

УДК 532.527

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛИВА ЖИДКОСТИ ИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ, СОВЕРШАЮЩЕЙ КОЛЕБАНИЯ В ПОПЕРЕЧНОМ И ПРОДОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИЯХ

С. А. ДАВЫДОВ

Днепропетровский национальный университет

Получено 27.09.2006

Работа посвящена экспериментальным исследованиям процесса слива жидкости из осесимметричной цилиндрической емкости со сферическим дном, совершающей гармонические колебания в поперечном и продольном направлениях в условиях нормальной гравитации. На основе проведенных экспериментов получены эмпирические зависимости для определения поправочного коэффициента, для адекватного расчета подобных динамических процессов.

Работа присвячена експериментальним дослідженням процесу зливу рідини з осесиметричної ємності зі сферичним дном, що здійснює гармонічні коливання у поперечному та поздовжньому напрямках в умовах нормальної гравітації. На основі проведених експериментів отримані емпіричні залежності для визначення поправочного коефіцієнта для адекватного розрахунку подібних динамічних процесів.

The paper is devoted to experimental investigation of the fuel evacuation process from the cylindrical capacity with the spherical bottom. The vessel is oscillated in the longitudinal and transversal directions in the normal gravity conditions. The empirical formula for the correction factor to determine was obtained. The correction factor is necessary for the adequate calculation of the similar dynamic processes.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к поведению жидкости в осесимметричной емкости, находящейся под действием внешних силовых импульсов, в значительной мере обусловлен развитием аэрокосмической техники. Непосредственно с вопросами динамики жидкости связана проблема опорожнения емкостей в условиях внешнего силового воздействия. Значительное количество публикаций посвящено разработке математических моделей этих процессов [1, 10, 11], а также экспериментальным исследованиям [2, 3, 5, 7, 9].

Чаще всего исследования направлены на определение объема так называемых невырабатываемых остатков (НО) топлива, т. е. объема жидкости, который остается внутри бака на момент прорыва газовой фазы в сливное отверстие. При этом численное моделирование эффективно для цилиндрических либо сферических баков с весьма упрощенной геометрией заборных устройств в условиях действия продольного массового ускорения [1, 10, 11].

В последнее десятилетие, в связи с ростом количества запусков ракет, возникла проблема нейтрализации НО топлива, которое остается в баках отработавших ракетных ступеней и попадает в почву после падения ступени на земную поверх-

ность. Одним из путей решения этой проблемы является слив НО топлива из баков до момента контакта ступени с земной поверхностью. При этом во время слива возможно периодическое поступление в сливную магистраль газа наддува. Степень в процессе движения по свободной траектории совершает колебания в поперечном и продольном направлениях. Поэтому возросла актуальность изучения процесса слива жидкости из емкости после прорыва газовой фазы в сливное отверстие. В [7, 9] экспериментально изучен процесс слива жидкости из цилиндрического бака с плоским дном при образовании вихревой воронки и влияние на расход сливаемой жидкости проникновения газа в сливное отверстие. Указанные эксперименты проводились в условиях нормальной гравитации и при неподвижной модельной емкости.

Экспериментальные исследования динамики жидкости в цилиндрической емкости, совершающей колебания в поперечном и продольном направлениях по отношению к действующему внешнему массовому ускорению, приведены в [2, 5]. Однако, в [2] слив жидкости ограничивается моментом прорыва газа в сливное отверстие и исследования направлены на определение объема НО. В [5] изучается динамика жидкости в баке без слива.

В [6] представлена математическая модель и методика численного расчета процесса слива НО

