

Экспериментальная оценка невырабатываемых остатков топлива разгонных блоков на заключительных этапах полета

Сапожников В.Б.^{1*}, Корольков А.В.^{1}, Константинов С.Б.^{2***},
Александров Л.Г.^{2****}**

¹*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-ая Бауманская ул. 5, Москва, 105005, Россия*

²*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, НПО Лавочкина,
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141402, Россия*

**e-mail: sapojnikov47@mail.ru*

***e-mail: korolkov@mgul.ac.ru*

****e-mail: konstantinov@laspace.ru*

*****e-mail: aia@laspace.ru*

Статья поступила 09.12.2019

Аннотация

Работа посвящена физическому моделированию процесса опорожнения баков разгонных блоков космической техники от компонентов топлив в условиях действия на жидкость ускорений различных значений. В качестве критерия моделирования выбирается число Фруда. Исследовательские эксперименты проводятся на прозрачной физической модели бака, заполняемой различным количеством модельной жидкости, которая истекает из модели с различными значениями расходов в процессе падения исследовательского контейнера с моделью в шахте «башни невесомости» (или «бросковой башни»).

В испытаниях определяется влияние числа Фруда на невырабатываемые остатки жидкости в модели, вызванные «динамическим провалом» поверхности

раздела «жидкость-газ» в сливное отверстие бака при её выработке (воронкообразование). Получена аппроксимационная формула зависимости объёма невырабатываемого остатка от числа Фруда при опорожнении бака. По результатам испытаний показано, что полученная зависимость достаточно точно описывает исследуемый процесс до значений Фруда $Fr \leq 10^4$. В области значений $Fr > 10^4$ начинают оказывать на результат силы поверхностного натяжения, и помимо числа Фруда следует учитывать при физическом моделировании и число Бонда.

Ключевые слова: топливный бак, разгонный блок, действующее ускорение, воронкообразование, физическое моделирование, критерий моделирования, истечение жидкости, «башня невесомости», «бросковая башня», аппроксимация, число Фруда, число Бонда.

Для двигательных установок (ДУ) многоразового включения космических аппаратов (КА) условием нормального функционирования ДУ является подача компонентов жидкого ракетного топлива (КЖРТ) в расходные магистрали ДУ без нарушения сплошности потока [1-4]. Обеспечение выполнения этого условия является комплексной задачей, решение которой зависит от целого ряда факторов, таких как физико-химические свойства компонентов жидкого топлива, геометрии топливных баков, форм и материалов внутрибаковых устройств, текущего гравитационного состояния, конвективных, капиллярных и термокапиллярных процессов. [5-10].

При малом заполнении топливных баков (коэффициент заполнения бака менее 0,05) на заключительных этапах работы космической ДУ причиной нарушения сплошности потока может быть прорыв газа наддува в расходную магистраль в результате образования воронки (с вихреобразованием или без него), получивший название «динамического провала» поверхности раздела «жидкость-газ» [11-15]. Актуальность исследований оценки процесса расхода КЖРТ в баках подтверждается, например, возможностью использования таких данных для эффективного управления современными КА [16], а также при разработке КА для очистки околоземного пространства, когда необходимо учитывать особенности объектов космического мусора, в частности, остатков топлива [17, 18].

Для того, чтобы исключить образование воронки, в топливных баках (ТБ) космических ДУ многократного запуска в районе заборных устройств устанавливают радиальные и кольцевые перегородки (схема одного из таких баков представлена на рис. 1).

Однако наличие этих перегородок не может предотвратить образование «динамического провала», в результате которого при определенной высоте поверхности раздела «жидкость-газ» над горловиной расходной магистрали, называемой обычно критической ($h_{кр}$), происходит прорыв газа наддува в трубопровод подачи топлива. Величина $h_{кр}$ зависит от многих факторов, определяющими среди которых являются расход топлива q , ускорение g_x , действующее по нормали к поверхности раздела «жидкость-газ», и диаметр расходной магистрали d . Воспользуемся одной из формул, которую используют для расчета величины $h_{кр}$ в ТБ разгонных блоков (РБ):

$$\frac{h_{кр}}{d} = A \cdot Fr^n \quad (1)$$

где число Фруда $Fr = \frac{q^2}{g_x \cdot d^5}$, а коэффициенты A и n – экспериментально определяемые константы.

