

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

© В.Б. Сапожников¹, В.И. Крылов², Ю.М. Новиков², Д.А. Ягодников³

¹ Научно-технический внедренческий центр «Энергетические, информационные, технологические достижения для установок и комплексов космического и оборонного назначения», г. Юбилейный, Московская область, 141091, Россия

² Центр высоких технологий в машиностроении при МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены методы и условия наземной отработки внутрибаковых устройств на основе так называемых капиллярных фазоразделителей (КФР), обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей в условиях, близких к невесомости. Показано, что наземные испытания должны базироваться на аппарате маломасштабного физического моделирования с применением методов теории подобия гидродинамических процессов и анализа размерностей. При этом для воспроизведения условий свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета необходимо применение специальных стендов и экспериментального оборудования. Установлены соотношения, которые рекомендовано использовать для обеспечения условий приближенного подобия внутрибаковых гидродинамических процессов, сопровождающих функционирование КФР. Приведены схемы основных стендов и экспериментальных установок, позволяющих имитировать условия свободного и возмущенного орбитального (суборбитального) полета в процессе наземной отработки КФР.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, многократный запуск в невесомости, внутрибаковое устройство, капиллярный фазоразделитель, наземные испытания.

Одной из проблем, возникших одновременно с началом практического освоения космического пространства в конце 1950-х годов, стала проблема обеспечения многократного запуска жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) космических аппаратов (КА), верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков в условиях, близких к невесомости.

Возможность многократного запуска ЖРД в условиях, близких к невесомости, представляет проблему, поскольку жидкое топливо, как

и любые предметы в невесомости, хаотически располагается внутри баков и не будет поступать в систему питания двигателя при отсутствии силы тяжести, если не предпринимать специальных мер или не использовать специальные технические устройства.

Среди всех известных технических устройств и способов, обеспечивающих многократный запуск ЖРД в условиях, близких к невесомости, одно из первых мест по распространенности занимают внутрибаковые устройства (ВБУ) на основе так называемых капиллярных фазоразделителей (КФР).

Принцип работы этих устройств заключается в том, что для предотвращения прорыва газа наддува в расходные магистрали топливных баков при запуске ЖРД в невесомости используют силы поверхностного натяжения (капиллярные силы), значение которых тем больше, чем меньше характерный размер ячеек КФР.

В качестве материала для изготовления КФР до недавних пор использовали металлическую вязаную (плетеную) проволочную сетку различного плетения с размерами ячеек от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. Главный недостаток таких устройств — их большое гидравлическое сопротивление и, как следствие, потребность в повышенных значениях давления наддува.

Кроме того, проволочная плетеная сетка — материал гибкий и в условиях действия вибраций и других внешних возмущений, возникающих при работе ЖРД, может не справляться с функцией сепарации жидкости и газа. Наконец, если газ наддува все-таки проходит через КФР на основе плетеных проволочных сеток, эти устройства перестают работать.

В начале 1990-х годов коллектив специалистов НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, продолжая и развивая идеи научной школы профессора В.М. Поляева по применению пористых материалов из металлических сеток, разработал уникальную технологию изготовления нового вида КФР на основе так называемых комбинированных пористо-сетчатых материалов (КПСМ).

В настоящее время КПСМ широко применяются в качестве элементов КФР, которые в этом случае заметно превосходят по характеристикам КФР на основе плетеных проволочных сеток.

Вместе с тем оценка работоспособности КФР 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.

Для решения этой задачи требуется проведение объемного цикла теоретических и экспериментальных исследований по изучению как

поведения жидкого топлива в баках ЛА в условиях полета, так и режимов работы выбранного варианта конструкции КФР.

Окончательную оценку эффективности выбранного варианта конструкции КФР на основе КПСМ, подтверждающую его работоспособность, выполняют по результатам расчетно-экспериментальных работ, включающих наземную экспериментальную отработку, которую можно охарактеризовать как доводочные испытания с использованием методов физического моделирования [1, 2]. Доводочные испытания КФР на основе КПСМ следует проводить в два этапа: 1) исследовательские испытания; 2) контрольные испытания.

Рассмотрим содержание исследовательских испытаний.

