

А. Н. МИНАЙ, И. В. СЕДЫХ, И. Ю. КУЗЬМИЧ

ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ ЗАБОРНЫХ УСТРОЙСТВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТИПА

При проектировании заборных устройств топливных баков ракет-носителей в инженерной практике используются эмпирические и полумпирические зависимости для определения основных параметров движения жидкости. Однако, полученные из опытных данных, эмпирические зависимости применимы для ограниченного круга задач, условия которых (начальные и граничные) подобны тем, для которых были получены данные зависимости. Поэтому правильность рассчитанных параметров заборных устройств должна быть подтверждена результатами экспериментальной отработки.

Экспериментальная отработка заборных устройств на гидродинамических стендах, как правило, проводится на натурных баках и на их масштабных моделях (опытных конструкциях) в земных условиях. Для подтверждения подобия гидродинамических процессов экспериментальная отработка масштабных моделей проводится на нескольких опытных конструкциях разных масштабов и на нескольких модельных жидкостях.

В настоящее время, с развитием вычислительной техники и численных методов решения дифференциальных уравнений движения жидкости, появилась возможность заменить практически повсеместное использование эмпирических зависимостей более точным вычислительным экспериментом. Это, в ряде случаев, позволяет сократить количество используемых опытных конструкций, сроки проведения экспериментальной отработки, и, как следствие, материально-технические затраты.

В работе рассмотрены результаты экспериментального определения статического гидравлического остатка компонента топлива в опытных конструкциях бака первой ступени ракет-носителей с центральным отбором компонента и численного моделирования на математических 3D и 2D моделях опытных конструкций (аналогичного масштаба).

Авторами разработан расчетно-экспериментальный метод верификации результатов численного моделирования, позволяющий проводить необходимые исследования с требуемой точностью.

Предложенный подход позволяет усовершенствовать существующую традиционную методику экспериментальной отработки заборных устройств, уже на начальном этапе разработки оптимизировать их параметры, уменьшить объем необходимой экспериментальной отработки и снизить временные и материально-технические затраты на ее проведение.

Ключевые слова: заборные устройства; статический гидравлический остаток; экспериментальная отработка; численное моделирование; гидродинамическое подобие.

Введение

Заборные устройства являются одним из важнейших элементов топливных баков и системы подачи компонентов топлива к жидкостной ракетной двигательной установке. Они должны обеспечить максимальную выработку компонентов топлива из баков без нарушения сплошности потока [1].

Количество компонентов топлива, остающееся в баке на момент прорыва газа наддува в расходную магистраль, называется гидравлическим остатком [1]. Этот остаток входит в конечную массу ракеты. Уменьшение его является существенным совершенствованием пневмогидравлической системы подачи,

поскольку способствует увеличению дальности полета или увеличению массы полезной нагрузки. Величина гидравлического остатка существенно зависит от конструкции заборного устройства и может быть заметно снижена применением тарелей различной конструкции и других устройств, уменьшающих высоту критического уровня компонентов топлива в баке, при которой происходит прорыв газа наддува в расходную магистраль [2]. Поскольку заборное устройство является элементом конструкции топливного бака ракеты, то его форма и геометрические размеры в значительной степени зависят от формы бака и, особенно, от геометрии нижнего днища.

В ракетной технике широко применяют цилиндрические баки со сферическим, эллиптическим или коническим нижним днищем; при этом наиболее распространена сферическая форма днища. Конструкция заборных устройств зависит также от компоновочной схемы ракеты и количества точек отбора компонентов топлива из бака в двигательную установку.

Традиционная методика расчета гидравлических остатков основана на экспериментальных работах, которые проводились различными конструкторско-проектными организациями на гидродинамических стендах с использованием натурных и масштабных моделей баков [1, 3]. Однако, полученные из опытных данных эмпирические зависимости применимы для решения ограниченного круга задач, условия которых (начальные и граничные) подобны тем, для которых получены данные зависимости. В случае использования новой конструкции бака требуется проводить отдельные экспериментальные работы, которые, в результате, приведут к определению эмпирических зависимостей, справедливых для данной конструкции и условий выведения ракет-носителей.

Поэтому расчетные параметры заборных устройств, определенные на стадии проектирования (в том числе, и значения статического гидравлического остатка), должны быть подтверждены в ходе экспериментальной отработки на полномасштабных или масштабных моделях баков. Для подтверждения подобия модельных гидродинамических процессов натурным процессам («автомодельности») испытания на масштабных моделях баков проводятся на опытных конструкциях (ОК) различных масштабов [4]. В связи со сложностью сохранения равенства чисел Рейнольдса в модельном и натурном процессе, для масштабных моделей (в рекомендованном диапазоне масштабов от 1:4 до 1:10) проводится снятие масштабного фактора по вязкости на двух модельных жидкостях, отличающихся между собой кинематической вязкостью [5, 6].

1. Расчетно-экспериментальный метод определения статического гидравлического остатка компонентов топлива

Для сокращения объема экспериментальной отработки (ЭО) и количества используемых опытных конструкций разработан расчетно-экспериментальный метод определения статического гидравлического остатка компонентов топлива для нижних ступеней ракет-носителей с центральным отбором компонентов топлива (КТ), совмещающий проведение экспериментальных работ и численного моделирования.

1.1. Экспериментальное определение величины статического гидравлического остатка компонентов топлива

Для обоснования возможности применения предлагаемого расчетно-экспериментального метода и верификации результатов численного моделирования на первом этапе проводилась экспериментальная отработка – испытания на гидродинамических стендах двух модельных емкостей, представляющих собой выполненные по внутренним размерам полость нижнего днища натурального бака до шпангоута в масштабах:

- ОК №1 – масштаб 1:1;
- ОК №2 – масштаб 1:8.