Значения коэффициентов A и n по данным различных источников для баков с пологими эллипсоидальными и сферическими днищами приведены в таблице 1. Вместе с тем, применительно к конкретным бакам РБ, формула (1) нуждается в уточнении с учетом конструкции внутрибаковых устройств баков РБ (см., например, рис. 1) и режимов их опорожнения.

Таблица 1

Значения коэффициентов A и n в формуле (1.1)

Источник	A	n
[14]	0,42	0,275
[15]	0,40	0,285

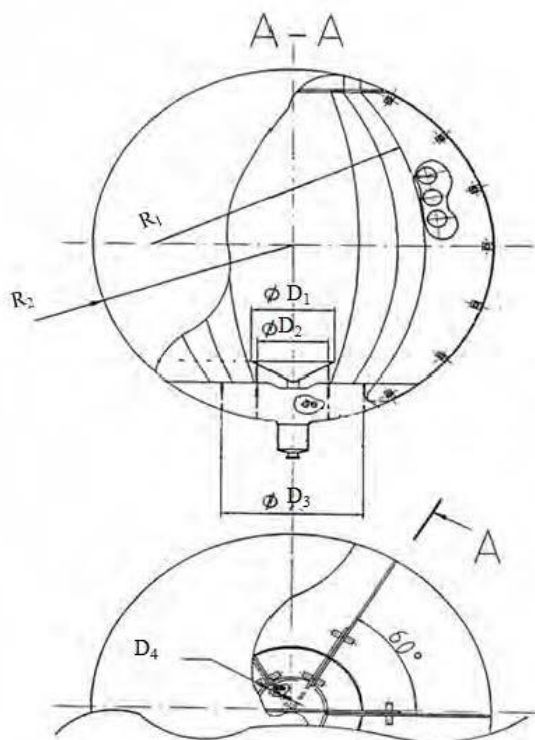


Рисунок 1. Схема топливного бака РБ

С этой целью в настоящей работе выполнена экспериментальная оценка невырабатываемых остатков топлива при малом (не более 0,03) коэффициенте заполнения ТБ РБ при запуске маршевого двигателя РБ в условиях свободного орбитального полета и действия предпусковой перегрузки. Эксперименты проводились как в условиях действия земного ускорения, так и в условиях действия малой гравитации, получаемой на «башне невесомости». Подробное описание характеристик применяемой в экспериментах измерительной и регистрирующей аппаратуры приведены в работе [19].

Экспериментальные исследования процесса опорожнения ТБ РБ на «башне невесомости» проводились по следующей методике. Малоразмерная прозрачная модель (рис. 2) фрагмента бака (геометрический масштаб модели фрагмента по отношению к баку рис. 1 равен 1:5,76), установленная на испытательном контейнере (рис. 3), заправлялась заданным количеством модельной жидкости.

