Челябинский физико-математический журнал. 2020. Т. 5, вып. 4, ч. 1. С. 451–462.

УДК 629.76.085.5+532.5+519.673 DOI: 10.47475/2500-0101-2020-15405

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ГОРЯЧИХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ С ЖИДКОСТЬЮ ПРИ ПОДВОДНОМ СТАРТЕ АППАРАТА

В. И. Пегов[1,2], **И. Ю. Мошкин**[1,2]

[1] *Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия*

[2] *Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева, Миасс, Россия*
ofpat@mail.ru

Приведено решение задачи тепломассообмена горячих газовых струй с жидкостью. Задача представлена в виде двух взаимосвязанных задач: задачи тепломассообмена двухфазного («газ — жидкость») потока и гидродинамической задачи. Процессы тепломассообмена в двухфазных потоках осуществляются на поверхностях раздела фаз. Зависимости скоростей переноса массы и теплоты от свойств фаз и режимных параметров представляются на основе критериального уравнения Нуссельта. Решение гидродинамической задачи получено с помощью численного интегрирования системы уравнений неразрывности, уравнений Навье — Стокса и уравнений энергии методом контрольного объёма. Результаты расчётов сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *тепломассообмен, гидродинамика, газовые струи, двухфазное течение, метод контрольного объёма, нестационарное течение.*

Введение

Создание современных автономных самоходных подводных аппаратов, обеспечивающих изучение арктического шельфа, поиск полезных ископаемых на дне Северного Ледовитого океана, а также доставку грузов в труднодоступные районы Арктики, эвакуацию людей, проведение подводных и спасательных работ, ставит перед наукой новые задачи, одной из которых является проблема математического трёхмерного моделирования нестационарных многокомпонентных струйных течений, гидрогазодинамических процессов обтекания тел с учётом многокомпонентности, многофазности внешних воздействий и процессов тепломассообмена горячих газовых струй с жидкостью. За рубежом многие фирмы приступили к проектированию и отработке подобных аппаратов, поэтому перед Российской Федерацией стоит задача сохранения научного и технического паритета, а также разработки современных технологий создания подводных и надводных автономных аппаратов.

При отделении аппарата от носителя за счёт работы газогенератора возникает сложное многофазное воздействие как на сам аппарат, так и на носитель. Для численного моделирования межфазового взаимодействия на поверхности раздела фаз «горячий газ — вода» разработана физическая модель исследуемого явления, получены уравнения и краевые условия, адекватно описывающие это явление, создана программа для численного решения на ЭВМ. Процессы тепломассообмена в двухфазных потоках осуществляются на поверхностях раздела фаз. Переносимая теплота из газового потока вследствие конвективной диффузии подводится к

пограничному слою жидкости и переносится вследствие теплопроводности внутрь жидкости. Зависимости скоростей переноса массы и теплоты от свойств фаз и режимных параметров представляются на основе критериальных уравнений Шервуда и Нуссельта. Решение представлено в виде двух взаимосвязанных задач: задачи тепломассообмена двухфазного («газ — жидкость») потока и гидродинамической задачи. Приближённое решение первой задачи получено в аналитической форме, а второй — с помощью численного интегрирования уравнений Навье — Стокса методом контрольного объёма. При этом уравнения дополняются источниковыми членами: в уравнении неразрывности — массовой скоростью парообразования, в уравнении энергии — теплотой межфазового взаимодействия. Результаты выполненных расчётов подтверждаются опытными данными.

1. Описание метода и алгоритма

Отделение аппарата от носителя сопровождается процессами интенсивного истечения горячих продуктов сгорания топлива двигателя в воду и тепломассообменом горячего газа с жидкостью. Это происходит при запуске двигателя в затопленный водой транспортный контейнер или при запуске газогенератора в воду, а также в процессах, сопутствующих запуску: при разгерметизации транспортного контейнера в момент выхода из него кормы аппарата или при послестартовом затоплении водой транспортного контейнера. В результате возникает сложная, существенно нестационарная картина взаимодействия горячих струй газа с водой. В течение многих лет ГРЦ Макеева проводит расчётно-теоретические и экспериментальные исследования подводного старта аппаратов и сопутствующих ему процессов, в частности, со струйным истечением высокотемпературных газовых струй в жидкость [1–5]. На рис. 1 приведена возникающая при этом физическая картина процессов. В среднем струйный характер истечения имеет место при больших начальных скоростях газовой фазы. Истечение газа создаёт интенсивную циркуляцию жидкости, которая в свою очередь воздействует на всплывающие пузыри и газожидкостные структуры.

