

Экспериментальная оценка невырабатываемых остатков топлива в баках с внутрибаковыми устройствами капиллярного типа для двигательных установок космических аппаратов

© В.Б. Сапожников¹, А.Р. Полянский¹, А.В. Корольков²,
С.Б. Константинов³, Л.Г. Александров³

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, 141005, Россия

³ АО «НПО Лавочкина», Химки, 141400, Россия

Исследованы процессы опорожнения топливных баков с внутрибаковыми устройствами капиллярного типа, установленных на жидкостных ракетных двигательных установках космических аппаратов. Представлены результаты экспериментальных исследований этих процессов на заключительных этапах свободного (невозмущенного) полета. На основании анализа процесса опорожнения сформирована структура безразмерных комплексов, определяющих зависимость невырабатываемых остатков топлива от физических свойств топлива и параметров внутрибаковых устройств капиллярного типа. Экспериментальные исследования проводились на башне невесомости, реализующей условия пониженной весомости при свободном падении испытываемого оборудования. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что основным критерием, определяющим величину невырабатываемых остатков топлива, является число Фруда. Получено критериальное уравнение для определения объема невырабатываемых остатков топлива. Установлено, что влияние вязкости и поверхностного натяжения топлива на величину невырабатываемых остатков начинает сказываться при значениях чисел Фруда, превышающих 10^4 .

Ключевые слова: жидкостная ракетная двигательная установка, топливный бак, невесомость, опорожнение, внутрибаковые устройства капиллярного типа, экспериментальные исследования

Введение. Внутрибаковые устройства капиллярного типа (ВБУ КТ) при объемах топливных баков (ТБ), превышающих сотни литров, к настоящему времени считают наиболее перспективными для решения проблемы обеспечения многократного запуска жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) космических аппаратов (КА) с минимальными объемами невырабатываемых остатков топлива в баках в условиях, близких к невесомости [1–6].

Применение ВБУ КТ стало более целесообразным с появлением разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством В.М. Поляева конструкционных материалов нового типа для ВБУ КТ, получивших название комбинированных пористо-сетчатых мате-

риалов (КПСМ) [7]. Именно такого типа материалы предложено использовать в конструкции ВБУ КТ двигательных установок перспективных КА для обеспечения длительного срока их активного функционирования.

Целью работы является получение эмпирических формул для определения объема невырабатываемых остатков топлива при использовании ВБУ КТ в условиях длительного орбитального полета.

Типовая двигательная установка с ВБУ КТ. В качестве базой для комплектации КА различного назначения с длительным сроком активного функционирования рассматривается типовая двигательная установка с ВБУ КТ. Система подачи топлива — вытеснительная. Вид топлива — двухкомпонентное жидкое ракетное топливо, окислитель — АТИН, горючее — НДМГ. Газ наддува — гелий. Жидкие компоненты топлива хранят в нескольких сферических баках с внутренним диаметром 784 мм, выполненных из сплава алюминия и магния (рис. 1). Внутренний объем каждого топливного бака $0,252 \text{ м}^3$.