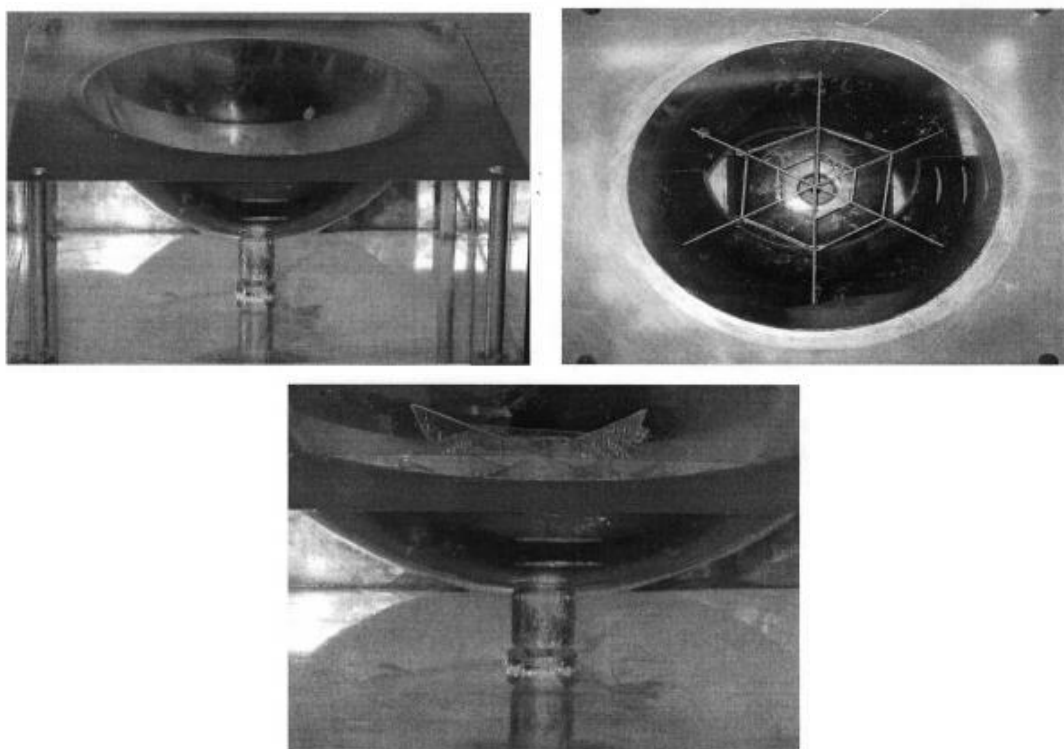


Рисунок 2. Модель фрагмента бака М 1:5,76

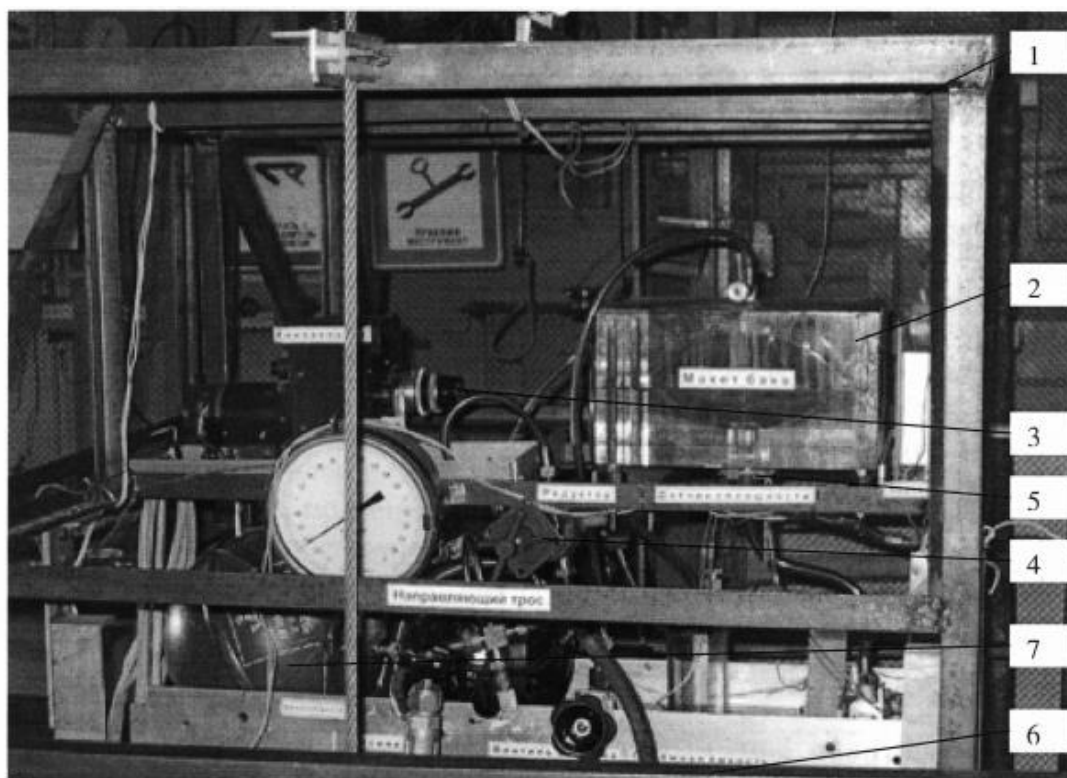


Рисунок 3. Испытательный контейнер:

1 – силовая рама; 2 – модель фрагмента бака; 3 – киноаппарат; 4 – редуктор системы наддува бака; 5 - датчик сплошности; 6 – емкость для слива модельной жидкости; 7 – шар-баллон системы наддува.