Схематическое изображение натурального заборного устройства приведено на рис. 1.

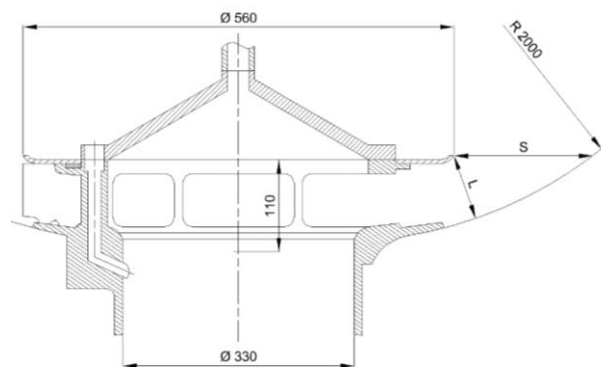


Рис. 1. Схема натурального заборного устройства:
S – площадь кольцевого зазора ($S=109,7 \text{ дм}^2$),
L – наименьшее расстояние от кромки тарелки до днища ($L=89 \text{ мм}$), Внутренний диаметр цилиндрической обечайки бака составляет 3000 мм

Гидродинамическое подобие истечения жидкости из опытной конструкции при экспериментальной отработке по определению статического гидравлического остатка в земных условиях достигается обеспечением равенства численных значений критериев подобия модели и природы [6 – 9]:

- числа Фруда (определяющего отношение сил инерции движущейся жидкости к массовым силам)

$$Fr = \frac{w_n^2}{a_n \cdot l_n} = \frac{w_m^2}{a_m \cdot l_m}; \quad (1)$$

- числа Рейнольдса (определяющего отношение сил инерции движущейся жидкости к силам вязкости)

$$Re = \frac{w_n \cdot l_n}{\nu_n} = \frac{w_m \cdot l_m}{\nu_m}; \quad (2)$$

- геометрического подобия (определяющего масштаб модели)

$$M = \frac{l_n}{l_m}, \quad (3)$$

где w_m, w_n – модельная и натурная скорость течения жидкости в эквивалентных сечениях;

a_m, a_n – модельное и натурное ускорение;

l_m, l_n – характерный линейный размер;

v_m, v_n – модельная и натурная кинематическая вязкость;

индексы «н» и «м» относятся к натурным и модельным условиям, соответственно.

Из равенства чисел Fr для натурального и модельного процессов определяется секундный расход модельной жидкости Q_m :

$$Q_m = Q_n \sqrt[2]{\frac{a_{mx}}{a_{nx}} \left(\frac{l_m}{l_n} \right)^5}, \quad (4)$$

где Q_n – натурный расход компонента топлива из бака;

a_{mx} – осевое модельное ускорение;

a_{nx} – осевое натурное ускорение.

Объём заправки опытной конструкции модельной жидкостью V_m определяется по зависимости:

$$V_m = V_n \cdot \left(\frac{l_m}{l_n} \right)^3, \quad (5)$$

где V_m – натурный объём заправки компонентом топлива.

При экспериментальной отработке на ОК №2 использовались две модельные жидкости: вода дистиллированная и топливо ТС-1.

На ОК №1 из-за больших объёмов заправки в качестве модельной жидкости применялась только вода.

Моделирование гидродинамических процессов для ОК №1 и №2 проводилось в диапазоне натуральных значений весовых секундных расходов: от 610,93 кг/с до 843,26 кг/с, при этом номинальное значение штатного расхода на двигательную установку составляет 752,79 кг/с. Натурная продольная перегрузка, действующая на ракету-носитель, составляет: $n_x = 3,9$.

Экспериментальные работы по определению статического гидравлического остатка на ОК №1 и №2 проводились на гидродинамических стендах в земных условиях ($n_x=1$).

Все данные, полученные в ходе экспериментальной отработки, для простоты анализа, с помощью зависимостей (1), (4) и (5) пересчитывались на натуру.

На рис. 2 приведен график зависимости изменения величины статического гидравлического остатка в натурном баке от числа Фруда (Fr), построенный по результатам экспериментальной отработки. Число Фруда (Fr) определялось для скорости рассчитанной в сечении входа в расходную магистраль (для натурального бака $D_{вх,р.м.} = 330$ мм, как показано на рис. 1).

1.2. Численное моделирование по определению статического гидравлического остатка компонентов топлива

На следующем этапе проводилось численное моделирование с параметрами, полностью соответствующими экспериментальным, а также с параметрами, соответствующими натурным.

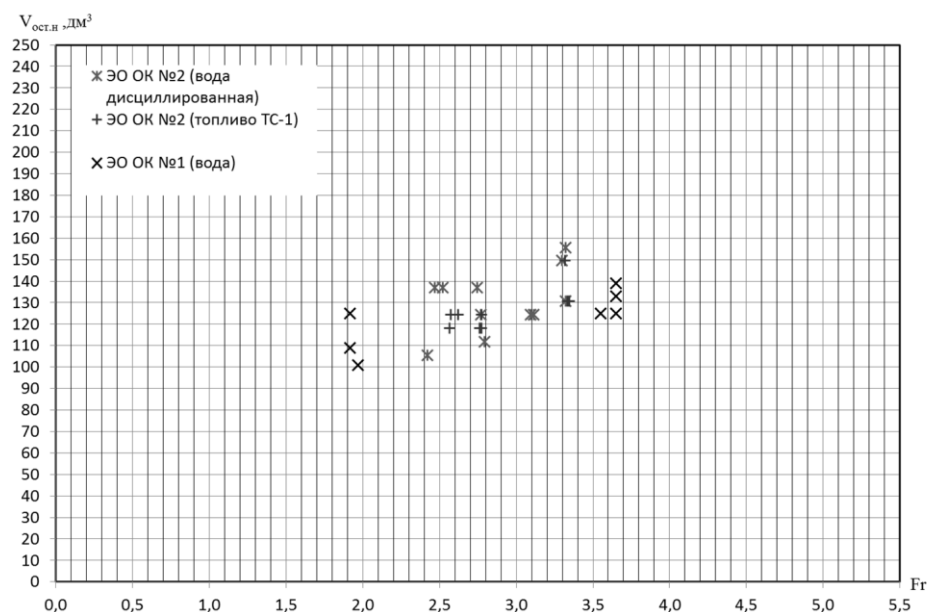


Рис. 2. График зависимости изменения величины статического гидравлического остатка в натурном баке от числа Фруда (Fr), построенный по данным экспериментальной отработки

