УДК 532.5:519.6

ВАЛИДАЦИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ «ЛОГОС» НА ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХФАЗНЫХ СРЕДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОСКОРОСТНОЙ МНОГОФАЗНОЙ МОДЕЛИ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2026 А. С. Козелков[1,4a], А. Ю. Пузан[1,3b], И. В. Лаптев[2c], В. В. Курулин[1,4] , А. А. Куроедов[2], А. О. Городнов[2]

[1] *Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров 607188, Россия,*
[2] *АО Государственный научный центр «Центр Келдыша», г. Москва 125438, Россия,*
[3] *Саровский филиал МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Саров 607328, Россия,*
[4] *Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород 603155, Россия*

E-mails: [a]askozelkov@mail.ru, [b]pppan@yandex.ru, [c]laptev.iv.kerc@gmail.com

Поступила в редакцию 14.01.2026 г.; после доработки 26.05.2026 г.; принята к публикации 15.07.2026 г.

Представлены результаты валидации российского пакета программ «Логос» на задачах динамики и теплообмена в двухфазных средах. Двухфазное течение моделируется на основе решения системы уравнений Навье — Стокса, межфазная граница учитывается посредством односкоростной многофазной модели жидкости VOF. Система уравнений решается методом Simple, реализованном на базе конечно-объёмной дискретизации для неструктурированных расчётных сеток. Базис валидационных задач разбит на два класса: задачи динамики границы раздела фаз и задачи сопряжённого тепломассообмена в двухфазных средах. Базис содержит девять задач, для которых доступны эталонные аналитические или экспериментальные данные по ключевым физическим параметрам задачи. Целью валидации программного пакета «Логос» было подтверждение его способности адекватно описывать динамику и теплообмен в двухфазных средах, а также обеспечение высокой точности результатов моделирования. В рамках исследования для различных классов задач были получены следующие осреднённые значения относительной погрешности: для задач исследования динамики границы раздела фаз усреднённая относительная погрешность лежит в диапазоне от 0,7% (амплитуда уровня воды в задаче о колебании воды в резервуаре под действием силы тяжести), до 25% (амплитуда уровня воды в задаче о плескании жидкости в качающейся ёмкости); для задач сопряжённого тепломассообмена в двухфазных средах погрешность в диапазоне от 0,14% (скорость распространения возмущений в задаче о распространении малых возмущений в смеси), до 6% (положение границы раздела фаз в задаче о движении межфазной границы за счёт испарения). Исследования показали, что пакет программ «Логос» позволяет корректно воспроизводить основные физические явления и процессы, характерные для течений двухфазных сред в присутствии границы раздела с допустимой для данного класса задач погрешностью.

Ключевые слова: гидродинамика, уравнения Навье — Стокса, многофазность, VOF, свободная поверхность, массообмен, теплообмен

DOI: 10.33048/SIBJIM.2026.29.306

ВВЕДЕНИЕ

Современная космонавтика и аэрокосмическая отрасль динамично развиваются, что влечёт за собой необходимость постоянного улучшения конструкций летательных аппаратов и обеспечения надёжности и безопасности их функционирования. Для решения задач гидрогазодинамики и теплообмена в двухфазных средах актуальным является использование современных методов вычислительной гидродинамики [1, 2]. Эти методы позволяют получать глубокое понимание процессов, происходящих в таких сложных системах, и могут быть применены для проектирования, анализа и оптимизации различных элементов ракетно-космической техники [2]. В настоящее время существует значительное количество программных комплексов, предназначенных для решения задач гидрогазодинамики и теплообмена. Среди отечественных комплексов в высокотехнологичных областях промышленности широко применяется пакет программ «Логос» [3, 4]. При этом для обеспечения корректного моделирования физических процессов и предсказания поведения многофазных потоков, повышенные требования предъявляются к точности, надёжности и эффективности моделей, реализованных в программном коде. С целью тестирования и доработки реализованных подходов, а также подтверждения высокой точности, стабильности и достоверности используемых численных моделей проводят верификацию и валидацию программных комплексов. В процессе разработки и развития пакет программ «Логос» постоянно успешно валидируется на задачах различных классов для моделирования ламинарных и турбулентных течений, решения задач судостроительной отрасли [5], задач аэрогазодинамики старта и полёта ракет-носителей, а также многофазных течений с учётом свободной поверхности [6]. В настоящее время валидационный базис содержит несколько десятков задач различных классов. Данная работа является логическим продолжением валидационных расчётов на задачах динамики и теплообмена в двухфазных средах с учётом свободной поверхности. Базис задач можно разделить на две группы: в первую группу входят задачи, направленные на подтверждение корректности моделирования движения свободной поверхности жидкости в условиях переменной перегрузки, для точного воспроизведения положения топлива в баке летательных аппаратов; во второй группе собраны задачи для валидации моделей теплового взаимодействия жидкой и газовой фазы, в том числе, с учётом фазовых переходов.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА

В пакете программ «Логос» используется подход Эйлера [7], в рамках которого можно выделить две модели. Наиболее полно динамику многофазной жидкости с учётом свободной поверхности позволяет описать Эйлер — Эйлерова многоскоростная модель [8], в которой для каждой фазы отдельно решаются уравнения движения и неразрывности. При этом каждая фаза имеет свою скорость, общее давление, а для расчёта объёма, который она занимает в пространстве, вводится уравнение переноса объёмной доли. Такая модель сложна в реализации, требует точных замыкающих соотношений при записи уравнений [9], а также значительных вычислительных ресурсов. Указанная модель используется достаточно редко в основном для задач пузырьковых потоков [10]. На практике наиболее распространённой методом является VOF (Volume of Fluid), где в качестве маркер-функции выступает объёмная доля жидкости [11]. Этот метод представляет собой упрощённую версию модели Эйлер — Эйлер, где общий набор уравнений движения и неразрывности решается для всех фаз. Для каждой фазы также решается отдельное уравнение переноса объёмной доли. Метод VOF позволяет корректно описывать потоки со свободной поверхностью, включая сложные процессы, такие как стратифицированные потоки, плескание жидкости, заполнение или опорожнение резервуаров, движение газовых пузырей в жидкости. Эта модель обладает меньшими требованиями к вычислительным ресурсам по сравнению с более сложной моделью Эйлер — Эйлер и может эффективно применяться на различных неструктурированных сетках. Также встречаются модификации

методик, в которых фиксируя границу раздела жидкой и газовой фаз теплообмен и гидродинамические процессы рассчитываются решением системы уравнений Навье-Стокса отдельно в жидкой и отдельно в газовой фазах, сопрягая решение в части тепло- и массообмена на границе раздела в итерационной процедуре [12].

Движение многофазной среды со свободной поверхностью в односкоростном приближении с учётом межфазного обмена описывается с помощью системы уравнений Навье — Стокса, которые дополняются уравнениями переноса объёмной доли жидкой и парообразной фаз [13]:

$$\begin{gathered}
\nabla \cdot \vec{u} = \dot{m}\left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_\nu}\right), \\
\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T)] + \rho\vec{g} + \vec{F}_{st}, \\
\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p T\vec{u}) = \nabla(\lambda\nabla T) + \dot{m}h_{\nu l}, \\
\frac{\partial\alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l\vec{u}) = \frac{\dot{m}}{\rho_l}, \\
\frac{\partial\alpha_\nu}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\nu\vec{u}) = -\frac{\dot{m}}{\rho_\nu},
\end{gathered} \tag{1}$$

где $\rho, \vec{u}, T, p$ — это, соответственно, плотность, скорость, температура и давление среды, μ, λ, C_p — это вязкость, коэффициент теплопроводности и теплоёмкость многофазной среды, $\vec{g}$ — вектор ускорения свободного падения, t — время, $\alpha_k = V_k/V$ — объёмная доля k-й фазы, ρ_k — плотность k-й фазы. Индекс k обозначает одну из фаз: l — жидкая фаза, v — пар. Фазы рассматриваются несжимаемыми, со следующими свойствами:

$$\rho = \sum_{k=1}^{N} \rho_k\alpha_k, \quad \mu = \sum_{k=1}^{N} \mu_k\alpha_k, \quad C_p = \sum_{k=1}^{N} \frac{C_{p,k}\rho_k}{\rho}\alpha_k, \quad \lambda = \sum_{k=1}^{N} \lambda_k\alpha_k.$$

При наличии фазовых переходов объёмный поток массы через межфазную границу может быть вычислен следующим образом [14]:

$$\dot{m} = \frac{2\gamma}{2-\gamma}\left(\frac{M}{2\pi R_g}\right)^{1/2} \frac{\rho_\nu h_{\nu l}}{T_{\text{sat}}^{3/2}}(T - T_{\text{sat}})|\nabla\alpha_l|,$$

где h_{lv} — скрытая теплота парообразования, γ — коэффициент конденсации/испарения, M — молекулярная масса, Rg — универсальная газовая постоянная, T_{sat} — температура насыщения при заданном давлении. В задачах расчёта движения межфазной границы также необходимо учитывать силы поверхностного натяжения $\vec{F}_{\text{st}}$, которые будут стремится сглаживать поверхность раздела фаз. Для учёта силы поверхностного натяжения в уравнении сохранения импульса используется модель непрерывной поверхностной силы [15]. В рамках этой модели рассматривают нормальную составляющую силы, а тангенциальной пренебрегают. Коэффициент поверхностного натяжения вдоль поверхности раздела фаз не меняется. В таком приближении сила поверхностного натяжения может быть представлена как непрерывная объёмная сила, действующая на межфазной границе в переходной области:

$$\vec{F}_{\text{st}} \approx \sigma\text{k}\nabla\alpha_i,$$

здесь σ — коэффициент поверхностного натяжения, $k = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla\alpha_i}{|\nabla\alpha_i|}\right)$ — кривизна поверхности раздела фаз.