В потоках двухфазной смеси возникают поверхности раздела фаз в виде нестационарных свободных границ и протекают процессы тепломассообмена (кипения, конденсации), которые осуществляются на граничных поверхностях жидкости. На этих поверхностях существуют особые силовые и тепловые взаимодействия, вызывающие изменение скорости течения, давления, температуры, тепловых и диффузионных потоков при переходе из одной фазы в другую.

Разработка методов математического моделирования межфазового взаимодействия на поверхности раздела фаз «горячий газ — вода» состоит из следующих этапов:

– выбор физической модели исследуемого явления и определение совокупности его исходных данных;

– построение математической модели, т. е. уравнений и краевых условий, адекватно описывающих это явление;

– разработка численного метода и алгоритма решения задачи;

– разработка программы для решения задачи на ЭВМ;

– проведение расчётов и сравнение с опытными данными.

С учётом полученных результатов исследования физических процессов нами проведено математическое моделирование процессов тепломассообмена двухфазных потоков, которое представлено в виде решения двух взаимосвязанных задач. Первая состоит в решении задачи тепломассообмена двухфазного («газ — жид-

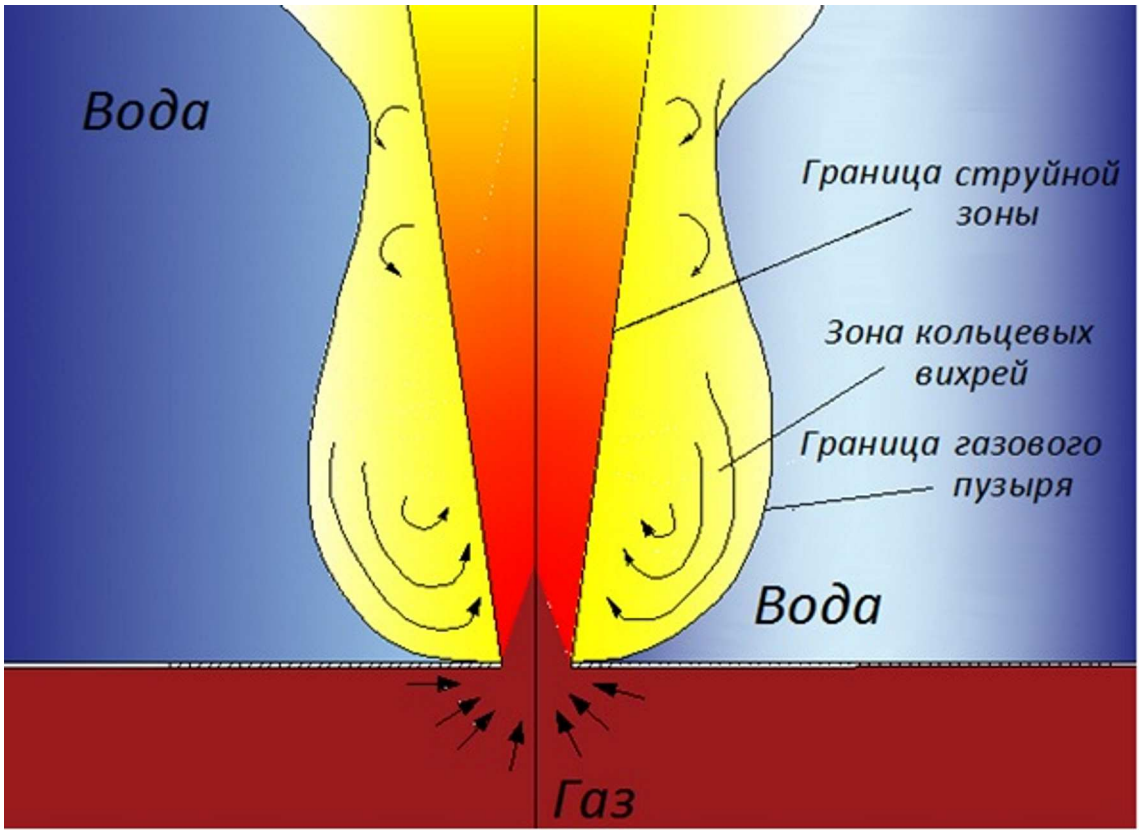


Рис. 1. Схема истечения газа в жидкость

кость») потока. Ко второй задаче относится решение гидрогазодинамической задачи — интегрирования уравнений Навье — Стокса: уравнений движения и энергии несущей газовой фазы и жидкости, в которой устанавливаются границы раздела фаз «газ — жидкость» и газодинамические параметры образующейся газопаровой смеси. Процессы тепломассообмена в двухфазных потоках осуществляются на поверхностях раздела фаз. Переносимая теплота из газового потока вследствие конвективной диффузии подводится к пограничному слою жидкости и переносится вследствие теплопроводности внутрь жидкости. Зависимости скоростей переноса массы и теплоты от свойств фаз и режимных параметров представляются на основе критериальных уравнений Шервуда и Нуссельта. Для расчёта коэффициента теплоотдачи a используем число Нуссельта Nu [6]: $a = \lambda Nu/l$, а для расчёта коэффициента массоотдачи β — число Шервуда Sh [7]: $\beta = DSh/l$, где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); D — коэффициент диффузии, м^2/с; l — характерный линейный размер, м.