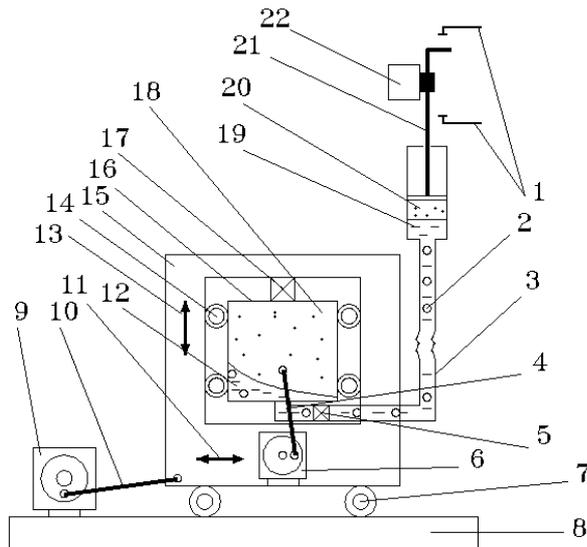


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – концевые выключатели перемещения поршня; 2 – газовые пузыри в сливной магистрали; 3 – сливная магистраль; 4 – вертикальная тяга; 5 – заправочно-сливной штуцер; 6 – двигатель вертикальных колебаний; 7 – ролики горизонтальных колебаний; 8 – платформа; 9 – двигатель горизонтальных колебаний; 10 – горизонтальная тяга; 11 – направление горизонтальных колебаний; 12 – жидкость в модельной емкости; 13 – направление вертикальных колебаний; 14 – ролики вертикальных колебаний; 15 – подвижная рама с моделью, совершающая горизонтальные колебания; 16 – модель бака с жидкостью; 17 – дренажный штуцер; 18 – газ; 19 – слитый объем жидкости; 20 – газ, прорвавшийся в сливную магистраль при сливе; 21 – поршень; 22 – привод поршневого блока

жидкости из цилиндрической емкости, совершающей колебания в продольном и поперечном направлениях в условиях проникновения газовой фазы в сливное отверстие. Однако при разработке теоретической модели использовался ряд упрощающих предположений. Поэтому с целью идентификации этой модели реальному физическому процессу были проведены экспериментальные исследования, основные результаты которых приведены ниже.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для исследования процесса слива жидкости из осциллирующей емкости была разработана экспериментальная установка (ЭУ) (рис. 1). Главным ее элементом является модель топливного бака (ТБ) отработавшей ракетной ступени 16 (рис. 1),

выполненная из оргстекла для визуализации исследуемого процесса. Модель имеет цилиндрическую форму с плоским верхним дном и выпуклым сферическим нижним дном. На плоском верхнем дном располагается дренажный штуцер 17 для сброса избыточного давления воздуха при заполнении модели рабочей жидкостью. В центре нижнего дна располагается отверстие сливной магистрали 3 для слива рабочей жидкости во время проведения экспериментов. Сливная магистраль соединяет полость модели 16 с расходным блоком.

Расходный блок представляет собой поршень 21, который перемещается в вертикальном направлении по цилиндрической емкости постоянного внутреннего диаметра, выполненной из оргстекла. Поршень приводится в движение специальным реверсивным двигателем постоянного тока 22 с регулируемой частотой оборотов. Перемещения поршня ограничены специальными бесконтактными выключателями 1. Поршневой блок также снабжен специальной мерной линейкой для регистрации текущего объема слитой из емкости жидкости 19. Модель 16 содержит рабочую жидкость 12, которая совершает колебательное движение и в заданный промежуток времени сливается из модели через штуцер 5.

Модель 16 может перемещаться в вертикальном направлении 13 на роликах 14 посредством тяги 4. Тяга 4 закреплена одним концом на дном модели, а другим – на стальном диске, который приводится во вращение реверсивным двигателем 6. Посредством выбора расстояния от точки закрепления тяги 4 до оси вращения диска и частоты оборотов диска можно варьировать амплитуду и частоту колебаний модели в вертикальном направлении.

Модель с жидкостью 16 и двигатель вертикальных колебаний 6 располагаются на подвижной металлической раме 15, совершающей колебания в горизонтальной плоскости. Эта рама располагается на подвижных роликах 7, которые скользят по специальным направляющим, размещенным на платформе 8. Рама 15 приводится в движение тягой горизонтальных колебаний 10. Указанная тяга совершает возвратно-поступательное движение за счет двигателя горизонтальных колебаний 9.

Системы горизонтальных и вертикальных колебаний, а также расходный блок управляются со специального общего пульта. Система управления дает возможность варьировать частоту оборотов двигателей 6, 9 и 22, что, в свою очередь, позволяет изменять в определенном диапазоне частоту колебаний модели в продольном и поперечном на-

правлении, а также уровень расхода сливаемой из емкости жидкости.

Целью экспериментов являлось изучение изменения относительного объема сливаемой жидкости в зависимости от параметров колебательного процесса и времени слива.

Перед проведением экспериментов в модель заливалась через дренажный штуцер 17 жидкость 12. На блоках питания двигателей 6, 9 и 22 устанавливался предварительно выбранный уровень напряжения. Перед проведением экспериментов проводилась тарировка соответствия подаваемого напряжения частоте оборотов двигателя. Далее включались двигатели 6 и 9, и модель 16 приходила в движение. Частота колебаний в вертикальной и горизонтальной плоскости фиксировалась светолучевым осциллографом посредством контактных выключателей. Через определенный промежуток времени, необходимый для стабилизации колебательного процесса, подавалось напряжение на двигатель 22 для запуска расходного блока. Начиная слив жидкости через сливную магистраль 3. Длительность времени слива задавалась посредством реле времени. От реле поступала команда на выключение расходного блока. После этого визуально по мерным рискам на расходном блоке определялся объем слитой из модели жидкости.

Экспериментальная установка позволяет варьировать параметры колебательного процесса в следующем диапазоне:

- амплитуда продольных колебаний
 $A_0 - 0 \div 80$ мм;
- амплитуда поперечных колебаний
 $A_6 - 0 \div 130$ мм;
- частота продольных колебаний
 $\omega_0 - 1.8 \div 4.0$ с⁻¹;
- частота поперечных колебаний
 $\omega_6 - 0.5 \div 1.5$ с⁻¹.

При этом параметры относительной интенсивности продольного $\chi_0 = \frac{A_0 \omega_0^2}{g}$ и поперечного $\chi_6 = \frac{A_6 \omega_6^2}{g}$ ускорений можно менять при проведении экспериментов в пределах [0; 0.13] и [0; 0.03] соответственно.

Расход сливаемой жидкости Q_M можно варьировать от 20 до 120 см³/с, а время слива $(t_M)_{max}$ – от 1.6 до 9 с.

При проведении экспериментов выполнялись специальные исследования влияния уровня расхода Q_M из указанного выше диапазона на объем сливаемой жидкости. Значимой связи между эти-

ми параметрами в пределах указанного выше диапазона изменения расхода обнаружено не было. Поэтому все представленные ниже экспериментальные данные получены при постоянном уровне расхода, создаваемого поршнем, $Q_M = 60$ см³/с.

При проведении экспериментов использовалась цилиндрическая модельная емкость, выполненная из оргстекла, внутренним радиусом $R = 60$ мм и длиной $L = 160$ мм. Модель имела плоское верхнее днище и сферическое нижнее днище с радиусом кривизны $R_d = 80$ мм. В качестве модельной жидкости применялся октан плотностью $\rho_\tau = 702.2$ кг/м³ [4]. В модель заправлялся начальный объем жидкости $\tau_n = 180$ см³. Сливное отверстие диаметром $d_n = 5$ мм располагалось на оси симметрии модели.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Эксперименты по исследованию влияния на слив жидкости колебаний емкости в продольном и поперечном направлении состояли из трех этапов.

На первом этапе исследовался слив из емкости, совершающей колебания только в поперечном направлении, т. е. $\chi_0 = 0$. Результаты этих экспериментов в виде зависимости коэффициента слива жидкости $\bar{\tau}_c = \frac{\tau_c}{\tau_n}$ (τ_c – текущий объем сливаемой жидкости, τ_n – начальный объем жидкости в модели) от времени слива t представлены на рис. 2. Здесь показаны эмпирические данные для различных значений параметра χ_6 (0.0015; 0.0038; 0.018; 0.027). При этом экспериментальные точки, соответствующие первым трем значениям параметра χ_6 (на графике они условно представлены в виде кружка, треугольника и квадрата), получены при постоянном значении амплитуды поперечных колебаний емкости $A_6 = 0.029$ м и различных значениях частоты этих колебаний $\omega_6 = 0.7$ Гц (“□”); 1.14 Гц (“▽”); 2.44 Гц (“□”). Экспериментальные точки, изображенные в виде ромбиков, получены для $A_6 = 0.11$ м и частоты $\omega_6 = 1.54$ Гц.

На рис. 2, а также показаны теоретические кривые, построенные с помощью математической модели [6], которая была скорректирована введением эмпирического коэффициента $k_{экс}$. Этот коэффициент уточняет момент начала и прекращения поступления газовой фазы в сливную магистраль. Необходимость введения коэффициента $k_{экс}$ обусловлена тем, что при построении математической модели предполагалось, что свободная по-

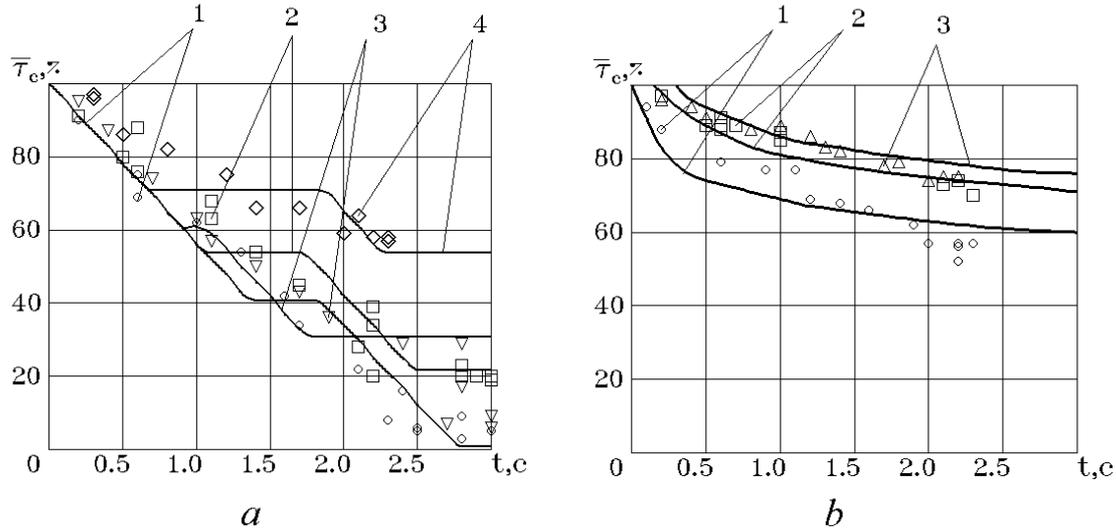


Рис. 2. Зависимость коэффициента слива жидкости $\bar{\tau}_c$ (%) от времени t (с) из цилиндрической емкости, совершающей гармонические колебания в одном направлении:

$$\begin{aligned}
 a - 1 - \chi_6 = 0.0015; 2 - \chi_6 = 0.0038; 3 - \chi_6 = 0.018; 4 - \chi_6 = 0.0027; \chi_0 = 0; \\
 b - 1 - \chi_0 = 0.025; 2 - \chi_0 = 0.093; 3 - \chi_0 = 0.144; \chi_6 = 0
 \end{aligned}$$

верхность жидкостного объема односвязная и плоская, а жидкость имеет форму шарового сегмента. В реальной ситуации это не совсем так.

На основе обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов и использования теории размерностей была получена эмпирическая зависимость для расчета коэффициента $k_{\text{экс}}$ для случая $\chi_0 = 0$ в виде

$$k_{\text{экс}} = C^* \chi_6^{B^*}, \quad (1)$$

где $C^* = 1290$, $B^* = 1.14$ – эмпирические постоянные.

Графические данные на рис. 2, а свидетельствуют о том, что введение поправочного коэффициента позволяет вполне адекватно теоретически рассчитывать коэффициент слива жидкости из емкости, совершающей гармонические колебания в поперечном направлении. Достаточно большой разброс экспериментальных точек вероятнее всего связан со случайным значением фазы колебаний φ_6 жидкости в момент начала процесса слива при проведении экспериментов. Теоретические кривые, представленные на рис. 2–5, построены при условии, что начальные фазы колебаний в поперечном φ_6 и продольном φ_0 направлениях равны нулю.

Экспериментально установлено, что слив жидкости носит ступенчатый характер. Это связано с циклическим перекрытием сливного отверстия жидкостью. Увеличение значения параметра χ_6

приводит к существенному снижению абсолютно-го объема сливаемой жидкости. Так, в момент времени $t = 2.5$ с имеем:

$$\begin{aligned}
 \bar{\tau}_c = 12\% \quad \text{при} \quad \chi_6 = 0.0015, \\
 \bar{\tau}_c = 22\% \quad \text{при} \quad \chi_6 = 0.0038, \\
 \bar{\tau}_c = 31\% \quad \text{при} \quad \chi_6 = 0.018, \\
 \bar{\tau}_c = 54\% \quad \text{при} \quad \chi_6 = 0.027.
 \end{aligned}$$

Поскольку для графиков на рис. 2 увеличение параметра χ_6 обусловлено увеличением частоты поперечных колебаний емкости ω_6 (за исключением кривой 4), а собственная частота колебаний жидкости $\omega_{\text{соб}} \approx 1.7$ Гц, то, скорее всего, снижение эффективности слива жидкости из емкости связано с приближением частоты ω_6 к частоте основного резонанса $\omega_{\text{соб}}$.

На втором этапе экспериментов исследовался слив из емкости, совершающей колебания только в продольном направлении, т. е. $\chi_6 = 0$. Результаты этих экспериментов в виде графической зависимости коэффициента слива жидкости $\bar{\tau}_c$ от времени слива t представлены на рис. 2, б. Экспериментальные точки на этом рисунке получены при постоянном значении амплитуды продольных колебаний емкости $A_0 = 0.022$ м и различных значениях частоты колебаний ω_0 . Условные обозначения в виде кружков на рис. 2, а соответствуют $\omega_0 = 3.33$ Гц, в виде квадратиков – $\omega_0 = 6.45$ Гц, в виде треугольников – $\omega_0 = 8.0$ Гц. Кривые 1–3 на рисунке построены с помощью полуэмпирической зависимости

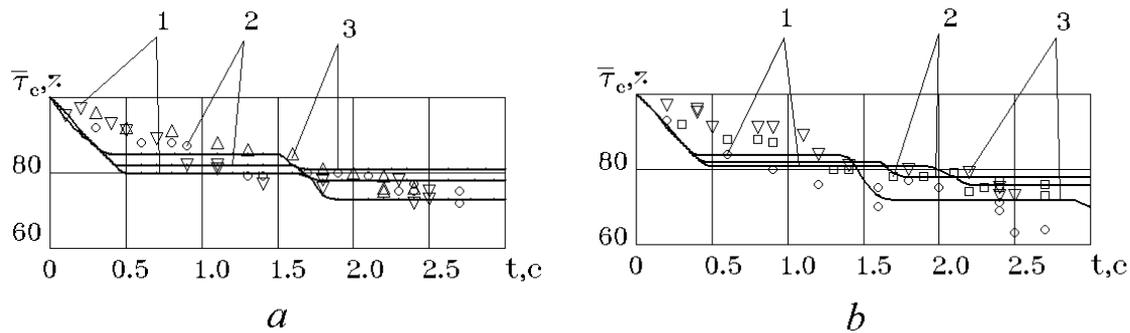


Рис. 3. Зависимость коэффициента слива жидкости $\bar{\tau}_c$ (%) от времени t (с) в цилиндрической емкости, совершающей гармонические колебания в продольном и поперечном направлениях с амплитудами $A_0 = 0.022$ м и $A_6 = 0.029$ м соответственно:

$$\begin{aligned}
 & a - \chi_0 = 0.056 \quad (\omega_0 = 5 \text{ Гц}); \\
 & 1 - \chi_6 = 0.0044 \quad (\omega_6 = 1.22 \text{ Гц}); \quad 2 - \chi_6 = 0.0076 \quad (\omega_6 = 1.6 \text{ Гц}); \quad 3 - \chi_6 = 0.018; \quad (\omega_6 = 2.4 \text{ Гц}); \\
 & \quad \quad \quad b - \chi_6 = 0.0076 \quad (\omega_6 = 1.6 \text{ Гц}); \\
 & 1 - \chi_0 = 0.023 \quad (\omega_0 = 3.2 \text{ Гц}); \quad 2 - \chi_0 = 0.056 \quad (\omega_0 = 5.0 \text{ Гц}); \quad 3 - \chi_0 = 0.162; \quad (\omega_0 = 8.5 \text{ Гц})
 \end{aligned}$$

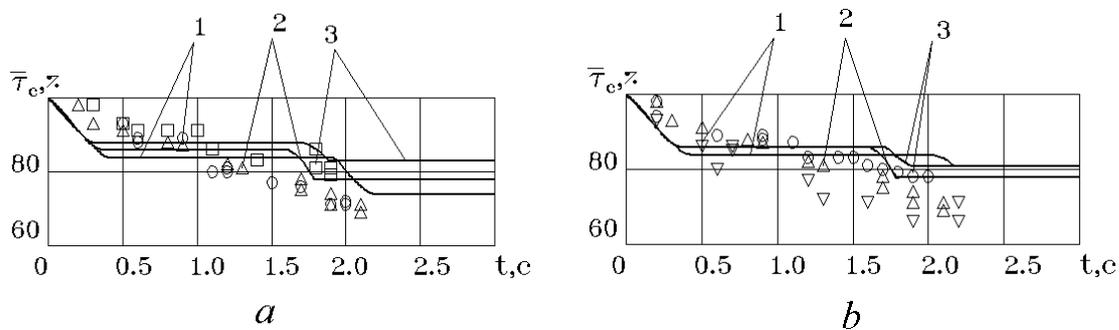


Рис. 4. Зависимость коэффициента слива жидкости $\bar{\tau}_c$ (%) от времени t (с) из цилиндрической емкости, совершающей гармонические колебания в продольном и поперечном направлениях с амплитудами $A_0 = 0.022$ м и $A_6 = 0.110$ м соответственно:

$$\begin{aligned}
 & a - \chi_0 = 0.11 \quad (\omega_0 = 7.0 \text{ Гц}); \\
 & 1 - \chi_6 = 0.0077 \quad (\omega_6 = 0.83 \text{ Гц}); \quad 2 - \chi_6 = 0.017 \quad (\omega_6 = 1.23 \text{ Гц}); \quad 3 - \chi_6 = 0.031; \quad (\omega_6 = 1.67 \text{ Гц}); \\
 & \quad \quad \quad b - \chi_6 = 0.017 \quad (\omega_6 = 1.23 \text{ Гц}); \\
 & 1 - \chi_0 = 0.036 \quad (\omega_0 = 4.0 \text{ Гц}); \quad 2 - \chi_0 = 0.11 \quad (\omega_0 = 7.0 \text{ Гц}); \quad 3 - \chi_0 = 0.144; \quad (\omega_0 = 8.0 \text{ Гц})
 \end{aligned}$$

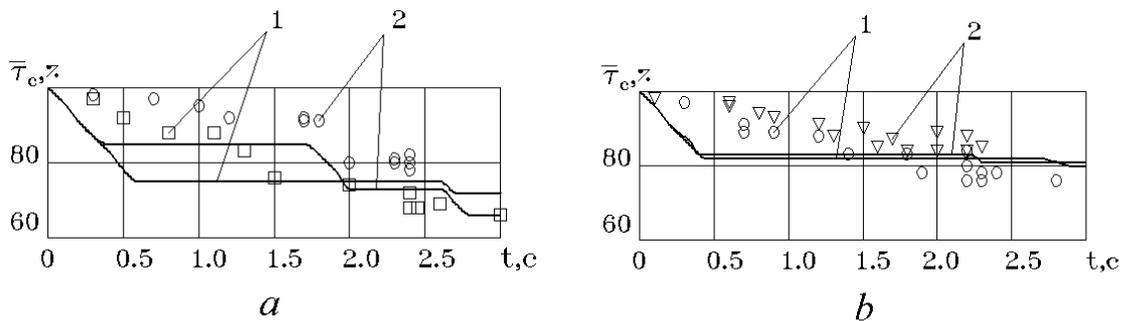


Рис. 5. Зависимость коэффициента слива жидкости $\bar{\tau}_c$ (%) от времени t (с) из цилиндрической емкости, совершающей гармонические колебания в продольном и поперечном направлениях с амплитудой $A_0 = 0.06$ м в продольном направлении:

$$\begin{aligned}
 & a - \chi_0 = 0.038 \quad (\omega_0 = 2.5 \text{ Гц}); \quad A_6 = 0.029 \text{ м}; \quad 1 - \chi_6 = 0.0022 \quad (\omega_6 = 0.87 \text{ Гц}); \quad 2 - \chi_6 = 0.0185 \quad (\omega_6 = 2.5 \text{ Гц}); \\
 & \quad \quad \quad b - \chi_6 = 0.0085 \quad (\omega_6 = 0.87 \text{ Гц}); \quad A_6 = 0.11 \text{ м}; \quad 1 - \chi_0 = 0.038 \quad (\omega_0 = 2.5 \text{ Гц}); \quad 2 - \chi_0 = 0.068 \quad (\omega_0 = 3.3 \text{ Гц})
 \end{aligned}$$

$$\bar{\tau}_c = C^0 \chi_0^{B^0} Sh^{D^0}, \quad (2)$$

где $C^0 = 240$, $B^0 = 0.13$, $D^0 = -0.12$ – эмпирические постоянные; $Sh = \frac{Q_M t}{d_n}$ – число Струхала.

Зависимость (2) получена с помощью анализа размерностей методом показателей Рэлея [8].

Экспериментальные данные на рис. 2, *a* свидетельствуют, что при вынужденных колебаниях емкости в продольном направлении слив жидкости происходит ступенчато, также как и в случае вынужденных колебаний в поперечном направлении. Увеличение значения параметра χ_0 от 0.025 до 0.144, обусловленное увеличением частоты продольных колебаний бака, приводит к повышению коэффициента слива $\bar{\tau}_c$. Например, через 2 секунды после начала слива в емкости остается $\bar{\tau}_c = 57\%$ начального объема жидкости при $\chi_0 = 0.025$; $\bar{\tau}_c = 73\%$ начального объема жидкости при $\chi_0 = 0.093$ и $\bar{\tau}_c = 80\%$ – при $\chi_0 = 0.144$.

На третьем этапе экспериментов исследовался слив из емкости, совершающей колебания одновременно в поперечном и продольном направлениях. Результаты экспериментов представлены на рис. 3–5, где приведены и теоретические кривые, которые получены на основе описанной выше математической модели, скорректированной введение эмпирического коэффициента

$$k_{\text{экс}} = C^* \chi_6^{B^*} \chi_0^{D^*}, \quad (3)$$

где $C^* = 25.4$, $B^* = 1.08$, $D^* = -0.3$ – эмпирические постоянные.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные по сливу жидкости из емкости, совершающей колебания в продольном и поперечном направлениях с амплитудами $A_0 = 0.022$ м и $A_6 = 0.029$ м соответственно. При этом на рис. 3, *a* варьировалась частота поперечных колебаний ω_6 при неизменной частоте продольных колебаний $\omega_0 = 5.0$ Гц, а на рис. 3, *б* варьировалась частота продольных колебаний ω_0 при неизменной частоте поперечных колебаний $\omega_6 = 1.6$ Гц. В результате анализа данных на рис. 3 были сделаны следующие выводы.

Рост параметра χ_6 от 0.0044 ($\omega_6 = 1.22$ Гц) до 0.018 ($\omega_6 = 2.44$ Гц) при неизменном значении параметра $\chi_0 = 0.056$ ($\omega_0 = 5.0$ Гц) не приводит к заметному изменению величины коэффициента слива $\bar{\tau}_c$ (рис. 3, *a*). В то же время, рост параметра χ_0 от 0.023 ($\omega_0 = 3.2$ Гц) до 0.162 ($\omega_0 = 8.5$ Гц) при неизменном значении параметра $\chi_6 = 0.0076$ ($\omega_6 = 1.6$ Гц) влечет за собой существенное увеличение коэффициента $\bar{\tau}_c$ (рис. 3, *б*). Например, в

момент времени $t = 2.5$ с при $\chi_0 = 0.023$ $\bar{\tau}_c = 63\%$, а при $\chi_0 = 0.162$ $\bar{\tau}_c = 74\%$. Следовательно, колебания емкости в продольном направлении в значительно большей степени ухудшают условия слива НО топлива, чем колебания в поперечном направлении.

На рис. 4 также приведены экспериментальные данные по исследованию слива жидкости из емкости, совершающей вынужденные колебания в поперечном и продольном направлениях одновременно. Однако амплитуда поперечных колебаний A_6 по сравнению с данными рис. 3 была увеличена от 0.029 до 0.11 м при неизменном значении амплитуды продольных колебаний $A_0 = 0.022$ м.

Представленные на рис. 4 результаты экспериментов подтверждают выводы, которые были сделаны по данным рис. 3. Колебания емкости в продольном направлении в значительно большей степени ухудшают условия слива НО топлива, чем колебания в поперечном направлении. Однако на рис. 4, *a* заметно влияние параметра χ_6 на значения коэффициента $\bar{\tau}_c$. В момент времени $t = 1.9$ с $\bar{\tau}_c = 70\%$ при $\chi_6 = 0.0077$ и $\bar{\tau}_c = 80\%$ при $\chi_6 = 0.031$.

На рис. 5 приведены результаты экспериментов по сливу жидкости из емкости, совершающей гармонические колебания в поперечном и продольном направлениях с амплитудами $A_6 = 0.029$ м и $A_0 = 0.06$ м (рис. 5, *a*) и с амплитудами $A_6 = 0.11$ м и $A_0 = 0.06$ м (рис. 5, *б*). Увеличение значений параметров χ_0 и χ_6 приводит к ухудшению условий слива жидкости из емкости. Кроме того, сравнение данных на рис. 3, *a* (“□”) и на рис. 5, *б* (“∇”) показывает, что для приближенно равных значений параметров χ_0 и χ_6 значения коэффициента слива $\bar{\tau}_c$ (%) достаточно близки друг к другу в одинаковые моменты времени. При этом соответствующие значения частот и амплитуд вынужденных колебаний для указанных экспериментальных данных существенно различаются. Следовательно, есть основания считать, что на эффективность слива жидкости из емкости, совершающей одновременно колебания в поперечном и продольном направлениях, оказывают значимое влияние прежде всего коэффициенты χ_0 и χ_6 при условии, что частоты вынужденных колебаний достаточно далеки от частоты основного резонанса жидкостного объема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проведенным экспериментальным исследованиям, необходимо отметить следующее. Процесс слива жидкости из осесимметричной ем-

кости, совершающей одновременно колебания в поперечном и продольном направлениях, вполне адекватно описывается математической моделью, которая предложена в [6], если в расчетной методике используется поправочный эмпирический коэффициент $k_{\text{экс}}$. Полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что можно осуществить слив НО топлива через патрубок на верхнем днище бака за достаточно короткий промежуток времени без использования дополнительных демпферов колебаний, если интенсивность внешних силовых воздействий на топливо находится в исследованном диапазоне значений с учетом коэффициента подобия.

В то же время, следует ожидать, что по мере удаления сливного отверстия от продольной оси бака эффективность его опорожнения будет снижаться и, как следствие, увеличиваться общее время слива. Для получения количественных оценок этого фактора необходимо проведение дополнительных исследований по методике, предложенной в данной работе.

1. Безуглый В.Ю., Козлов И.Н. Численный расчет гидродинамики и теплообмена при истечении жидкости через сливное отверстие // Математические методы тепломассопереноса: Сб. научн. тр. – Днепропетровск, ДГУ. – 1986 - С. 14–20.
2. Беляев Н.М., Калиниченко В.Я., Шевченко Б.А. Влияние колебаний жидкости на высоту провала

уровня // Гидромеханика и теория упругости. Численные и аналитические методы решения задач гидроаэродинамики и теории упругости: Сб. научн. тр. – Днепропетровск, ДГУ. – 1986 - С. 9–15.

3. Богомаз Г.И., Сирота С.А. Колебания жидкости в баках (методы и результаты экспериментальных исследований). – Днепропетровск: НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2002. – 306 с.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
5. Давыдов С.А. Вынужденные колебания жидкости в цилиндрическом баке в переменном гравитационном поле // Системне проєктування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: Зб. наук. праць - Т. II - Дніпропетровськ: Видавництво "Навчальна книга", – 2000. – С. 50–55.
6. Давыдов С.А. Математическое моделирование слива невыработываемых остатков топлива из баков отработавших ракетных ступеней // Авиационно-космическая техника и технология. - 2006. - № 5(31). - С. 43–50.
7. Павельев А.А., Штарев А.А. Эксперимент по формированию вихря при вытекании жидкости из бака // Изв. РАН. МЖГ. – 2001. – № 5. – С. 203–207.
8. Шарп Дж. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984. – 280 с.
9. Штарев А.А. Экспериментальное исследование расхода жидкости при нестационарном истечении из заполненной емкости // Изв. РАН. МЖГ. – 2005. – № 2. – С. 113–121.
10. Chou C.Y., Lay W.M. Unsteady axisymmetric flows of a liquid draining from a circular tank // AIAA Journal. – 1972. – 10, № 8. – P. 27–35.
11. Easton C.R., Catton J. Nonlinear free surface effect in tank draining at low gravity // AIAA Journal. – 1970. – 8, № 8.