Для течений со свободной поверхностью, рассматриваемых в рамках данной статьи, целесообразно применение модели турбулентности Ментера SST [16]. Она представляет собой гибридную RANS модель. Данная модель реализована в пакете программ «Логос», верифицирована и наиболее широко применяется для решения инженерных задач.

Для численного решения системы уравнений (1) необходимо задать граничные условия. Для исследуемого класса задач обязательно наличие непроницаемых стенок, ограничивающих поток жидкости. На стенках задаётся условие равенства нулю градиентов давления и объёмной доли:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_l}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_v}{\partial n} = 0,$$

значение компонент скорости равно нулю:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0.$$

Для учёта теплообмена потока жидкости со стенкой необходимо задать на стенке температуру или тепловой поток:

$$T = T_\Sigma(\vec{R}, t), \quad (\overrightarrow{R}, t) \in \Sigma,$$

где $T_\Sigma(\vec{R}, t)$ — распределение температуры на границе.

$$-(\chi \frac{\partial T}{\partial n}) = q_\Sigma(\vec{R}, t),$$

где $q_\Sigma(\overrightarrow{R}, t)$ — поток тепла в направлении внешней нормали к поверхности Σ, χ — коэффициент теплопроводности.

На выходе из расчётной области или на открытой границе фиксируется требуемое статическое давление, градиенты скорости и объёмных долей равны нулю:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_l}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_v}{\partial n} = 0, \quad P_{\text{stat}} = \text{const}\,.$$

В пакете программ «Логос» используется метод конечных объёмов на произвольных неструктурированных сетках [17]. Данный метод основан на применении закона сохранения для некоторой скалярной величины, записанного в интегральной форме. Для произвольно выбранного объёма конечного размера справедливо следующее утверждение: изменение скалярной величины выражается через поток этой величины через поверхность, ограничивающую указанный объём, и источник или сток этой величины внутри объёма. Конечно-объёмную схему дискретизации уравнений переноса рассмотрим на примере уравнения переноса произвольной скалярной величины φ [18] :

$$\frac{\partial \rho\varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varphi u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\tau_j + Q. \tag{2}$$

Первое слагаемое в уравнении (2) представляет собой нестационарное слагаемое и описывает изменение величины с течением времени; второй — конвективное слагаемое, третий — диффузионное слагаемое; четвёртый — источниковое слагаемое, описывающее источники или стоки величины в объёме. Тензор τ_j содержит пространственные производные от искомой величины φ. Для простоты примем, что $\tau_j = \mu \dfrac{\partial \varphi}{\partial x_j}$.

Процесс решения уравнения (2) методом конечных объёмов можно разбить на два этапа [19]: на первом этапе проводится пространственная дискретизация расчётной области, на втором — составление и численное решение дискретного аналога для уравнения (2). Этап пространственной дискретизации подразумевает разбиение расчётной области на непересекающиеся ячейки произвольной формы. Этап составления и численного решения дискретного

аналога для дифференциального уравнения (2) подразумевает проведение интегрирования уравнения по пространству и времени. Проинтегрировав уравнение переноса скалярной величины φ по объёму V_p в некоторой точке P и применив к полученному выражению теорему Остроградского Гаусса переходят от интегралов по объёму к поверхностным интегралам для конвективного и диффузионного слагаемых:

$$\int\limits_{V_P} \frac{\partial \rho\varphi}{\partial t}\, dV + \int\limits_{S_P} \rho\varphi u_j dS_j - \int\limits_{S_P} \mu \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}\, dS_j - \int\limits_{V_P} Q\, dV = 0,$$

где V_P — объём ячейки P; S_P — поверхность ячейки P.

Далее необходимо получить дискретные аналоги для объёмных и поверхностных интегралов, а также для производной по времени и градиента.

Дискретный аналог нестационарного слагаемого в данной работе рассчитывается неявным методом по схеме Эйлера [20]:

$$\frac{\rho^{j+1}\varphi^{j+1} - \rho^j\varphi^j}{\Delta t} + \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varphi u_j) - \frac{\partial}{\partial x_j}\tau_{ij} - Q\right]^{j+1} = 0,$$

где j — номер шага по времени, Δt — шаг по времени.

Дискретный аналог конвективного слагаемого записывается в следующем виде:

$$\int\limits_{S_P} \rho\varphi u_j dS_j \approx \sum_k \rho_k\varphi_k u_{j,k} S_{j,k} \approx \sum_k \rho_k\varphi_k F_k,$$

где $S_{j,k}$ — вектор-площадь грани, F_k — объёмный поток через грань. Известно большое количество схем дискретизации конвективных потоков [21], в данной работе используется сжимающая схема HRIC [21].

Дискретный аналог диффузионного слагаемого записывается в следующем виде [20]:

$$\int\limits_{S_P} \mu \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}\, dS_j \approx \sum_k \left(\mu \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}\right)_k S_{j,k} = \sum_k \mu_k \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n_k}\right)_k |S_k|,$$

где n_k — нормаль грани k.

Градиент на грани вычисляется одним из известных методов, например, методом Грина — Гаусса:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}\right)_P = \nabla\varphi_P = \frac{1}{V_P}\sum_k \varphi_k S_{k,i}.$$

Дискретизация источникового слагаемого выполняется следующим образом:

$$\int\limits_{V_P} Q\, dV = Q_P V_P.$$

Учитывая описанную выше дискретизацию, уравнение (2) заменяется системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), записанных для каждой расчётной ячейки:

$$A_P\varphi_P + \sum_{k_{int}} A_{k,int}\varphi_{Mk,int} = R_{i,P}.$$

В работе для решения полученной СЛАУ используется алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [4, 21], основанный на использовании полунеявной схемы

с расщеплением по физическим процессам. Записанная в таком виде математическая модель реализована в пакете программ «Логос» [5, 6].

Для всех задач валидационного базиса были проведены исследования на сеточную сходимость. По результатам этих исследований была выбрана оптимальная сеточная модель, обеспечивающая высокую точность расчётов. Для выбора оптимальной сеточной модели были использованы следующие критерии: сходимость решения, обеспечивавшая устойчивость и минимальные изменения параметров (менее 5%) при уточнении сетки; разрешение свободной поверхности, необходимое для корректного воспроизведения волновых процессов; точность воспроизведения экспериментальных данных по ключевым параметрам; экономичность модели, позволяющая достичь приемлемой точности с минимальными вычислительными затратами; численная стабильность расчётов без осцилляций и нестабильностей. В связи с тем, что валидационный базис содержит большое количество задач, а объём научной статьи ограничен, в данной работе не приводится описание проведённых исследований сеточной сходимости.

2. ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ФАЗ

Задачи данного типа являются распространёнными при исследованиях поведения жидких компонентов топлив в баках космических и летательных аппаратов в условиях переменных перегрузок, которые возникают при движении и маневрировании изделий [23]. Как правило, такие задачи рассматриваются в изотермическом приближении, а определяемой величиной являются амплитуда и частота колебаний границы раздела жидкой и газовой фаз. В нижеописанных задачах все используемые сеточные модели построены в пакете программ «Логос».

2.1. Колебания воды в резервуаре под действием силы тяжести

Постановка задачи 2.1. В качестве первой задачи рассматриваются колебания воды в резервуаре под действием силы тяжести [24]. Принципиальная схема задачи приведена на рис. 1. В начальный момент времени граница раздела фаз имеет форму половины длины гармонической волны с амплитудой 0,005 м относительно уровня 0,05 м. На левую, правую и нижнюю стенки накладывается граничное условие прилипания потока, на переднюю и заднюю стенку — условие симметрии, сверху фиксируется статическое давление P = 0 Па. Плотности воды и воздуха принимались равными $\rho_w = 1000$ кг/м^3 и $\rho_a = 1$ кг/м^3.

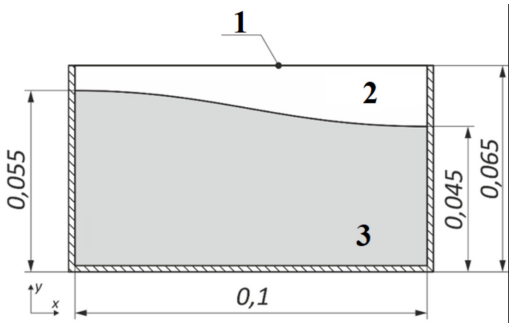


Рис. 1. Схема расчётной области:
1 — открытая граница; 2 — воздух; 3 — вода

Результаты валидации 2.1. Для проведения численного моделирования использовалась однородная структурированная сеточная модель с количеством ячеек по осям x и y равным 160 и 104 соответственно. На рис. 2 приведена зависимость колебания уровня жидкости у левой стенки резервуара от времени. Видно, что численные результаты дают хорошее качественное и количественное согласование с теорией и численным решением, приведённым в работе [24]. Усреднённая относительная погрешность расчётных значений уровня воды от эталонных данных составляет около 0,7%.