Физическое моделирование внутрибаковых гидродинамических процессов основано на использовании широко применяющейся в физическом эксперименте теории гидродинамического подобия [3]. Как известно, согласно этой теории, два процесса считают подобными, если обеспечиваются три условия:

1) геометрическое подобие — линейные размеры, площади и объемы этих объектов находятся в соотношении

$$\frac{l_M}{l_H} = \pi_l; \quad \frac{S_M}{S_H} = \pi_l^2; \quad \frac{V_M}{V_H} = \pi_l^3,$$

где π_l — геометрический линейный масштаб моделирования, а индексы «м» и «н» присваиваются значениям параметров для модели и природы соответственно;

2) кинематическое подобие — в сходственных точках природы и модели направления векторных параметров, описывающих процесс, одинаковы в сходственные моменты времени, находящиеся в соотношении

$$\frac{t_M}{t_H} = \pi_t,$$

где π_t — масштаб моделирования времени;

3) динамическое подобие — силы, действующие в сходственных точках модели и природы, в сходственные моменты времени находятся в соотношении

$$\frac{f_M}{f_H} = \pi_f,$$

где π_f — масштаб моделирования силы.

Движение жидкого топлива в баках ЛА подвержено действию различных сил, к которым относятся массовые силы (силы инерции,

силы тяжести), поверхностные силы (силы поверхностного натяжения, силы давления), силы вязкого трения и т. д. Каждая из этих сил выражается через некоторые физические величины, характеризующие природу сил и физические свойства жидкостей (размерные коэффициенты и параметры). Условия гидродинамического подобия натурального и модельного процессов требуют, чтобы отношения всех сил в сходственных точках модели и натуре в сходственные моменты времени (для нестационарных процессов и процессов с изменяющейся во времени формой свободной поверхности жидкости) были одинаковы и равны π_f .

Однако вследствие физических особенностей сил, действующих на жидкость, выполнить условие $\pi_f = \text{idem}$ одновременно для всех сил практически невозможно. В общем случае для внутрибаковых гидродинамических процессов, сопровождающих опорожнение топливных баков ЛА и характеризующихся наличием изменяющихся во времени формы и положения границы раздела жидкость — газ, приведение к безразмерному виду уравнений Навье — Стокса с соответствующими граничными условиями дает следующие безразмерные комплексы, которые характеризуют соотношения соответствующих сил [3]:

Число Фруда $Fr = \frac{U^2}{al}$ — отношение конвективных сил инерции к силам тяжести. Здесь U — характерная скорость жидкости (например, скорость опорожнения бака); l — характерный размер (в качестве характерного размера может выступать, в частности, диаметр сливной магистрали); a — ускорение, действующее на жидкость.

Число Рейнольдса $Re = \frac{Ul}{\nu}$ — отношение конвективных сил инерции к силам вязкого трения, где ν — коэффициент кинематической вязкости.

Число Бонда $Bo = \frac{\rho al^2}{\sigma}$ — отношение массовых сил к силам поверхностного натяжения, где σ и ρ — соответственно коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкости.

Число гомохронности $Ho = \frac{Ut}{l}$ — отношение локальных сил инерции к конвективным силам инерции (появляется в нестационарных процессах и процессах с переменными во времени формой и положением поверхности раздела жидкость — газ).

Поскольку одновременное выполнение условия $Fr = \text{idem}$, $Re = \text{idem}$ и $Bo = \text{idem}$ практически невозможно, то при решении

конкретных задач стремятся найти так называемые условия приближенного подобия. Эти условия характеризуются тем, что можно пренебречь влиянием каких-либо сил (например, силами поверхностного натяжения или силами вязкого трения), а также тем, что в некоторых случаях реализуется режим автомодельности по какому-либо критерию подобия.

В первую очередь это касается критерия Рейнольдса. Дело в том, что, как правило, режимы опорожнения топливных баков соответствуют области так называемой турбулентной автомодельности, т. е. натурные значения числа Re существенно больше 10^4 . Поэтому необходимость в соблюдении условия $Re_n = Re_m$ ($Re = idem$) отпадает, достаточно лишь того, чтобы выполнялось условие $Re_m > 10^4$.

Для процессов, в которых влияние сил поверхностного натяжения оказывается преобладающим по сравнению с влиянием других сил (в частности, для процессов опорожнения топливных баков в условиях, близких к невесомости), подобие гидродинамических процессов, сопровождающих опорожнение топливных баков ЛА, можно обеспечить выполнением условия [4]

$$We = idem; No = idem, \quad (1)$$

где число Вебера $We = Fr \cdot Bo = \frac{\rho U^2 l}{\sigma}$.