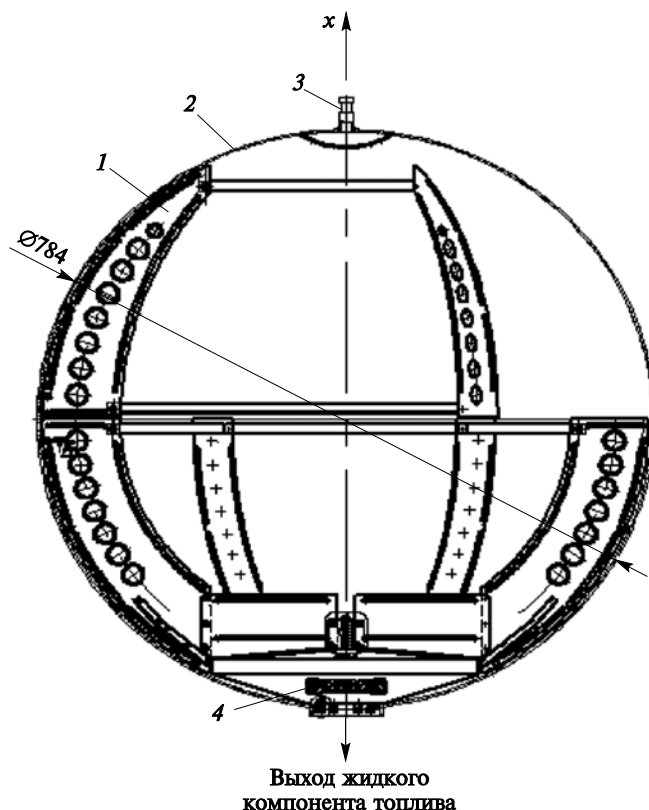


Рис. 1. Топливный бак:

1 — перфорированная перегородка; 2 — корпус бака;
3 — штуцер для подвода газа наддува; 4 — фильтр в сборе

Как правило, такую двигательную установку комплектуют набором ЖРД малой тяги (МТ), выполняющих функции доразгона КА после отделения от разгонного блока, коррекции траектории, ориентации, стабилизации и создания предпусковой перегрузки. Значение силы тяги отдельных ЖРД МТ в составе комплекта может находиться в диапазоне 10...400 Н. С учетом достигнутых к настоящему времени значений удельного импульса для отечественных ЖРД МТ объемный расход q_0 компонентов топлива из каждого бака при работе ЖРД МТ в зависимости от числа одновременно работающих двигателей может составлять от $4 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

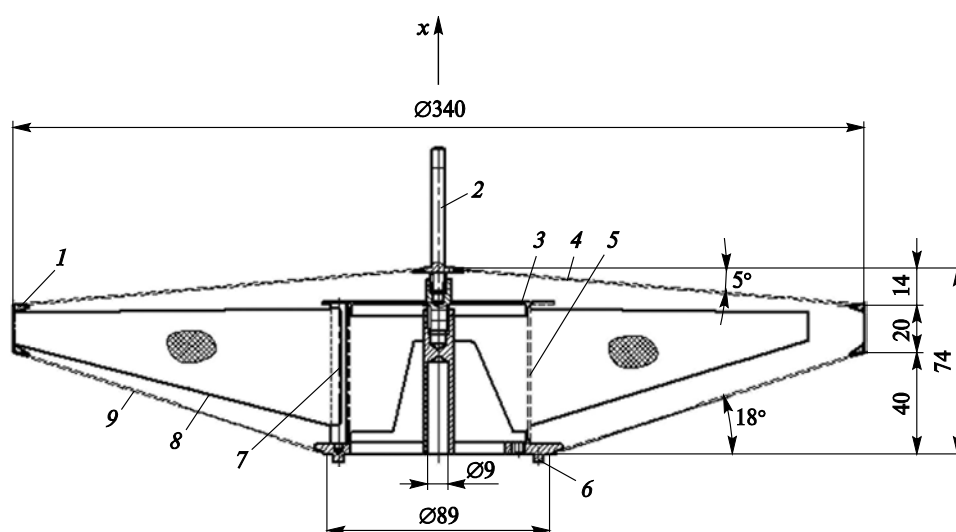


Рис. 2. Схема фильтра-сепаратора:

1 — корпус; 2, 7 — стойки; 3 — крышка; 4, 5, 9 — проницаемые экраны, выполненные из КПСМ; 6 — опора; 8 — перегородка, выполненная из КПСМ

Основным узлом ВБУ КТ в таком баке является фильтр-сепаратор (рис. 2). Именно в этом узле или в зоне вокруг него локализуются остатки компонента топлива на заключительных этапах жизненного цикла КА. Очевидно, что с точки зрения минимизации невырабатываемых остатков топлива наиболее критичными будут режимы, при которых расход компонентов топлива из баков близок к максимальному, а направление вектора силы тяги препятствует приливу топлива к зоне расходной магистрали.

Постановка задачи, описание экспериментальных установок и методики проведения экспериментов. В настоящей работе выполнена экспериментальная оценка объема невырабатываемых остатков топлива при малом (не более 0,03) коэффициенте заполнения ТБ при работе ЖРД МТ с максимально возможным расходом топлива в

условиях свободного орбитального полета и действия отрицательной перегрузки. Эксперименты проводились на башне невесомости, подробное описание которой и характеристики применяемой в экспериментах измерительной и регистрирующей аппаратуры приведены в работе [8].

