

Численное моделирование сепарации жидкого кислорода и газообразного гелия в условиях микрогравитации

© Н.В. Кукшинов, В.Е. Евстигнеева, А.А. Ганцев, А.А. Подчуфаров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Представлены результаты численного моделирования процесса сепарации жидкого кислорода и газообразного гелия в условиях микрогравитации при вращении сферического бака вокруг поперечной оси. Математическая модель основана на уравнениях Навье — Стокса для двухфазной несжимаемой среды во вращающейся системе координат. Для отслеживания межфазной границы использован метод объема жидкости (VOF) в сочетании с моделью континуальной поверхностной силы (CSF), учитывающей капиллярные эффекты и смачивание стенок. Для расчета турбулентных характеристик используется двухпараметрическая модель турбулентности $k-\omega$ SST. Проведена серия расчетов на последовательно сгущающихся неструктурированных полиэдрических сетках (300 тыс., 600 тыс. и 1,5 млн ячеек). Разработан специализированный алгоритм кластеризации на языке программирования C для автоматического определения времени сепарации — момента, когда более 99 % объема газа собирается у стенки. Установлено, что при недостаточном пространственном разрешении погрешность моделирования времени сепарации может достигать 20 %. Переход от промежуточной сетки (600 тыс. ячеек) к подробной (1,5 млн) снижает погрешность до 7,7 %. Показано, что смещение центра масс системы по осям X и Y достигает 6 и 5 мм соответственно при радиусе бака 150 мм, а проекции сил на стенки выходят на стационарный режим после завершения переходных процессов. Результаты сопоставлены с данными космического эксперимента FLUIDICS.

Ключевые слова: численное моделирование, сеточная сходимость, газожидкостная сепарация, микрогравитация

Введение. Одной из перспективных концепций выполнения межпланетных полетов является орбитальная дозаправка: в течение некоторого времени дозаправляемые баки находятся на орбите Земли и дозаправляются специально выводимыми дополнительными баками, при этом осаждение компонентов топлива на заборные устройства происходит за счет закрутки состыкованных космических объектов вокруг центра масс [1].

Исследования по осаждению жидкости за счет микроускорений, создаваемых вращением бака вокруг поперечной оси, проводились еще в 1990-х годах в эксперименте «Волна-2А» [2]. Гидростенд состоял из центрифуги, на роторе которой располагались электродвигатель и редуктор, модели бака, заправочно-сливные емкости, а также пневмогидравлическая система с арматурой. Видеокамера и осветительные лампы входили в состав стенда для регистрации гидродинамических

процессов. Одним из основных результатов этих исследований явилось экспериментальное подтверждение применимости такого способа для получения равновесных форм жидкости и возможности забора жидкости из бака.

Важная работа по изучению поведения жидкости в условиях микрогравитации проведена в рамках исследования SPHERES-SLOSH [3, 4]. Это эксперимент NASA для получения данных о поведении жидкости в резервуарах в условиях невесомости для повышения точности и надежности численных моделей, используемых при проектировании ракетных ступеней.

В целом, исследование поведения жидких компонентов топлива в условиях микрогравитации представляет собой сложную междисциплинарную задачу, поскольку динамика жидкости в баках оказывает существенное влияние на стабильность ориентации и управляемость космических аппаратов, а также на эффективность и безопасность хранения криогенных компонентов топлива [5]. Для обеспечения высокой точности прогнозирования процессов, происходящих в баке, например, процессов наддува, сепарации разных сред и колебания свободной поверхности жидкого компонента топлива в условиях микрогравитации, необходимо использовать методы вычислительной гидродинамики (CFD). Данный подход позволяет моделировать нестационарные многофазные течения с комплексным учетом таких факторов, как капиллярные силы на межфазной границе, тепломассоперенос и фазовые переходы [6, 7].

В вычислительной гидродинамике многофазных сред для решения задач со свободной поверхностью применяются эйлеровы подходы, основанные на явном выделении границы раздела фаз. Наиболее распространенным среди них является метод объема жидкости (Volume of Fluid, VOF), который в сочетании с моделью континуальной поверхностной силы (Continuum Surface Force, CSF) Бракбилла [8] позволяет эффективно описывать течения в резервуарах сложной геометрии [9–11].

Альтернативой VOF служат методы функций уровня (Level Set) [12, 13], которые благодаря представлению межфазной границы как множества нулевого уровня обеспечивают повышенную точность вычисления ее кривизны. Именно этим подходом пользовались авторы работы [13] для численного моделирования гидродинамических процессов при движении сферического бака, результаты которых валидированы в космическом эксперименте FLUIDICS (Fluid Dynamics in Space), проведенном на борту европейского модуля Columbus Международной космической станции. Экспериментальная установка представляла собой центрифугу с плечом 400 мм со сферическим прозрачным баком диаметром 585 мм, заполненным жидкостью 3M Novac 2704, которая по физическим свойствам близка к различным

компонентам топлива, и воздухом. Испытывались два варианта заполнения объема бака жидкостью — на 50 и 75 %. Маневры, выполняемые центрифугой, состояли из фазы ускорения, фазы вращения с постоянной угловой скоростью и фазы торможения.

В задачах, характеризующихся значительными деформациями и дроблением свободной поверхности (например при моделировании плескания (sloshing) в баках ракет-носителей и космических аппаратов), высокую эффективность демонстрируют бессеточные лагранжевы методы: гидродинамика сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) [14, 15] и метод движущихся частиц с полунейвной схемой (Moving Particle Semi-implicit, MPS) [16]. Указанные подходы позволяют решить проблемы, связанные с деформацией расчетной сетки и топологической сложностью течения, но при этом повышаются требования к вычислительным ресурсам.