Для проведения численного моделирования были построены геометрические 3D и 2D модели расчетной области течения, то есть смоделированы внутренние полости ОК №1, ОК №2 с частью расходной магистрали (без учета толщины стенок).

Ввиду наличия элементов сложной геометрии и мелкоразмерных деталей в опытных конструкциях, для исключения построения слишком сложной расчетной сетки, геометрия расчетной области течения 3D и 2D моделей строилась с допущениями, влияние которых на моделирование процесса истечения жидкости и формирование остатка в статических условиях заведомо незначительно.

В ходе работ по численному моделированию проверялась возможность применения математических 2D моделей для получения достоверных результатов и точность результатов расчетов на 3D моделях различной геометрии. При этом математические 3D модели строились и применялись только для ОК №2.

На рис. 3 приведен общий вид принятых расчетных области 3D и 2D моделей.

Для исключения влияния масштабного фактора и различий в свойствах натурального компонента топлива и модельной жидкости на результаты, численный расчет проводился для условий, максимально приближенных к условиям экспериментальной отработки, а именно: одинаковые масштабы моделей, ускорение свободного падения, модельная жидкость.

Процессы движения газожидкостной смеси описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных – уравнениями Навье-Стокса с учетом каждой фазы, которые в общем случае включают в себя: уравнения неразрывности, движения, энергии и диффузии [10]. Поэтому для численного моделирования использовалось специализированное программное обеспечение, позволяющее решать задачи вычислительной гидродинамики. С его помощью исходные дифференциальные

уравнения в частных производных заменялись системой алгебраических уравнений, которые при использовании метода конечных объемов связывают между собой значения искомых переменных в группе узловых точек. Конечно-элементная сетка с узловыми точками, построенная при численном моделировании, распределяется по всей вычислительной области во времени и в пространстве [11 – 13].

Для расчетов была выбрана Эйлера модель, которая используется для моделирования многофазного течения с четкими границами раздела фаз при опорожнении емкостей и движения больших пузырей газа в жидкости.

При выбранной модели для каждой фазы решается один единый набор уравнений сохранения импульса, и добавляются уравнения переноса объемной доли каждой фазы.

Исходя из граничных условий, в результате решения уравнений получают распределение параметров течения (скоростей, давлений, температур) в зависимости от пространственного расположения, определяемого координатами x , y , z , и временем t . Нахождение параметров жидкости происходит итерационным методом.

Численные расчеты для определения статических гидравлических остатков компонентов топлива проводились для следующих расчетных случаев:

– расчетный случай I – математическая 3D модель половины ОК №2 (модельная жидкость топливо ТС-1). Для сокращения времени расчета и оптимизации параметров расчетной математической модели под мощности вычислительной техники, сетка расчетной области была задана с довольно грубыми параметрами по количеству элементов – 7782799. Начальные и граничные условия идентичны модельным;

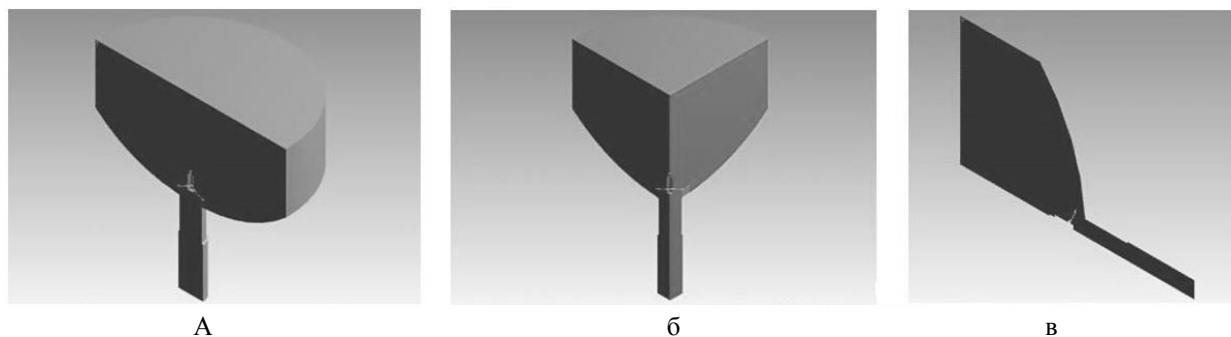


Рис. 3. Общий вид принятых расчетных области 3D и 2D моделей:

а – 3D модель расчетной области половины натурального бака; б – 3D модель расчетной области четверти натурального бака; в – 2D модель расчетной области натурального бака

– расчетный случай II – математическая 3D модель четверти ОК №2 (модельная жидкость топливо ТС-1). С целью улучшения качества математической модели, расчетная область была сокращена с половины до четверти ОК №2 (в виду осесимметричности геометрических параметров модели), что позволило увеличить количество элементов сетки до 5188430. Начальные и граничные условия идентичны модельным;

– расчетный случай III – математическая 2D модель ОК №2 (модельная жидкость топливо ТС-1). Для анализа возможности применения математической 2D модели при расчете нестационарных режимов течения жидкости, моделирование проводилось для трех значений числа Фруда (Fr). Начальные и граничные условия идентичны модельным;

– расчетный случай IV – математическая 2D модель ОК №2 (модельная жидкость вода). Начальные и граничные условия идентичны модельным;

– расчетный случай V – математическая 2D модель ОК №1 (модельная жидкость вода). Начальные и граничные условия идентичны модельным;

– расчетный случай VI – математическая 2D модель опытной конструкции №1 (модельная жидкость азотный тетраоксид «амил»). Начальные и граничные условия идентичны натурным.