С учетом технических возможностей башни невесомости физическое моделирование процессов опорожнения ТБ, представленного на рис. 1, проводилось с использованием геометрически подобной модели фрагмента нижней части бака, выполненной в масштабе 1:3,67. Указанная модель изготовлена из оптически прозрачного материала (оргстекла) и снабжена моделью фильтра-сепаратора, также выполненной в масштабе 1:3,67 (рис. 3).



Рис. 3. Модель фрагмента бака с ВБУ

Диаметр расходной магистрали этой модели 3 мм. В качестве модельных жидкостей были выбраны ректификованный гидролизный технический этиловый спирт сорта «Экстра» по ГОСТ Р 55878–2013 (А), 40%-ный водный раствор этилового спирта (В) и дистиллированная вода двойной дистилляции (С). Физические свойства модельных жидкостей приведены в табл. 1 [9].

Таблица 1

Физические свойства модельных жидкостей при температуре 20 °С

Модельная жидкость	Плотность ρ , кг/м ³	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Удельное поверхностное натяжение $\sigma/\rho \cdot 10^6$, м ³ /с ²
А	800,6	1,51	28,48
В	940,0	3,09	33,51
С	1000,0	1,0	72,90

Такой набор модельных жидкостей позволяет выявить влияние чисел Рейнольдса Re и Вебера We на процесс опорожнения баков, если это влияние существенно. В частности, диапазон изменения удельного поверхностного натяжения составляет $(11...57) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}^2$, а диапазон изменения кинематической вязкости — $(0,34...3,10) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

В соответствии с задачами исследования наиболее критичными являются следующие условия работы ВБУ КТ:

- начальное заполнение натурального бака $V_0 = 7,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$;
- максимальный объемный расход компонента топлива $q_0 = 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$;
- ускорение, действующее на топливо в баках, $a = 5,88 \cdot 10^{-2} \text{ м}/\text{с}^2$;
- диаметр расходной магистрали натурального бака $d_0 = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Известно [10], что, как правило, приближенное подобие гидродинамических процессов опорожнения топливных баков КА можно обеспечить выполнением условия

$$Fr = \text{idem}; \quad Ho = \text{idem}, \quad (1)$$

где Fr — число Фруда; Ho — число гомохронности, определяющее остатки топлива в баке в сходственные моменты времени.

Таким образом, параметры модельных процессов, режимы и условия моделирования в первом приближении будем определять на основании условия (1), а влияние таких критериев, как число Вебера и число Рейнольдса, следует оценить отдельно.

Поскольку в качестве определяющего критерия принято число Фруда, для заданного геометрического масштаба π_l (в нашем случае $\pi_l = 1:3,67$), согласно условию (1), имеем

$$\pi_q = \pi_a^{1/2} \pi_l^{5/2}; \quad \pi_t = \pi_l^3 \pi_q^{-1}, \quad (2)$$

где $\pi_q = q_m/q_n$, $\pi_a = a_m/a_n$ — масштабы объемного расхода топлива и ускорения соответственно (индекс «м» относится к модельному процессу, «н» — к натурному); π_t — масштаб времени.

Таким образом, натурное значение числа Фруда составляет 8.

Число Фруда рассчитывалось по формуле $Fr = \frac{q_0^2}{ad_0^5}$.

Эксперименты по моделированию процесса опорожнения ТБ с ВБУ КТ были проведены как в условиях действия ускорения свободного падения, так и на башне невесомости. При этом значение a изменялось в диапазоне от 9,81 до 0,098 $\text{м}/\text{с}^2$. Результаты

расчетов модельных параметров в соответствии с условием (2) при $\pi_a = 1,67 - 166,7$ и $\pi_l = 0,275$ приведены ниже:

π_q	0,05–0,50
q_M	0,439–4,39 см ³ /с
π_t	0,40–0,04
t_M	24,0–2,4 с

Здесь t_M — время моделирования процесса опорожнения.