Количество теплоты ΔQ, отведённой от газа к жидкости, рассчитывается как сумма

$$\Delta Q = \Delta Q_K + \Delta Q_M,$$

где ΔQ_K, ΔQ_M — количество теплоты, переданной механизмом конвекции и массообмена (конденсация и испарение).

Количество теплоты ΔQ_K, переданное конвекцией, выражается формулой Ньютона через коэффициент теплоотдачи, разность температур газа и поверхности жидкости согласно уравнению

$$\Delta Q_K = \alpha F \left(T_\Gamma - T_W\right) \Delta\tau,$$

где F — площадь граничной поверхности жидкости; T_Γ, T_W — температуры газа и на поверхности жидкости соответственно; $\Delta\tau$ — временной шаг принятой схемы расчёта.

Количество теплоты ΔQ_M массообмена определяется как сумма теплоты, потраченной на парообразование, и теплоты за счёт перехода среды от одного состояния в другое:

$$\Delta Q_M = r\Delta m_{\text{и.к.}} + \Delta m_{\text{исп.}} \left[H\left(p_\Gamma, T_\Gamma\right) - H\left(p_\Gamma, T_W\right)\right],$$

где $\Delta m_{\text{и.к.}}$ — масса жидкости, испарившейся в результате кипения; r — скрытая теплота парообразования; $\Delta m_{\text{исп.}}$ — испарившаяся масса жидкости с поверхности раздела, включающая в себя конвективный массообмен и массообмен в результате кипения; $H\left(p_\Gamma, T_\Gamma\right)$, $H\left(p_\Gamma, T_W\right)$ — удельные энтальпии паров жидкости при соответствующих давлениях и температурах. При определении количества теплоты в уравнении предполагается, что за малый промежуток времени $\Delta\tau$ процесс испарения происходит изобарно.

Испарившаяся с поверхности раздела масса жидкости $\Delta m_{\text{исп.}}$ включает в себя массу, испарившуюся в результате кипения $\Delta m_{\text{и.к.}}$ и в процессе конвективного массообмена $\Delta m_{\text{и.конв.}}$:

$$\Delta m_{\text{исп.}} = \Delta m_{\text{и.к.}} + \Delta m_{\text{и.конв.}} = \left(\dot{m}_{\text{и.к.}} + \dot{m}_{\text{и.конв.}}\right)\Delta\tau.$$

Масса пара $\Delta m_{\text{и.конв.}}$ определяется по зависимости

$$\Delta m_{\text{и.конв.}} = \beta F \frac{(p_W - p_\Pi)}{R_\Pi T_\Gamma}\Delta\tau = \dot{m}_{\text{и.конв.}}\Delta\tau,$$

где p_W, p_Π — давления паров жидкости на её поверхности и на удалении от неё, R_Π — газовая постоянная для паров жидкости, $\dot{m}_{\text{и.конв.}}$ — скорость массопередачи вследствие конвективного теплообмена между газом и жидкостью.