1.3 Результаты численного моделирования

Результатом численного моделирования было определение статического гидравлического остатка в момент, когда сплошность потока в расчётном сечении падала ниже 100 %.

Критерием достоверности результатов численного моделирования являлось подтверждение совпадения полученного значения остатка для математической модели и результатов, полученных при экспериментальной отработке [11].

В случае соответствия результатов численного моделирования результатам, полученным при экспериментальной отработке, с допустимым отклонением $\pm 15\%$ от среднего значения полученных при испытаниях данных [14, 15], численная модель считалась подтвержденной экспериментально и принималась, как базисная, для проведения дальнейших расчетов.

Результаты расчетов численного моделирования по определению статического гидравлического остатка, для расчетных случаев I...VI, пересчитанные для натуральных условий с помощью зависимостей (1), (4) и (5), приведены в таблице 1.

Для сравнения и анализа, значения остатков, полученные в ходе экспериментальной отработки и математического моделирования, приведенные на

рис. 2 и в таблице 1 (для расчетного случая III), аппроксимировались степенной функцией:

– $V_{\text{ост.н.}} = 84,036 \cdot Fr^{0,3740}$ – для экспериментальной отработки ОК №1 (вода);

– $V_{\text{ост.н.}} = 81,888 \cdot Fr^{0,4362}$ – для экспериментальной отработки ОК №2 (вода дистиллированная);

– $V_{\text{ост.н.}} = 75,118 \cdot Fr^{0,4900}$ – для экспериментальной отработки ОК №2 (топливо ТС-1);

– $V_{\text{ост.н.}} = 66,315 \cdot Fr^{0,6128}$ – для математической 2D модели ОК №2 (топливо ТС-1, расчетный случай III).

Таблица 1

Результаты расчетов численного моделирования по определению статического гидравлического остатка для расчетных случаев I...VI

Расчетный случай	Число Фруда (Fr)	Натурный объёмный остаток в баке ($V_{\text{ост.н.}}$, дм ³)	Отклонение от средне аппроксимированного значения остатка, полученного в результате экспериментальной отработки (%)
I	2,91	97,28	-23,16
II	2,91	128,00	+1,11
III	2,56	117,76	-0,20
III	2,91	128,00	+1,11
III	3,32	138,24	+2,17
IV	2,91	117,76	-9,62
V	2,91	118,60	-5,27
VI	2,91	120,39	-3,84

На расчет, с учетом корректировки значений параметров (числа Куранта и временного шага) и устранения сбоев, с последующим перезапуском расчета, было потрачено:

– для расчетного случая I – 1848 часов машинного времени;

– для расчетного случая II – 2232 часов машинного времени;

– для расчетного случая III...VI – по ~ 24 часа машинного времени на каждый.

Как видно из приведенных выше цифр – расчеты при численном моделировании на математических 2D моделях занимают существенно меньший временной интервал, что позволяет не только ускорить процесс определения параметров заборных устройств, но и провести его оптимизацию на стадии проектирования.

На рис. 4...6 приведена форма свободной поверхности жидкости в опытных конструкциях, для расчетных случаев I...III, полученная при численном моделировании, для характерных моментов времени.

Для расчетных случаев IV...VI форма свободной поверхности жидкости в характерные моменты времени идентична приведенной на рис. 6.

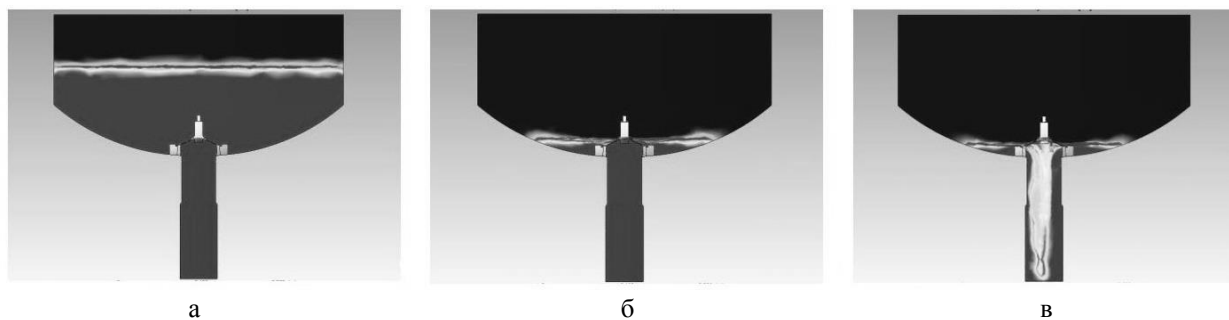


Рис. 4. Характерные моменты слива КТ из ОК (3D модель ОК №2, топливо ТС-1, расчетный случай I): а – начальный уровень модельной жидкости (сплошность 100 %); б – достижение воронкой провала уровня плоскости среза тарели заборного устройства (сплошность 100 %); в – достижение газовыми включениями плоскости фиксации датчиком сплошности наличия газовой фазы (сплошность 99,97 %)