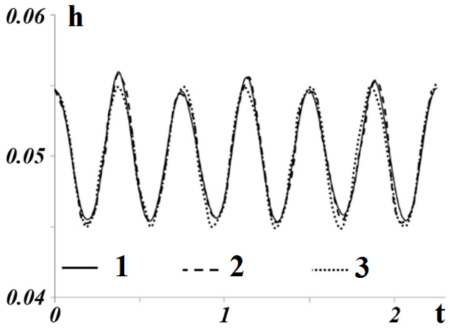


Рис. 2. Колебания уровня жидкости h (м) от времени T (сек) у левой стенки резервуара:
1 — «Логос»; 2 — Ubbink; 3 – Cos

2.2. Плескание жидкости в качающейся ёмкости

Постановка задачи 2.2. В качестве второй задачи рассматривается плескание жидкости в качающейся ёмкости, представляющей собой прямоугольный параллелепипед (см. рис. 3). Результаты экспериментального исследования данной задачи приведены в работе [25]. В нижней части ёмкости находится вода с плотностью $\rho_w = 998$ кг/м^3 и вязкостью $\mu_w = 1 \cdot 10^{-3}$ Па$\cdot$ с, а в верхней части — воздух с плотностью $\rho_a = 0.0017$ кг/м^3 и вязкостью $\mu_a = 8.9 \cdot 10^{-6}$ Па$\cdot$ с.

Уровень заполнения резервуара h отсчитывается от дна. В начальный момент времени вектор нормали к основанию ёмкости совпадает с направлением вектора силы тяжести. В дальнейшем осуществляется качание резервуара по гармоническому закону с угловой частотой ω и угловой амплитудой φ_0 относительно оси, проходящей через центр донной части ёмкости и параллельной оси z.

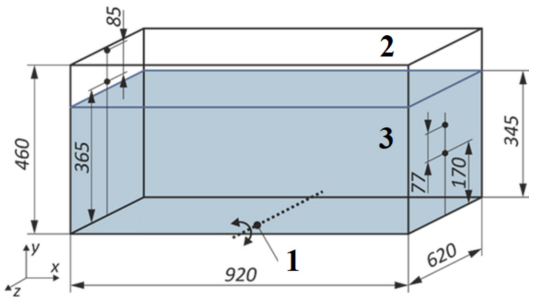


Рис. 3. Схема расчетной области и расположение датчиков (размеры указаны в мм):
1 — ось вращения; 2 — воздух; 3 — вода

Результаты валидации 2.2. В расчётной области задаются два региона, соответствующие жидкости и газу, внешними границами для обоих регионов выступает твёрдая стенка без проскальзывания. Смежная граница регионов задаётся через внутренний интерфейс. Течение в ёмкости предполагается ламинарным, влиянием сил поверхностного натяжения пренебрегается. Процесс колебания резервуара реализуется в ПП «Логос» с использованием объёмных источников, задание которых позволяет моделировать движение в неинерциальной системе отсчёта. Валидация осуществляется с использованием результатов экспериментов, представленных в [25], на серии расчётов, в которых варьируется угловая амплитуда колебаний при частоте колебаний $\nu = 2$ рад/с. Сравнение ведётся по показаниям датчиков избыточного давления, расположение которых представлено на рис. 3. На рис. 4 приведены экспериментальные и расчётные графики избыточного давления при $\varphi_0 = 4°$ и $\varphi_0 = 8°$.

Для $\varphi_0 = 4°$ максимальное отклонение расчётных значений амплитуды давления от эталонных составляет от 10% до 25% в зависимости от расположения датчика. Для угла $\varphi_0 = 8°$

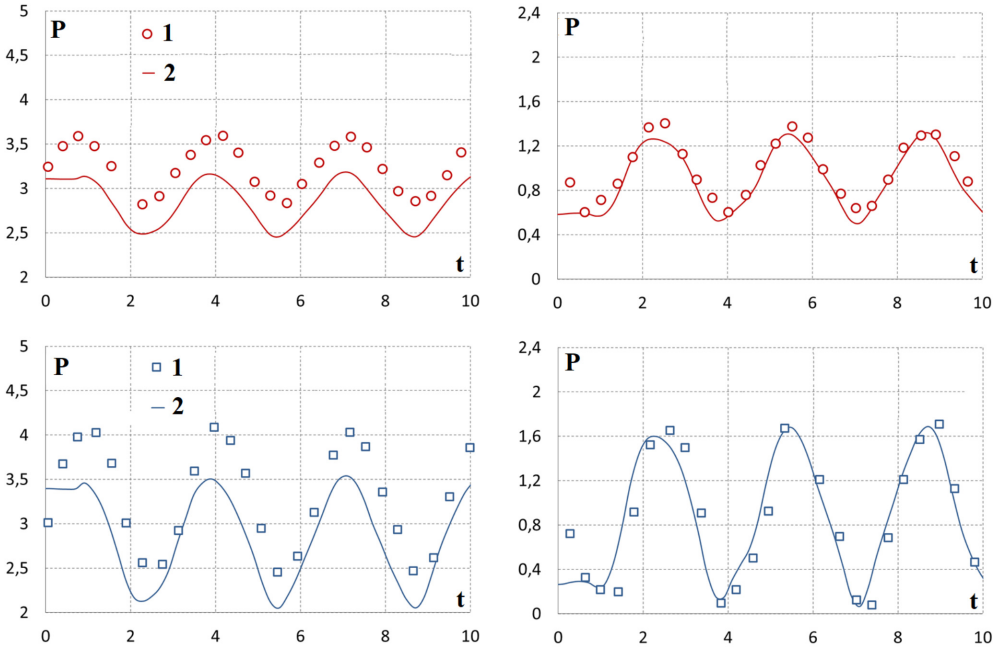


Рис. 4. График зависимости избыточного давления P (кПа) от времени T (сек) при $\varphi_0 = 4°$ и $\varphi_0 = 8°$: 1 — эксперимент; 2 — расчёт

максимальное отклонение амплитуды наблюдается на датчике *1* и составляет около 20%. Отклонения усреднялись на трёх соседних экстремумах графиков давления.

Высокая погрешность в определении значения давления на сенсорах обусловлена наличием эффекта плескания жидкости, которое вызывает резкие изменения градиентов давления, приводит к деформации границы раздела фаз и образованию капель. Также для установления стационарного режима плескания необходимо значительное время, а с течением времени погрешность может постепенно накапливаться. Это связано с накоплением ошибок в численных методах, особенно при длительных расчётах, где малые отклонения в начальных этапах могут усиливаться из-за нелинейности уравнений. Это вносит существенную неоднородность в распределение давления на сенсорах в резервуаре. Так для сенсора № 3 максимальная погрешность составляет до 25 %, в то время как для сенсора № 2 — до 10 %.

2.3. Плескание жидкости в качающейся ёмкости с перегородками

Постановка задачи 2.3. Постановка третьей задачи аналогична предыдущей [26], за тем исключением, что внутри ёмкости находятся перегородки, положение и геометрические размеры которых представлены на рис. 5.

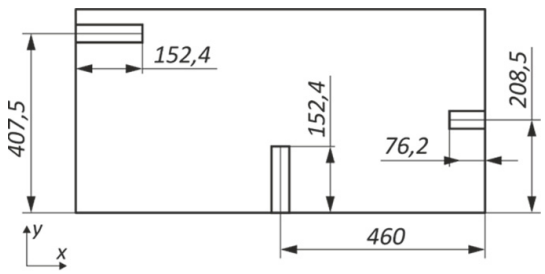


Рис. 5. Схема резервуара и положение перегородок (размеры указаны в мм)

Валидация расчётов, выполненных в пакете программ «Логос», также проводилась на

данных [26]. Результаты сравнения по величине избыточного давления в точках расположения датчиков при степени заполнения 75% и угловой частоте колебаний 2 рад/с представлены на рис. 6.

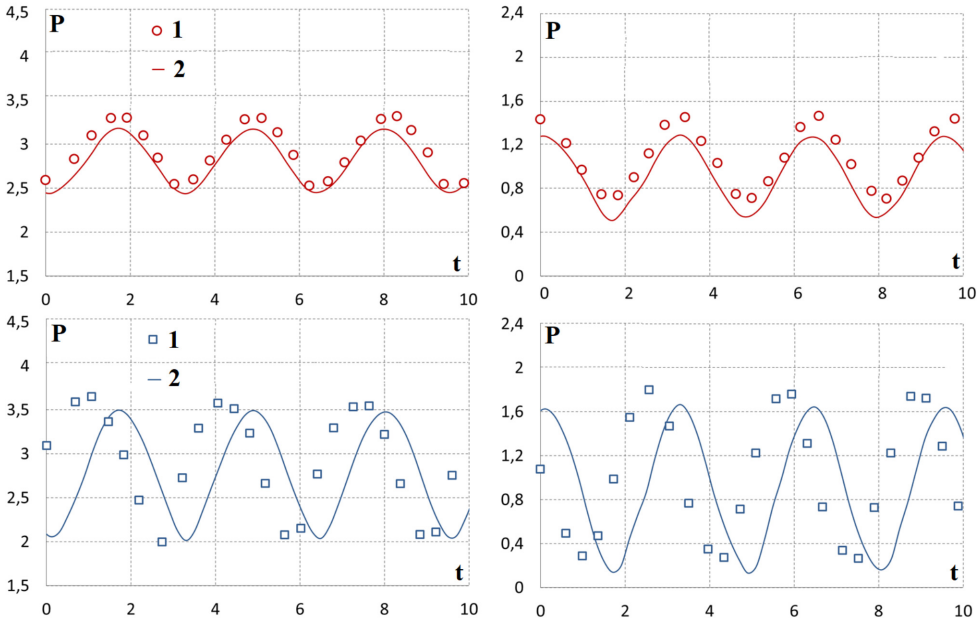


Рис. 6. График зависимости избыточного давления P (кПа) от времени T (сек) при $\varphi_0 = 4°$ и $\varphi_0 = 8°$: 1 — эксперимент; 2 — расчёт

