех вариантов, реализован-

ных в физических экспериментах, до момента «прорыва» газа.

На рис. 5 показано, как меняются объёмы жидкости и газа, отбираемые с помощью модельного элемента КЗУ при его работе в режиме «саморегенерации», для одного из рассмотренных вариантов. Здесь видно, что даже после того, как газ наддува прорывается во внутреннюю полость модельного КЗУ, процесс обора жидкости не прекращается.

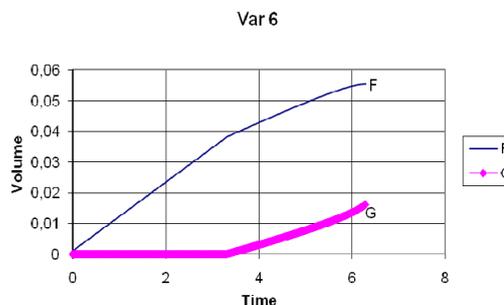


Рис. 5. Изменение количества отобранной жидкости (F) и газа (G) по времени при работе модельного элемента КЗУ в режиме «саморегенерации»

Таким образом, выполненные расчетно-экспериментальные исследования подтверждают 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 возмущенно-орбитального (суборбитального) полета.

#### Библиографические ссылки

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов / В. В. Багров, А. В. Курпатенков, В. М. Поляев и др. ; под ред. В. М. Поляева. М. : УНПЦ «Энергомаш», 1997.
2. Пористые сетчатые материалы / Ю. И. Синельников [и др.]. М. : Металлургия, 1983.

V. B. Sapozhnikov, Ya. P. Grischko, A. V. Korolkov, V. A. Bolshakov, Yu. M. Novikov, S. B. Konstantinov, M. B. Martynov

### APPLICATION OF COMBINED POROUS-MESH MATERIALS IN CONSTRUCTION OF INTRATANK DEVICES OF PROPULSION INSTALLATIONS OF SPACECRAFTS, FINAL STEPS OF CARRIER ROCKETS AND UPPER-STAGES

*Theoretical and experimental basis of perspective of application of new type materials – the combined porous-mesh materials (KPSM) in intratank devices (VBU) of propulsion installations to provide multiple starts of liquid-propellant engine of spacecrafts, final steps of carrier rockets and upper-stage of rockets in the conditions of real zero-gravity is described in the report. It is shown that KPSM work is accompanied with phenomena that do not appear while using meshy materials previously applied for this purpose. As a result the VBU efficiency on the base of KPSM increases greatly and finally it allows to cut to minimum unusable fuel in tanks and to raise power mass efficiency of aircraft in general.*

*Keywords: liquid-propellant engine, multiple starts, conditions of real zero-gravity, intratank devices.*

© Сапожников В. Б., Гришко Я. П., Корольков А. В., Большаков В. А., Новиков Ю. М., Константинов С. Б., Мартынов М. Б., 2011