В экспериментах это количество составляло соответственно 150, 210 и 300 см³. С помощью наддува сжатым воздухом во внутренней полости модели устанавливалось избыточное давление в диапазоне от 50 до 150 кПа. Испытательный контейнер (ИК) в «башне невесомости» (или «бросковой башне») конструктивно подвешен в направляющих тросах. С помощью фрикционных механизмов устанавливалась требуемая величина остаточного ускорения на борту ИК при падении. Эксперимент в условиях действия малой гравитации проводился по следующей методике:

- после начала движения (падения) ИК в шахте «башни невесомости» подавалось питание на электромагнитный клапан, установленный на расходной магистрали, и начинался процесс слива жидкости из модели;
- момент, когда газ наддува попадал в расходную магистраль, фиксировался с помощью показаний датчика сплошности;
- по кинограмме процесса слива определялся объём жидкости в сливной ёмкости в момент срабатывания датчика сплошности.

Эксперименты по сливу в условиях действия земного ускорения силы тяжести проводились по аналогичной методике, но без сбрасывания ИК в шахту «башни невесомости». В экспериментах фиксировались следующие параметры:

- время прорыва газа наддува в расходную магистраль;
- величина действующего ускорения;
- давление наддува;
- объём жидкости, слитой из модели к моменту прорыва газа.

Типовая осциллограмма эксперимента приведена на рисунке 4.

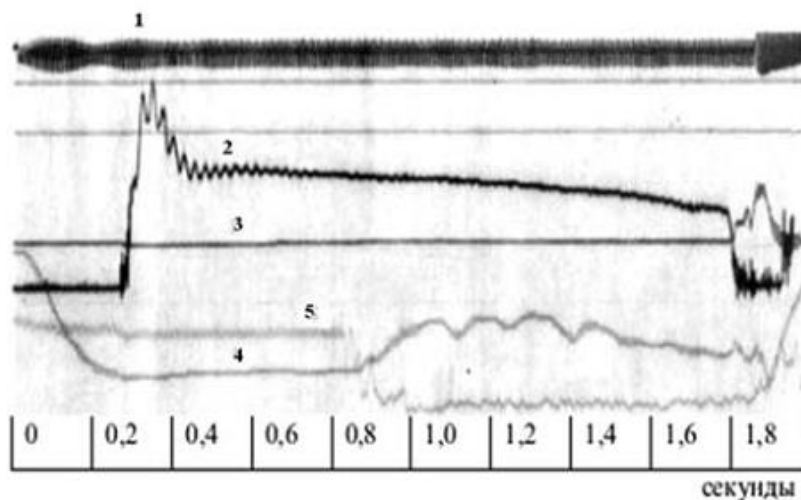


Рисунок 4. Типовая осциллограмма эксперимента:

1 – момент открытия электроклапана на расходной магистрали для слива модельной жидкости; 2 – остаточное ускорение на борту испытательного контейнера; 3 – давление наддува модели; 4 – перепад давления между давлением наддува и давлением в расходной магистрали; 5 - момент прорыва газа в расходную магистраль (сигнал датчика сплошности).

Всего было проведено 5 серий экспериментов при различных (от 9,81 до 0,5 м/с²) значениях остаточных ускорений на борту ИК. В качестве модельных жидкостей использовались 96 % и 40 % растворы этилового спирта в воде. Результаты экспериментов представлены в таблицах 2...6.

Таблица 2

Результаты экспериментов серии № 1
(модельная жидкость – 96% водный раствор этилового спирта;
начальное заполнение модели $V_0 = 209 \text{ см}^3$)

№ эксперимента	Режимы и значения экспериментальных параметров						
	Давление наддува, кПа	Ускорение, м/с ²	Время прорыва, с	Объем слитой жидкости, см ³	Объем остатков, см ³	Расход, см ³ /с	Число Фруда
1-1	106	1,18	0,25	39,5	169,5	158	6800
1-2	113	0,78	0,23	36,3	172,7	158	10200
1-3	50	0,69	0,46	49,2	159,8	107	5300
1-4	50	0,59	0,50	53,5	155,5	107	6200
1-5	111	0,78	0,23	36,3	172,7	158	10200
1-6	50	0,59	0,44	47,1	161,9	107	6200
1-7	72	9,81	0,65	87,1	121,9	134	600
1-8	50	9,81	1,13	127,7	81,3	113	420
1-9	50	9,81	1,10	124,3	84,7	113	420
1-10	152	9,81	0,33	65,7	143,3	199	1300
1-11	154	9,81	0,36	71,6	137,4	199	1300