Таким образом, параметры модельных процессов, а также режимы и условия моделирования в первом приближении следует определять на основании условия (1). При этом, однако, необходимо иметь в виду, что геометрическое подобие ячеек КФР обеспечить практически невозможно вследствие их чрезвычайно малых (порядка 40... 60 мкм) размеров и непредсказуемости геометрии.

В связи с этим при любых экспериментальных исследованиях внутрибаковых гидродинамических процессов с применением методов теории подобия всегда приходится решать вопрос, как учесть то обстоятельство, что в моделях внутрибаковых устройств на основе КФР используется так называемый натуральный образец КПСМ.

Отвечая на этот вопрос, отметим, что работоспособность КФР при работе в режиме сепарации газожидкостных сред определяют по условию [5]

$$\Delta p_{\text{кап}} \geq \Delta p_m, \quad (2)$$

где $\Delta p_{\text{кап}} = \frac{4\sigma}{d_3} \cos \alpha$ — капиллярная удерживающая способность (КУС) КПСМ; σ — коэффициент поверхностного натяжения компонента топлива на поверхности раздела жидкость — газ; d_3 — экви-

валентный диаметр ячейки КПСМ; α — краевой угол (угол смачивания) на границе раздела жидкость — газ — твердое тело для компонента жидкого топлива и образца КПСМ. Для большинства компонентов жидкого топлива, за исключением гидразина, и исходных материалов, используемых при получении КПСМ, значение α можно считать близким к нулю; $\Delta p_m = \zeta_m \frac{\rho u^2}{2}$ — потери давления при прохождении жидкости по нормали к поверхности КПСМ; ζ_m — коэффициент гидравлического сопротивления КПСМ; ρ — плотность жидкости; u — скорость потока по нормали к поверхности образца КПСМ. В общем случае коэффициент $\zeta_m = E + F Re^{-1}$, где $Re = \frac{ud_3}{\nu}$ — число Рейнольдса; ν — кинематическая вязкость жидкости. Коэффициенты E и F определяют экспериментально путем проливок образцов КПСМ.

Иначе говоря, элемент КПСМ сохраняет сепарирующую способность при условии, что $KUC > \Delta p_{местн}$ для фиксированного значения ζ_m . Условие (2) можно записать в виде

$$\frac{KUC}{\Delta p_{местн}} > 1,0. \quad (3)$$

Режим работы КПСМ в процессе сепарации газожидкостных сред определяется, с одной стороны, числом Рейнольдса

$$Re = \frac{ud_{эКВ}}{\nu},$$

от которого зависит коэффициент гидравлического сопротивления образца КПСМ и, следовательно, числовое значение $\Delta p_{местн}$, а с другой, — числом Вебера

$$We = \frac{\rho u^2 d_{эКВ}}{\sigma},$$

которое характеризует KUC.

Введем понятие коэффициента работоспособности элемента КПСМ ω для режима сепарации газожидкостных сред. Тогда, согласно (3), условие работоспособности элемента КПСМ при работе в режиме сепарации газожидкостных сред можно записать в виде

$$\omega = \frac{KUC}{\Delta p_{местн}} > 1,0 \vee \frac{Re}{We} > \left(\frac{Re}{We} \right)_{\min}, \quad (4)$$

где $(Re/We)_{\min}$ — предельное минимально возможное значение параметра Re/We во всем возможном диапазоне изменений этого параметра при работе элемента КПСМ в режиме сепарации газожидкостных сред.

Для определения числового значения параметра $(Re/We)_{\min}$ в натуральных условиях заметим, что соотношение Re/We может быть выражено как

$$\frac{Re}{We} = \frac{\sigma}{\rho u \nu},$$

где σ , ρ , ν — физические свойства компонента жидкого топлива (поверхностное натяжение, плотность и кинематическая вязкость соответственно); u — скорость потока жидкости по нормали к поверхности элемента КПСМ. Иначе говоря, для данной жидкости минимально возможное значение параметра Re/We будет соответствовать максимальному значению u .

Следовательно, на первом этапе наземной отработки КФР на основе КПСМ стоит задача выбора из всех возможных образцов КПСМ таких, которые удовлетворяют условию (4). Решение этой задачи является содержанием начальной стадии этапа исследовательских испытаний при наземной отработке КФР на основе КПСМ.

На этой стадии используют, во-первых, известные схемы и экспериментальные установки для определения гидравлического сопротивления фильтрующих материалов (экспериментального нахождения числовых значений коэффициентов E и F) и, во-вторых, установки для определения КУС, например, аналогичные установкам для определения точки пузырька мембран [6].

Вопрос о корректном переносе результатов модельных испытаний на натурные условия, когда в моделях ВБУ на основе КФР используют так называемый натуральный образец КПСМ, считают решенным, если выполнено требование $K_{\text{м}} \geq K_{\text{н}}$, где индексы «м» и «н» относятся соответственно к модельному и натурному значениям параметра $K = (Re/We)_{\min}$. Таким образом, исследовательским испытаниям подвергают модели КФР и (или) их элементы (образцы КПСМ), установленные в моделях топливных баков и (или) моделях элементов топливных баков.

Следующим этапом наземной экспериментальной отработки выбранного варианта конструкции КФР являются контрольные испытания. В соответствии с базовыми положениями теории подобия контрольным испытаниям в общем случае следует подвергать модели топливных баков с КФР, полностью воспроизводящие натурные топливные баки в определенном геометрическом масштабе. Однако, поскольку на практике это требование можно обеспечить далеко не

всегда, контрольные испытания КФР допускается проводить на моделях, отдельные элементы которых выполнены в различных геометрических масштабах или отсутствуют, если отступления от полного геометрического подобия не облегчают условия работы КФР и их элементов по сравнению с условиями эксплуатации. Облегченными условиями испытаний моделей КФР по сравнению с условиями эксплуатации считают те условия, при которых затрудняется попадание газа во внутреннюю полость КФР.

В ходе контрольных испытаний определению подлежат параметры работоспособности КФР. Перечень параметров работоспособности КФР, подлежащих определению при испытаниях, устанавливают исходя из конкретных условий работы натурального КФР и его элементов и при необходимости дополняют следующими параметрами:

- удерживающая способность КФР при действии вибраций;
- сепарирующая способность КФР;
- гидравлические остатки во внутренних полостях КФР;
- гидравлические потери на КФР;
- кавитационные режимы работы КФР;
- изменение удерживающей способности КФР при длительном воздействии компонентов ракетного топлива;
- другие параметры работоспособности КФР, обусловленные спецификой условий их эксплуатации.

Оборудование, применяемое при испытаниях КФР, должно обеспечивать:

- воспроизведение моделируемых полей массовых сил и (или) состояния невесомости с изменением во времени по закону, заданному в программе испытаний с требуемой в ней точностью;
- измерение и регистрацию модельных значений внешних воздействующих факторов и параметров, определяющих реализуемые режимы функционирования объекта испытаний, оборудования и аппаратуры;
- регистрацию поведения жидкости в прозрачных моделях топливных баков с КФР.

Для воспроизведения моделируемых полей массовых сил и (или) состояния невесомости следует применять:

- стенды невесомости, на которых состояние невесомости реализуется во время свободного падения объекта испытаний;
- кинематические модели орбитальных средств, обеспечивающие подобие совокупностей ускорений, действующих на натурные баки и их модели;
- динамические устройства, воспроизводящие периодические и аperiodические знакопеременные силы;
- устройства для воспроизведения начального положения модельной жидкости в модели топливного бака с КФР;

- устройства, обеспечивающие воспроизведение закона изменения поля массовых сил во времени, определяемого заданными условиями испытаний;
- устройства для воспроизведения структуры газожидкостной смеси в модели топливного бака с КФР;
- устройства, обеспечивающие расход модельной жидкости из модели топливного бака с КФР;
- другое испытательное оборудование, обеспечивающее воспроизведение заданных условий испытаний.

Примеры схем испытательного оборудования приведены на рис. 1–4. Для регистрации поведения модельной жидкости в прозрачных моделях баков с КФР применяют кино-, фото-, телеаппаратуру и (или) видеозапись.

Испытательное оборудование, используемое при контрольных испытаниях, предназначено для оценки различных параметров работоспособности КФР.

Так, стелды невесомости (см. рис. 1) воспроизводят кратковременную (1,0...10,0 с) продолжительность невесомости. Состояние невесомости реализуется во время свободного падения объекта испытаний. Для уменьшения остаточных ускорений, обусловленных воздействием силы аэродинамического сопротивления на объект испытаний, рабочее пространство стелды может быть вакуумировано.

Для воспроизведения закона изменения во времени поля массовых сил пользуются стелдами с вертикальными направляющими (см. рис. 2). Модель топливного бака с КФР устанавливают на подвижной платформе внутри испытательного контейнера, оснащенного системой измерения, системой теле-, кино-, фоторегистрации, расходным блоком и другими устройствами. Подвижная платформа пе-

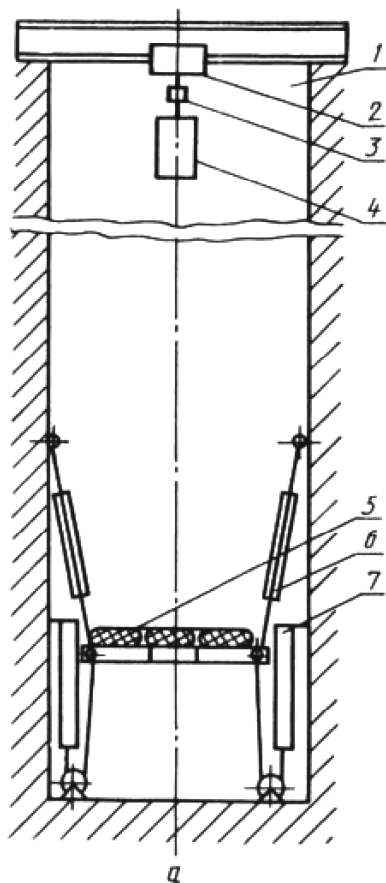


Рис. 1. Стелда невесомости свободного падения:

- 1 — рабочее пространство стелды; 2 — тельфер; 3 — замок сброса; 4 — кинематическая модель КА; 5 — платформа (батут) системы торможения; 6 — амортизатор; 7 — фиксатор платформы

ремещается по вертикальным направляющим. Подвижную платформу гибкими тросами через систему блоков связывают с противовесом, имеющим массу, меньшую, чем масса подвижной платформы, с поршнями газовых демпферов или с инерционными вращающимися барабанами. Характеристики тормозной системы подбирают таким образом, чтобы обеспечить требуемое ускорение движения платформы при ее падении по направляющим.

Для определения удерживающей способности КФР при перепаде статического давления могут быть использованы поворотные устройства (см. рис. 3). Эти устройства должны обеспечивать разворот моделей топливных баков с КФР на угол 2π рад вокруг горизонтальной оси с угловой скоростью до $0,035$ рад/с. Допускается пользоваться в качестве моделей образцами проницаемых экранов КФР. Удерживающую способность КФР или их элементов при действии вибраций допускается определять на вибростендах (вибростолах).

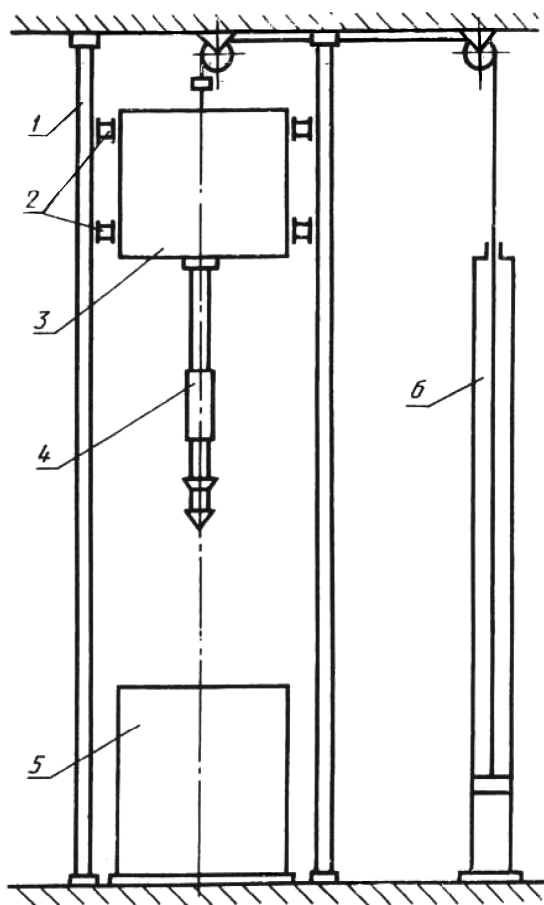


Рис. 2. Стэнд невесомости с направляющими:

1 — направляющие штанги (тросы); 2 — направляющие скобы; 3 — кинематическая модель КА; 4 — тормозное устройство; 5 — приемник тормозного устройства; 6 — демпфер

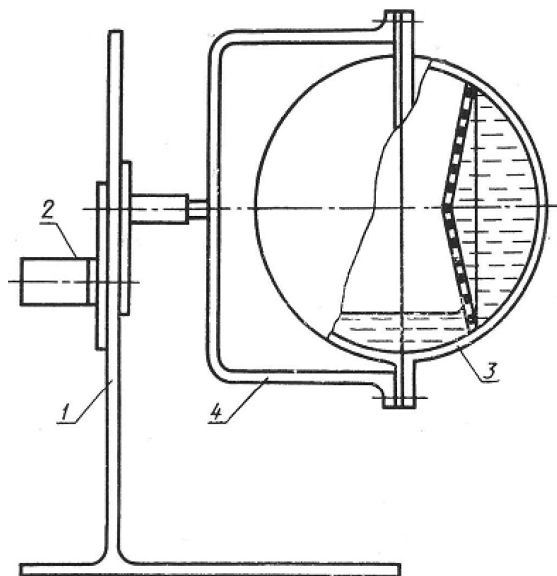


Рис. 3. Поворотное устройство:

1 — стол; 2 — привод; 3 — модель бака с КФР (в качестве материала стенок бака может быть использовано прозрачное бесцветное оргстекло); 4 — силовая рама

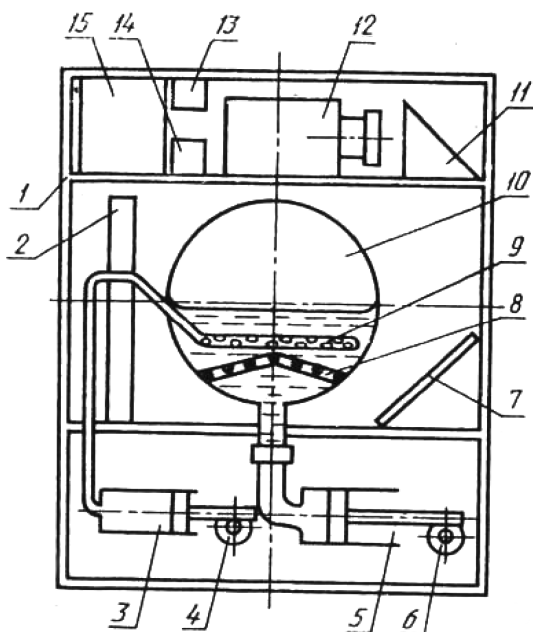


Рис. 4. Схема кинематической модели КА:

1 — силовая рама; 2 — блок освещения; 3 — дозатор газа; 4 — привод дозатора газа; 5 — расходный блок; 6 — привод расходного блока; 7 — зеркало; 8 — проницаемый экран КФР; 9 — трубка ввода газа в модель; 10 — модель бака; 11 — призма; 12 — киноаппарат (телекамера); 13 — датчик ускорения; 14 — датчик угловой скорости; 15 — блок управления и записи параметров

Для моделирования полей массовых сил при испытаниях КФР используют кинематические модели КА или других орбитальных средств (см. рис. 4). В сочетании со стендами невесомости кинематические модели используются для проведения испытаний по определению удерживающей способности КФР при перепаде динамического давления. Кроме того, кинематические модели позволяют обеспечить подобие совокупности ускорений, воздействующих на натурные баки и их модели, и смоделировать процесс опорожнения бака.

Соотношения, которые необходимо использовать для обеспечения условий приближенного подобия при моделировании внутрибаковых гидродинамических процессов, сопровождающих функционирование КФР на основе КПСМ, в процессе контрольных испытаний, можно записать в следующем виде (индексом «м» обозначен модельный параметр, индексом «н» — натуральный) [2].

1. Определение удерживающей способности КФР при перепаде статического давления (действующее на топливо ускорение поля массовых сил постоянно во времени по величине и направлению, расход компонентов топлива из баков отсутствует). Определяющим

критерием подобия является число Бонда $Bo = \frac{\rho a l^2}{\sigma}$, где ρ — плот-

ность жидкости, кг/м^3 ; a — ускорение поля массовых сил; l — характерный геометрический размер, м; σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела газ — жидкость — материал КФР, Н/м. Для моделей топливных баков, оснащенных КФР на основе натуральных образцов КПСМ, используют так называемый модифици-

рованный вид числа Бонда $Bo^* = \frac{\rho a l_6 d_{\text{ЭКВ}}}{\sigma}$, где l_6 — характерный