Особую сложность при численном моделировании представляет учет капиллярных сил, которые являются определяющими в условиях невесомости. При малых числах Бонда ($Bo = \Delta \rho g R^2 / \sigma \sim 1$, где $\Delta \rho = \rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}$ — разность значений плотности жидкой $\rho_{\text{ж}}$ и газовой $\rho_{\text{г}}$ фаз, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; R — характерный размер, м; σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м) форма свободной поверхности определяется кривизной поверхности и контактным углом смачивания, а вклад силы инерции и вязкости носят второстепенный характер [5, 17]. В указанном диапазоне режимных параметров классические эйлеровы подходы, в частности метод объема жидкости VOF в сочетании с моделью континуальной поверхностной силы CSF, склонны к генерации нефизических (паразитных) течений. Данный эффект обусловлен несбалансированностью дискретных аналогов градиента давления и силы поверхностного натяжения [18, 19].

В условиях микрогравитации, характеризующихся минимальным уровнем внешних инерционных воздействий, амплитуда паразитных скоростей может достигать значений, сопоставимых с характерными скоростями основного течения, что вносит недопустимые искажения в результаты моделирования [20]. Минимизация уровня паразитных токов достигается путем применения усовершенствованных схем реконструкции межфазной границы (например, геометрических схем типа PLIC), сглаживания поля объемной доли при вычислении кривизны, а также использования специальных методов интерполяции давления на гранях расчетных ячеек [21].

Цель настоящей работы — проведение численного моделирования сепарации жидкого кислорода и газообразного гелия в условиях микрогравитации. Моделирование выполняется с помощью метода

VOF; для учета капиллярных эффектов используется модель поверхностного натяжения на основе CSF и задается адгезия на стенке. Задача рассматривается в изотермической постановке без учета фазовых переходов. Полученные результаты позволят выработать рекомендации по выбору минимально достаточного пространственного разрешения для достоверного прогнозирования формы границы раздела фаз и гидродинамических характеристик процесса.

Физическая и математическая модель. Рассматривается изотермическое течение двух несмешивающихся сред в сферическом модельном баке диаметром 300 мм, а именно газа наддува (гелия) и жидкого кислорода, который выполняет в данном случае роль компонента топлива для жидкостной ракетной двигательной установки. Обе среды приняты несжимаемыми, все физические свойства постоянны и рассчитываются для рабочей температуры кислорода 90К и рабочей температуры гелия 293К, что отражено в таблице. В настоящей работе используется допущение изотермичности без учета фазовых переходов, поскольку интерес представляет гидродинамическая картина течения при сепарации фаз, а акцент сделан на динамику межфазной границы именно под действием центробежных и капиллярных сил.

Уровень внешней гравитации полагается равным нулю. Объемная доля содержания кислорода составляет 95 %, а гелия — 5 %.

Свойства рабочих жидкостей

Рабочая жидкость	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, Па·с
Жидкий кислород	1142	$195,8 \cdot 10^{-6}$
Гелий	0,166	$1,9 \cdot 10^{-5}$

Система находится во вращающейся системе координат, связанной с баком; вращение осуществляется вокруг оси Z , параллельной поперечной оси бака, с угловой скоростью $\omega(t)$. Расстояние от оси вращения до центра бака $R_0 = 0,3$ м. Вращение реализовано с помощью переходной функции угловой скорости

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{\omega_0}{t_1} t, & t \leq t_1; \\ \omega_0, & t > t_1, \end{cases} \quad (1)$$

где ω_0 — постоянная угловая скорость, $\omega_0 = 1$ рад/с; t_1 — время выхода на постоянную скорость, $t_1 = 5$ с.

Тогда вектор угловой скорости определяется как $\mathbf{\Omega} = \omega(t) \cdot \mathbf{e}_z$, где $\mathbf{e}_z$ — единичный вектор вращения вокруг оси Z ; координаты центра вращения в неподвижной системе координат $\mathbf{r}_0 = (0,3; 0; 0)$ м.

Численное моделирование выполнено в рамках эйлера подхода с разрешением межфазной границы методом VOF. Используется односкоростная модель: поля скорости и давления являются общими для обеих фаз, а локальные свойства смеси определяются через объемную долю гелиевой фазы α .

Неразрывность несжимаемых сред вычисляют по формуле

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{u}$ — относительная скорость жидкости в подвижной системе координат.

Уравнение количества движения в относительной постановке имеет вид

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \right] = \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \left[(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \right] + \mathbf{F}_\sigma. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ρ, μ — средневзвешенные по объемной доле плотность и динамическая вязкость:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2, \\ \mu &= \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2; \end{aligned} \quad (4)$$

$2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}$ — кориолисова сила; $\boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r})$ — центробежная сила; $\mathbf{r}$ — радиус-вектор точки в подвижной системе координат относительно центра вращения; p — давление; μ_t — турбулентная вязкость, вычисляемая из модели $k-\omega$ SST; $\mathbf{F}_\sigma$ — объемная сила поверхностного натяжения.

Перенос объемной доли находят следующим образом:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0. \quad (5)$$

Сила поверхностного натяжения вводится как объемный источник:

$$\mathbf{F}_\sigma = \sigma \frac{\rho \kappa \nabla \alpha}{0,5(\rho_1 + \rho_2)}. \quad (6)$$

Здесь σ — коэффициент поверхностного натяжения; κ — локальная кривизна поверхности раздела, $\kappa = \nabla \cdot \mathbf{n}$, где $\mathbf{n} = \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|}$.