Результаты валидации 2.3. Для всех рассматриваемых случаев плескания воды в качающейся ёмкости, как с наличием перегородок, так и без них, наблюдается корректное воспроизведение амплитуды и частоты колебаний давления жидкости. Относительное отклонение амплитуды колебаний давления для постановки с перегородками не превосходит 20%. При колебаниях резервуара с перегородками с угловой амплитудой $\varphi_0 = 8°$ наблюдается сдвиг колебаний давления при расчётах по фазе до 80° относительно экспериментальных данных. Для данной задачи получено довольно высокое значение относительной погрешности в расчёте давления на сенсорах. Причины таких высоких отклонений от эталонных данных описаны в задаче выше. Дополнительный вклад в увеличение погрешности оказывает наличие перегородок, вносящих дополнительные нелинейные эффекты в распределение давления и течения жидкости. Перегородки создают локальные зоны турбулентности, изменяя гидродинамические характеристики потока и усиливая динамику деформации границы раздела фаз.

2.4. Изотермическое заполнение двух сообщающихся баков

Постановка задачи 2.4. В качестве четвёртой задачи рассматривается изотермическое заполнение двух цилиндрических баков, соединённых между собой через трубовидный канал. В начальный момент времени весь внутренний объём заполнен газом, а через входное отверстие одного из баков с фиксированной скоростью $U = 0.5$ м/с поступает вода. Высота баков составляет 1 м, диаметр 0.6 м, длина и диаметр соединительного канала соответственно 0.7 м и 0.08 м, длина и диаметр входного канала соответственно 0.1 м и 0.08 м. На стенках баков и каналов задаётся граничное условие «Стенка без проскальзывания», входной канал — «Скорость на входе» с соответствующим значением скорости. В задаче оценивается величина массового дисбаланса газа на протяжении всего времени расчёта. Расчёт проводился с числом Куранта $C = 1$ до момента времени $t_{\max} = 220$ с, в который газ сжимается в 30 раз.

Результаты валидации 2.4. На рис. 7 показана изоповерхность объёмной доли воды на различные моменты времени. На начальном этапе вода втекает в левый бак, и её уровень начинает постепенно подниматься. Заполнив бак наполовину, вода через соединительный канал перетекает во второй бак, где постепенно начинается его заполнение. К моменту времени, равному 167 с, газ из соединительного канала полностью вытесняется и концентрируется у верхних областей обоих баков.

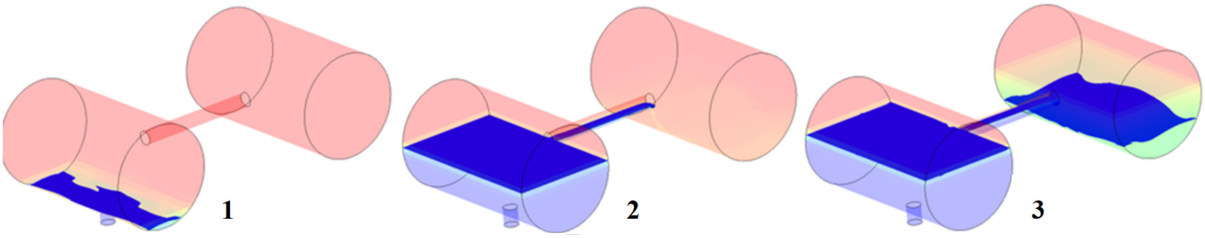


Рис. 7. Изоповерхность объемной доли воды по уровню $\alpha = 0.5$
на различные моменты времени: 1 — $t = 3$ сек; 2 — $t = 60$ сек; 3 — $t = 100$ сек

По результатам расчётов был получен график массового дисбаланса, представленный на рис. 8. Максимальное значение процентного отклонения массы газа по времени составило 0,155%.

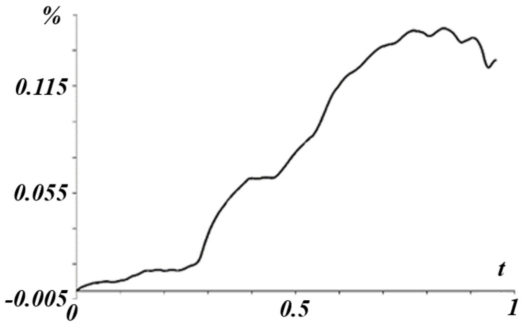


Рис. 8. Процентное отклонение массы газа по времени

Высокая точность определения дисбаланса массы подтверждает, что используемая методика, основанная на методе VOF, обладает консервативностью, то есть корректно сохраняет массу фаз на всех этапах расчёта. Это обеспечивается за счёт строгого соблюдения законов сохранения массы, импульса и энергии, что характерно для численных схем, адаптированных для двухфазных течений. Низкий процент дисбаланса свидетельствует о том, что модель не только учитывает физические взаимодействия, но и минимизирует численные ошибки.

2.5. Изотермическое заполнение бака жидкостью

Постановка задачи 2.5. Рассматривается изотермический процесс заполнения цилиндрического бака жидкостью, сопровождаемый сжатием находящегося в нём газа. В задаче контролируется масса газа, а также давление, которые сравниваются с аналитическим решением.

По трубовидному каналу длиной 0.7 м и диаметром 0.08 м со скоростью $U = 0.5$ м/с равномерно поступает вода, которая втекает в бак цилиндрической формы диаметра 0.6 м и высотой 1 м. На остальные границы расчётной области наложено граничное условие «Стенка». В начальный момент времени бак полностью заполнен газом, который на протяжении всего процесса не покидает расчётную область.

Аналитическая зависимость давления от времени может быть получена из уравнения Менделеева — Клайперона при постоянной массе газа: $p(t) = \frac{\rho_0 V_0}{V_0 - Qt} RT$, где ρ_0 и V_0 — соответственно плотность газа и объём в начальный момент времени, R — газовая постоянная, T — температура; Q — объёмный расход жидкости, втекающей в бак.

Результаты валидации 2.5. На рис. 9 приведено сравнение аналитического и полученного в результате расчёта в «Логос» графиков изменения давления в зависимости от времени. Используются следующие безразмерные величины: $P^* = \dfrac{P(t)}{P_0}$, $t^* = t \cdot U \cdot S/V_0$, где P_0 – начальное давление в баке, S – площадь входа в бак.

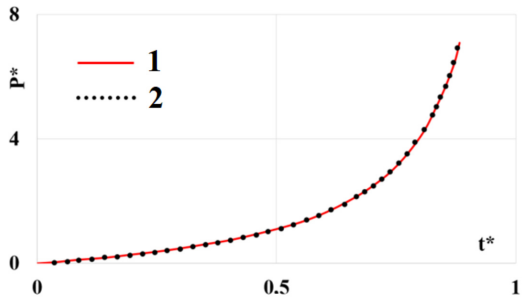


Рис. 9. Графики давления в баке:
1 — расчёт «Логос»; 2 — аналитические данные

Из графика видно, полученные в расчёте, хорошо согласуются с аналитическими данными, среднее отклонение от точного решения составляет менее 0.5%.

3. ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ФАЗ

Задачи данного типа встречаются при рассмотрении двухфазных сред в баках космических и летательных аппаратов [26] в условиях существенной неоднородности температур, которая может быть вызвана как внешними тепловыми потоками, так и локальными течениями жидкостей и газов.

3.1. Задача Стефана

Постановка задачи 3.1. В первой задаче данного типа, задаче Стефана, рассматривается движение плоской межфазной границы между паром и жидкостью, определяемое испарением жидкости из-за взаимодействия с перегретым паром. Задача имеет классическое решение для величины скорости движения межфазной границы [27]. Изначально имеются неподвижные жидкость и паровая прослойка, находящиеся в равновесии. Их температура в начальный момент времени равна температуре насыщения T_{sat}, далее температура пара увеличивается за счёт поступления тепла от нагреваемой стенки, находящейся при температуре T_w большей температуры насыщения. Пар по мере испарения вытесняет жидкость, что приводит к движению межфазной границы по направлению от нагреваемой стенки.

Для численного решения выбрана область длиной $L = 0.1$ м, где построена одномерная расчётная сетка с размером ячеек $\Delta x = 10^{-3} \cdot L$, внешний вид которой представлен на рис. 10. Левая граница — непроницаемая стенка с температурой T_w, при этом $(T_w - T_{\text{sat}} = 25K)$; правая граница — граница с фиксированным давлением.