Вместе с тем в нашем случае представляется оправданным не ограничиваться реализацией точечных значений модельных расходов. Поскольку полное подобие модельного и натурального процессов обеспечить не удастся (не моделируются силы вязкого трения и силы поверхностного натяжения), необходимо выявить степень влияния данных сил на процесс опорожнения баков. Поэтому экспериментальные исследования динамики процесса опорожнения и определения величины невырабатываемых остатков топлива были проведены в широком диапазоне чисел Фруда, Вебера и Рейнольдса для различных жидкостей и при разных начальных заполнениях моделей ТБ.

Эксперименты проводились по следующей методике. Модель фрагмента бака устанавливалась на борту сбрасываемого испытательного контейнера. Начальное заполнение модели фрагмента бака составляло 30...240 см³. Далее с использованием шаров-баллонов со сжатым воздухом устанавливалось давление наддува модели бака в диапазоне 50...150 кПа. Контейнер, подвешенный в направляющих тросах, фиксировался в зоне площадки обслуживания. Далее эксперимент проходил по следующей циклограмме:

- в момент $t = t_0$ подавался сигнал на включение освещения (подсветки) модели;
- при $t = t_0 + 0,2$ с включался механизм протяжки светолучевого осциллографа;
- при $t = t_0 + 0,3$ с подавалось питание на двигатель киноаппарата;
- при $t = t_0 + 0,35$ с срабатывал электромагнит замка и контейнер начинал свободное падение по направляющим тросам;
- при $t = t_0 + 0,4$ с подавалось питание на электромагнитный клапан, установленный на расходной магистрали, и начинался процесс слива.

В момент, когда газ наддува проходил в расходную магистраль, с помощью датчика сплошности фиксировался объем слитой жидкости.

Эксперименты по сливу в условиях действия ускорения свободного падения проводились по аналогичной методике, но без сбрасы-

вания контейнера (питание на электромагнит замка не подавалось). При обработке экспериментальных данных фиксировались следующие параметры:

- время прорыва газа в расходную магистраль;
- остаточное ускорение;
- давление наддува;
- объем жидкости, слитой из модели к моменту прорыва газа.

Результаты экспериментов. В соответствии с изложенной методикой было выполнено 10 серий экспериментов по физическому моделированию процесса опорожнения ТБ с ВБУ КТ. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты физического моделирования процесса опорожнения ТБ с ВБУ КТ

Номер серии эксперимента	Модельная жидкость	Расход жидкости*, см ³ /с	Объем жидкости, см ³		Время прорыва, с	Пере-грузка g	Относительный конечный объем жидкости* ε _к
			началь-ный	конеч-ный			
1	A	19	70	49	1,1	0,02	0,006
2		23	70	65	0,22	0,02	0,008
3		15	70	45	1,67	0,02	0,0055
4		40	150	25	3,125	1,0	0,003
5	B	16	240	220	1,25	0,01	0,027
6		25	240	235	0,20	0,01	0,029
7		13	240	65	13,46	1,0	0,008
8	C	15	30	8	1,47	0,02	0,001
9		13	30	10	1,54	0,01	0,0012
10		16	120	4	7,25	1,0	0,0005

*Осредненные значения.

В табл. 3 и на рис. 4 приведены результаты обработки физического моделирования процесса опорожнения ТБ с ВБУ КТ. Относительный приведенный объем остатка топлива в баке на момент прорыва газа в расходную магистраль рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{W_{\text{ост}}}{W_{\text{б}}} \frac{\sigma D_{\text{эф}}}{\rho \nu^2},$$

где $W_{\text{ост}}$ — объем остатка жидкости в баке на момент прорыва газа в расходную магистраль; $W_{\text{б}}$ — объем бака; σ — коэффициент поверхностного натяжения; $D_{\text{эф}}$ — эффективный диаметр поры КПСМ; ρ — плотность жидкости; ν — коэффициент кинематической вязкости.