Учет смачивания на твердых стенках реализован через коррекцию нормали в пристеночных ячейках в соответствии с заданным краевым углом θ_w :

$$\mathbf{n}_{\text{wall}} = \mathbf{n}_w \cos \theta_w + \mathbf{t}_w \sin \theta_w, \quad (7)$$

где $\mathbf{n}_w$ — единичная нормаль к стенке; $\mathbf{t}_w$ — единичный касательный вектор.

В начальном положении пузырь гелия, объем которого 5 % объема бака, представляет собой сферу, расположенную в геометрическом центре бака. Для корректного задания такого начального распределения фаз в препроцессоре строится геометрия из двух концентрических сфер; затем на основе единой топологии создаются неструктурированные полиэдрические сетки различного разрешения. Интегрирование по времени выполняется по неявной схеме первого порядка с адаптивным шагом с сохранением глобального числа Куранта, равным 0,1.

Для количественной оценки процесса сепарации газовых включений в условиях вращающегося бака был разработан алгоритм на языке C, интегрированный в основной решатель. Целью его работы является автоматическое обнаружение отдельных пузырей в сплошной жидкой фазе и определение момента, когда практически весь газ (более 99 % его объема) собирается в единый пузырь, находящийся в пристеночной области, что и принимается за время полной сепарации.

Выбор порога в 99 % для определения времени полной сепарации обусловлен двумя факторами. Во-первых, для устойчивого запуска жидкостного ракетного двигателя и предотвращения образования газовых пробок в заборных устройствах и топливных магистралях допустимое содержание газа в отбираемой жидкости не должно превышать 1-2 % объема. Достижение 99 % сепарированного газа у стенки гарантирует, что в зоне забора жидкости останется не более 1 % газа, что с точки зрения безотказной работы жидкостного ракетного двигателя и заборных устройств является приемлемым. Во-вторых, стремление к более высоким значениям (99,5 или 100 %) нецелесообразно, поскольку самые мелкие пузыри, стабилизированные капиллярными силами, удаляются к стенке крайне медленно и могут увеличить время ожидания в несколько раз, не внося при этом существенного вклада в динамику системы.

Алгоритм обрабатывает данные после заданного числа итераций, последовательно решая несколько задач:

1) перебираются все ячейки расчетной сетки: если содержание гелия в ячейке превышает 5 %, она заносится в список газовых ячеек с ее координатами центра, объема газа и характерного размера (порог в 5 % отсекает численный шум на размытых межфазных границах);

2) для объединения ячеек используется метод кластеризации: две ячейки считаются принадлежащими одному пузырю, если расстояние между ними не превышает адаптивного радиуса, который определяется из размера ячеек расчетной сетки для каждого пространственного разрешения;

3) обнаруженный кластер проверяется на контакт со стенкой: если хотя бы одна ячейка кластера имеет грань, граничащую с твердой поверхностью, то весь объем данного кластера помечается как «пристеночный»;

4) для кластеров, не касающихся стенок, вычисляется суммарный объем V и определяется эквивалентный диаметр $d = (6V/\pi)^{1/3}$, после чего все пузыри распределяются по восьми диапазонам (от менее чем 1 мм до более чем 15 мм).

Такой подход заменяет субъективный визуальный анализ полей объемной доли после расчета и дает объективную количественную оценку завершенности процесса разделения фаз в условиях микрогравитации.

Анализ результатов расчетного исследования. Для оценки достоверности численного решения и определения степени влияния дискретизации расчетной области на результаты моделирования было проведено исследование сеточной сходимости с использованием трех расчетных сеток: грубой (300 тыс. ячеек), промежуточной (600 тыс. ячеек) и подробной (1,5 млн ячеек).

Характерные моменты времени и соответствующее им положение границы раздела фаз для подробной сетки представлены на рис. 1.

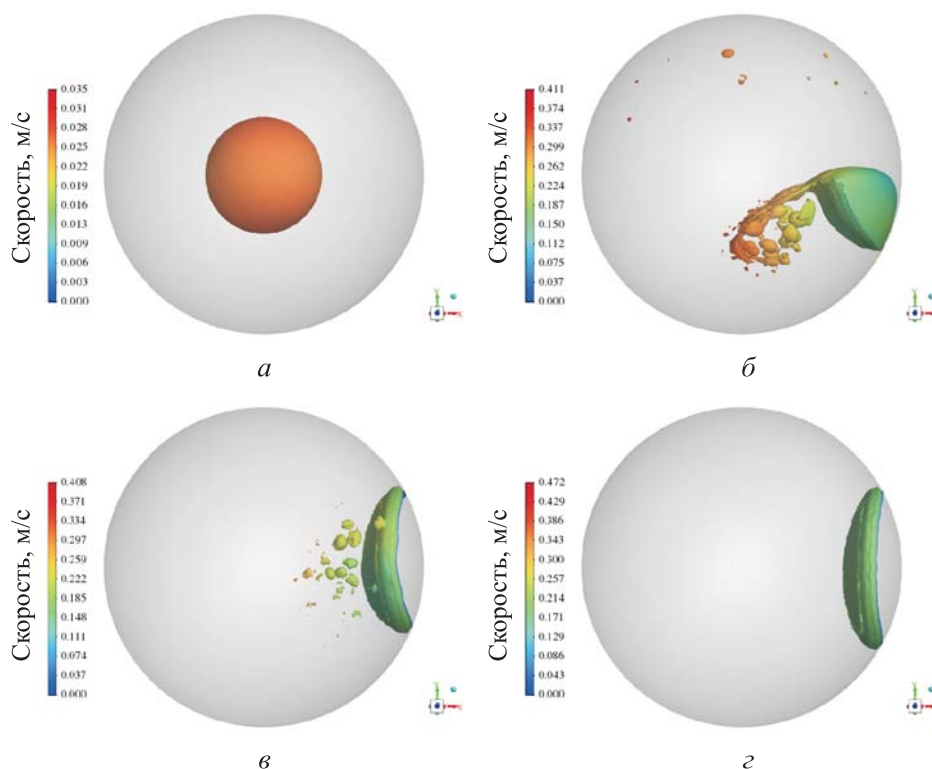


Рис. 1. Положение поверхности раздела фаз в моменты времени:
а — 0,5 с; б — 10 с; в — 15 с; г — 25 с