В соответствии с [27], аналитическая зависимость положения межфазной границы от времени x_{in} и распределение температуры могут быть найдены из следующих соотношений: $x_{\text{in}}(t) = 2\zeta\sqrt{a_v t}$, где $x_{\text{in}}(t)$ — положение межфазной границы.

$$T(x,t) = T_w - \frac{T_w - T_{\text{sat}}}{\operatorname{erf}(\zeta)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_v t}}\right),$$

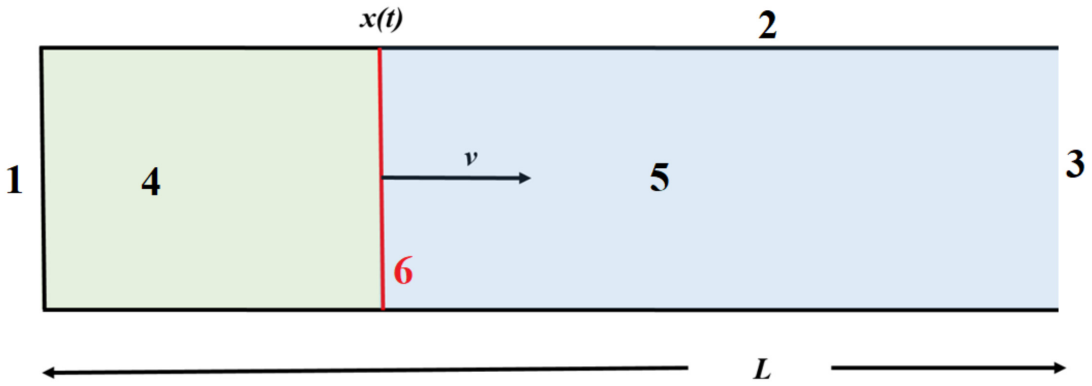


Рис. 10. Схема численного эксперимента:
1 — непроницаемая граница с температурой $T_w > T_{\text{sat}}$; 2 — непроницаемая адиабатическая граница; 3 — открытая граница; 4 — пар; 5 — жидкость; 6 — межфазная граница

где $T(x,t)$ — распределение температуры, T_w — температура стенки, T_{sat} — температура насыщения, $a_v = \dfrac{\lambda_v}{\rho_v c_v}$ — коэффициент температуропроводности пара, ρ_v — плотность пара, c_v — теплоёмкость пара, λ_v — теплопроводность пара.

Константа ζ вычисляется из решения следующего уравнения:

$$\zeta \exp(\zeta^2)\text{erf}(\zeta) = \frac{c_v(T_w - T_{\text{sat}})}{\sqrt{\pi} h_{vl}},$$

где $\text{erf}(x)$ — функция ошибки.

Результаты валидации 3.1. В начальный момент времени пар занимает две ячейки, примыкающие к нагреваемой стенке. Численное моделирование проводилось для давления насыщения воды равное 101.3 кПа и для нескольких , для которого в [27] приводится аналитическое решение. На рис. 11 представлены графики зависимости положения межфазной границы от времени для расчётов по моделям кипения Tanasawa и Lee в сравнении с аналитикой для всех расчётных случаев. Модель Tanasawa точнее описывает аналитику. Модель Lee также даёт приемлемые результаты, особенно для случаев с $p_{\text{sat}} = 571$ кПа и $p_{\text{sat}} = 14044$ кПа. Для этих случаев результаты по моделям Tanasawa и Lee практически совпадают.

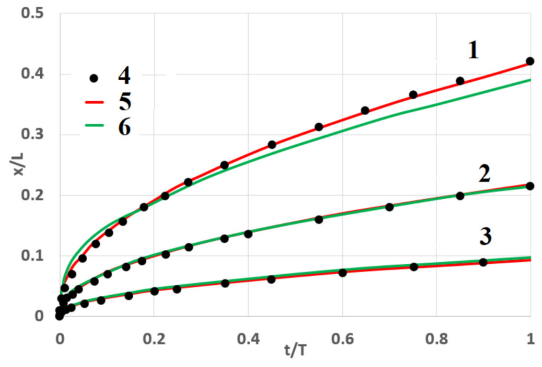


Рис. 11. Положение межфазной границы от времени для различных давлений:
1 — $P = 101,3$ кПа, 2 — $P = 571$ кПа, 3 — $P = 14.044$ МПа;
4 — аналитические данные; 5 — расчёт по модели Танасава; 6 — расчёт по модели Лии

В задачах моделирования двухфазных течений, численная диффузия может приводить к размыванию границы раздела фаз, что снижает точность расчётов и увеличивает погреш-

ность. Для минимизации данного эффекта использовалась сжимающая схема HRIC [28], которая обеспечивает сохранение резких градиентов давления и плотности за счёт локальной адаптации численной схемы. Использование схемы HRIC позволило повысить стабильность и точность моделирования. Средняя погрешность расчётов для модели Lee составляет до 6%, для модели Tanasawa — до 3%, при этом чем выше давление, тем меньше погрешность расчётов.

3.2. Конденсация одиночного пузырька насыщенного пара

Постановка задачи 3.2. Во второй задаче моделируется конденсация одиночного пузырька насыщенного пара в неподвижной недогретой воде [29]. На начальный момент времени пузырёк пара диаметром $D = 1$ мм окружён водой, находящейся при температуре ниже температуры насыщения на 25 K. Фазовый обмен, происходящий на межфазной границе, приводит к уменьшению размера пузырька за счёт конденсации. Результаты численного моделирования сравниваются с опубликованными экспериментальными данными [30]. Геометрия данной задачи представлена на рис. 12.

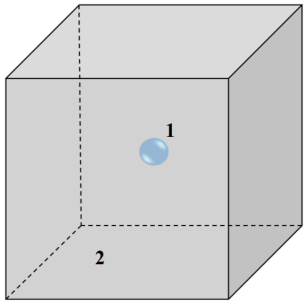


Рис. 12. Схема задачи:
1 — пузырёк пара с температурой $T_{\text{vapor}} = T_{\text{sat}}$; 2 — вода с температурой $T_{\text{water}} = (T_{\text{sat}} - 25)$

На фронтальной и задней поверхности области моделирования задаётся граничное условие симметрии. Сверху задано фиксированное давление, на всех остальных граничных поверхностях задано граничное условие «Стенка с прилипанием». Температура пара на начальный момент времени равна температуре насыщения $T_{\text{sat}} = 380{,}26$ K при давлении 130 кПа, температура воды на начальный момент времени равна $T = T_{\text{sat}} - 25$ K.

Результаты валидации 3.2. В ПП «Логос» реализовано три модели кипения, в каждой из которых для калибровки модели присутствуют эмпирические коэффициенты. Для корректного моделирования изменения формы и диаметра пузырька были проведены калибровочные расчёты, позволившие определить оптимальные значения эмпирических коэффициентов. На рис. 13 представлены результаты расчётов по трём моделям фазовых переходов, реализованным в «Логос», с оптимальными значениями эмпирических параметров. Из графиков следует, что все три модели позволяют получить данные об изменении диаметра пузырька во времени.

Среди доступных моделей кипения, модель Tanasawa меньше всего отклоняется от экспериментальных данных. На рис. 14 представлена динамика изменения формы пузырька со временем: сравнение численных расчётов по модели Tanasawa с экспериментом. Видно хорошее согласие экспериментальных данных с расчётными.

Полученные данные показали, что все реализованные в «Логос» модели межфазного массообмена позволяют решать задачи о конденсации газа.

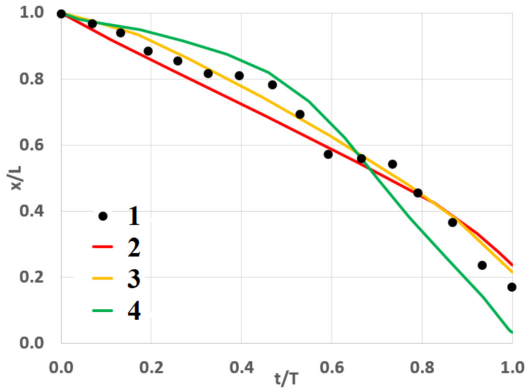


Рис. 13. Динамика изменения диаметра пузырька во времени:
1 — экспериментальные данные; 2 — расчёт по модели Лии;
3 — расчёт по модели Танасава; 4 — расчёт по модели Рохсёнова

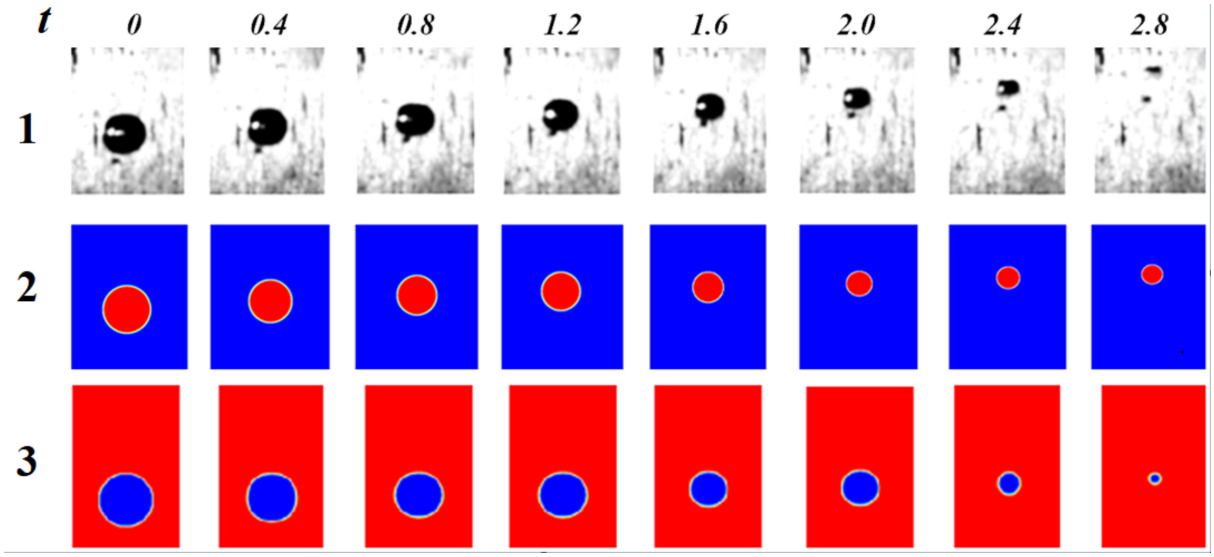


Рис. 14. Изменение формы и размера пузырька:
1 — экспериментальные фотографии (см.[31]); 2 — расчёт «Логос»;
3 — расчёт OpenFOAM (см. [32])

3.3. Сжатие двухфазной среды

Постановка задачи 3.3. В задаче рассматривается процесс сжатия двухфазной среды «жидкость-газ» при наличии свободной поверхности: закрытая область, изначально заполненная до некоторого уровня жидкостью, сжимается посредством поршня. В качестве эталонных данных используются аналитические значения средней температуры и давления в расчётной области. На рис. 15 приведена постановка задачи.

По периметру расчётной области задаются границы «Стенка без проскальзывания», при этом для учёта движения поршня для соответствующей стенки следует использовать тип подвижной границы «Подвижная». В задаче рассматривается адиабатический процесс сжатия термодинамической системы «несжимаемая жидкость-идеальный газ»: закрытая теплоизолированная область размером $L \times L \times 0{,}2 \cdot L$ ($L = 1$ м), изначально заполненная водой и воздухом в соотношении объёмов 1:1 при $P_0 = 105$ Па и $T_0 = 300$ K, сжимается до половины своего начального объёма. Данный процесс имеет известное аналитическое решение (уравнение

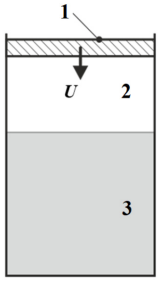


Рис. 15. Схема задачи:
1 — поршень движется со скоростью $U = 0.5$ м/с; 2 — газ; 3 — жидкость

Пуассона):

$$P(t) = P_0\left(\frac{V_0}{V(t)}\right)^{\gamma}, \quad T(t) = T_0\left(\frac{V_0}{V(t)}\right)^{(\gamma-1)},$$

где $\gamma = 1{,}4$ — показатель адиабаты, P_0 — начальное давление, V_0 — начальный объём, T_0 — начальная температура.

Сжатие области происходит за счёт движения одной из стенок со скоростью $U = 0{,}5$ м/с, что обеспечивает следующий закон изменения объёма: $V(t) = \left(1 - \dfrac{U \cdot t}{L}\right)V_0$. С учётом этого зависимости давления и температуры от времени приобретают вид:

$$P(t) = \frac{P_0}{2}\left(1 - \frac{U \cdot t}{L}\right)^{-\gamma}, \quad T(t) = \frac{T_0}{2}\left(1 - \frac{U \cdot t}{L}\right)^{1-\gamma}.$$

Данные зависимости сравниваются с осреднёнными по пространству расчётными значениями давления и температуры.

Результаты валидации 3.3. По результатам расчётов получены значения среднего давления и средней температуры в зависимости от времени. На рис. 16 приведены сравнения расчётных данных, полученных в пакете программ «Логос», с аналитическим решением.

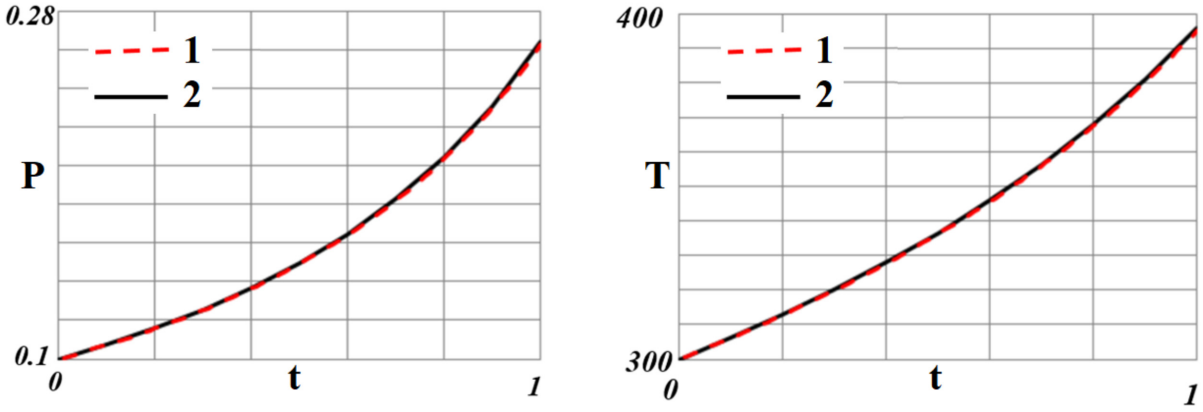


Рис. 16. Графики зависимости давления P (МПа) и температуры (К) от времени t (сек):
1 — расчёт «Логос»; 2 — аналитические данные

Полученные результаты показывают хорошее согласование между численным моделированием и аналитическим решением: среднее значение относительной погрешности давления и температуры не превышает 2%, что свидетельствует о высокой точности метода.

3.4. Распространения малых возмущений в смеси

Постановка задачи 3.4. Исследуется процесс распространения малых возмущений в жидкости с ненулевым газосодержанием. Это типичный пример задачи по оценке опасности возникновения кавитационных процессов. В качестве эталонных данных используется расчётная скорость распространения малых возмущений [33]. Рассматривается одномерный канал длиной $l = 1$ м. В расчёте измеряется скорость звука, которая сравнивается с аналитическим решением. На левой и правой границах задано граничное условие фиксированного статического давления. На остальных границах задано условия непротекания. Канал полностью заполнен однородной смесью, состоящей на 99% из воды и на 1% из воздуха. Давление в начальный момент времени составляет $p_0 = 1$ атм. На правом конце задано давление p_0, на левом — $1{,}01 \cdot p_0$.

В начальный момент времени на левой границе области образуется волна сжатия, которая движется в сторону меньшего давления со скоростью звука c_{sound}. Скорость звука для данной смеси можно оценить аналитически с использованием обобщения формулы Мэллока [33]:

$$c_{\text{sound}} = \sqrt{\frac{kp}{\rho a_{\text{gas}}}} = 101{,}27 \text{ м/с}$$

где $k = 1{,}4$ — коэффициент политропы, p — давление, ρ — плотность смеси, a_{gas} — объёмная доля газа в смеси.

Результаты валидации 3.4. Результаты расчётов в пакете программ «Логос» изменения параметров в канале для момента времени $t = 0{,}0049$ с представлены на рис. 17.

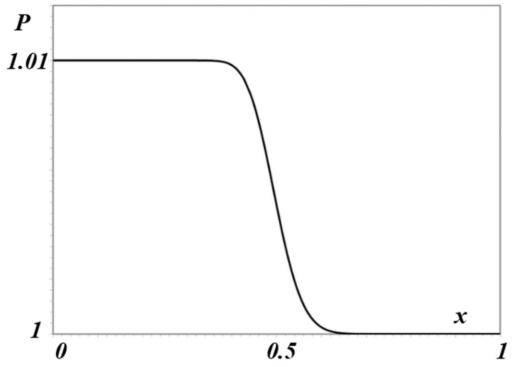


Рис. 17. График изменения давления

Здесь используются безразмерные величины $p^* = p/p_0$ и $x^* = x/l$, где x — координата по оси, отложенной от начала канала и вдоль его длины. По результатам проведённых расчётов скорость распространения малых возмущений составила 101,41 м/с, что отличается от аналитического значения на 0,14%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты валидации пакета программ «Логос» на задачах динамики и теплообмена в двухфазных средах со свободной поверхностью. Гидродинамика двухфазного потока рассчитывается на основе решения системы уравнений Навье-Стокса, дополненной уравнениями переноса объёмных долей жидкости и газа в рамках односкоростной многофазной модели жидкости VOF. Система уравнений решается методом SIMPLE, реализованном на базе конечно-объёмной дискретизации для неструктурированных расчётных сеток. Базис валидационных задач разбит на два класса задач: задачи динамики границы раздела фаз и задачи сопряжённого тепломассообмена в двухфазных средах. Базис содержит девять

задач, для которых доступны эталонные аналитические или экспериментальные данные по ключевым физическим параметрам задачи: колебания воды в резервуаре под действием силы тяжести, плескание жидкости в качающейся ёмкости, плескание жидкости в качающейся ёмкости с перегородками, изотермическое заполнение двух сообщающихся баков, изотермическое заполнение бака жидкостью, задача Стефана, конденсация одиночного пузырька насыщенного пара, сжатие двухфазной среды, распространения малых возмущений в смеси. В результате решения валидационного базиса задач получены следующие значения относительной погрешности: для задач исследования динамики границы раздела фаз усреднённая относительная погрешность лежит в диапазоне от 0,7% (амплитуда уровня воды в задаче о колебании воды в резервуаре под действием силы тяжести), до 25% (амплитуда уровня воды в задаче о плескании жидкости в качающейся ёмкости); для задач сопряжённого тепломассообмена в двухфазных средах погрешность в диапазоне от 0,14% (скорость распространения возмущений в задаче о распространении малых возмущений в смеси), до 6% (положение границы раздела фаз в задаче о движении межфазной границы за счёт испарения).

Исследования показали, что пакет программ «Логос» позволяет корректно воспроизводить основные физические явления и процессы, характерные для течений двухфазных сред в присутствии границы раздела с допустимой для данного класса задач погрешностью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Результаты получены при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодёжных лабораторий (проект FSWE-2024-0001). Других источников финансирования проведения или руководства данным конкретным исследованием не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wu M., Zhang J., Gui N.* Advances in the modeling of multiphase flows and their application in nuclear engineering // A Review. Exp. Comput. Multiph. Flow. 2024. N 6. P. 287–352; DOI: 10.1007/s42757-024-0202-5
2. *Апостол Ю.С., Вожаков И.С.* Численное моделирование турбулентного газового потока над волнистой поверхностью // Сиб. журн. индустр. матем. 2023. V. 26, № 2. С. 5–13.
3. *Mani M., Dorgan J.* A Perspective on the State of Aerospace Computational Fluid Dynamics Technology // Annual Rev. Fluid Mech. 2023. V. 55. P. 431–457; DOI: 10.1146/annurev-fluid-120720-124800
4. *Козелков А.С., Лашкин С.В., Куркин А.А., Корнев А.В., Вялых А.М.* Параллельная реализация метода SIPMLE на основе многосеточного метода // Сиб. журн. вычисл. математики. 2020, Т. 23, № 1. С. 1–22.
5. *Козелков А.С., Таранов А.Е., Курулин В.В., Рудниченко А.А., Плыгунова К.С., Крутякова О.Л.* Валидация программного комплекса Логос с использованием задач в судостроении // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Т.4, № 406. С. 59–73.
6. *Kozelkov A., Kurkin A., Kurulin V., Plygunova K., Krutyakova O.* Validation of the LOGOS software package methods for the numerical simulation of cavitational flows // Fluids. 2023. V. 8, Iss. 3. P. 104; DOI: 10.3390/fluids8030104
7. *Hu G., Celik I.* Eulerian Lagrangian based large eddy simulation of a partially aerated bubble column // Chemical Engrg. Sci. 2008. V. 63. P. 253–271.
8. *Linmin Li, Yabiao Niu, Guolai Wei, Sivakumar Manickam, Xun Sun, Zuchao Zhu* Investigation of cavitation noise using Eulerian-Lagrangian multiscale modeling // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. V. 97. Article number 106446.

9. *Alkhezzi A., Fan Y.* Improved two-fluid model for segregated flow and integrated multiphase flow modeling for downhole pressure predictions // Energies. 2023. V. 16, Iss. 24; DOI: 10.3390/en16247923
10. *Zurner Till, Kamble Vikrant, Rzehak Roland, Eckert Kerstin* Experimental and numerical investigation of turbulent multiphase jets // Minerals Engrg. 2024. V. 211.
11. *Mohan A., Tomar G.* Volume of Fluid Method: A Brief Review // J. Indian Inst. Sci. 2024. V. 104. P. 229–248; DOI: 10.1007/s41745-024-00424
12. *Городнов А.О., Лаптевv И.В.* Влияние теплоемкости стенки на рост давления и температурную стратификацию при термической конвекции паров водорода в вертикальном цилиндрическом резервуаре // Труды МАИ. 2021. № 116. С. 2.
13. *Тятюшкина Е.С., Козелков А.С., Куркин А.А., Курулин В.В., Ефремов В.Р., Уткин Д.А.* Оценка численной диффузии метода конечных объемов при моделировании поверхностных волн // Вычислительные технологии. 2019. Т.24. № 1. С. 106–119, DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.008.
14. *Liu H., Tang J., Sun L.* An assessment and analysis of phase change models for the simulation of vapor bubble condensation // Internat. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 157; DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119924
15. *Seric I., Afkhami S., Kondic L.* Direct numerical simulation of variable surface tension flows using a Volume-of-Fluid method // J. Comput. Phys. 2018. V. 352, N 1. P. 615–636.
16. *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of industrial experience with the sst turbulence model // Turbulence, Heat and Mass Transfer. 2003, V. 4. P. 625–632.
17. *Ferziger J., Peric M.* Computational Method for Fluid Dynamics. N. Y.: Springer-Verl., 2002.
18. *Singh S., Kashyap P.* Finite volume method: an efficient tool for transport equation solutions // J. Propulsion Technology. 2023. V. 44, N 6; DOI: 10.52783/tjjpt.v44.i6.3938
19. *Kovenya V.M., Babintsev P.V.* Application of splitting algorithms in the method of finite volumes for numerical solution of the Navier–Stokes equations // J. Appl. Indust. Math. 2018. V. 12. P. 479–491; DOI: 10.1134/S1990478918030080
20. *Efimov D., Polyakov A., Aleksandrov A.* Discretization of homogeneous systems using Eulermethod with a state-dependent step // Automatica. 2019. V. 109. Article number 108546.
21. *Fletcher K.* Computational Methods in Fluid Dynamics in Two Volumes. M: Mir, 1991.
22. *Waclawczyk T., Koronowicz T.* Comparison of cicsam and hric high-resolution schemes for interface capturing // J. Theor. Appl. Mech. 2008. V. 46, N 2. P. 325–345.
23. *Kim G., Rhee H., Jeon W.* Lateral sloshing analysis by cfd and experiment for a spherical tank // Internat. J. Aeronaut. Space Sci. 2020. V. 21. P. 816–825; DOI: 10.1007/s42405-020-00295-2
24. *Ubbink O.* Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces // Department of Mechanical Engrg. Imperial College of Science: Technology & Medicine. 1997.
25. *Akyildiz H., Unal N.* Sloshing in a three-dimensional rectangular tank numerical simulation and experimental validation // Ocean Engrg. 2010. V. 33, N 16. P.2135–2149.
26. *Zhang J., Wang Y. Liu.* Numerical simulation of two-phase fluid dynamics in a spacecraft propellant tank under low-gravity conditions // Acta Astronautica. 2021. N 187. P. 45–58.
27. *Welch S. and Wilson J.* A volume of fluid based method for fluid flows with phase change // J. Comp. Phys. 2000. V. 160. P. 662–682.
28. *Пузан А. Ю., Козелков А. С.* Численная оценка погрешности моделирования испарения с использованием односкоростной многофазной модели жидкости со свободной поверхностью методом конечных объёмов // Вопросы атомной науки и техники. 2026. С. 53–67.
29. *Kozelkov A. S., Puzan A. Y.* Estimation of the numerical diffusion of the finite volume method in condensation modeling using a single-rate multiphase model of a liquid with a free surface // Engrg. Phys. 2024. N 11. P. 41–55, DOI: 10.25791/infizik.11.2024.1439.
30. *Kamei S.,Hirata M.* Study on condensation of a single vapor bubble into subcooled water-Part 2, experimental analysis // Heat Trans. Jpn. Res., 1990.
31. *Samkhaniani N., Ansar M.* Numerical simulation of bubble condensation using CF-VOF // Progress in Nuclear Energy. 2016. V. 89. P. 120–131.

32. *Zeng Q., Cai J., Yin H.* Numerical simulation of single bubble condensation in subcooled flow using OpenFOAM // Progress Nucl. Energy. 2015. V. 83. P. 336–346.

33. *Elperin T., Fominykh A.* Heat transfer during gas hydrate formation in gas-liquid slug flow // Heat and Mass Transfer. 1996. V. 31, P. 179–183; DOI: 10.1007/BF02333317

SIBERIAN JOURNAL OF INDUSTRIAL MATHEMATICS

UDC 532.5:519.6

VALIDATION OF THE LOGOS SOFTWARE PACKAGE ON THE PROBLEMS OF DYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN TWO-PHASE MEDIA USING A SINGLE-SPEED MULTIPHASE MODEL OF A LIQUID WITH A FREE SURFACE

© 2026 **A. S. Kozelkov**[1,4a], **An. Yu. Puzan**[1,3b], **I. V. Laptiev**[2c], **V. V. Kurulin**[1,4], **A. A. Kuroedov**[2], **A. O. Gorodnov**[2]

[1]*FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov 607188, Russia*
[2]*Keldysh Research Center, Moscow 125438, Russia*
[3]*Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Sarov 607328, Russia*
[4]*Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod 603155, Russia*

E-mails: [a]askozelkov@mail.ru, [b]pppan@yandex.ru, [c]laptev.iv.kerc@gmail.com

Received 14.01.2026, revised 26.05.2026, accepted 15.07.2026

Abstract. The article presents the results of validation of the Russian Logos software package on the problems of dynamics and heat exchange in two-phase environments. Two-phase flow is modeled on the basis of the solution of the Navier-Stokes equation system, the interphase boundary is taken into account by means of a single-speed multiphase VOF fluid model. The system of equations is solved by the Simple method, implemented on the basis of finite-volume sampling for unstructured design grids. The basis of validation problems is divided into two classes: phase boundary dynamics problems and conjugate heat and mass exchange problems in two-phase media. The basis contains nine problems for which reference analytical or experimental data on key physical parameters of the problem are available. The purpose of the Logos validation was to confirm its ability to adequately describe the dynamics and heat transfer in two-phase environments, as well as to ensure high accuracy of the simulation results. As part of the study, the following averaged values ? ? of relative error were obtained for various classes of tasks: for tasks of studying the dynamics of the phase boundary, the averaged relative error lies in the range from 0.7(the amplitude of the water level in the problem of water fluctuation in the tank under the influence of gravity), up to 25(the amplitude of the water level in the problem of splashing liquid in a swinging tank); for problems of conjugate heat and mass exchange in two-phase media, an error in the range from 0.14(the rate of propagation of perturbations in the problem of propagation of small perturbations in the mixture), up to 6(the position of the phase boundary in the problem of the movement of the interphase boundary due to evaporation). Studies have shown that the Logos software package makes it possible to correctly reproduce the main physical phenomena and processes characteristic of currents of two-phase media in the presence of an interface with an error permissible for this class of tasks.

