

## Экспериментальное исследование гидродинамических процессов в топливных баках с капиллярными системами отбора жидкости

© А.В. Новиков, А.В. Сухов, Е.А. Андреев

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

*Представлена методика и описано экспериментальное оборудование маятникового стенда для исследования функционирования капиллярных разделителей фаз топливных баков жидкостных ракетных двигательных установок. Указано их отличие от существующих установок, которое заключается в получении однозначных начальных граничных условий в нелинейном диапазоне амплитуд плесканий жидкости и их использовании в топливных баках сложной конфигурации. Рассмотрен принцип работы маятникового стенда с установленным модельным баком жидкости, основанный на эффекте стабилизации зеркала жидкости в положении, нормальном оси подвеса маятника, при его качании. Приведено описание систем измерения и регистрации на основе первичных измерительных преобразователей давления, перепада давления и видеорегистрации. Результаты исследований подтверждают использование экспериментальной установки и методику проведения модельных исследований в процессе разработки внутрибаковых заборных устройств перспективных жидкостных ракетных двигателей.*

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, капиллярные системы отбора жидкости, модельные испытания, невесомость

**Введение.** Одной из задач, решаемых для комбинированного летательного аппарата жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), является обеспечение многократного запуска. Проблема заключается в сплошности жидкости — компонента топлива на входе в заборные магистрали окислителя и горючего. Существуют несколько типов устройств для разделения жидкой и газовой фаз [1] (мешки, сифоны, поршни), центробежные сепараторы, капиллярные системы отбора жидкости. Последние в настоящее время широко распространены. Они просты конструктивно и надежны в работе [2, 3]. Принцип действия таких капиллярных систем основан на удержании жидкого топлива перед заборной магистралью за счет сил поверхностного натяжения, которые возникают в капиллярных каналах сетчатых стенок разделителей фаз. Эффективность капиллярных систем отбора жидкости определяется прежде всего капиллярной удерживающей способностью капиллярных разделителей фаз. Капиллярная удерживающая способность — это максимальный перепад давления, который может воздействовать на сетчатые капиллярные разделители фаз без потери их работоспособности. Удерживающая способность зависит от смачиваемости материала разделителей компонентом топлива, от коэффициента поверхностного натяжения топлива, размеров капилляров (ячеек сетки).

Важная задача, возникающая при проектировании и отработке систем отбора жидкости, — повышение удерживающей способности сетчатых разделителей фаз, внутренние полости которых целиком заполнены жидким компонентом.

К настоящему времени капиллярные системы отбора жидкости, типовыми элементами которых являются совокупности — пучки, решетки и т. д. цилиндрических трубчатых пористых разделителей фаз, используются в составе установок ЖРД разгонных блоков «Бриз-М», «Фрегат», которые используют высококипящие компоненты топлива — азотный тетраоксид и несимметричный диметилгидразин. Для их производства разработаны математические модели и методики проектирования [3, 4], значит есть возможность решения всех основных задач, стоящих перед разработчиками капиллярных систем отбора жидкости.

Вместе с тем для современной ракеты-носителя «Ангара-5» с целью повышения грузоподъемности выводимого комбинированного летательного аппарата на геостационарную орбиту предполагают использовать кислород-водородный разгонный блок тяжелого класса, оснащенный кислород-водородным ЖРД, запуск которого в состоянии невесомости на околоземной орбите обеспечивается капиллярными системами отбора жидкости. Для разработки эффективной конструкции последних необходимы экспериментальные данные о работе элементов этих систем в условиях испарения жидких кислорода и водорода. Однако информация о работе капиллярных разделителей фаз в баках с криогенными компонентами ограничена. В частности, в работе [5] приведено описание ЖРД с установленной капиллярной системой отбора жидкости, обеспечивающей орбитальное маневрирование много-разового космического корабля «Буран».

С учетом необходимости экспериментальных данных о работе разделителей фаз в баках с криогенными компонентами **целью** настоящей статьи является описание разработанной методики экспериментального исследования при имитации воздействия условий полета (невесомости, испарения компонента), характеристик капиллярных разделителей фаз, изготовленных из композитных пористо-сетчатых материалов.