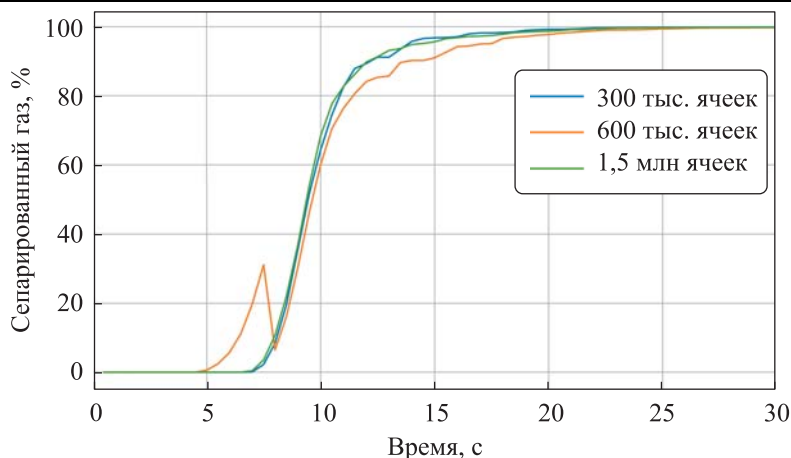
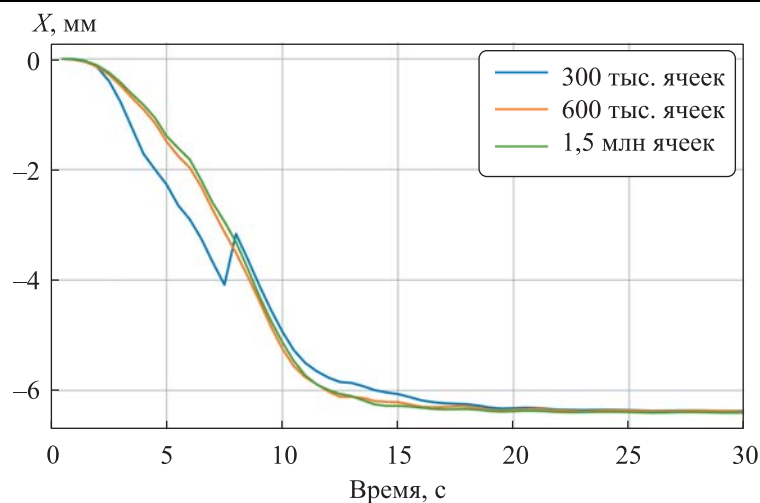
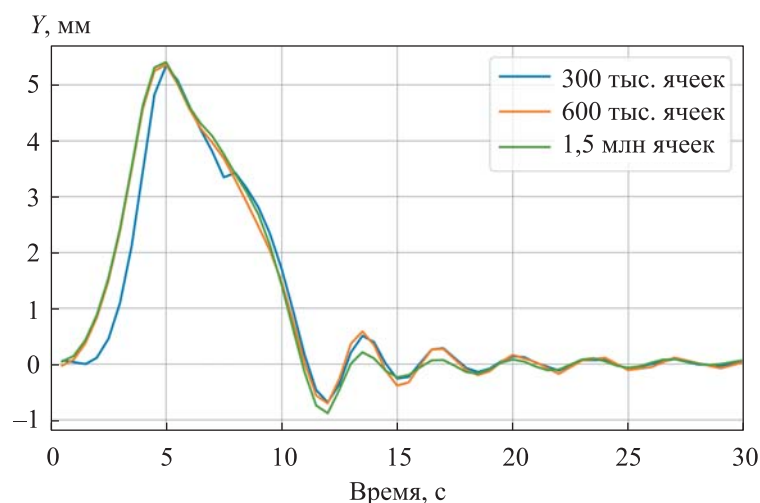


Рис. 2. Зависимость сепарированного газа от времени при расчетных сетках с разным количеством ячеек

Изменение объемной фазы, которая находится у стенки и считается сепарированной, показано на рис. 2. Именно по этому критерию в данной работе определяется время сепарации. Следует отметить, что на рис. 2 отражены данные, которые получены в ходе работы описанного выше алгоритма, встроенного в решатель.

Анализ полученных данных выявил закономерное уточнение результатов при измельчении сетки: переход от грубой сетки к промежуточной привел к изменению времени сепарации с 23,5 до 21,0 с, что соответствует относительной разнице в 10,6 %. Дальнейшее существенное измельчение расчетной области до 1,5 млн ячеек (коэффициент измельчения относительно промежуточной сетки составил 2,5) изменило значение до 19,5 с, что соответствует отклонению на 7,1 % относительно предыдущего шага. Если рассматривать наиболее подробную сетку (1,5 млн ячеек) как эталонную в рамках данного исследования, то относительная погрешность определения времени сепарации для грубой сетки достигает 20,5 %, в то время как для промежуточной она снижается до 7,7 %, что свидетельствует о выходе графика решения на плато и затухании влияния сеточных параметров.

Изменения положения центра масс с течением времени по осям X и Y основной системы координат, связанной с баком, представлены на рис. 3 и 4, где показаны результаты для последовательно сгущающихся расчетных сеток (с 300 тыс. до 1,5 млн ячеек). Видно, что по оси X смещение происходит более чем на 6 мм с учетом того, что радиус бака 150 мм, при этом ближе к моменту сепарации смещение выходит на плато. По оси Y смещение происходит более чем на 5 мм, но центр масс возвращается по данной оси к нулю к моменту сепарации и колеблется около него. По оси Z смещение около нуля (менее 0,1 мм), поэтому данный параметр не представляет интереса для рассмотрения.