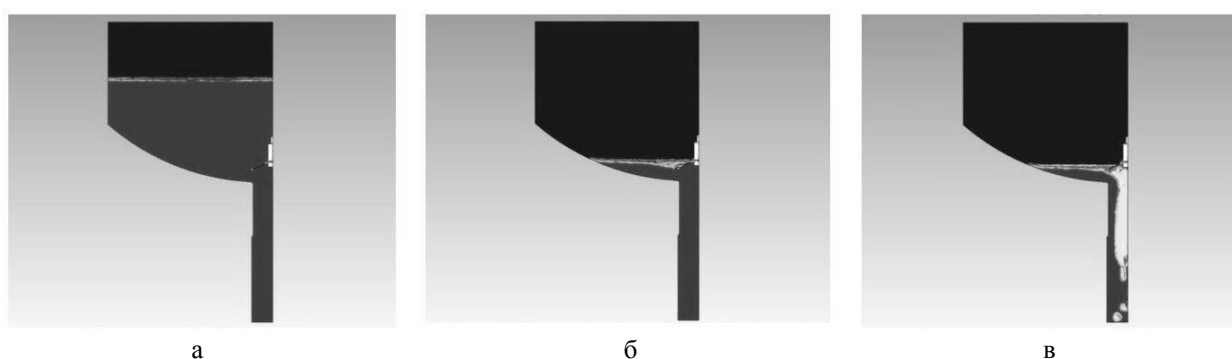


Рис. 5. Характерные моменты слива КТ из ОК (3D модель ОК №2, топливо ТС-1, расчетный случай II): а – начальный уровень модельной жидкости (сплошность 100 %); б – достижение воронкой провала уровня плоскости среза тарели заборного устройства (сплошность 100 %); в – достижение газовыми включениями плоскости фиксации датчиком сплошности наличия газовой фазы (сплошность 99,99 %)

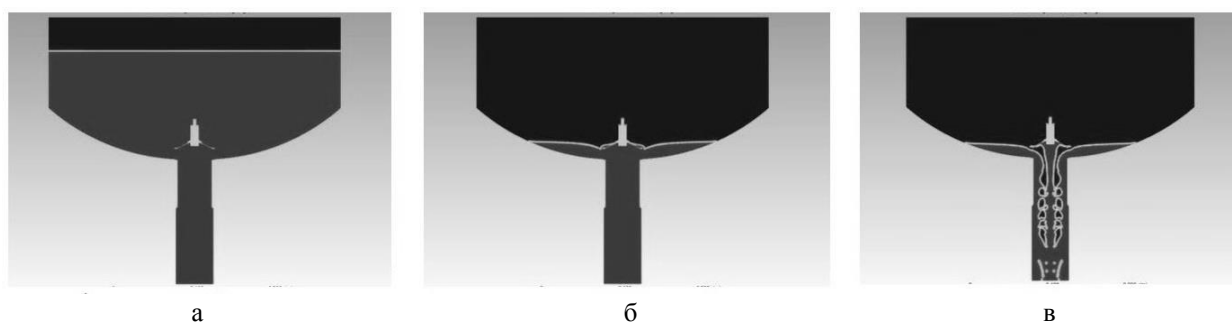


Рис. 6. Характерные моменты слива КТ из ОК (2D модель ОК №2, топливо ТС-1, расчетный случай III): а – начальный уровень модельной жидкости (сплошность 100 %); б – достижение воронкой провала уровня плоскости среза тарели заборного устройства (сплошность 100 %); в – достижение газовыми включениями плоскости фиксации датчиком сплошности наличия газовой фазы (сплошность 99,99 %)

На рис. 7 приведен график зависимости изменения величины статического гидравлического остатка в натурном баке от числа Фруда (Fr), построенный по результатам экспериментальной отработки и числен-

ного моделирования. Все данные, для простоты анализа, с помощью зависимостей (1), (4) и (5) пересчитаны на натуру

Как видно из результатов экспериментальной отработки и численного моделирования, приведен-

ных в таблице 1 и на рис. 7, погрешность определения значения статического гидравлического остатка для математической 3D модели половины ОК №2 (расчетный случай I) превышает допустимые 15 %, что делает ее неприменимой для дальнейших расчетов. На рис. 4 хорошо заметно размытие границы раздела фаз газ-жидкость, вызванное построением сетки с заведомо загрубленными параметрами. Это привело к нечувствительности расчётной математической модели к формированию и прорыву единичных газовых пузырей под пластину заборного устройства [12].

Процесс формирования и сноса единичных газовых пузырей основным потоком жидкости к плоскости фиксации сплошности хорошо представлен на рис. 5, 6 (для расчетных случаев II...III), что является достоверным отражением гидродинамических процессов при истечении жидкости из опытной конструкции в отработанном диапазоне чисел Фруда, для исследуемой конструкции заборного устройства. Поэтому для дальнейших расчетов и анализа использовались математические 3D и 2D модели опытной конструкции, разработанные для расчетных случаев II...VI.

Как видно из таблицы 1 и рис. 7, результаты численного моделирования для математической 2D модели ОК №2 (расчетный случай III) полностью совпали с результатами расчетов для математической 3D модели четверти ОК №2 (расчетный случай II) при равных значениях числа Фруда (Fr). Градиент изменения кривой зависимости остатка от числа Фруда

(Fr), полученный в результате аппроксимации степенной функцией результатов математического моделирования для трех значений числа Фруда (Fr) близок к полученному в ходе экспериментальной отработки ОК №2 (модельная жидкость – топливо ТС-1), что подтверждает возможность применения математической 2D модели при расчете нестационарных режимов течения жидкости. В результате отпадает необходимость в применении 3D моделей, что в свою очередь значительно сокращает время, затрачиваемое на численное моделирование.