Результаты экспериментов серии № 2
(модельная жидкость – диэтиловый эфир; начальное заполнение модели $V_0 = 209$ см³)

№ Эксперимента	Режимы и значения экспериментальных параметров						
	Давление наддува, кПа	Ускорение, м/с ²	Время прорыва, с	Объем слитой жидкости, см ³	Объем остатков, см ³	Расход, см ³ /с	Число Фруда
2-1	51	9,81	1,08	123	86	114	424
2-2	115	9,81	0,85	136	73	160	830
2-3	121	9,81	0,63	120	89	189	1165
2-4	120	9,81	0,63	123	86	187	1140
2-5	110	0,69	0,083	15	194	178	14760
2-6	50	0,88	0,25	35	174	142	7310

Результаты экспериментов серии № 3
(модельная жидкость – 40 % водный раствор этилового спирта; начальное заполнение модели $V_0 = 209$ см³)

№ Эксперимента	Режимы и значения экспериментальных параметров						
	Давление наддува, кПа	Ускорение, м/с ²	Время прорыва, с	Объем слитой жидкости, см ³	Объем остатков, см ³	Расход, см ³ /с	Число Фруда
3-1	90	9,81	0,84	113	96	135	600
3-2	90	9,81	0,89	120	89	135	600
3-3	90	9,81	0,87	117	92	135	600
3-4	90	9,81	0,82	111	98	135	600
3-5	115	9,81	0,65	117	92	180	1060
3-6	60	0,69	0,60	54	155	90	3770
3-7	80	0,59	0,22	30	179	135	9910
3-8	120	0,59	0,18	33	176	180	17610

Таблица 5

Результаты экспериментов серии № 4
(модельная жидкость – 96% водный раствор этилового спирта; начальное
заполнение модели $V_0 = 150 \text{ см}^3$)

№ Эксперимента	Режимы и значения экспериментальных параметров						
	Давление наддува, кПа	Ускорение, м/с ²	Время прорыва, с	Объем слитой жидкости, см ³	Объем остатков, см ³	Расход, см ³ /с	Число Фруда
4-4	103	9,81	0,52	85	65	162	860
4-5	152	9,81	0,30	65	85	218	1550
4-6	95	9,81	0,67	90	60	135	590
4-10	50	0,69	0,18	30	120	163	12380
4-11	103	0,59	0,17	28	122	162	14270
4-12	148	0,59	0,05	13	137	220	26310
4-17	48	9,81	0,42	95	55	130	550
4-18	89	9,81	0,49	82	68	166	900

Таблица 6

Результаты экспериментов серии № 5
(модельная жидкость – 96% водный раствор этилового спирта; начальное
заполнение модели $V_0 = 300 \text{ см}^3$)

№ эксперимента	Режимы и значения экспериментальных параметров						
	Давление наддува, кПа	Ускорение, м/с ²	Время прорыва, с	Объем слитой жидкости, см ³	Объем остатков, см ³	Расход, см ³ /с	Число Фруда
5-8	100	0,69	0,63	83	217	132	8120
5-9	150	0,69	0,26	57	243	220	22550
5-19	100	9,81	1,48	207	93	140	640
5-20	147	9,81	0,88	194	106	220	1580

Обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов трансформированной формулы (1) в виде зависимости $\frac{V_{\text{ост}}}{d_0^3} = A \cdot Fr^b$ приводит к следующему результату:

$$\frac{V_{\text{ост}}}{d^3} = 79,25 \cdot Fr^{0,3} \quad (2)$$

где $V_{\text{ост}}$ - объем невырабатываемых остатков

На рисунке 5 представлены результаты экспериментов и вычислений по аппроксимационной формуле (2). Разброс экспериментальных точек относительно результатов расчёта в диапазоне значений чисел Фруда от 10^2 до 10^3 составляет $\pm 25\%$. В диапазоне значений чисел Фруда более 10^4 разброс доходит до $\pm 30\%$. Для объяснения причины увеличения расхождения между результатами эксперимента и расчётами в области значений $Fr > 10^4$ были проведены расчёты невырабатываемых остатков жидкости, связанные с явлением «динамического провала», с помощью математической модели, представленной в работе [20]. Математическая модель учитывает действие сил поверхностного натяжения, приводящее к искривлению поверхности жидкости в топливном баке. Результаты численного эксперимента представлены в таблице 7.