Рис. 3. Положение центра масс по оси X Рис. 4. Положение центра масс по оси Y

На графиках для грубой сетки (300 тыс. ячеек), в частности на рис. 2–4, наблюдается локальный выброс (зубец) в районе 7–8 с. Данное явление имеет численную природу и связано с недостаточным пространственным разрешением при моделировании начального этапа движения газового пузыря. При стартовом разгоне бака градиенты скорости и давления достигают максимальных значений. На грубой сетке это приводит к погрешностям совместного расчета кориолисовой силы и силы поверхностного натяжения, что вызывает кратковременные численные колебания интегральных параметров (см. рис. 2–4). При измельчении сетки до 600 тыс. и 1,5 млн ячеек данный выброс исчезает, что подтверждает его нефизическую природу.

Зависимости от времени для проекции силы, действующей на стенку сферического бака, на оси X , Y , Z основной системы координат, связанной с баком, представлены на рис. 5–7, где приведены результаты для последовательно сгущающихся расчетных сеток (с 300 тыс. до 1,5 млн ячеек).

По изменению значений проекций сил можно судить о времени сепарации газовой и жидкой фаз. Так, на рис. 5 видно, что проекция силы на ось X , действующей на стенку, имеет отрицательное значение из-за разнонаправленности вектора силы и оси основной системы координат. С течением времени после разгона бака с 0 до 5 с проекция силы на ось X принимает постоянное во времени значение.

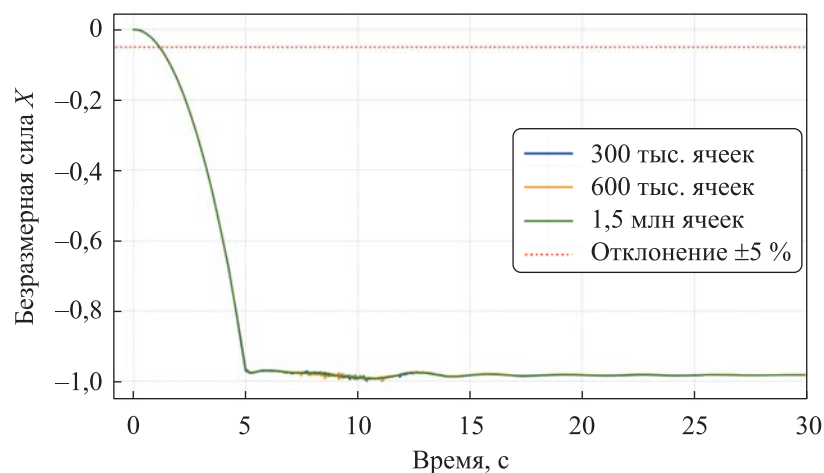


Рис. 5. Проекция силы на ось X

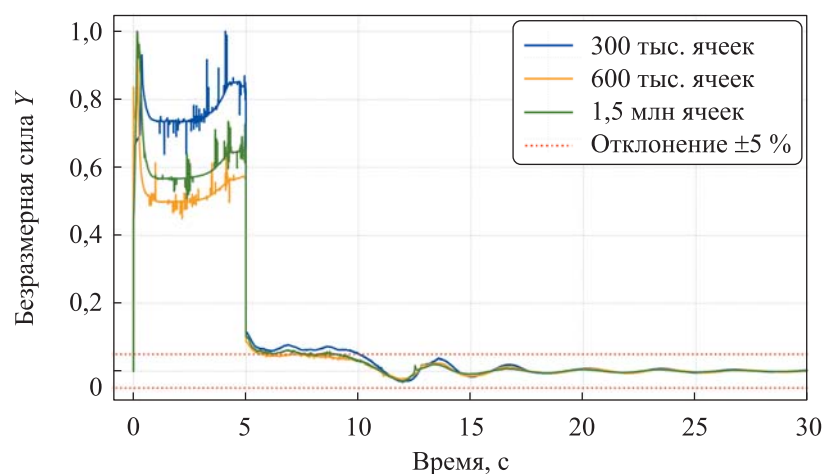
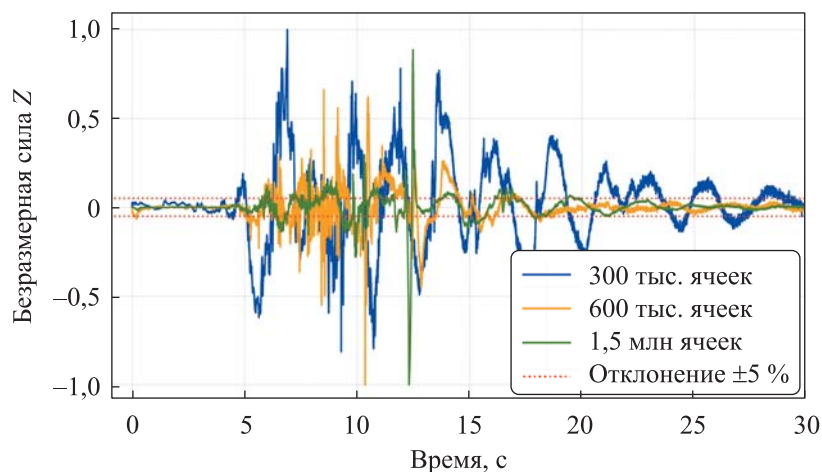