**Описание маятникового стенда.** Цель проектирования капиллярных систем отбора жидкости — обеспечение их надежной и безаварийной работы так, чтобы суммарный перепад давления на сетке капиллярных разделителей фаз не превысил значения капиллярной удерживающей способности в тех областях, где разделитель контактирует по внешней поверхности с газом. Это гарантирует гидравлические магистрали комбинированных летательных аппаратов от попадания в них газа наддува. При этом давление во внутренней полости разделителей формируется под действием ряда факторов —

гидравлического сопротивления материала сетки при фильтрации жидкого компонента и проточного тракта систем отбора при течении в нем жидкости, гидростатического распределения давления под действием перегрузки, вибрационных нагрузок и т. д. Маневры летательного аппарата приводят к интенсивным перемещениям и плесканию жидкого компонента в объеме топливного бака, натеканию плещущейся жидкости на элементы системы ее отбора и смешению жидкости с газом наддува. Работоспособность капиллярной системы отбора жидкости при плесканиях жидкости в баках исследована недостаточно для практического применения. Оценочные расчеты показывают, что в реальных условиях движение жидкости в топливных баках приводит к дополнительной гидродинамической составляющей перепада давления на разделителях фаз систем отбора, отрицательно влияющей на работоспособность разделителей.

Например, оценки на основе анализа данных работы [2] показывают, что пульсации давления в полостях систем отбора жидкости, вызываемые плесканиями жидкости в баках комбинированного летательного аппарата при маневрах, достигают 30 % удерживающей способности разделителей фаз. Это выводит фактор гидродинамического взаимодействия плещущейся жидкости и элементов систем ее отбора в объеме топливного бака в разряд факторов комплексного исследования с целью создания методики расчета пульсаций давления при плесканиях жидкости в баках маневрирующих комбинированных летательных аппаратов. Поэтому актуальны исследования процессов внешнего обтекания цилиндрических капиллярных разделителей фаз и их совокупностей жидким компонентом.

Для исследования процессов плесканий жидкости в топливных баках с капиллярными системами отбора жидкости были разработаны маятниковый стенд и методика эксперимента по физическому моделированию этих процессов (рис. 1). Маятниковый стенд относится к классу гидродинамических экспериментальных установок, реализующих метод свободных колебаний жидкости путем задания отклонения зеркала жидкости.

Принцип работы маятникового стенда основан на известном эффекте стабилизации зеркала жидкости в положение, нормальное оси подвеса маятника, при движении маятника с жидким заполнением. Подвергая полость со стабилизированным зеркалом жидкости некоторому силовому воздействию (ударному торможению, безударному улову при амплитудном отклонении маятника и т. д.), можно реализовать процесс переориентации и свободных колебаний жидкости под действием земного тяготения с четким начальным граничным условием для зеркала жидкости.



Рис. 1. Общий вид маятникового стенда

В этом преимущество маятникового стенда перед альтернативными экспериментальными установками, которые либо не позволяют получить четкие начальные граничные условия в нелинейном диапазоне амплитуд плесканий жидкости (вследствие проявления нелинейных эффектов — вращения и дробления зеркала жидкости), либо не могут быть использованы в топливных баках сложной конфигурации, загроможденных внутрибаковыми устройствами.

Маятниковый стенд включает в себя кинематическую часть, пневмогидросистему, систему управления, систему измерения, ряд сменных модельных емкостей (рис. 2).

Кинематическая часть стенда (рис. 2, а) включает в себя:

- качающуюся часть, состоящую из рабочего участка 1, соединенного жесткой подвеской 2 с шарниром 3;
- подъемное устройство 4 для отклонения качающейся части на заданный начальный угол;
- электромеханический замок 5, служащий для сбрасывания отклоненной качающейся части;
- улавливающее устройство 6 с приводом 7 для безударного улавливания качающейся части или ее торможения с необходимой перегрузкой.