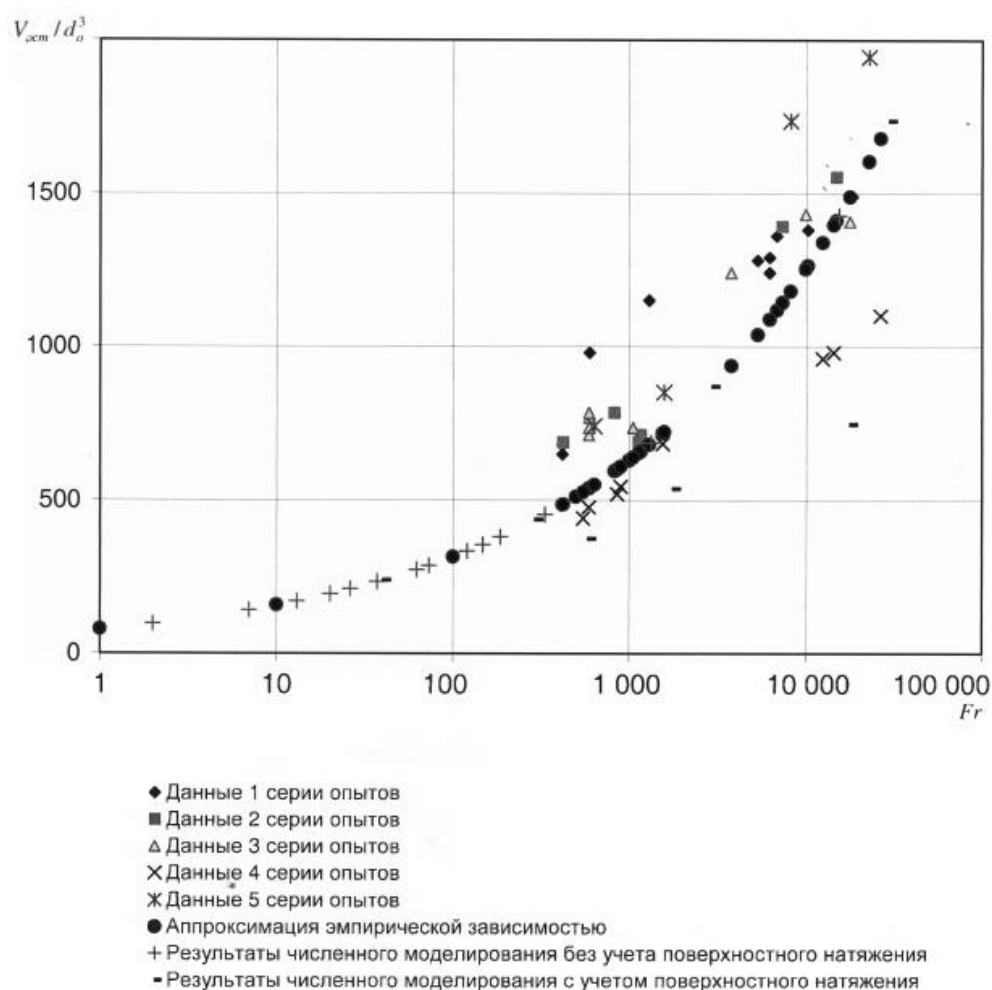


Рисунок 5. Результаты экспериментов по моделированию на башне невесомости процесса опорожнения топливного бака согласно рис. 1.

Материалы таблицы 7 показывают, что при малых значениях числа Фруда ($Fr < 10^2$) силы поверхностного натяжения не оказывают влияния на результаты оценки объема невырабатываемых остатков. В области значений $Fr > 10^4$ силы поверхностного натяжения существенно влияют на оценку величины невырабатываемых остатков. Чем больше значение силы поверхностного натяжения, тем, при остальных равных условиях, меньше значение величины невырабатываемых остатков. Т.е. оценка невырабатываемых остатков по формуле (2), полученная по результатам физического моделирования при условии $Fr = idem$, в области $Fr \geq 10^4$ завышена. Согласно [10] можно сделать вывод о том, что в

области $Fr \geq 10^4$ необходимо при физическом моделировании обеспечивать одновременное выполнение двух условий: $Fr=idem$ и $Vo=idem$.