Выводы

Разработанные на базе математической 2D модели ОК №2 (расчетный случай III) 2D модели для расчетных случаев IV...VI при расчете статических гидравлических остатков имеют хорошую сходимость результатов как между собой, так и с результатами расчетных случаев II, III и результатами экспериментальной отработки. Максимальные отклонения значений результатов численного моделирования (для расчетных случаев II...VI) лежат в поле разбросов, полученных в ходе экспериментальной отработки и не превышают их.

Последнее свидетельствует о соблюдении гидродинамического подобия при 3D и 2D моделировании (для расчетных случаев II...VI), о подобии модельных гидродинамических процессов натурным («автомодельности») в отработанном диапазоне задаваемых начальных условий и корректности выполнения поставленных задач по:

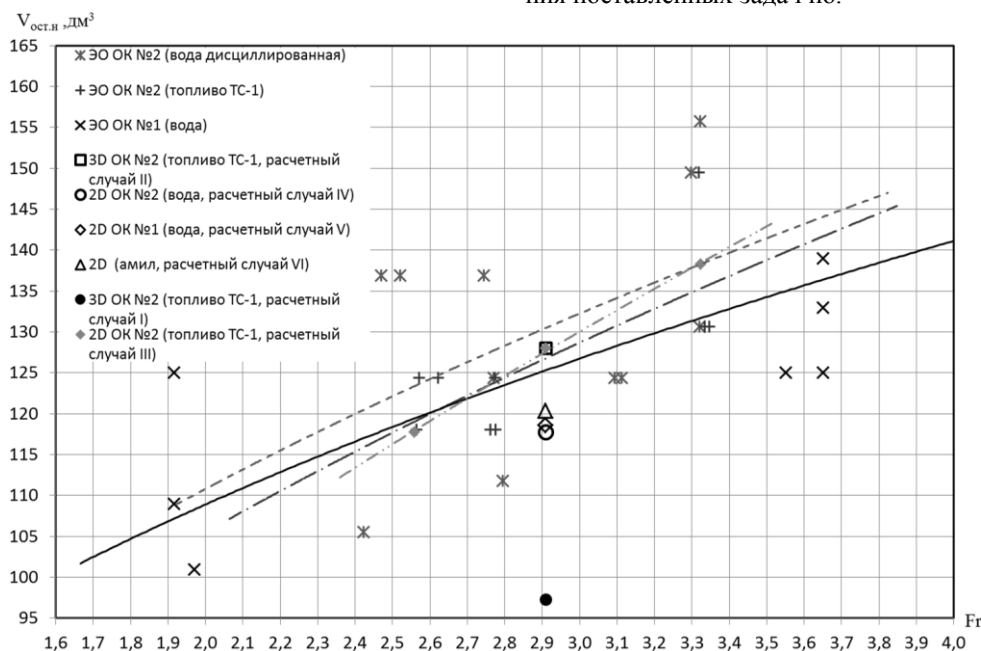


Рис. 7. График зависимости изменения величины статического гидравлического остатка в натурном баке от числа Фруда (Fr), построенный по данным экспериментальной отработки и численного моделирования

- построению 3D и 2D -модели расчетной области;
- созданию расчетной сетки;
- выбору математической модели расчета;
- заданию свойств материалов;
- заданию начальных и граничных условий;
- заданию параметров решателя;
- выбору временного шага (для нестационарного расчета);
- процессу компьютерного вычисления.

Принятые при проведении численного моделирования упрощения и допущения, а также вынужденное огрубление точности компьютерного расчета, исходя из имеющихся вычислительных и временных ресурсов – не повлияли на достоверность полученных результатов, так как они подтверждаются (верифицируются) результатами экспериментальной отработки.

Указанное дает возможность применить отработанную математическую 2D модель для определения статического гидравлического остатка при различных начальных и граничных условиях, а также использовать разработанную расчетно-математическую модель для других ракет-носителей с аналогичной конструкцией заборных устройств и нижних днищ баков.

Предложенный комбинированный расчетно-экспериментальный метод позволяет усовершенствовать существующую традиционную методику проектирования и экспериментальную отработку заборных устройств, обеспечивая необходимую точность.

Проведение численного моделирования с использованием математических 2D моделей позволяет уже на начальном этапе разработки оптимизировать параметры заборных устройств, уменьшить объем необходимой экспериментальной отработки и снизить временные и материально-технические затраты на ее проведение за счет:

- исключения необходимости использования при экспериментальной отработке полномасштабной модели бака;
- сокращения количества масштабных моделей с двух до одной (обусловлено необходимостью верификации значений численного расчета результатами экспериментальной отработки);
- сокращения (при необходимости) количества используемых при экспериментальной отработке модельных жидкостей до одной;
- сокращения (при необходимости) количества испытаний при экспериментальной отработке.

За счет более рационального распределения времени численные расчеты могут быть проведены еще на стадии эскизного проектирования с последующей

их верификацией данными экспериментальной отработки.