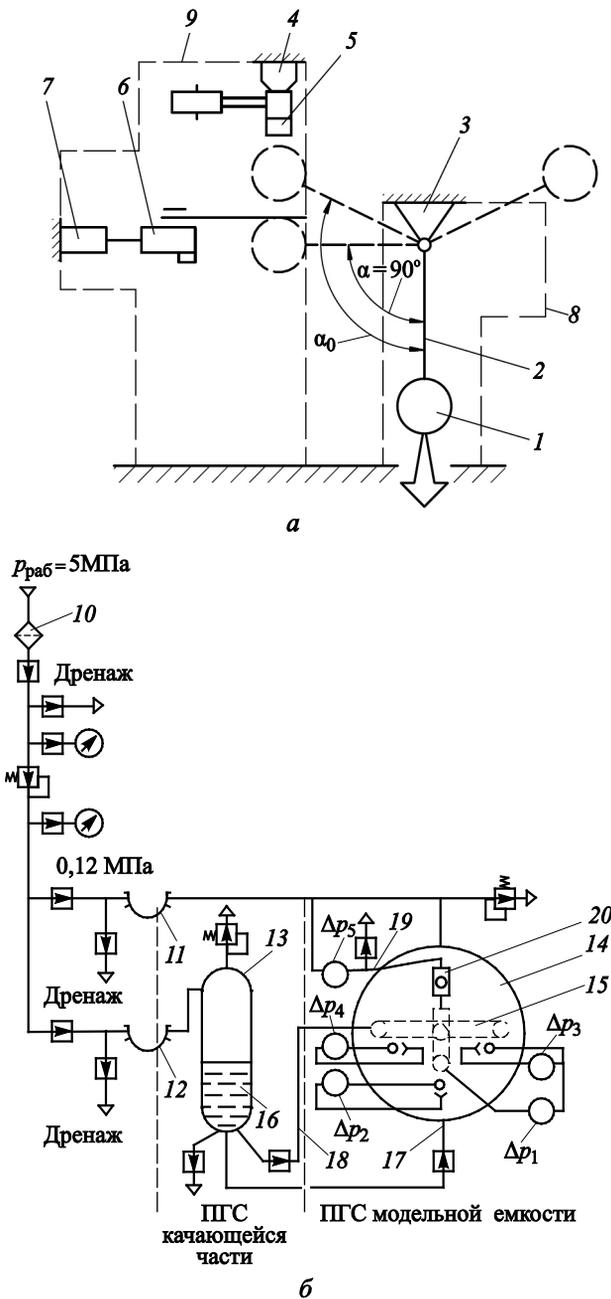


Рис. 2. Кинематическая (а) и пневмогидравлическая (б) схемы маятникового стенда

Элементы кинематической части 1–7 смонтированы на несущей конструкции 8 и колонне 9. В состав рабочего участка 1 входят собственно модельная емкость и частично пневмогидросистема (ПГС) стенда, приведенная на рис. 2, б. Фильтр 10 обеспечивает фильтрацию газа от частиц размером более 5 мкм. Гибкие рукава 11 и 12

служат для выдачи управляющего давления и давления наддува на блок ПГС качающейся части стенда. Блок ПГС качающейся части имеет в своем составе сливную емкость 13 с рабочей жидкостью 16, которая принимает поток газожидкостной смеси, подаваемой из модельной емкости 14 с моделью капиллярного заборного устройства 15 во время эксперимента. Магистраль 17, снабженная обратным клапаном и визуальным датчиком сплошности, подает поток газожидкостной смеси из модельной емкости в емкость 16. Визуальный датчик сплошности, представляющий собой прозрачный канал, снабженный распределительным и сборочным коллекторами для создания равномерного потока, определяет газосодержание потока газожидкостной смеси путем видеорегистрации потока, проходящего щелевой канал визуального датчика сплошности. Толщина щелевого канала этого датчика определялась из характерного размера газового включения в потоке газожидкостной смеси так, чтобы отдельные газовые включения в канале не перекрывали друг друга.

Магистраль 18 служит для отбора жидкости из модели капиллярного заборного устройства 15. Регулятор расхода 11 и турбинный датчик расхода 12 регулируют и измеряют значения расхода жидкости. Магистралы 19 и прозрачная трубка 20 служат для заправки полости модели заборного устройства 17 модельной жидкостью и сигнализации сплошности жидкости в этой модели 19 (контроля отсутствия газовых включений в полости заборного устройства при подготовке к эксперименту и в ходе эксперимента).

Пульт управления ПГС предназначен для создания давления газа, необходимого для работы систем стенда, посредством редуцирования газа (воздуха) высокого давления редукторами и коммутации потоков сжатого газа электропневмоклапанами и вентилями. Электрическая система стенда подает и снимает команды на срабатывание исполнительных элементов кинематической части стенда и его ПГС, а также на включение и выключение регистрирующей аппаратуры системы измерений.

Система измерений стенда обеспечивает измерение, индикацию и регистрацию параметров процесса во всем диапазоне их изменения. Блок измерения давлений и перепадов давлений содержит два канала измерения давлений и семь каналов измерения перепадов давлений.