Более того, в области очень больших чисел Фруда ($Fr > 10^5$) может появиться необходимость обеспечения условия $We=idem$, где число Вебера $We=Fr*Vo$.

Таблица 7

Результаты вычислительного эксперимента по оценке влияния поверхностного натяжения на величину невырабатываемых остатков топлива

№ варианта	Коэффициент поверхностного натяжения, н/м ²	Расход, дм ³ /с	Ускорение, м/с ²	Объем остатков, дм ³	Число Фруда
1	0	2,07	4,43	3,9	40
3	0,0248	2,07	4,43	3,5	40
5	0,0248	2,07	0,06	13	2940
17	0,0248	2,07	0,006	15	29400
22	0,0496	2,07	0,006	8,8	29400
23	0,0124	2,07	0,006	22,2	29400

Библиографический список

1. 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 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. № 6(105). С. 130 - 142.
2. 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 Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2006. № 2(63). С. 78 – 88.

3. Сапожников В.Б., Корольков А.В. Математическое моделирование процесса опорожнения топливного бака летательного аппарата в условиях орбитального полета // Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development: Abstracts of International Scientific Conference, BMSTU, Moscow, 17 – 19 November 2014, pp. 80 - 81.

4. Беляев Н.М. Расчет пневмогидравлических систем ракет. – М.: Машиностроение, 1983. - 219 с.

5. Кудрявцев В.М. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. – М.: Высшая школа, 1993. Т. 2 – 368 с.

6. Партола И.С. Результаты проектирования и отработки капиллярных заборных устройств торового топливного бака РБ “Бриз-М” // Первая международная научно-техническая конференция “Аэрокосмические технологии”, посвященная 90-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея: Сборник докладов МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М.: НПО “Машиностроение”, 2004. С. 19 - 22.

7. Большаков В.А., Новиков Ю.М., Партола И.С. Средства обеспечения сплошности жидких компонентов топлива в системе питания РБ «Бриз-М» с дополнительным (сбрасываемым) топливным баком // XXXIV Научные чтения, посвященные научному наследию и развитию идей К.Э. Циолковского: сборник докладов. Калуга, 1999. С. 78 - 86.

8. Новиков Ю.М., Большаков В.А. Инженерная школа МГТУ им. Н.Э. Баумана: Комбинированные пористые сетчатые металлы. Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе // Безопасность жизнедеятельности. 2005. № 11. С. 53 - 56.
9. Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М. и др. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов. - М.: УНПЦ «Энергомаш», 1997. - 328 с.
10. 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. № 4. URL: [http:// engjournal. ru/ catalog/machin/rocket/707.html](http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/707.html)
11. Поликовский В.И., Перельман Р.Г. Воронкообразование в жидкости с открытой поверхностью. - М.: Госэнергоиздат, 1959. - 191 с.
12. Сизонов В.С. О динамическом провале уровня свободной поверхности жидкости конечной глубины над сливным отверстием // Известия АН СССР. Серия: Механика жидкости и газа. 1971. № 6. С. 72 - 75.
13. Архипов В.А., Васенин И.М., Ткаченко А.С., Усанина А.С. О нестационарном всплытии пузырька в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса // Механика жидкости и газа. 2015. № 1. С. 86 - 94.
14. Беляев Н.М., Шандоров Г.С. К вопросу о воронкообразовании без вращения при сливе жидкости через донные отверстия // Гидроаэромеханика. 1965. № 2. С. 27 - 32.

15. Токарев В.Е. Истечение жидкости из емкости с образованием воронки // Известия Вузов. Серия: Авиационная техника. 1967. № 3. С. 37 - 43.

16. Глушков А.В., Улыбышев С.Ю. Применение режима тактовой работы к двигательной установке для высокоточного орбитального маневрирования и переориентации космического аппарата // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96960>

17. Асланов В.С., Юдинцев В.В. Тросовая буксировка объекта космического мусора с полостью, заполненной жидкостью // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87150>

18. Рязанов В.В. Управление движением космического аппарата при бесконтактном уводе космического мусора // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107837>

19. 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.

20. Сапожников В.Б., Корольков А.В., Авраамов Н.И. и др. Влияние времени выхода на режим маршевого ЖРД на процесс опорожнения топливного бака летательного аппарата в условиях свободного орбитального полета // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. С. 603 - 617.