Литература

1. Беляев, Н. М. Расчет пневмогидравлических систем ракеты [Текст] / Н. М. Беляев. – М. : «Машиностроение», 1983. – 223 с.
2. Токарев, В. Е. Истечение жидкости из емкости с образованием воронки [Текст] / В. Е. Токарев // Известия высших учебных заведений. Сер. Авиационная техника. – 1967. – №3. – С. 92 – 94.
3. Шевченко, Б. А. Расчетный и экспериментальный метод разработки средств забора компонентов топлива из баков летательных аппаратов с жидкостным ракетным двигателем [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 / Шевченко Борис Алексеевич. – Днепропетровск, КБ «Южное», 1990. – 209 с.
4. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических аппаратов [Текст] / В.В. Багров [и др.]. – М. : УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997. – 328 с.
5. Abramson, Y. N. Simulation of fuel sloshing characteristics in missile tanks by use of small models [Text] / Y. N. Abramson, G. E. Ranaleben. // ARS Journal. – 1960. – Vol. 30, No. 7. – P. 603–613.
6. Микишев, Г. Р. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов [Текст] / Г. Р. Микишев. – М. : «Машиностроение», 1978. – 246 с.
7. Ринг, Э. Двигательные установки ракет на жидком топливе [Текст] / Э. Ринг. – М. : «Мир», 1966. – 400 с.
8. Седых, И.В. Экспериментальное подтверждение работоспособности капиллярного заборного устройства при отделении космического аппарата [Текст] / И.В. Седых, Д.Э. Смоленский // Механика гироскопических систем. – 2017. – № 33. – С. 105–114. <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771332017119618>.
9. Седых, И. В. Экспериментальное подтверждение работоспособности капиллярного заборного устройства (сетчатого разделителя) при программном развороте [Текст] / И. В. Седых, Д. Э. Смоленский, Д. С. Назаренко // Вісн. Дніпр. ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка. – 2018. – Вип. 21, Т. 26. – С. 112–119.
10. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В 2-х томах. Т. 1. Основные положения и общие методы [Текст] / К. Флетчер. – М. : Мир, 1991. – 504 с.
11. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. [Текст] : учеб. пособие / В. А. Брюяка [и др.]. – Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
12. An adaptive fixed-mesh ale method for free surface flows [Text] / J. Baiges, R. Codina, A. Pont, E. Castillo // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 2017. – No. 313. – P. 159–188. DOI: 10.1016/j.cma.2016.09.041.
13. Numerical modelling of 3D sloshing experiments in rectangular tanks [Text] / L. Battaglia,

M. Cruchaga, M. Storti, J. D'Elia, J. N. Aedo, R. Reinoso // *Appl. Math. Modell.* – 2018. – No. 59. – P. 357-378. DOI: 10.1016/j.apm.2018.01.033.

14. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик. – М.: «Машиностроение», 1975. – 558 с.

15. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград, ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1991. – 301 с.

References

1. Beljaev, N. M. *Raschet pnevmogidravlicheskih sistem rakety* [Calculation of rocket pneumohydraulic systems]. Moscow, «Mashinostroenie» Publ., 1983. 223 p.

2. Tokarev, V. E. *Istечение zhidkosti iz emkosti s obrazovaniem voronki* [The outflow of liquid from the tank with the formation of a funnel]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaja tehnika*, 1967, no. 3, pp. 92-94.

3. Shevchenko, B. A. *Raschetnyj i jeksperimental'nyj metod razrabotki sredstv zabora komponentov topliva iz bakov letatel'nyh apparatov s zhidkostnym raketnym dvigatelem. Dys. ... kand. tekhn. nauk.* [Estimated and experimental method for the development of means for collecting fuel components from tanks of aircraft with a liquid rocket engine. Diss. ... cand. tech. sci.] Dnepropetrovsk, KB «Juzhnoe» Publ., 1990. 209 p.

4. Bagrov, V. V., Kurpatenok, A. V., Poljaev, V. M. *Kapilljarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh apparatov* [Capillary systems for selecting liquid from spacecraft tanks]. Moscow, UNPC «JeNERGOMASH» Publ., 1997. 328 p.

5. Abramson, Y. N. Ranaleben, G. E. Simulation of fuel sloshing characteristics in missile tanks by use of small models. *ARS Journal*, 1960, vol. 30, no. 7, pp. 603-613.

6. Mikishev, G. R. *Jeksperimental'nye metody v dinamike kosmicheskikh apparatov* [Experimental methods in the dynamics of spacecraft]. Moscow, «Mashinostroenie» Publ., 1978. 246 p.

7. Ring, Je. *Dvigatel'nye ustanovki raket na zhidkom toplive* [Liquid propellant rocket propulsion systems]. Moscow, «Mir» Publ., 1966. 400 p.

8. Siedykh, I. V., Smolenskij, D. Je. *Jeksperimental'noe podtverzhdenie rabotosposobnosti kapilljarnogo zaboronogo ustrojstva pri otdelenii kosmicheskogo apparata* [Experimental confirmation of the operability of a capillary intake device in the separation of the spacecraft]. *Mehanika giroskoicheskikh system*, 2017, no. 33, pp. 105-114. DOI: 10.20535/0203-3771332017119618.

9. Siedykh, I. V., Smolenskij, D. Je., Nazarenko, D. S. *Jeksperimental'noe podtverzhdenie rabotosposobnosti kapilljarnogo zaboronogo ustrojstva (setchatogo razdelitelja) pri programnom razvorote* [Experimental confirmation of the operability of a capillary intake device (mesh separator) during a program turn]. *Visn. Dnpr. un-tu. Raketno-kosmichna tehnika*, 2018, vol. 21, no. 26, pp. 112-119.

10. Fletcher, K. *Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkostej. V 2-h tomah. T. 1. Osnovnye polozhenija i obshhie metody* [Computational methods in fluid dynamics. In 2 volumes. Vol. 1. The main provisions and general methods] Moscow, «Mir» Publ. 1991. 504 p.

11. Brujaka, V. A., Fokin, V. G., Soldusova, E. A., Glazunova, I. E., Adejanov, I. E. *Inzhenernyj analiz v ANSYS Workbench. Ucheb. posob.* [Engineering analysis at ANSYS Workbench]. Samar. gos. tehn. un-t Publ., 2010. 271 p.

12. Baiges, J., Codina, R., Pont, A., Castillo E. An adaptive fixed-mesh ale method for free surface flows *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2017. no. 313, – pp. 159–188. DOI: 10.1016/j.cma.2016.09.041.