Основную информацию о процессах в полости модельной емкости (колебаниях жидкости, дробления газовой подушки, сепарации пузырей и т. д.) несет видеорегистрация процессов полости емкости 14 и визуального датчика сплошности.

При проведении экспериментальных исследований на маятниковом стенде могут быть реализованы режимы работы ПГС стенда как

с расходом жидкости из полости модельной емкости во время эксперимента, так и без расхода.

Исходя из задач экспериментального исследования, системы стенда обеспечивают следующие возможности:

- физическое моделирование плесканий жидкости в приведенной на рис. 3 модели топливного бака с переменной степенью заправки при выполнении начального граничного условия — вертикального неподвижного зеркала жидкости в полости модели топливного бака (запуск двигательной установки системы обеспечения запуска из состояния невесомости с максимальной амплитудой плесканий жидкости);

- работу стенда в ручном и автоматическом режимах;
- замер интересующих параметров процесса.

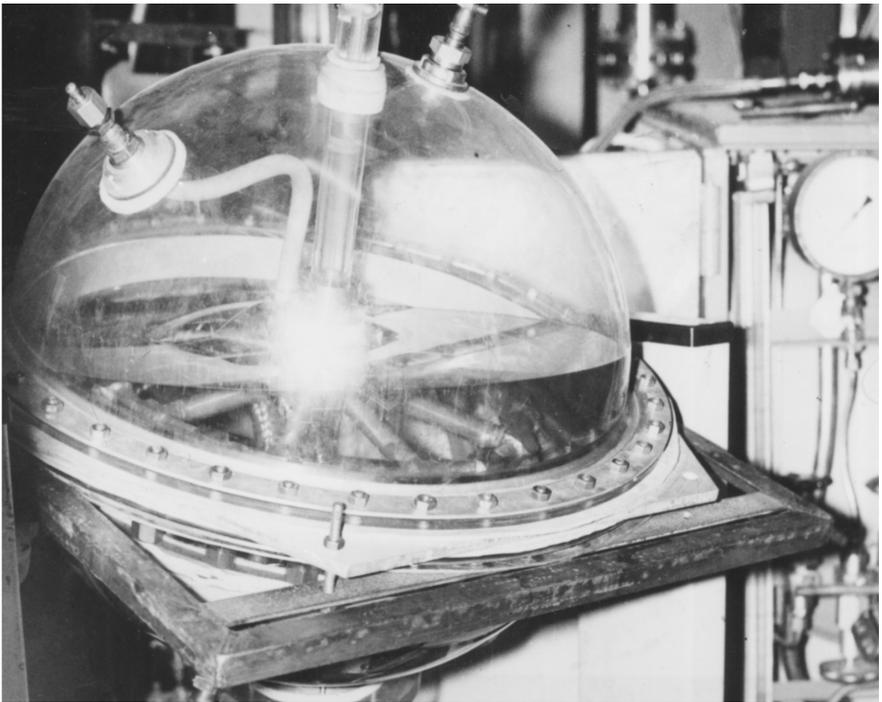


Рис. 3. Общий вид модели топливного бака (масштаб 1:5)

Маятниковый стенд предоставляет также возможность физического моделирования других гидродинамических полетных ситуаций, характерных для топливных систем маневрирующих комбинированных летательных аппаратов: пушечный запуск маршевого двигателя; попеременное включение двигателей ориентации и стабилизации; вход в плотные слои атмосферы.

**Описание моделей топливных емкости и бака.** Маятниковый стенд может быть оснащен модельными емкостями различных типов. Схема плоской модели представлена на рис. 4. Плоская модель пред-

ставляет собой контейнер, полость которого ограничена прямоугольной рамкой 1 и плоскими прозрачными стенками 2. В нижней части модели, где ожидаются максимальные скорости течения жидкости, смонтирован модельный фазоразделитель капиллярного заборного устройства (3), оснащенный двухкомпонентной системой датчиков Пито (трубки 4, 5, 6, 7, 8, 9), расположенных в непосредственной близости от фазоразделителя 3, и системой замера перепада давления «статическое давление в набегающем потоке — давление в полости фазоразделителя». Фазоразделитель 3 крепится на опорной плашке 10.