**Результаты обработки физического моделирования процесса опорожнения
ТБ с ВБУ КТ**

Номер серии эксперимента	Модельная жидкость	Перегрузка* g	Относительный конечный объем жидкости ϵ_k	Число Фруда Fr	ϵ при $D_{эф} = 50$ мкм (числитель) и 58 мкм (знаменатель)	$(We/Re^2) \cdot 10^3$
1	А	0,02	0,006	7580	3,75/4,35	1,60/1,38
2		0,02	0,008	11107	5,00/5,80	
3		0,02	0,0055	4720	3,44/3,98	
4		1,0	0,003	672	1,875/2,17	
5	В	0,01	0,027	10750	4,75/5,51	5,68/4,90
6		0,01	0,029	26245	5,11/5,91	
7		1,0	0,008	71	1,41/1,63	
8	С	0,02	0,001	4724	3,65/4,24	0,274/0,236
9		0,01	0,0012	7097	4,38/5,08	
10		1,0	0,0005	107	1,82/2,12	

*Осредненные значения.

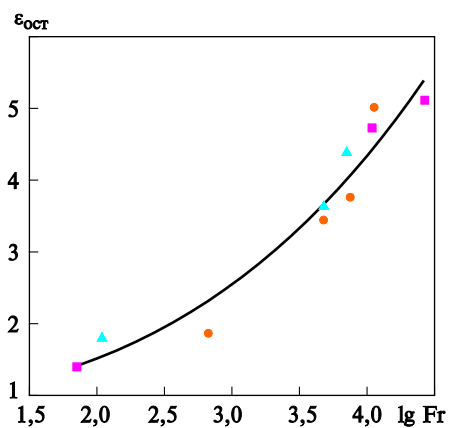


Рис. 4. Экспериментальные данные результатов физического моделирования процесса опорожнения ТБ с ВБУ КТ:
 ● — 96%-ный этиловый спирт;
 ■ — 40%-ный раствор этилового спирта;
 ▲ — дистиллированная вода

С учетом проведенного исследования для данной конструкции ВБУ КТ значение величины ϵ рекомендуется находить с использованием эмпирических зависимостей вида

$$\epsilon = A (Re^2 / We) (lg Fr)^m, \quad (3)$$

где $We = \frac{\rho V_0^2 D_{эф}}{\sigma d^4}$ — число Вебера (V_0 — объемный расход жидкости;

d — диаметр расходной магистрали); $Re = \frac{V_0 D_{эф}}{d^2 \nu}$ — число Рейнольдса.

Параметр We/Re^2 учитывает влияние вязкости и поверхностного натяжения на работу КПСМ в режиме сепарации газа. В нашем случае обработка экспериментальных результатов по методу наименьших квадратов дала значения $A = 0,48$ и $m = 1,63$. Зависимость (3) с указанными значениями констант A и m экспериментально подтверждена в диапазоне чисел Фруда от $3 \cdot 10^1$ до $3 \cdot 10^4$.

Заключение. Результаты физического моделирования процесса опорожнения ТБ с ВБУ КТ на основе КПСМ заданного типа показали, что принятая конструктивная схема фильтра-сепаратора сохраняет работоспособность вплоть до степени заполнения баков не менее $4,9 \cdot 10^{-4}$. Указанная степень заполнения баков соответствует объему невырабатываемых остатков топлива не более 0,12 л на бак, что представляется вполне приемлемым значением и характеризует высокую степень совершенства ВБУ.

Для данной конструкции ВБУ объем невырабатываемых остатков при изменении условий полета и режимов опорожнения ТБ рекомендуется находить с использованием эмпирических зависимостей вида

$$\varepsilon_{\text{ост}} = A(Re^2/We)(\lg Fr)^m.$$

При этом параметр We/Re^2 входит в формулу в минус в первой степени и играет роль нормирующего множителя, учитывающего влияние вязкости и поверхностного натяжения на работу КПСМ в режиме сепарации. При изменении конструкции ВБУ или типа КПСМ необходимо будет уточнять значения констант A и m .