Рис. 6. Проекция силы на ось Y

Рис. 7. Проекция силы на ось Z

Проекция силы на ось Y показана на рис. 6. Наличие скачка проекции силы на ось Y в начальный момент времени объясняется действием кориолисовой силы во время разгона. Под действием центробежных сил газовый пузырь начинает движение преимущественно вдоль оси X , т. е. к ближней от оси стенке. Кориолисова сила, возникающая при этом движении, действует перпендикулярно направлению движения и оси вращения, т. е. вдоль оси Y . Из-за этого пузырь отклоняется в поперечном направлении и нарушается симметрия распределения фаз относительно оси X . Образующаяся при этом асимметрия поля давления относительно плоскости XZ на стенках сосуда обуславливает появление поперечного импульса, который соответствует резкому скачку силы на рис. 6. После выхода на постоянную угловую скорость движение пузыря замедляется, кориолисовы эффекты становятся пренебрежимо малыми, поэтому проекция силы на ось Y стремится к нулю.

Проекция силы на ось Z (см. рис. 7) имеет максимальные значения амплитуды в интервале 5...15 с, что подтверждает сложный характер движения жидкости при постоянной скорости вращения. Кривые на рис. 7 позволяют сделать следующий вывод: критерием полной сепарации можно считать момент времени, когда амплитуда колебаний проекции силы на ось Z не превышает 5 % ее максимального значения (отмечено красными пунктирными линиями). Для сеточных моделей с 600 тыс. и 1,5 млн элементов этот критерий выполняется в промежутке 18...21 с, что свидетельствует о затухании инерционных воздействий на стенку. Однако для грубой сетки в 300 тыс. элементов затухание идет слишком медленно и даже после завершения сепарации фаз продолжают колебания проекции силы, их амплитуда составляет примерно 10 % максимального значения. Это

объясняется недочетами численной реализации метода VOF на сетке с недостаточной дискретизацией по пространству, включая ошибки в расчете кривизны поверхности раздела фаз, что влечет неточное определение нормали к поверхности раздела, которая необходима для расчета силы поверхностного натяжения по формуле (6). Как следствие, появляются нефизичные осцилляции на границе раздела, которые остаются даже при достижении физической сепарации, что делает невозможным точное определение времени сепарации по данному параметру на сетках с крупными элементами.

Сходимость результатов на более подробных сетках подтверждает, что результаты корректно воспроизводятся предлагаемой математической моделью.

Для оценки достоверности результатов проведено сопоставление с данными космического эксперимента FLUIDICS [13]. Основным критерием подобия выступает центробежное число Бонда, определяющее баланс инерционных и капиллярных сил.

Для условий моделирования, принятых в настоящей работе,

$$\text{Bo}_c = \frac{\rho_{\text{ж}} \omega^2 R_0 D_0^2}{\sigma} = 298,8,$$

где D_0 — начальный диаметр газового пузыря, $D_0 = 110,5$ мм; σ — коэффициент поверхностного натяжения, принято $\sigma = 0,014$ Н/м.

Для режимов с наибольшей скоростью вращения в эксперименте FLUIDICS [13] максимальное число Бонда составляло 76. Таким образом, в настоящей работе центробежное ускорение превышает поверхностное натяжение в 3,9 раза (больше, чем в самом интенсивном по скорости режиме космического эксперимента FLUIDICS), что предопределяет более высокую скорость перемещения газового пузыря к периферии бака при вращении.

Динамику перемещения фаз в работе [13] анализировали с использованием безразмерного времени t^* , для чего время относили к капиллярному масштабу: $\tau = (\rho_{\text{ж}} D_0^3 / \sigma)^{1/2}$. Для системы, моделируемой в настоящей работе, капиллярный масштаб $\tau = 10,5$ с, следовательно, время сепарации газа 19,5 с, полученное при численном моделировании, соответствует безразмерному значению t^* , равному 1,85.

Согласно данным, приведенным в статье [13], первичный контакт объема газа, составляющего 50 % общего объема, со стенкой при $\text{Bo}_c = 76$ зафиксирован при $t^* \approx 0,5$. После первого соприкосновения газового пузыря с объемной долей 50 % в работе FLUIDICS пузырь долго совершает затухающие колебания, которые фиксируются датчиками до момента $t^* = 8...10$. В работе [13] отмечается, что при

прочих равных условиях колебания пузыря гораздо сильнее демпфированы для бака с содержанием жидкости 75 % объема бака. В таком случае система приходит в успокоение при $t^* \approx 4$.

Экстраполяция этих данных на условия, исследуемые в настоящей работе, показывает, что к моменту $t^* = 1,85$ газовый пузырь не только достигает стенки, но и завершает фазу первичных высокоамплитудных отскоков от стенки, которые замечены в экспериментах [13]. Такое быстрое демпфирование объясняется: 1) высоким заполнением бака жидким кислородом (95 %), при котором газовый объем (5 %) стеснен стенками бака, что увеличивает трение при попытках поверхности раздела фаз колебаться; 2) более высокой скоростью перемещения газового пузыря из-за преобладания центробежного ускорения над силами поверхностного натяжения.

Заключение. Разработаны математическая модель динамики двухфазного потока в условиях микрогравитации и программный модуль для автоматизированной оценки времени сепарации газа от жидкости. С помощью разработанной модели проведено численное моделирование сепарации жидкого кислорода и газообразного гелия во вращающемся баке. На основании анализа сеточной сходимости установлено, что при увеличении числа ячеек в 5 раз (с 300 тыс. до 1,5 млн) расчетное время сепарации сокращается с 23,5 до 19,5 с. Показано, что относительная погрешность определения времени сепарации для промежуточной сетки (600 тыс. ячеек) снижается до 7,7 %, что свидетельствует о выходе решения на плато. Выявлено, что максимальное смещение центра масс системы по осям X и Y составляет 6 и 5 мм соответственно при радиусе бака 150 мм, в то время как изменения по оси Z пренебрежимо малы (менее 0,1 мм). Установлено, что подробная дискретизация расчетной области позволяет минимизировать численные осцилляции сил. Таким образом, разработанная методика и выбранные параметры дискретизации позволяют с высокой точностью прогнозировать движение двухфазных потоков в условиях микрогравитации при вращении бака вокруг поперечной оси.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию (Проект № FSN-2025-0018).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бычков А.Д. Способ дозаправки жидким топливом космического объекта в космическом пространстве. Пат. № 2787259 Российская Федерация, 2023, бюл. № 1, 6 с.
- [2] Перфильев Л.А., Подобедов Г.Г., Соколов Б.А. Исследование вопросов гидромеханики в условиях невесомости на борту орбитальной станции Мир. *Известия РАН*, 2003, № 4, с. 44–50.

- [3] Storey J.M., Kirk D., Marsell B., Schallhorn P. Progress towards a microgravity CFD validation study using the ISS SPHERES-SLOSH experiment. *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*, 2020, p. 3814.
- [4] Lapilli G. Design of a liquid sloshing experiment to operate in the International Space Station. *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2015, p. 4074.
- [5] Abramson H.N. The dynamic behavior of liquids in moving containers, with applications to space vehicle technology. *NASA SP-106*, 1967.
- [6] Konopka M., Behruzi P., Schmitt S., Dreyer M. Phase change in cryogenic upper stage tanks. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, AIAA 2014-3998, 2014.
- [7] Von Rden D. *Pressurization behavior of a cryogenic propellant tank in microgravity. Master's thesis*, Universität Bremen, 2021.
- [8] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, 1992, vol. 100, no. 2, pp. 335–354.
- [9] Hardy T.L., Tomsik T.M. Prediction of the ullage gas thermal stratification in a NASP vehicle propellant tank experimental simulation using FLOW-3D. *NASA Technical Memorandum 103217*, 1990.
- [10] Wang L., Li Y., Li C., Zhao Z. CFD investigation of thermal and pressurization performance in LH2 tank during discharge. *Cryogenics*, 2013, vol. 57, pp. 63–73.
- [11] Liu D., Lin P. A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks. *Journal of Computational Physics*, 2008, vol. 227, no. 8, pp. 3921–3939.
- [12] Sussman M., Smereka P., Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *Journal of Computational Physics*, 1994, vol. 114, no. 1, pp. 146–159.
- [13] Dalmont A. Comparison between the FLUIDICS experiment and direct numerical simulations of fluid sloshing in spherical tanks under microgravity conditions. *Microgravity Science and Technology*, 2019, vol. 31, pp. 123–135.
- [14] Green M.D., Zhou Y., Dominguez J.M., Gesteira M.G., Peiro J. Smooth particle hydrodynamics simulations of long-duration violent three-dimensional sloshing in tanks. *Ocean Engineering*, 2021, vol. 229, art. 108925.
- [15] Trimulyono A., Atthariq H., Chrismianto D., Samuel S. Investigation of sloshing in the prismatic tank with vertical and T-shape baffles. *Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development*, 2022, vol. 73, no. 2, pp. 43–58.
- [16] Huang C.-Y., Wang J.-F., Zhao W.-W., Wan D.-C. Numerical simulation of liquid sloshing in a spherical tank by MPS method. *Journal of Hydrodynamics*, 2024, vol. 36, no. 2, pp. 232–240.
- [17] Storey J.M., Kirk D.R. Experimental investigation of spherical tank slosh dynamics with water and liquid nitrogen. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, vol. 57, no. 5, pp. 876–890.
- [18] Harvie D.J.E., Davidson M.R., Rudman M. An analysis of parasitic current generation in volume of fluid simulations. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, vol. 30, no. 10, pp. 1056–1066.
- [19] Heyns J.A., Oxtoby O.F. Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach. *11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)*, 2014.
- [20] Scheufler H., Roenby J. Accurate and efficient surface reconstruction from volume fraction data on general meshes. *Journal of Computational Physics*, 2019, vol. 383, pp. 1–23.
- [21] Martinez J.M., Chesneau X., Zeghmami B. A new curvature technique calculation for surface tension contribution in PLIC-VOF method. *Computational Mechanics*, 2006, vol. 37, no. 2, pp. 182–193.

Статья поступила в редакцию 29.05.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кукшинов Н.В., Евстигнеева В.Е., Ганцев А.А., Подчуфаров А.А. Численное моделирование сепарации жидкого кислорода и газообразного гелия в условиях микрогравитации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 8.

EDN FNZZZO

Кукшинов Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kukshinov@bmstu.ru

Евстигнеева Варвара Евгеньевна — ассистент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: yevstigneeva@bmstu.ru

Ганцев Андрей Алексеевич — инженер НОЦ «Передовая инженерная школа», Лаборатория «Теплофизические свойства перспективных материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: gantsev@bmstu.ru

Подчуфаров Алексей Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: podchufarov@bmstu.ru

Numerical Simulation of Liquid Oxygen and Gaseous Helium Separation under Microgravity Conditions

© N.V. Kukshinov, V.E. Evstigneeva, A.A. Gantsev, A.A. Podchufarov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The paper presents the results of numerical simulation of the separation process of liquid oxygen and gaseous helium under microgravity conditions in a spherical tank rotating about a transverse axis. The mathematical model is based on the Navier–Stokes equations for a two-phase incompressible fluid in a rotating reference frame. The volume of fluid (VOF) method in combination with the continuum surface force (CSF) model, which accounts for capillary effects and wall wetting, is used to track the interface. Turbulent characteristics are calculated using the two-equation $k-\omega$ SST turbulence model. A series of simulations was performed on successively refined unstructured polyhedral meshes (300k, 600k, and 1.5 million cells). A specialized clustering algorithm written in C was developed to automatically determine the separation time – the moment when more than 99% of the gas volume accumulates near the wall. It was found that insufficient spatial resolution leads to a simulation error in separation time of up to 20%. Transition from the intermediate mesh (600k cells) to the fine mesh (1.5 million cells) reduces the error to 7.7%. It is shown that the shift of the system's center of mass along the X and Y axes reaches 6 mm and 5 mm, respectively, for a tank radius of 150 mm, and the projections of forces onto the walls reach a steady state after the completion of transient processes. The results are compared with data from the FLUIDICS space experiment.

Keywords: numerical simulation, grid convergence, gas-liquid separation, microgravity, CFD

The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under a state assignment (Project No. FSN-2025-0018).

REFERENCES

- [1] Bychkov A.D. *Sposob dozapravki zhidkim toplivom kosmicheskogo ob'ekta v kosmicheskoy prostranstve* [Method for refueling a space object with liquid fuel in outer space]. Patent No. 2787259 Russian Federation, 2023, bull. no. 1, 6 p.
- [2] Perfilov L.A., Podobedov G.G., Sokolov B.A. *Issledovanie voprosov gidromekhaniki v usloviyakh nevesomosti na bortu orbital'noy stantsii Mir* [Investigation of hydromechanics issues under weightlessness conditions aboard the Mir orbital station]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela — Mechanics of Solids*, 2003, no. 4, pp. 44–50.
- [3] Storey J.M., et al. Progress towards a microgravity CFD validation study using the ISS SPHERES-SLOSH experiment. *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*. Reston, VA, AIAA, 2020, p. 3814.
- [4] Lapilli G. Design of a liquid sloshing experiment to operate in the International Space Station. *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Reston, VA, AIAA, 2015, p. 4074.
- [5] Abramson H.N. The dynamic behavior of liquids in moving containers, with applications to space vehicle technology. *NASA SP-106*. Washington, D.C., NASA, 1967.
- [6] Konopka M., Behruzi P., Schmitt S., Dreyer M. Phase change in cryogenic upper stage tanks. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. Reston, VA, AIAA, 2014, AIAA 2014-3998.

- [7] von Rüden D. *Pressurization behavior of a cryogenic propellant tank in micro-gravity. Master's thesis*. Bremen, Universität Bremen, 2021.
- [8] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, 1992, vol. 100, no. 2, pp. 335–354.
- [9] Hardy T.L., Tomsik T.M. Prediction of the ullage gas thermal stratification in a NASP vehicle propellant tank experimental simulation using FLOW-3D. *NASA Technical Memorandum 103217*. Washington, D.C., NASA, 1990.
- [10] Wang L., Li Y., Li C., Zhao Z. CFD investigation of thermal and pressurization performance in LH2 tank during discharge. *Cryogenics*, 2013, vol. 57, pp. 63–73.
- [11] Liu D., Lin P. A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks. *Journal of Computational Physics*, 2008, vol. 227, no. 8, pp. 3921–3939.
- [12] Sussman M., Smereka P., Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *Journal of Computational Physics*, 1994, vol. 114, no. 1, pp. 146–159.
- [13] Dalmont A., et al. Comparison between the FLUIDICS experiment and direct numerical simulations of fluid sloshing in spherical tanks under microgravity conditions. *Microgravity Science and Technology*, 2019, vol. 31, pp. 123–135.
- [14] Green M.D., Zhou Y., Dominguez J.M., Gesteira M.G., Peiro J. Smooth particle hydrodynamics simulations of long-duration violent three-dimensional sloshing in tanks. *Ocean Engineering*, 2021, vol. 229, art. 108925.
- [15] Trimulyono A., et al. Investigation of sloshing in the prismatic tank with vertical and T-shape baffles. *Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development*, 2022, vol. 73, no. 2, pp. 43–58.
- [16] Huang C.-Y., Wang J.-F., Zhao W.-W., Wan D.-C. Numerical simulation of liquid sloshing in a spherical tank by MPS method. *Journal of Hydrodynamics*, 2024, vol. 36, no. 2, pp. 232–240.
- [17] Storey J.M., Kirk D.R. Experimental investigation of spherical tank slosh dynamics with water and liquid nitrogen. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, vol. 57, no. 5, pp. 876–890.
- [18] Harvie D.J.E., Davidson M.R., Rudman M. An analysis of parasitic current generation in volume of fluid simulations. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, vol. 30, no. 10, pp. 1056–1066.
- [19] Heyns J.A., Oxtoby O.F. Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach. *11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)*. Barcelona, 2014.
- [20] Scheufler H., Roenby J. Accurate and efficient surface reconstruction from volume fraction data on general meshes. *Journal of Computational Physics*, 2019, vol. 383, pp. 1–23.
- [21] Martinez J.M., Chesneau X., Zeghamati B. A new curvature technique calculation for surface tension contribution in PLIC-VOF method. *Computational Mechanics*, 2006, vol. 37, no. 2, pp. 182–193.

Kukshinov N.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Thermophysics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: kukshinov@bmstu.ru

Evstigneeva V.E., assistant lecturer, Department of Thermophysics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: yevstigneeva@bmstu.ru

Gantsev A.A., engineer, advanced engineering school, laboratory of thermophysical properties of advanced materials, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: gantsev@bmstu.ru

Podchufarov A.A., Cand. Sc. (Eng.), associate professor, Department of refrigeration, cryogenic engineering, air conditioning and life support systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: podchufarov@bmstu.ru