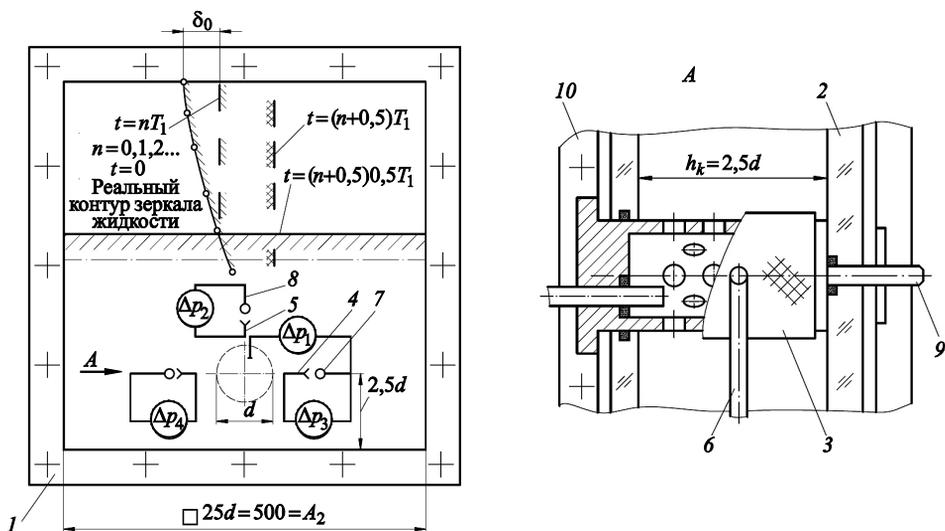


Рис. 4. Схема плоской модели топливной емкости и бака

На рис. 4 также представлены положения зеркала жидкости в характерные моменты времени при переориентации жидкости под действием модельной перегрузки двигательного устройства системы обеспечения запуска с предположением, что при плесканиях жидкости имеет место только основной тон колебаний, зеркало жидкости остается плоским и отсутствует диссипация энергии плещущейся жидкости. На рис. 4 время  $t$  отсчитывается с момента безударного удара качающейся части, за масштаб времени принят период первого тона плоских колебаний жидкости.

Геометрия конструктивно-подобной (масштабной) модели в масштабе 1:5 (рис. 4) полностью определяется геометрией исследуемой конструкции топливного бака. Оболочки модели выполнены прозрачными (из органического стекла), что позволяет вести видеорегистрацию гидродинамических процессов в полости модели. Модельная жидкость — фреон-113 моделирует процессы работы заборных устройств при испарении криогенного компонента топлива.

Особенности кинематики и динамики качания маятника приводят к выводу о том, что, например, по числам Фруда и Галилея моделируются натурные условия, возникающие при работе ЖРД системы обеспечения запусков с перегрузкой 0,05 g. Собственно состояния невесомости здесь нет — в верхней «мертвой» точке траектории модель зависает на мгновение, но при этом жидкость имеет строго плоское положение с зеркалом, перпендикулярным оси подвеса маятника.

**Методика проведения экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования были проведены в следующем порядке:

- модельную емкость со встроенным в ее полости модельным капиллярным разделителем фаз или его блоком монтировали на качающейся части стенда и стыковали с жидкостными и газовыми магистральями ПГС;

- качающуюся часть стыковали замком 5 (см. рис. 2) с подъемным устройством 4 и отклоняли с его помощью на угол  $\alpha = 90^\circ$ ;

- осуществляли заправку модельной жидкостью полости модели и полости капиллярного разделителя фаз; для моделирования испарения компонентов использовали фреон-113;

- качающуюся часть с модельной емкостью отклоняли с помощью устройства 4 на начальный угол  $\alpha_0 > 90^\circ$ ; значение угла  $\alpha_0$  определяли экспериментально так, чтобы скомпенсировать действие на качающейся части диссипативных сил (аэродинамических и трения в подшипниках) за время движения качающейся части и обеспечить к моменту улова качающейся части выполнение условия вертикального неподвижного зеркала жидкости в полости модели;

- качающуюся часть, отклоненную на угол  $\alpha_0$ , освобождали по подаваемому на механический замок 5 сигналу; она совершала несколько свободных затухающих колебаний до стабилизации зеркала жидкости в полости модели, и по команде на привод 7 ее улавливало устройство 6 в момент времени  $t_0$ , когда  $\alpha(t_0) = 90^\circ$ .

Одновременно с подачей команды на замок 5 осуществляется включение регистрирующей аппаратуры системы измерений стенда.