размер бака, м; $d_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный капиллярный диаметр образца КПСМ. При проведении испытания в условиях действия силы притяжения Земли ($a_M = 9,81 \text{ м/с}^2$) условие приближенного подобия

$Bo^* = \text{idem}$ примет вид

$$\frac{l_M}{l_H} = 0,102 \frac{\rho_H}{\sigma_H} \frac{\sigma_M}{\rho_M} a_H. \quad (5)$$

2. Определение удерживающей способности КФР при перепаде динамического давления (действующее на топливо ускорение поля массовых сил переменено во времени по величине и направлению, закон изменения во времени величины и направления ускорения поля массовых сил задан, расход компонентов топлива из баков отсутствует). Определяющими критериями подобия являются число Бонда

$Bo = \frac{\rho a l^2}{\sigma}$, модифицированное число Рейнольдса $Re^* = \frac{a l}{\nu}$ и число

гомохронности $Но = \frac{at^2}{l}$ (здесь v — кинематический коэффициент вязкости жидкости, m^2/c ; t — характерное время процесса, с).

Для большинства компонентов жидких ракетных топлив и модельных жидкостей выполнение условия полного механического подобия данного режима работы КФР $Во = idem$, $Re^* = idem$ и $Но = idem$ приводит к тому, что размеры модельных баков должны быть близки к размерам натуральных баков или превышать их. В этом случае допускается исключать из перечня определяющих критериев число Re , а геометрический масштаб модели выбирать из условия продолжительности модельного процесса, воспроизводимой экспериментальным оборудованием. Тогда приближенное подобие натурального и модельного процессов может быть обеспечено воспроизведением на модели ускорения поля массовых сил, которое находят по соотношению

$$\frac{a_M}{a_H} = \frac{\rho_H}{\sigma_H} \frac{\sigma_M}{\rho_M} \left(\frac{l_H}{l_M} \right)^2. \quad (6)$$

Продолжительность действия модельных ускорений устанавливают по соотношению

$$\left(\frac{t_M}{t_H} \right)_y = \frac{\sigma_H \rho_M v_M l_M}{\rho_H \sigma_M v_H l_H}, \quad (7)$$

а продолжительность пауз между импульсами модельных ускорений — по соотношению

$$\left(\frac{t_M}{t_H} \right)_п = \sqrt{\frac{\sigma_H \rho_M}{\rho_H \sigma_M} \left(\frac{l_M}{l_H} \right)^3}. \quad (8)$$

При испытаниях моделей, в которых КФР изготовлены из натуральных образцов КПСМ ($d_{ЭКВ}^M = d_{ЭКВ}^H$) в перечне определяющих критериев

число Бонда $Во = \frac{\rho a l^2}{\sigma}$ следует заменить его модификацией

$Во^* = \frac{\rho a l_{6d_{ЭКВ}}}{\sigma}$, в результате чего будут получены следующие соотношения между модельными и натуральными значениями ускорений, их продолжительности действия и пауз между ними:

$$\frac{a_M}{a_H} = \frac{\rho_H}{\sigma_H} \frac{\sigma_M}{\rho_M} \frac{l_H}{l_M}; \quad (9)$$

$$\left(\frac{t_M}{t_H}\right)_y = \frac{\sigma_H \rho_M v_M}{\rho_H \sigma_M v_H}; \quad (10)$$

$$\left(\frac{t_M}{t_H}\right)_n = \sqrt{\frac{\sigma_H \rho_M}{\rho_H \sigma_M}} \left(\frac{l_M}{l_H}\right)^3. \quad (11)$$

3. Определение сепарирующей способности КФР при перепаде динамического давления (действующее на топливо ускорение поля массовых сил переменнo во времени по величине и направлению, закон изменения во времени величины и направления ускорения поля массовых сил, а также расход компонентов топлива из баков заданы).

Критериями, определяющими собственно процесс сепарации газа наддува и компонента жидкого топлива с помощью КФР в условиях наличия расхода топлива из баков, являются, как отмечалось выше, числа Re , We и Fr . В этих комплексах присутствует такой параметр, как скорость потока жидкости по нормали к поверхности элемента КПСМ. Однако на практике в качестве условия однозначности удобнее использовать не скорость, а объемный расход компонента топлива из бака. С учетом этого выражения для критериев (чисел подобия), определяющих условия полного подобия процесса сепарации газа наддува и компонента жидкого топлива, можно записать в виде

$$Re = \frac{V d_{\text{ЭКВ}}}{l^2 v}; \quad We = \frac{\rho V^2 d_{\text{ЭКВ}}}{\sigma l^4}; \quad Fr = \frac{V^2}{a l^4 d_{\text{ЭКВ}}},$$

где V — объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$.

Как правило, обеспечить при испытаниях условие полного подобия ($Re = \text{idem}$, $We = \text{idem}$ и $Fr = \text{idem}$) практически невозможно. Однако в тех случаях, когда натурные значения модифицированного числа Bo^* менее 200, допускается исключать из рассмотрения число Fr . Тогда приближенное подобие при испытаниях моделей, в которых КФР изготовлены из натуральных образцов КПСМ ($d_{\text{ЭКВ}}^M = d_{\text{ЭКВ}}^H$), будет обеспечено соотношениями

$$\frac{l_M}{l_H} = \left(\frac{v_M}{v_H}\right)^2 \frac{\sigma_H \rho_M}{\rho_H \sigma_M}; \quad (12)$$

$$\frac{V_M}{V_H} = \left(\frac{l_M}{l_H}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{\sigma_M \rho_H}{\rho_M \sigma_H}}. \quad (13)$$

Если же модифицированное число Bo для натурн ы равно или более 200, допускается исключать из рассмотрения числа We и Re , и

приближенное подобие при испытаниях моделей, в которых КФР изготовлены из натуральных образцов КПСМ ($d_{\text{ЭКВ}}^{\text{М}} = d_{\text{ЭКВ}}^{\text{Н}}$), будет обеспечено при соотношении

$$\frac{V_{\text{М}}}{V_{\text{Н}}} = \sqrt{\frac{a_{\text{М}} \left(\frac{l_{\text{М}}}{l_{\text{Н}}} \right)^5}{a_{\text{Н}}}}. \quad (14)$$

Таким образом, на сегодняшний день создана теоретическая база для оценки эффективности конструкции КФР на основе КПСМ с подтверждением работоспособности по результатам наземной экспериментальной отработки выбранного варианта конструкции.

Установлены соотношения (5)–(14), которые рекомендовано использовать для обеспечения условий приближенного подобия внутрибаковых гидродинамических процессов, сопровождающих функционирование КФР на основе КПСМ.

Для достижения прорыва и вывода нашей страны на передовые позиции в мировом космическом сообществе по данной проблематике необходимо создание современной экспериментальной базы, основу которой должна составить «башня невесомости».

Учитывая, что при МГТУ им. Н.Э. Баумана в настоящее время существует кооперация наиболее сильных научных коллективов, имеющих значительные теоретические и технологические наработки в указанном направлении, представляется целесообразным строительство такой башни под эгидой и при участии данной кооперации. В этом случае МГТУ им. Н.Э. Баумана сможет выступать в качестве головной организации России по разработке и исследованиям ВБУ на основе КФР.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. ГОСТ 16504–81.
- [2] Корольков А.В., Партола И.С., Сапожников В.Б. Теоретические основы разработки и экспериментальной отработки капиллярных заборных устройств с минимальными остатками топлива. Сб. Научно-технические разработки ОКБ-23 — КБ «Салют». Москва, Воздушный транспорт, 2006, с. 313–319.
- [3] Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Москва, Высшая школа, 1963, 367 с.
- [4] Беляев Н.М. Расчет пневмогидравлических систем ракет. Москва, Машиностроение, 1983, 219 с.
- [5] Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск ЖРД. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, вып. 2(63), 2006, с. 78–88.
- [6] Мембраны полимерные. Метод определения точки пузырька плоских мембран. ГОСТ Р 50516–93.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

В.Б. Сапожников, В.И. Крылов, Ю.М. Новиков, Д.А. Ягодников. 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>

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор, генеральный директор Научно-технического внедренческого центра «Энергетические, информационные, технологические достижения для установок и комплексов космического и оборонного назначения». e-mail: sapojnikov@mail.ru

Крылов Владимир Иванович — канд. техн. наук, генеральный директор Центра высоких технологий в машиностроении при МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: cvtm@power.bmstu.ru

Новиков Юрий Михайлович — канд. техн. наук, начальник отделения Центра высоких технологий в машиностроении при МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: cvtm@power.bmstu.ru

Ягодников Дмитрий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: daj@mx.bmstu.ru