При проведении экспериментов погрешность определения перегрузки составила 4 %, погрешность определения конечного объема — 3 %, погрешность определения времени прорыва газа в расходную магистраль — 3 %. Максимальная погрешность экспериментального определения параметров процесса опорожнения модели бака с ВБУ КТ в данной работе не превысила 16 %, что является вполне удовлетворительным значением.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Корольков А.В., Меньшиков В.А., Партола И.С., Сапожников В.Б. Математическая модель капиллярно-заборных устройств торового топливного бака. *Лесной вестник*, 2007, № 2 (51), с. 35–40.
- [3] Сапожников В.Б., Гришко Я.П., Корольков А.В., Большаков В.А., Новиков Ю.М., Константинов С.Б., Мартынов М.Б. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкции внутрибаковых

- устройств двигательных установок космических аппаратов, верхних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева*, 2011, вып. 3 (36), с. 122–126.
- [4] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Расчетно-теоретическая и экспериментальная оценка работоспособности комбинированных пористо-сетчатых материалов в качестве капиллярных заборных устройств топливных баков жидкостных ракетных двигательных установок. *11-я Междунар. конф. «Авиация и космонавтика – 2012»*. Москва, 13–15 ноября 2012 г. Тез. докл. Санкт-Петербург, Мастерская печати, 2012, с. 220–221.
- [5] Александров А.А., Хартов В.В., Новиков Ю.М., Крылов В.И., Ягодников Д.А. Современное состояние и перспективы разработки капиллярных топливозаборных устройств из комбинированных пористо-сетчатых материалов для космических аппаратов с длительным сроком активного существования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 6 (105), с. 130–142.
- [6] Авраамов Н.И., Корольков А.В., Маслов В. А., Сапожников В.Б. Математическая модель комбинированного пористо-сетчатого материала как фазоразделителя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 4–16.
- [7] Сапожников В.Б., Меньшиков В.А., Партола И.С., Корольков А.В. Развитие идей профессора В.М. Поляева по применению пористо-сетчатых материалов для внутрибаковых устройств, обеспечивающих многократный запуск жидкостных ракетных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2006, вып. 2 (63), с. 78–88.
- [8] Сапожников В.Б., Корольков А.В. Отделение газа от жидкости в потоке газожидкостной смеси в условиях невесомости с помощью комбинированных пористо-сетчатых материалов. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*, 2014, № 1 (14), с. 60–65.
- [9] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. 2-е изд. Москва, Наука, 1972, 720 с.
- [10] Беляев Н.М. *Расчет пневмогидравлических систем ракет*. Москва, Машиностроение, 1983, 219 с.

Статья поступила в редакцию 29.09.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сапожников В.Б., Полянский А.Р., Корольков А.В., Константинов С.Б., Александров Л.Г. Экспериментальная оценка невырабатываемых остатков топлива в баках с внутрибаковыми устройствами капиллярного типа для двигательных установок космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1941>

Сапожников Владимир Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: гидрогазодинамика при течении жидкостей и газов в структурно-сложных средах. Автор около 120 научных публикаций. e-mail: sapojnikov@bmstu.ru

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

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

Константинов Сергей Борисович — канд. техн. наук, главный специалист отдела перспективных научных исследований и разработок АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование космической техники и систем. Автор около 40 научных публикаций. e-mail: konstantinov@laspace.ru

Александров Лев Григорьевич — канд. техн. наук, начальник сектора отдела двигательных установок АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: гидродинамика и теплообмен в энергетических установках летательных аппаратов. Автор около 30 научных публикаций. e-mail: aia@laspace.ru

Experimental estimation of residual propellant in the fuel tanks with inertant capillary devices for spacecraft propulsion systems

© V.B. Sapozhnikov¹, A.R. Polyanskiy¹, A.V. Korolkov²,
S.B. Konstantinov³, L.G. Alexandrov³

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi Branch,
Mytishchi, Moscow Region, 141001, Russia

³JSC «Lavochkin Scientific and Production Association», Khimki, 141400, Russia

The paper presents the results of experimental studies of the processes of emptying the fuel tanks of spacecraft liquid rocket propulsion systems at the final stages of free (undisturbed) flight in tanks with inertant capillary devices (IT CD). On the basis of the analysis of the emptying process, the dimensionless complex structure is formed. The complexes determine the dependence of the residual propellant on the physical properties of the propellant and the parameters of the IT CD. Experimental studies were performed on the weightlessness stand, using the principle of realization of the conditions of reduced weight in tested equipment free fall. The results of the experimental studies have shown that the main criterion determining the value of residual propellant is the Froude number. The criterion equation for determination of residual propellant is obtained. The influence of viscosity and surface tension of the propellant on the value of residual propellant begins to affect at the values of the Froude numbers exceeding 10^4 .