При работе ПГС в режиме с расходом жидкости в момент времени  $t_0$  происходит открытие отсечного клапана и реализуется расход жидкости из полости модельной емкости в емкость 6. Величина расхода настраивается заранее путем регулировки давления наддува модельной емкости и с помощью гидравлического дросселя.

В период времени  $t = t_0 \dots t_0 + t_1$  происходят замер и регистрация параметров процесса переориентации и плесканий жидкости. Необходимая длительность периода  $t_1$  определяется экспериментально

так, чтобы за время  $t_1$  происходило практически полное затухание плесканий жидкости.

По прошествии с момента улова периода времени  $t_1$  происходит отсечка расхода жидкости из полости модельной емкости (при работе ПГС в режиме с расходом жидкости). Регистрация показаний датчиков системы измерений продолжается до выхода показаний на стационарный уровень, после чего регистрирующая аппаратура отключается и осуществляется дренаж полости модельной емкости (если полость была наддута).

При необходимости уменьшить степень заправки модельной емкости осуществляется вытеснение жидкости из полости емкости в сборник газа и сборник жидкости ПГС путем наддува полости модельной емкости, дренажа сборника газа и открытия запорных элементов перепускных гидравлических магистралей ПГС.

**Анализ результатов исследований.** Рассмотрим результаты модельных испытаний, выполненных на плоской модели. На рис. 5 представлены отдельные кадры видеограммы процесса плескания (переориентации) жидкости в полости плоской модели, полученной при съемке с частотой 1000 кадр/с. Отчетливо наблюдается положение зеркала жидкости в разные моменты времени при переориентации под действием модельной перегрузки.



Рис. 5. Видеограмма плескания жидкости в плоской модели. Частота съемки 1000 кадр/с

В серии экспериментов по определению газосодержаний потока жидкости для полного обзора полости модели в окрестности фазоразделителя при видеосъемке из конструкции модели устранена опорная структура, а сам фазоразделитель заменен макетом — сплошным металлическим цилиндром того же диаметра, покрытым слоем тканой металлической сетки.

Газосодержание потока определяли с помощью видеорегистрации цифровой видеокамерой с частой съемки до 1000 кадров в секунду в полости модели и дальнейшей оптико-электронной обработки изображений по методике, аналогичной рассмотренной в работе [6]. Разработанный программный комплекс проводит с высокой разрешающей способностью расшифровку малоконтрастных и полутоновых изображений по степеням оптической плотности.

На рис. 6 представлена характерная структура течения в окрестности макета фазоразделителя по величине  $\psi$ . Среднее объемное газосодержание жидкости в окрестности фазоразделителя определяют путем интегрирования величины  $\psi$  по площади. Равенство величины  $\psi = 100\%$ , выделенное на рис. 5 красным цветом, соответствует состоянию, близкому к максимальному содержанию газовых включений.

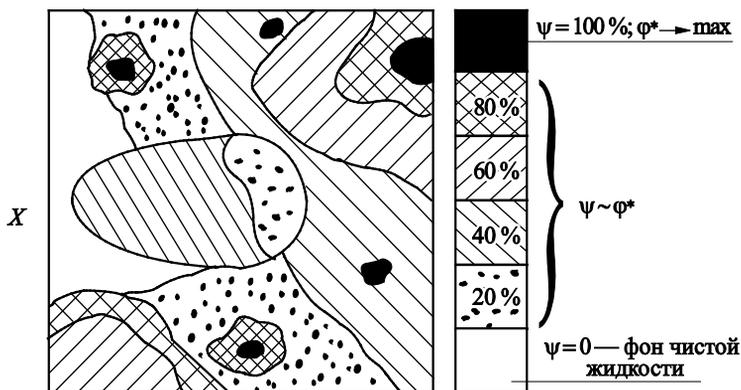


Рис. 6. Характерная структура течения

**Выводы.** Разработанные методика и экспериментальное оборудование маятникового стенда исследуют характеристики функционирования капиллярных разделителей фаз топливных баков ЖРД установок в условиях, моделирующих натурные по величине действующей перегрузки и испарения криогенного компонента топлива. Результаты исследований подтверждают эффективность методики проведения модельных исследований, а также систем регистрации и обработки экспериментальных данных в процессе создания и наземной отработки внутрибаковых заборных устройств перспективных ЖРД.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Основы теории и расчета ЖРД*. В 2 т. Кудрявцев В.М., ред. Москва, Высшая школа, 1993.
- [2] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М. и др. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов*. Москва, УНПЦ «Энергомаш», 1997, 328 с.
- [3] Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М. и др. Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 6 (105), с. 130–142. URL: <http://vestnikmach.ru/catalog/mmach/indmech/1053.html>  
DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-130-142
- [4] Сапожников В.Б., Крылов В.И., Новиков Ю.М., Ягодников Д.А. Наземная отработка капиллярных фазоразделителей на основе комбинированных