Keywords: hydrodynamics, Navier–Stokes equations, multiphase, VOF, free surface, mass exchange, heat exchange.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2026.29.306

REFERENCES

1. Wu M., Zhang J., Gui N. Advances in the modeling of multiphase flows and their application in nuclear

English translation is published in Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2026, Vol. 20, No. 3.

engineering. *A Review. Exp. Comput. Multiph. Flow*, 2024, No. 6, pp. 287–352; DOI: 10.1007/s42757-024-0202-5

2. Apostol Yu.S., Vozhakov I.S. Numerical modeling of turbulent gas flow over a wavy surface. *J. Appl. Indust. Math.*, 2023, Vol. 17, No. 2, pp. 235–241.
3. Mani M., Dorgan J. A Perspective on the State of Aerospace Computational Fluid Dynamics Technology. *Annual Rev. Fluid Mech.*, 2023, Vol. 55, pp. 431–457; DOI: 10.1146/annurev-fluid-120720-124800
4. Kozelkov A.S., Lashkin S.V., Kurkin A.A., Kornev A.V., Vyalyh A.M. Parallel'naya realizaciya metoda SIPMLE na osnove mnogosetochnogo metoda [Parallel implementation of the SIPMLE method based on the multigrid method]. *Sib. Zhurn. Vychisl. Mat.* [Sib. J. Comput. Math.], 2020, Vol. 23, No. 1, pp. 1–22 (in Russian).
5. Kozelkov A.S., Taranov A.E., Kurulin V.V., Rudnichenko A.A., Plygunova K.S., Krutyakova O.L. Validaciya programmnogo kompleksa Logos s ispol'zovaniem zadach v sudostroenii [Validation of Logos software package using tasks in shipbuilding]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra* [Transactions of the Krylov State Research Centre], 2023, Vol. 4, No. 406, pp. 59–73 (in Russian).
6. Kozelkov A., Kurkin A., Kurulin V., Plygunova K., Krutyakova O. Validation of the LOGOS software package methods for the numerical simulation of cavitational flows. *Fluids*, 2023, Vol. 8, Iss. 3, pp. 104; DOI: 10.3390/fluids8030104
7. Hu G., Celik I. Eulerian Lagrangian based large eddy simulation of a partially aerated bubble column. *Chemical Engrg. Sci.*, 2008, Vol. 63, pp. 253–271.
8. Linmin Li, Yabiao Niu, Guolai Wei, Sivakumar Manickam, Xun Sun, Zuchao Zhu Investigation of cavitation noise using Eulerian-Lagrangian multiscale modeling. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, Vol. 97. Article number 106446.
9. Alkhezzi A., Fan Y. Improved two-fluid model for segregated flow and integrated multiphase flow modeling for downhole pressure predictions. *Energies*, 2023, Vol. 16, Iss. 24; DOI: 10.3390/en16247923
10. Zurner Till, Kamble Vikrant, Rzehak Roland, Eckert Kerstin Experimental and numerical investigation of turbulent multiphase jets. *Minerals Engrg.*, 2024, Vol. 211.
11. Mohan A., Tomar G. Volume of Fluid Method: A Brief Review. *J. Indian Inst. Sci.*, 2024, Vol. 104, pp. 229–248; DOI: 10.1007/s41745-024-00424
12. Gorodnov A.O., Laptev I.V. Vliyanie teploemkosti stenki na rost davleniya i temperaturnuyu stratifikaciyu pri termicheskoj konvekcii parov vodoroda v vertikal'nom cilindricheskom rezervuare [Influence of wall heat capacity on pressure growth and temperature stratification during thermal convection of hydrogen vapors in a vertical cylindrical tank]. *Trudy MAI* [Proceed. MAI], 2021, No. 116, pp. 2 (in Russian).
13. Tyatyushkina E.S., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Kurulin V.V., Efremov V.R., Utkin D.A. Ocenka chislennoj diffuzii metoda konechnyh ob'emov pri modelirovanii poverhnostnyh voln [Evaluation of numerical diffusion of the finite volume method when modelling surface waves]. *Vychisl. Tehnol.* [Comput. Technol.], 2019, Vol. 24, No. 1, pp. 106–119 (in Russian); DOI: 0.25743/ICT.2019.24.1.008
14. Liu H., Tang J., Sun L. An assessment and analysis of phase change models for the simulation of vapor bubble condensation. *Internat. J. Heat Mass Transfer*, 2020, Vol. 157; DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119924
15. Seric I., Afkhami S., Kondic L. Direct numerical simulation of variable surface tension flows using a Volume-of-Fluid method. *J. Comput. Phys.*, 2018, Vol. 352, No. 1, pp. 615–636.
16. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, Vol. 4, pp. 625–632.
17. Ferziger J., Peric M. Computational Method for Fluid Dynamics. N. Y.: Springer-Verl., 2002.
18. Singh S., Kashyap P. Finite volume method: an efficient tool for transport equation solutions. *J. Propulsion Technology*, 2023, Vol. 44, No. 6; DOI: 10.52783/tjjpt.v44.i6.3938
19. Kovenya V.M., Babintsev P.V. Application of splitting algorithms in the method of finite volumes for numerical solution of the Navier-–Stokes equations. *J. Appl. Indust. Math.*, 2018, Vol. 12, pp. 479–491; DOI: 10.1134/S1990478918030080

20. Efimov D., Polyakov A., Aleksandrov A. Discretization of homogeneous systems using Eulermethod with a state-dependent step. *Automatica*, 2019, Vol. 109. Article number 108546.
21. Fletcher K. Computational Methods in Fluid Dynamics in Two Volumes. M: Mir, 1991.
22. Waclawczyk T., Koronowicz T. Comparison of cicsam and hric high-resolution schemes for interface capturing. *J. Theor. Appl. Mech.*, 2008, Vol. 46, No. 2, pp. 325–345.
23. Kim G., Rhee H., Jeon W. Lateral sloshing analysis by cfd and experiment for a spherical tank. *Internat. J. Aeronaut. Space Sci.*, 2020, Vol. 21, pp. 816–825; DOI: 10.1007/s42405-020-00295-2
24. Ubbink O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. *Department of Mechanical Engrg. Imperial College of Science: Technology & Medicine*, 1997.
25. Akyildiz H., Unal N. Sloshing in a three-dimensional rectangular tank numerical simulation and experimental validation. *Ocean Engrg.*, 2010, Vol. 33, No. 16, pp.2135–2149.
26. Zhang J., Wang Y. Liu. Numerical simulation of two-phase fluid dynamics in a spacecraft propellant tank under low-gravity conditions. *Acta Astronautica*, 2021, No. 187, pp. 45–58.
27. Welch S. and Wilson J. A volume of fluid based method for fluid flows with phase change. *J. Comp. Phys.*, 2000, Vol. 160, pp. 662–682.
28. Puzan A.Yu., Kozelkov A.S. Chislennaya ocenka pogreshnosti modelirovaniya ispareniya s ispol'zovaniem odnoskorostnoj mnogofaznoj modeli zhidkosti so svobodnoj poverhnost'yu metodom konechnyh ob'yomov [Numerical assessment of the error in modeling evaporation using a single-speed multiphase fluid model with a free surface by the finite volume method]. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tehniki* [Problems of Atomic Science and Technology], 2026, pp. 53–67 (in Russian).
29. Kozelkov A. S., Puzan A. Y. Estimation of the numerical diffusion of the finite volume method in condensation modeling using a single-rate multiphase model of a liquid with a free surface. *Engrg. Phys.*, 2024, No. 11, pp. 41–55, DOI: 10.25791/infizik.11.2024.1439.
30. Kamei S.,Hirata M. Study on condensation of a single vapor bubble into subcooled water-Part 2, experimental analysis. *Heat Trans. Jpn. Res.*, 1990.
31. Samkhaniani N., Ansar M. Numerical simulation of bubble condensation using CF-VOF. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, Vol. 89, pp. 120–131.
32. Zeng Q., Cai J., Yin H. Numerical simulation of single bubble condensation in subcooled flow using OpenFOAM. *Progress Nucl. Energy*, 2015, Vol. 83, pp. 336–346.
33. Elperin T., Fominykh A. Heat transfer during gas hydrate formation in gas-liquid slug flow. *Heat and Mass Transfer*, 1996, Vol. 31, pp. 179–183; DOI: 10.1007/BF02333317