Keywords: liquid rocket propulsion systems, fuel tank, weightlessness, emptying, inertant devices, experimental studies

REFERENCES

- [1] Korolkov A.V., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. Teoreticheskie osnovy razrabotki i eksperimentalnoy otrabotki kapillyarnykh zabornykh ustroystv s minimalnymi ostatkami topliva [Theoretical bases of development and experimental testing of capillary intake devices with minimal fuel residues]. In: *Sbornik. Nauchno-tehnicheskie razrabotki OKB-23 – “Salut”* [Collection of research papers. Scientific and technical developments SDB-23-DB “Salyut”]. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 2006, pp. 313–319.
- [2] Korolkov A.V., Menshokov V.A., Partola I.S., Sapozhnikov V.B. *Forestry Bulletin*, 2007, no. 2 (51), pp. 35–40.
- [3] Sapozhnikov V.B., Grishko Ya.P., Korolkov A.V., Bolshakov V.A., Novikov Yu.M., Konstantinov S.B., Martynov M.B. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva — Vestnik. Scientific Journal of Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev*, 2011, no. 3 (36), pp. 122–126.
- [4] Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. Raschetno-teoreticheskaya i eksperimentalnaya otsenka rabotosposobnosti kombinirovannykh poristo-setchatykh materialov v kachestve kapillyarnykh zabornykh ustroystv toplivnykh bakov zhidkostnykh raketnykh dvigatelnykh ustanovok [Computational-theoretical and experimental performance evaluation of the combined porous-mesh materials as capillary intake devices of fuel tanks of liquid rocket propulsion systems].

- XI Mezhdunarodnaya konferentsiya "aviatsiya i kosmonavtika – 2012". Moskva, 13–15 noyabrya 2012 g. Tezisy dokladov* [11th International Conference "Aviation and Cosmonautics-2012". Moscow, November 13–15, 2012, Abstracts]. St. Petersburg, Masterskaya pechaty Publ., 2012, pp. 220–221.
- [5] Aleksandrov A.A., Khartov V.V., Novikov Yu.M., Krylov V.I., Yagodnikov D.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2015, no. 6 (105), pp. 130–142.
- [6] Avraamov N.I., Korolkov A.V., Maslov V.A., Sapozhnikov V.B. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 4–16.
- [7] Sapozhnikov V.B., Menshokov V.A., Partola I.S., Korolkov A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2006, no. 2(63), pp. 78–88.
- [8] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V. *Sovremennaya Nauka: Issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii — Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*, 2014, no. 1 (14), pp. 60–65.
- [9] Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook on thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 720 p.
- [10] Belyaev N.M. *Raschet pnevmogidravlicheskih system raket* [Calculation of pneumatic-hydraulic rocket systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 219 p.

Sapozhnikov V.B., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: fluid and gas dynamics in the flow of liquids and gases in structurally complex environments. Author of about 120 research publications. e-mail: sapojnikov@bmstu.ru

Polyanskiy A.R., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: fluid and gas dynamics of the flows in power plants. Author of about 90 research publications. e-mail: polyanskiy@bmstu.ru

Korolkov A.V., Dr. Sc. (Phys.-Mat.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi Branch. Research interests: fluid and gas dynamics in the flow of liquids and gases in structurally complex environments. Author of about 100 research publications. e-mail: an_korolkov@mail.ru

Konstantinov S.B., Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist, Department of Advanced Research and Development, JSC "Lavochkin Scientific and Production Association". Research interests: design of space systems and technology. Author of about 40 research publications. e-mail: konstantinov@laspace.ru

Aleksandrov L.G., Cand. Sc. (Eng.), Head of the Sector, Department of propulsion systems, JSC Lavochkin Scientific and Production Association. Research interests: hydrodynamics and heat transfer in aircraft power plants. Author of about 30 research publications. e-mail: aia@laspace.ru