

E. M. Kraeva

HYDRODYNAMICS OF VISCOUS FLUID FLOWS IN THE LATTICE OF PROFILES BLADES OF CENTRIFUGAL HYDRAULIC MACHINE

The calculation of a viscous fluid flow profile cascade vanes of a centrifugal impeller is represented. The dependencies of parameters of the boundary layer along the edges of the input grating blade centrifugal hydraulic profiles are obtained. The calculations for a number of working viscosities.

Keywords: hydrodynamics flow, model, turbulence, parameters, flow, viscosity, working lattice, blade.

© Краева Е. М., 2011

УДК 621.396.677

А. С. Першин, Е. Ю. Узолин

АДАПТИВНЫЕ МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ ОАО «ИСС»

Приведен один из вариантов исполнения адаптивной антенны, позволяющий эффективно подавлять помеху с заданного направления при сохранении уровня сигнала в большей части зоны обслуживания.

Ключевые слова: космический аппарат, адаптивные многолучевые антенны, кластер.

Развитие современных антенных систем, в том числе военной связи, потребовало обеспечения высокой помехозащищенности антенной системы от направленных помех. При использовании классических многолучевых антенн (МЛА), где схема антенно-фидерной системы (АФС) построена по принципу «облучатель–луч», защита от помехи осуществляется отключением приемника для заданного луча. Однако, это также лишало связи или приводило к значительному ухудшению качества связи тех, кто находился в зоне отключения сигнала [1].

Решением данной проблемы стало развитие адаптивных антенных систем. Принципиальное отличие данных систем заключается в том, что они позволяют подавлять помеху в определенной зоне, но при этом, не ухудшают качество связи для остальных абонентов. Несмотря на то, что адаптивные антенные системы используют антенны различных типов, их можно разделить на 3 основных класса:

- адаптивная фазированная антенная решетка (АФАР);
- адаптивная многолучевая антенна (АМЛА);
- их вариации.

Одно из направлений использования таких антенн – это установка их на космические аппараты (КА). В нашей стране использование адаптивных антенн на КА – это только перспектива. Преимуществом АМЛА над АФАР является возможность обеспечить покрытие всей зоны обслуживания (ЗО) набором узких высокоэнергетических лучей, обеспечивающим высокое качество связи, а при возникновении помех эффективно подавлять помеху. Кроме того, подавление сигнала в АМЛА осуществляется в главном лепестке диаграммы направленности антенны.

В данной статье будет рассмотрен один из примеров реализации АМЛА и представлены возможности подавления направленных помех в заданной зоне.

Данная адаптивная антенная система должна обеспечивать работу в двух режимах:

- многолучевой режим;
- режим подавления.

Данные режимы при их совмещении могут существенно дополнять друг друга. Так, в мирное время наиболее предпочтительной является многолучевая концепция, позволяющая организовывать связь с абонентами во всей зоне обслуживания вплоть до глобальной. Кроме того, существует возможность двойного использования данного режима (в мирное время) выделяя часть ресурса для средств гражданской связи. При этом для части ячеек облучателя МЛА, которые не требуют противопомеховой защиты, спутниковая обработка сигналов может быть отключена, что позволит использовать коммерческие пользовательские терминалы [2]. На рис. 1 приведен габаритный эскиз адаптивной многолучевой антенны, работающей в Ка-диапазоне частот.

АМЛА Ка-диапазона (диаметр рефлектора $D = 400$ мм, фокусное расстояние $F = 985$ мм), имея в своем составе 61-элементную облучающую решетку, по схеме «излучатель–луч» формирует 61 луч шириной $1^\circ \times 1^\circ$, набор которых покрывает зону $5^\circ \times 5^\circ$. Блок формирования диаграммы направленностей (ДН) позволяет формировать провалы в ДН для обеспечения подавления помехи. Блок формирует кластер, состоящий из определенного количества рупоров, от 7 до 37 облучателей. Каждый элемент запитывается синфазно и равноамплитудно.

При отсутствии помехи антенна работает в режиме МЛА по схеме «облучатель–луч». При появлении помехи формируется кластер, состоящий из 7–19 элементов для подавления помехи. Для облучателя, на котором наблюдается превышение уровня «сигнал/шум», система формирует варианты подавления сигнала в пределах луча методом перебора вариантов. Для случая с одной помехой система использует заранее

синтезированные варианты амплитудно-фазового распределения (АФР). Для случая нескольких помех система формирует еще один кластер для подавления помехи либо подавляет две помехи одним кластером, синтезируя АФР для подавления двух помех одновременно.

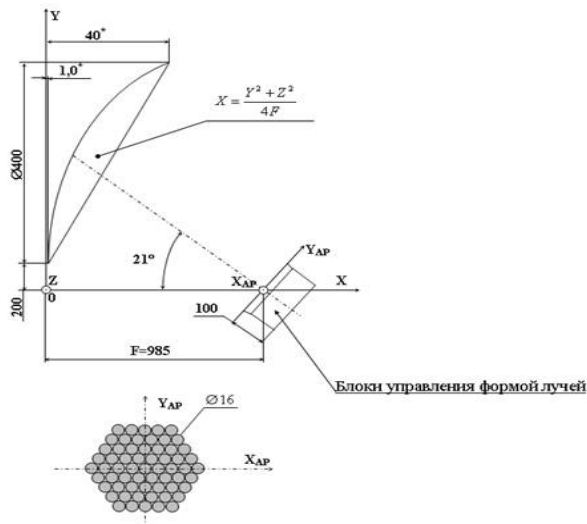


Рис. 1. Габаритный эскиз АМЛА Ка-диапазона

Кластер, состоящий из 19 элементов, позволяет получить гораздо больше вариантов формирования провала, а также изменения его положения, чем кластер, состоящий из семи элементов. Провалы, формируемые 19-элементным кластером, можно получить различной формы для покрытия заданной ЗО.

Для формирования провалов на краях зоны необходимо увеличить количество облучателей решетки [3]. Набор из 31 облучателя, который покрывает зону $5^\circ \times 5^\circ$ одноградусными лучами, не позволяет сформировать провалы на краях ЗО.

Как показали результаты моделирования, для подавления сигнала на краю ЗО на 25 дБ и больше необходимо, чтобы антенна формировала набор узких лучей $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ либо $1^\circ \times 1^\circ$, для более широких лучей качество подавления сигнала ухудшается.

Результаты расчетов радиотехнических характеристик АМЛА. Были проведены расчеты радиотехнических характеристик АМЛА с набором кластеров для подавления помех на краях зоны обслуживания. Как видно из результатов расчета, подавление помехи возможно в небольшой зоне $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ на -30 дБ (рис. 2, 3).

При изменении АФР облучающей решетки возможно перемещение провала в ДН АМЛА в пределах ЗО с различной глубиной провала.

Алгоритм обладает хорошим быстродействием, что позволит оперативно подавлять помеху в пределах ЗО (синтез АФР до 2 минут). Как показывают расчеты, подавление помехи на 30 дБ достигается без существенного искажения ДН антенны, что позволит сохранить уровень сигнала для всей ЗО.

Как показали результаты моделирования, представленная в данной статье система позволяет формировать провалы в ДН на 25–30 дБ для подавления направленных помех.

Перспективой развития технологии адаптивных антенн является:

- использование в Ка-диапазоне;
- использование цифровой ДОС в составе АФУ антенны;
- использование кодирования сигналов и их корреляционной обработки сигналов для выявления помех и формирования провалов в ДН для их подавления;
- возможность подавления помех в заданной зоне на 25–30 дБ.

По результатам расчетов было показано, что в Ка-диапазоне возможно подавление помех на 25–27 дБ в небольших зонах. Рассчитанные антенны имеют малые габариты и массовые показатели (апертуры рефлекторов не более 500 мм).

Библиографические ссылки

1. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ : в 2 ч. Ч. 1. М. : Изд-во «Связь», 1977.
2. Richard C. Johnson Antenna Engineering Handbook. 3ed. Johnson, 1983.
3. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ : в 2 ч. Ч. 2. М. : Изд-во «Связь», 1977.

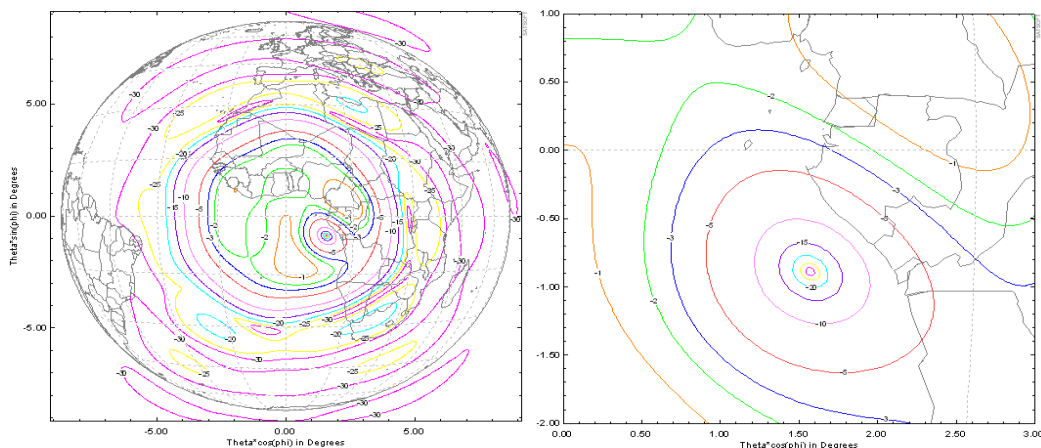


Рис. 2. Проекция ДН на заданную ЗО. Кластер состоит из 19 элементов (1–19 рупор). Контуры построены от -3 до -30 дБ. Провал по уровню 30 дБ в зоне $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Слева – общий вид ДН, справа – провал в ДН

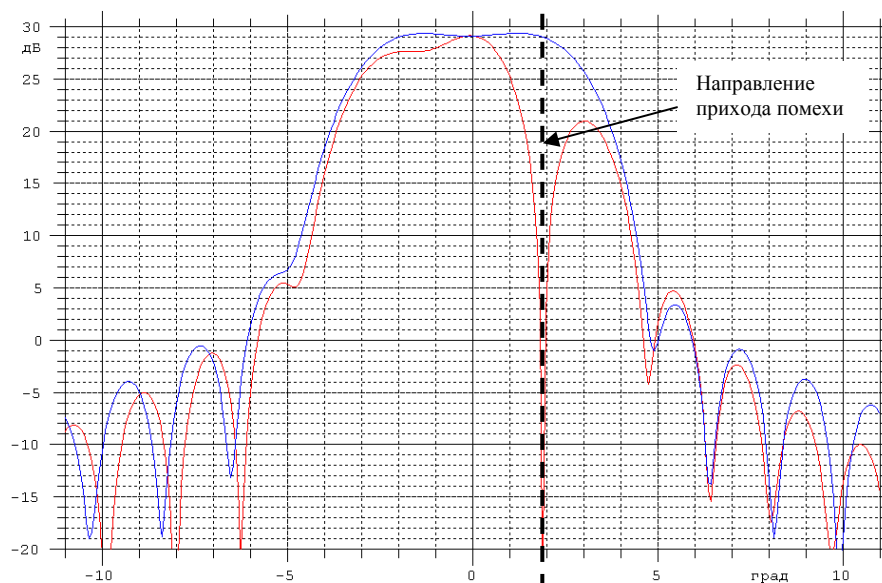


Рис. 3. ДН антенны до и после подавления сигнала в кластере

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:

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

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

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

$$\Delta p_{\text{м}} = \zeta_{\text{м}} \frac{\rho \cdot u^2}{2},$$

где $\zeta_{\text{м}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления СР; ρ – плотность жидкости; u – скорость потока по нормали к поверхности СР.

В общем случае величина примет вид

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

где $\text{Re} = \frac{u \cdot d_s}{\nu}$ – число Рейнольдса; ν – 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).

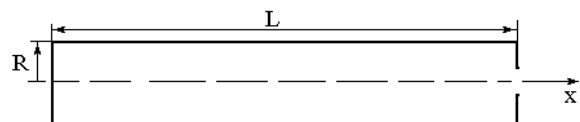


Рис. 1. Расчетная схема и обозначения:

L – длина трубы; R – радиус трубы; r – радиус выходного отверстия; λ – коэффициент сопротивления; α – «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

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

Уравнение неразрывности выглядит следующим образом:

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

где $V_{set}(p)$ – 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 $a = \frac{E \cdot \rho}{2}$, $b = \frac{F \cdot v \cdot \rho}{2 \cdot d_s}$, E, F, d_s – 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 за 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

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

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.

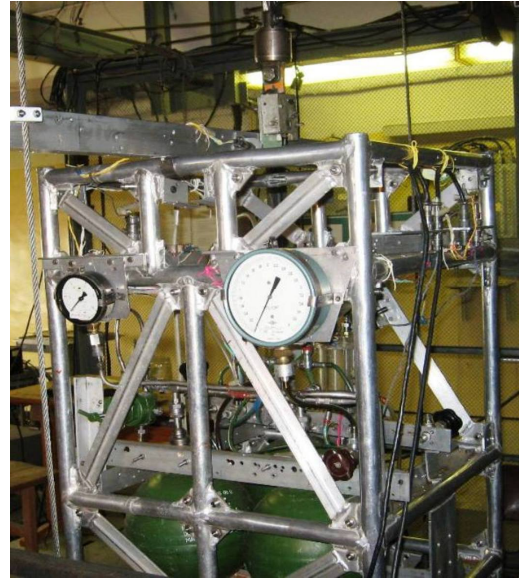


Рис. 2. Общий вид испытательного контейнера

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.

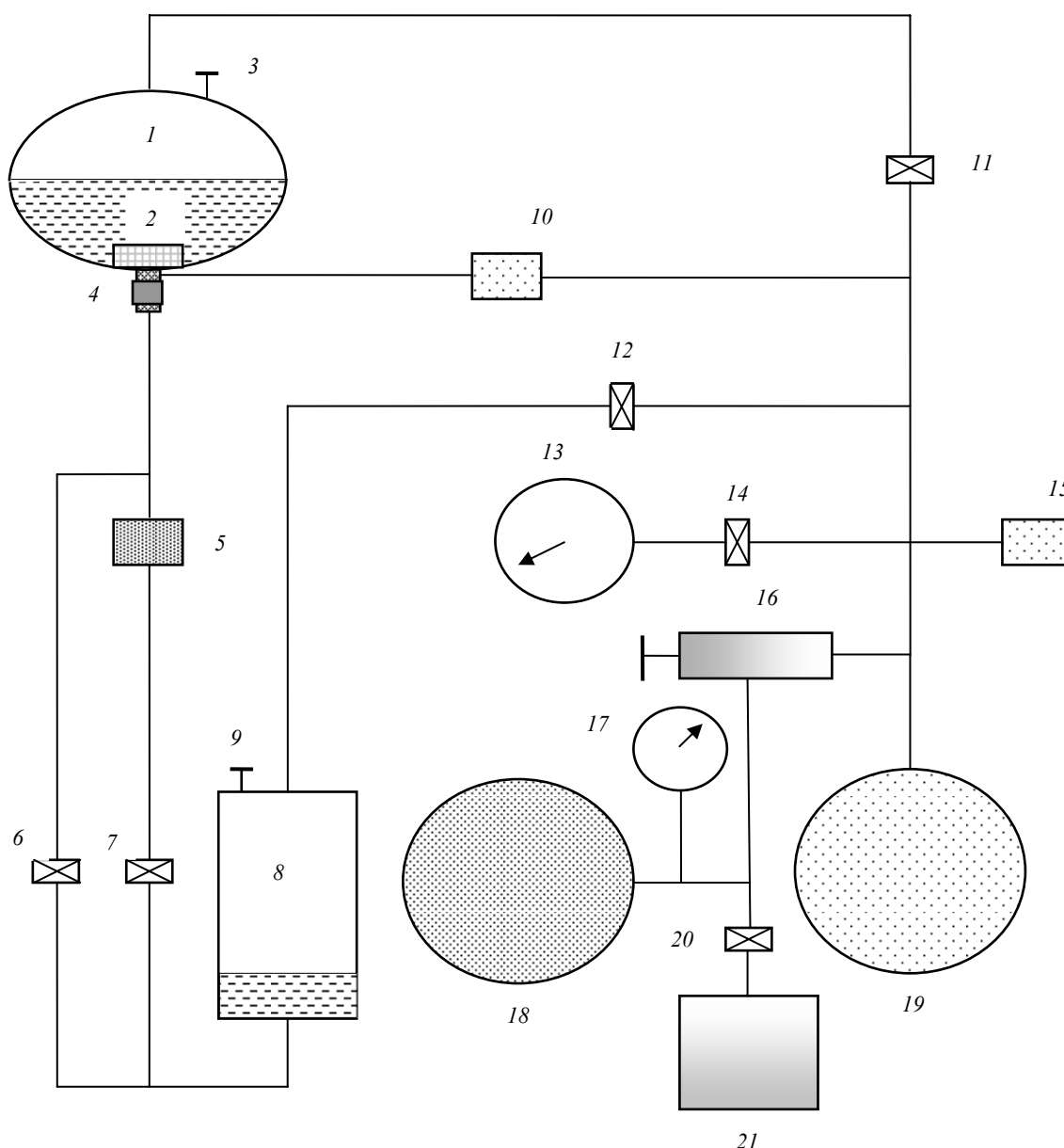


Рис. 3. Пневмогидравлическая схема экспериментальной установки:

- 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.

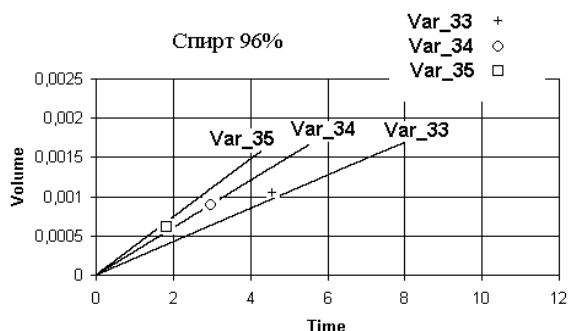


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные данные по работе КПСМ в режиме сепарации газожидкостной смеси, наддув $(0,1; 0,2; 0,3) \cdot 10^5$ Па

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.

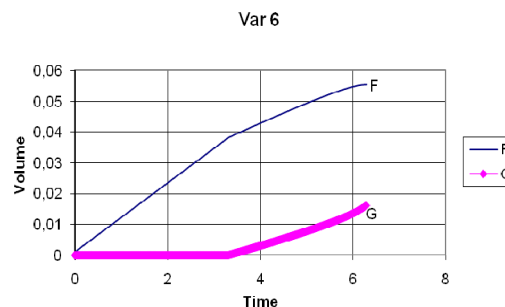


Рис. 5. Изменение количества отобранной жидкости (F) и газа (G) по времени при работе модельного элемента КЗУ в режиме «саморегенерации»

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 возмущенного 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