13. Battaglia, L., Cruchaga, M., Storti, M., D'Elia, J., Aedo, J. N., Reinoso, R. Numerical modelling of 3D sloshing experiments in rectangular. *Appl. Math. Modell.*, 2018, no. 59, pp. 357–378. DOI: 10.1016/j.apm.2018.01.033

14. Idel'chik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam* [Hydraulic Resistance Reference]. Moscow, «Mashinostroenie» Publ., 1975. 558 p.

15. Novickij, P. V., Zoграф, I. A. *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij* [Estimation of errors of measurement results]. Leningrad, JeNERGOATOMIZDAT, 1991. 301 p.

Поступила в редакцию 12.11.2019, рассмотрена на редколлегии 10.12.2019

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ВІДПРАЦЮВАННІ ЗАБОРНИХ ПРИСТРОЇВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТИПУ

О. М. Мінай, І. В. Сєдих, І. Ю. Кузьміч

Під час проектування заборних пристроїв паливних баків ракет-носіїв в інженерній практиці використовуються емпіричні і напівемпіричні залежності для визначення основних параметрів руху рідини. Але, отриманні із дослідних даних, емпіричні залежності застосовуються для обмеженого кола задач, умови яких (початкові і граничні) подібні тим, для яких були отриманні дані залежності. Тому правильність розрахованих параметрів заборних пристроїв повинна бути підтверджена результатами експериментального відпрацювання.

Експериментальне відпрацювання заборних пристроїв на гідродинамічних стендах, як правило, проводиться на натурних баках і на їх масштабних моделях (дослідних конструкціях) в земних умовах. Для підтвердження подібності гідродинамічних процесів експериментальне відпрацювання масштабних моделей проводиться на декількох дослідних конструкціях різних масштабів і на декількох модельних рідинах.

В теперішній час, з розвитком обчислювальної техніки і чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь руху рідини, з'явилась можливість замінити практично повсюдне використання емпіричних залежностей більш точним обчислювальним експериментом. Це, в ряду випадків, дозволяє зменшити кількість дослідних конструкцій, які використовуються, терміни проведення експериментального відпрацювання і, як наслідок, матеріально-технічні витрати.

В роботі розглянуті результати експериментального визначення статичного гідравлічного залишку компоненту палива в дослідних конструкціях баку першого ступеню ракет-носіїв з центральним відбором компоненту і чисельного моделювання на математичних 3D і 2D моделях дослідних конструкцій. (аналогічного масштабу).

Авторами розроблений розрахунково-експериментальний метод верифікації результатів чисельного моделювання, який дозволяє проводити необхідні дослідження з необхідною точністю.

Запропонований підхід дозволяє вдосконалити існуючу традиційну методику експериментального відпрацювання заборних пристроїв, вже на початковому етапі розробки оптимізувати їх параметри, зменшити об'єм необхідного експериментального відпрацювання і знизити часові та матеріально-технічні вимоги на їх проведення.

Ключові слова: заборні пристрої; статичний гідравлічний залишок; експериментальне відпрацювання; чисельне моделювання; гідродинамічна подібність.

APPLICATION OF NUMERICAL MODELING METHODS AT EXPERIMENTAL WORKING OFF OF INTAKES OF CENTRAL TYPE

A. N. Minai, I. V. Siedykh, I. Y. Kuzmich

At the design of intakes of fuel tanks of launch vehicles in engineering practice, empirical and semi-empirical dependences are used for the determination of main parameters of the movement of liquid. However, the received from skilled data, empirical dependencies are applicable for a limited circle of tasks in which conditions (initial and boundary) are similar to for what these dependencies were received. Therefore, the calculated parameters of intakes it has to be validated by the results of experimental working off.

Experimental working off intakes at hydrodynamic stands is, as a rule, carried out on natural tanks and their large-scale models (skilled designs) in terrestrial conditions. For confirmation of similarity of hydrodynamic processes, experimental working off the large-scale models is carried out on several skilled designs of different scales and several model liquids.

Now, with the development of computer facilities and numerical methods of the solution of the differential equations of the movement of liquid, there was an opportunity to replace almost universal use of empirical dependences with more exact computing experiment. It, in some cases, allows reducing the quantity of the used skilled designs, terms of carrying out experimental working off, and, as a result, material expenses.

The article presents results of the experimental definition of the static hydraulic rest of a component of fuel in skilled designs of a tank of the first step of carrier rockets with the central selection of a component and numerical modeling on mathematical 3D and 2D models of skilled designs (similar scale) are considered.

The authors developed the calculated and experimental method of verification of results of numerical modeling allowing them to conduct necessary researches with the demanded accuracy.

The offered approach allows improving the existing traditional method of experimental working off of intakes, already at the initial stage of development to optimize their parameters, to reduce the volume of necessary experimental working off and to lower time and material expenditure on its carrying out.

Keywords: intakes; static hydraulic residual; experimental working off; numerical modeling; hydrodynamic similarity.

Минай Александр Николаевич – начальник сектора, ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина.

Седых Игорь Викторович – начальник группы, ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина.

Кузьмич Ирина Юрьевна – инженер-конструктор 1 категории, ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина.

Minai Alexandr Nikolaevich – The chief of sector of SE Design Office “YUZHNOYE”, Dnepr, Ukraine, e-mail: minayan1976@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-4180-0149.

Siedykh Ihor Viktorovich – The chief of group of SE Design Office “YUZHNOYE”, Dnepr, Ukraine, e-mail: sh4nder@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-6981-3355, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=6zZ4HL0AAAAJ&hl>

Kuzmich Iryna Yurievna – design engineer 1 category of SE Design Office “YUZHNOYE”, Dnepr, Ukraine, e-mail: kuzmichiyu82@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-3944-2602.