пористо-сетчатых материалов для топливных баков жидкостных ракетных двигателей верхних ступеней ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/707.html>

- [5] Семенов Ю.П., ред. *Многоразовый орбитальный корабль «Буран»*. Москва, Машиностроение, 1995.
- [6] Ягодников Д.А., Хомяков И.И., Бурков А.С., Самородов А.В., Артюхова О.А., Яновский Л.С., Суриков Е.В. Скоростная видеосъемка и цифровая обработка изображений выхлопной струи модельного газогенератора на твердом топливе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/709.html>

Статья поступила в редакцию 03.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новиков А.В., Сухов А.В., Андреев Е.А. Экспериментальное исследование гидродинамических процессов в топливных баках с капиллярными системами отбора жидкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-01-1576>

**Новиков Артур Витальевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований течения жидкости и газа в сложных структурных средах. e-mail: [kafedra-e1@yandex.ru](mailto:kafedra-e1@yandex.ru)

**Андреев Евгений Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области двухфазных течений в газовом тракте ракетных двигателей и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. e-mail: [kafedra-e1@yandex.ru](mailto:kafedra-e1@yandex.ru)

**Сухов Алексей Васильевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области горения металлосодержащих энергетических конденсированных систем и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. e-mail: [kafedra-e1@yandex.ru](mailto:kafedra-e1@yandex.ru)

# Experimental study of hydrodynamic processes in propellant tanks with capillary systems of fluid extraction

© A.V. Novikov, A.V. Sukhov, E.A. Andreev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper considers the procedure and specification of the experimental pendulous stand equipment used for studying capillary phase separators in propellant tanks of liquid-fuel rocket engines, which differ from the existing ones as it gives the opportunity to obtain unambiguous initial boundary conditions in the nonlinear range of sloshing amplitudes. It can also be used in complex propellant tanks. We analyze the operating principle of the pendulous stand with a mounted model liquid tank based on the effect of stabilizing the liquid surface in an upright attitude to the pendulum-supported axis during its oscillation. The description of measuring and recording systems is given based on the initial measuring pressure converters, delta pressure and video recording. The obtained results confirm the possibility of using both the experimental equipment and the model investigation procedure for designing inboard tank intakes of the prospective liquid-fuel rocket engines.*

**Keywords:** liquid-fuel rocket engines, capillary systems of fluid extraction, model tests, weightlessness

## REFERENCES

- [1] Kudryavtsev V.M., ed. *Osnovy teorii i rascheta ZhRD* [Fundamentals of theory and calculation of liquid rocket engines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1993.
- [2] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyayev V.M., et al. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Capillary systems of liquid selection from spacecraft tanks]. Moscow, UNPTs "ENERGOMASH" Publ., 1997, 328 p.
- [3] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., etc. *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. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-130-142
- [4] Sapozhnikov V.B., Krylov V.I., Novikov Yu.M., Yagodnikov D.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/707.html> (accessed November 28, 2016).
- [5] Semenov Yu.P., ed. *Mnogorazovyy orbitalnyy korabl "Buran"* [Reusable orbiter "Buran"]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995.
- [6] Yagodnikov D.A., Khomyakov I.I., Burkov A.S., Samorodov A.V., Artyukhova O.A., Yanovskiy L.S., Surikov E.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/709.html> (accessed November 28, 2016).

**Novikov A.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include experimental and theoretical studies of fluid flow and gas in complex structural environments. e-mail: [kafedra-e1@yandex.ru](mailto:kafedra-e1@yandex.ru)

**Sukhov A.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include combustion of metal-containing energetic condensed systems and methodologies for diagnosis of operating processes in rocket and jet engines. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

**Andreev E.A.**, Cand. Sci. (Eng.), Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include two-phase flows in the gas path of rocket engines and the diagnosis methodology of operating processes in rocket and jet engines. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru