

## Условия разрушения газовых полостей в жидкости при переходе от невесомости к кратковременному воздействию одиночных импульсов перегрузки

© В.Б. Сапожников, Н.И. Авраамов

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

*Представлены результаты экспериментальных исследований процессов разрушения газовой полости в топливных баках жидкостных ракетных двигательных установок в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета под действием кратковременных одиночных импульсов перегрузки. Установлено, что характер процесса разрушения свободных газовых полостей при воздействии таких импульсов определяется временем действия импульса и соотношением между силами поверхностного натяжения и вязкого трения. Сформирована структура безразмерных комплексов, которые определяют зависимость максимального объема газовой полости, не разрушающегося при всплытии под действием архимедовой силы, от импульсов перегрузки, продолжительности импульса и физических свойств жидкости.*

**Ключевые слова:** жидкостная ракетная двигательная установка, топливный бак, невесомость, перегрузка, газовая полость, деформация, разрушение, экспериментальные исследования

**Введение.** Поведение жидкого топлива и газа наддува в топливных баках летательных аппаратов (ЛА) в условиях свободного (невозмущенного) орбитального (суборбитального) полета при действии на них одиночных импульсов перегрузки определяет нормальное функционирование жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Для ЛА, находящихся в полете при указанных условиях, нормальное функционирование ЖРД может обеспечить исключительно непрерывность подачи компонентов жидкого ракетного топлива в расходные магистрали топливных баков без нарушения сплошности потока. Поэтому решение задачи о динамике газовой подушки в топливных баках жидкостных ракетных двигательных установок при переходе от невесомости к перегрузке представляет несомненный практический интерес.

Однако процессы разрушения газовой подушки и образования газожидкостных смесей в топливных баках жидкостных ракетных двигательных установок в рассматриваемых условиях под действием кратковременных одиночных импульсов перегрузки — наиболее сложные для исследований, и не всегда можно гарантировать получение ожидаемых и достоверных результатов.

В связи с этим наряду с выполненным ранее численным решением краевой задачи Дирихле [1] и теоретическими результатами, представленными в статье [2], была проведена серия экспериментальных исследований, результаты которых описаны ниже. Для постановки экспериментов и обработки полученных результатов посчитали целесообразным использование методов анализа размерностей [3].

**Постановка задачи экспериментальных исследований. Описание экспериментальных установок и методик проведения экспериментов.** В задаче о динамике деформируемой газовой полости в вязкой жидкости при заданной постоянной интенсивности поля массовых сил  $ng$ , где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ,  $n$  — величина перегрузки, нас интересует максимальный объем полости  $W_{\max}$ , не разрушающийся при всплытии под действием архимедовой силы, обусловленной воздействием импульса перегрузки интенсивностью  $ng$ . Очевидно, что при  $ng = \text{const}$  величину  $W_{\max}$  можно определить по физическим свойствам жидкости (вязкости  $\nu$ , поверхностному натяжению  $\sigma$  и плотности  $\rho$ ), т. е.  $W_{\max} = f(\nu, \sigma, \rho)$ . Согласно анализу размерностей [3] имеем

$$[W] = [\nu]^{\alpha} [\sigma]^{\beta} [\rho]^{\gamma},$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  — произвольные показатели степени, определяемые из анализа размерностей:

$$[\text{м}^3] = [\text{м}^2/\text{с}]^{\alpha} [\text{кг}/\text{с}^2]^{\beta} [\text{кг}/\text{м}^3]^{\gamma}. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что  $\beta = -\gamma$ , т. е. число переменных в интересующей нас задаче может быть уменьшено на единицу и  $W_{\max} = f_1(\nu, \sigma/\rho)$ . Перепишем выражение (1) в виде

$$[\text{м}^3] = [\text{м}^2/\text{с}]^{\alpha} [\text{м}^3/\text{с}^2]^{\delta},$$

откуда  $\alpha = 6, \delta = -3$ .

Иначе искомая зависимость должна иметь вид

$$W_{\max} = Av^6 / \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^3,$$

или, учитывая, что  $W_{\max} \sim L^3$ , где  $L$  — эквивалентный линейный размер газовой полости (диаметр или радиус), можем получить

$$L_{\max} = A_1 v^2 / \left( \frac{\sigma}{\rho} \right). \quad (2)$$

Отметим, что соотношение (2) широко известно под названием *вязкостно-капиллярный радиус* и может быть получено из комбинации

$$\frac{Ga}{Bo} = \frac{L\sigma}{\rho v^2},$$

где  $Ga = \frac{ngL^3}{v^2}$  — число Галилея,  $Bo = \frac{\rho ngL^2}{\sigma}$  — число Бонда.

Применяя  $\pi$ -теорему [3] к задаче (1), заключаем, что в данном случае  $n = 3$ ,  $k = 2$ , следовательно, соотношение  $\frac{Ga}{Bo}$  является для задачи (1) необходимым и достаточным условием подобия. Для различных значений  $ng$ , используя тот же подход, получаем

$$L_{\max} = A_2 \left( \frac{\sigma}{\rho} \right) \left( \frac{1}{vng} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

где  $A$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  — константы, определяемые экспериментальным путем.

Однако сложность состоит в том, что величина перегрузки  $ng$ , хотя и остается неизменной в период действия, но действует крайне непродолжительное время в диапазоне от десятых долей секунды до нескольких десятков секунд, после чего вновь наступает состояние практической невесомости. Поэтому к параметрам, определяющим величину  $L_{\max}$ , по-видимому, можно отнести и время действия (продолжительность) импульса перегрузки  $t_{\text{имп}}$ .

Таким образом, в экспериментах по исследованию устойчивости поверхности раздела жидкость—газ при переходе от невесомости к перегрузке следовало обеспечить изменение времени действия импульса перегрузки  $t_{\text{имп}}$  в достаточно широком диапазоне.

В связи с этим для экспериментального определения условий разрушения одиночных газовых включений под действием кратковременных одиночных импульсов перегрузки был использован, во-первых, стенд невесомости, где условий практической невесомости можно достичь при свободном падении испытываемого оборудования (такие стенды получили название башен невесомости [4]), во-вторых, для экспериментального определения условий разрушения одиночных газовых включений при значительной продолжительности одиночных импульсов перегрузки использовали летающую лабораторию (ЛЛ) [5]. Для создания на борту такой лаборатории (самолета) состояния невесомости применяют специальную технику пилотирования — полет по параболе Кеплера. Сначала самолет разгоняют до максимальной скорости, затем переводят в набор высоты и при достижении угла кабрирования  $45...50^\circ$  движением штурвала создают за  $1...2$  с вертикальную нулевую перегрузку. В этот момент на борту лаборатории появляется состояние невесомости; находиться в этом состоянии допускается до

20...25 с. Самолет за этот период переходит на пикирование с углом 45...50°, после чего его выводят в горизонтальный полет с вертикальной перегрузкой 2g.

Установок для исследования процессов разрушения газовых пузырьков в жидкости при переходе от невесомости к перегрузке, которая была использована в составе стенда невесомости, представляет собой испытательный контейнер в форме параллелепипеда. Внутри контейнера размещены оптически прозрачная модель, программно-временное устройство, кинокамера, устройство для формирования газовой полости и твердотопливные ракетные двигатели малой тяги для создания импульсных перегрузок, действующих на испытательный контейнер в процессе его свободного падения. В конечном итоге, считая ошибки измерения независимыми случайными величинами, максимальная погрешность конечных результатов серии экспериментов составила не более 18...20 %.

Исследование характера и закономерностей процесса разрушения газовой полости при действии длительных (более 1 с) перегрузок малой величины на стенде невесомости проводить не удастся вследствие недостаточной продолжительности состояния невесомости. В связи с этим признали, что целесообразно проводить эксперименты по исследованию процесса разрушения газовой полости при действии импульсов перегрузки длительностью более 1 с, используя летающую лабораторию.

Поскольку в условиях самолета-лаборатории остаточные перегрузки  $n_x$  по продольной оси лаборатории составляют  $10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2}$  единиц, была проведена выборка из всей серии полетов тех режимов, когда остаточные перегрузки не превышали  $5 \cdot 10^{-3}$  единиц. Методика экспериментов на летающей лаборатории заключалась в следующем. За 1...2 с до начала режима невесомости включают слив жидкости из модели в сливную емкость. К моменту наступления невесомости в модельной емкости начинает образовываться газовая подушка, которая через 4...6 с после начала режима невесомости приобретает форму, близкую к равновесной. На 8...10 с полета по кеплеровской траектории, по команде оператора, пилот создает малую (до 0,1) перегрузку в направлении  $n_x$ , совпадающем с продольной осью летающей лаборатории. Длительность перегрузки определяется программой эксперимента. В течение всего времени эксперимента поведение газовой полости контролируют кинокамеры. В ходе эксперимента измеряют размер газовой полости, а также величину и время действия импульса перегрузки, которые регистрируют с помощью светолучевого осциллографа К20-21. Максимальная погрешность конечных результатов для экспериментов на летающей лаборатории несколько выше, чем в условиях стенда, и достигает 22...25 % за счет того, что значение перегрузки усредняется за все время ее действия.

**Результаты экспериментов.** В ходе экспериментов на стенде невесомости и на летающей лаборатории было установлено, что поведение свободных включений в жидкости в условиях невесомости под действием одиночных импульсов перегрузки зависит от продолжительности импульсов. Одним из критериев, определяющих характер поведения газовых полостей, согласно результатам проведенных экспериментов, является параметр безразмерной длительности импульса перегрузки

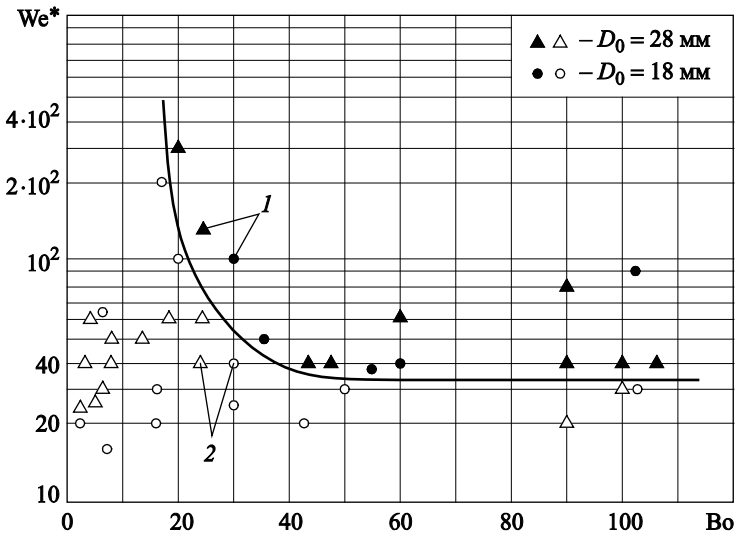
$$\tau_{и} = t_{имп} \sqrt{\sigma / \rho R_0^3},$$

где  $t_{имп}$  — продолжительность действия импульса;  $\sigma, \rho$  — поверхностное натяжение и плотность жидкости, содержащей газовую полость, соответственно;  $R_0$  — радиус эквивалентной сферы (начальный радиус газовой полости).

Численное значение параметра  $\tau_{и}$  определяет характер разрушения газовой полости. Так, при безразмерной длительности импульса перегрузки  $\tau_{и} \leq 0,85$  форма первоначально сферической газовой полости за время действия импульса практически не изменяется, а положение полости по отношению к стенкам емкости изменяется очень незначительно. Разрушение полости, если оно имеет место, происходит по окончании действия импульса, его обуславливает движение жидкости в нижней полусфере. Отсюда можно сделать заключение о том, что при  $\tau_{и} \leq 0,85$  динамика газовой полости близка к случаю идеальной жидкости. Иначе говоря, при  $\tau_{и} \leq 0,85$  можно пренебречь влиянием вязкости на процесс разрушения газовой полости, что подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 1.

Вместе с тем при исследованиях на стенде невесомости было замечено, что увеличение параметра  $\tau_{и}$  до значений, превышающих 1,2...1,7, приводит к нарушению однозначности между числами  $Wo$  и  $We$ . Полученные в этих условиях экспериментальные данные не соответствуют закономерности, представленной на рис. 1. Анализ кинограмм процесса показал, что картина разрушения при этом также изменяется. Свободная поверхность деформируется как в нижней части полусферы, так и на боковых участках. Разрушению полости предшествует образование на границе раздела жидкость—газ сложной системы волн. Иногда разрушение происходит только в шлейфовой (кормовой) части всплывающей под действием перегрузки газовой полости. Было высказано предположение, что при  $\tau_{и} > 0,85$  существенное значение в динамике газовой полости имеет характер распределения давления на ее поверхности при обтекании полости

окружающей жидкостью в процессе всплытия. Но в этом случае, очевидно, на динамику полости должна оказывать влияние вязкость окружающей жидкости. Эксперименты на летающей лаборатории, когда располагаемое время невесомости составляет 20...25 с, подтвердили указанное предположение. Было обнаружено, что при  $\tau_{и} \geq 1,2... 1,7$  разрушение газовых полостей носит квазистационарный характер, аналогичный тому, который имеет место в земных условиях при установившемся всплытии одиночных пузырьков большого диаметра. Обработка полученных результатов в соответствии с изложенными представлениями позволила оценить границы области устойчивости газовой полости при  $\tau_{и} > 1,7$  в координатной зависимости  $\sqrt{\sigma\rho D_0}/\mu$  и  $Bo$ , где  $\sqrt{\sigma\rho D_0}/\mu$  — аналог вязкостно-капиллярного диаметра,  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости. Одновременно с этим появилась возможность сопоставить результаты экспериментов на стенде невесомости и в условиях летающей лаборатории. Обобщение этих результатов представлено на рис. 2.



**Рис. 1.** Область устойчивости свободных газовых полостей по отношению к коротким ( $\tau_{и} \leq 0,85$ ) одиночным импульсам перегрузок при координатной зависимости чисел  $We$  и  $Bo$ , где

$$We^* = \frac{\rho (ngt_{имп})^2 D_0}{\sigma}, \quad Bo = \frac{\rho ng D_0^2}{\sigma}; \quad D_0 \text{ — диаметр эквивалентной сферы (начальный диаметр газовой полости, } D_0 \sim \sqrt[3]{W_0});$$

1 — разрушение полости; 2 — разрушение отсутствует

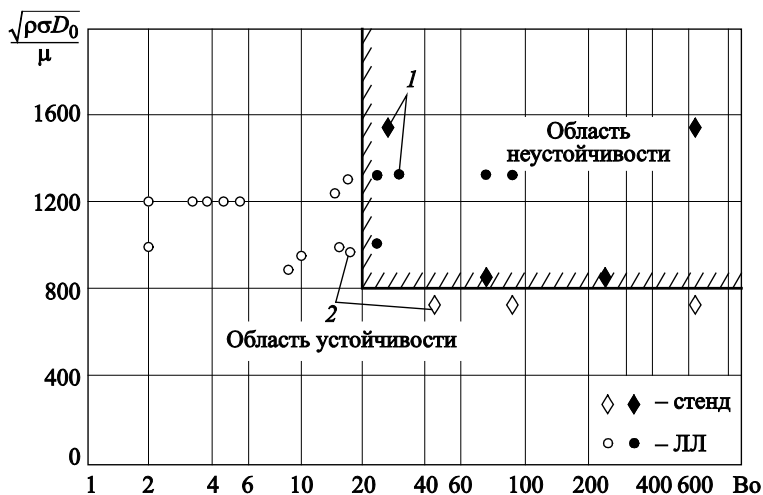


Рис. 2. Область устойчивости свободных газовых полостей по отношению к продолжительным ( $\tau_{и} > 1,7$ ) одиночным импульсам перегрузок при координатной зависимости  $\sqrt{\rho\sigma D_0}/\mu$  от числа  $Bo$ :

1 — разрушение полости; 2 — разрушение отсутствует

Отметим, что оценка максимально возможного диаметра газового пузырька, устойчивого в земных условиях при его всплытии под действием архимедовой силы, выполненная на основании данных рис. 2, совпадает с большим количеством экспериментальных данных, имеющих в работах [6–9].

**Заключение.** Экспериментальные исследования проводились на стенде невесомости, использующем принцип реализации условий пониженной весомости при свободном падении испытываемого оборудования, и на самолете-лаборатории при полете по «параболе Кеплера».

При кратковременных импульсах перегрузки можно пренебречь влиянием вязкости на процесс разрушения газовой полости. Разрушение полости, если оно имеет место, происходит по окончании действия импульса и обуславливается движением жидкости в нижней полусфере полости. При значительной продолжительности импульса перегрузки движение полости в жидкости под действием импульса приобретает квазистационарный характер, и устойчивость свободной поверхности определяется интенсивностью поля массовых сил при фиксированном значении вязкостно-капиллярного радиуса.

По результатам проведенных экспериментальных исследований поведения свободных газовых полостей в жидкости в условиях невесомости при действии одиночных импульсов перегрузки можно сделать следующие выводы. Характер процесса разрушения свободных газовых полостей при воздействии одиночных импульсов перегрузки

определяется, кроме значений чисел  $We$  и  $Bo$ , значением приведенного к безразмерному виду времени действия импульса  $\tau_{и} = t_{имп} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho R_0^3}}$ .

При безразмерной длительности импульса перегрузки  $\tau_{и} \leq 0,85$  форма первоначально сферической газовой полости за время действия импульса практически не изменяется, а положение полости по отношению к стенкам емкости изменяется очень незначительно. Разрушение полости, если оно имеет место, происходит по окончании действия импульса и обусловлено движением жидкости в нижней полусфере. Отсюда можно сделать заключение о том, что при  $\tau_{и} \leq 0,85$  динамика газовой полости близка к случаю идеальной жидкости. Другими словами, при  $\tau_{и} \leq 0,85$  можно пренебречь влиянием вязкости на процесс разрушения газовой полости. При  $\tau_{и} > 1,7$ , когда движение полости в жидкости под действием импульса перегрузки приобретает квазистационарный характер, устойчивость свободной поверхности определяется интенсивностью поля массовых сил  $ng$  при фиксированном значении комплекса  $\mu^{-1} \sqrt{\sigma \rho D_0}$ , т. е. соотношением между силами поверхностного натяжения и вязкого трения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Корольков А.В., Сапожников В.Б. Имитационная модель изменения формы газового пузыря в жидкости в условиях реального космического полета. *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*, 2005, № 4, с. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V. Mathematical modeling of a spacecrafts' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions. *International Scientific Conference «Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development» (Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014), abstracts*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014, p. 80–81.
- [3] Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. 8-е изд., перераб. Москва, Наука, 1977, 440 с.
- [4] 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*. Днепропетровск, НПВК «Триакон», 2014, вып. 1 (14), с. 60–65.
- [5] Ганиев Р.Ф., Лапчинский Г.Ф. *Проблемы механики в космической технологии*. Москва, Машиностроение, 1978, 119 с.
- [6] Воинов О.В. Условия разрушения сферического газового пузыря в жидкости при нелинейных пульсациях. *Доклады Академии наук*, 2008, т. 422, № 6, с. 750–754.
- [7] Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С. Экспериментальное исследование нестационарных режимов всплывания одиночного пузырька. *Инж.-физ. журн.*, 2013, т. 86, № 5, с. 1097–1106.



- [8] 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.
- [9] Гасенко В.Г., Горелик Р.С., Тимкин Л.С. Метод формирования полидисперсной газожидкостной смеси. *Международный научно-исследовательский журнал (International research journal)*, 2015, № 10 (41), ч. 4, ноябрь, с. 14–20.

Статья поступила в редакцию 14.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сапожников В.Б., Авраамов Н.И. Условия разрушения газовых полостей в жидкости при переходе от невесомости к кратковременному воздействию одиночных импульсов перегрузки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-02-1581>

**Сапожников Владимир Борисович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: газогидродинамика при течении жидкостей в газах в структурно-сложных средах. Автор порядка 120 научных публикаций. e-mail: [sapojnikov47@mail.ru](mailto:sapojnikov47@mail.ru)

**Авраамов Николай Иванович** — канд. техн. наук, заместитель заведующего отделом НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: газогидродинамика при течении жидкостей в газах в структурно-сложных средах. Автор порядка 40 научных публикаций. e-mail: [zaytseva@bmstu.ru](mailto:zaytseva@bmstu.ru)

# Conditions for gas cavity collapse in fluid during the transition from weightlessness to short-term exposure to individual G-force pulses

© V.B. Sapozhnikov, N.I. Avraamov

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia

*We present experimental investigation results for the gas cavity collapse processes in propellant tanks of liquid propellant rocket propulsion plants under free (nonperturbed) orbital (suborbital) flight conditions, subjected to short-term individual g-force pulses. We defined the structure of dimensionless groups that link the maximum cavity volume to the amplitude and duration of a g-force pulse and to the physical properties of the fluid, so that the cavity does not collapse under the influence of the buoyant force when floating up. We carried out our experimental investigation using a weightlessness bench implementing reduced gravity conditions during free fall of the equipment being tested, and employing a flying laboratory moving along a Keplerian parabola. Results of the experimental studies mean that the nature of the collapse process in the case of free gas cavities subjected to individual g-force pulses is determined by the dimensionless pulse duration value and by the surface tension to viscosity ratio. Short-term g-force pulses make it possible to disregard the effect of viscosity upon the gas cavity collapse process. The cavity collapse, if it takes place, happens when the pulse duration is over, and is caused by fluid motion in the bottom hemisphere of the cavity. When the g-force pulse duration is significant, the pulse-induced cavity motion in the fluid becomes quasi-stationary, and the free surface stability is determined by the mass-force field intensity, the capillary viscosity radius parameter being fixed.*

**Keywords:** liquid propellant rocket propulsion plant, propellant tank, weightlessness, g-force, gas cavity, strain, collapse, experimental studies

## REFERENCES

- [1] Korolkov A.V., Sapozhnikov V.B. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa / Lesnoy vestnik: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet lesa (Mytishchi) — Moscow state forest university bulletin / Lesnoy vestnik*, 2005, no. 4, pp. 51–52.
- [2] Sapozhnikov V.B., Korolkov A.V. Mathematical modeling of a spacecrafts' fuel tank empty in-gin the orbital flight conditions. *International Scientific Conference "Physical and Mathematical Problems of Advanced Technology Development" (Moscow, Bauman MSTU, 17–19 November 2014): abstracts*. Moscow, BMSTU Publ., 2014, pp. 80–81.
- [3] Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimensional methods in mechanics]. 8th ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 1977, 440 p.
- [4] 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.
- [5] Ganiev R.F., Lapchinskiy G.F. *Problemy mekhaniki v kosmicheskoy tekhnologii* [Problems of mechanics in space technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 119 p.
- [6] Voinov O.V. Conditions for breakdown of a spherical gas bubble in fluid caused by nonlinear pulsations. *Doklady Physics*, 2008, vol. 53, no. 10, pp. 539–543. DOI: 10.1134/S1028335808100108 [In Russ.: Voinov O.V. Usloviya razrusheni-

ya sfericheskogo gazovogo puzyrya v zhidkosti pri nelineynykh pulsatsiyakh. *Doklady Akademii Nauk*, 2008, vol. 422, no. 6, pp. 750–754].

- [7] Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Usanina A.S. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 5, pp. 1097–1106.
- [8] Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Tkachenko A.S., Usanina A.S. *Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 2015, no. 1, pp. 86–94.
- [9] Gasenko V.G., Gorelik R.S., Timkin L.S. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal — International Research Journal*, 2015, no. 10 (41), vol. 4, pp. 14–20.

**Sapozhnikov V.B.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sapojnikov47@mail.ru

**Avraamov N.I.**, Deputy Head of Department, Scientific Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: zaytseva@bmstu.ru