Для определения второй составляющей $\Delta m_{\text{и.к.}}$, включающей в себя массу, испарившуюся в результате кипения жидкости на поверхности раздела фаз «газ — жидкость», используем многофазную модель Эйлера. Перенос массы из жидкости в пар (испарение и конденсация) определяется для плоской границы по дифференциальному уравнению переноса паровой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(a_\nu\rho_\nu\right) + \nabla\cdot\left(a_\nu\rho_\nu\vec{V}_\nu\right) = \dot{m}_{l\nu} - \dot{m}_{\nu l},$$

где ν — паровая фаза; a_ν — объёмная доля пара; ρ_ν — плотность пара; $\vec{V}_\nu$ — скорость паровой фазы; $\dot{m}_{l\nu}$, $\dot{m}_{\nu l}$ — скорости массопередачи вследствие испарения и конденсации соответственно, кг/(м^3·с).

Правая часть уравнения определяет положительную массопередачу из жидкости в пар для задач испарения-конденсации. Исходя из температурных режимов (рис. 2) массопередачу описываем следующим образом: если температура жидкости на поверхности раздела больше температуры насыщения жидкости, то происходит испарение, если же меньше, то конденсация:

если $T_l > T_\text{ж}$ (испарение), то

$$\dot{m}_{l\nu} = k\cdot a_l\cdot\rho_l\frac{T_l - T_\text{ж}}{T_\text{ж}};$$

если $T_l < T_\text{ж}$ (конденсация), то

$$\dot{m}_{\nu l} = k\cdot a_\nu\cdot\rho_\nu\frac{T_\text{ж} - T_\nu}{T_\text{ж}},$$

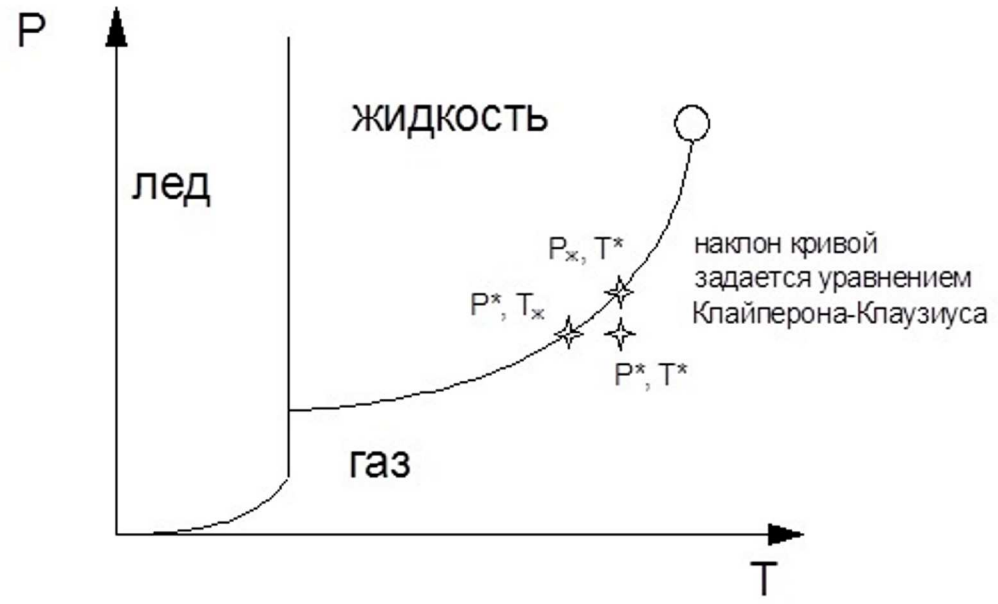


Рис. 2. Фазовая диаграмма устойчивости

где k — коэффициент, значение которого уточняется по экспериментальным данным и связано с временем релаксации; $T_ж$ — температура насыщения; a_ν, ρ_ν — доля и плотность фазового объёма соответственно. Исходный член для уравнения энергии определим путём умножения скорости массопередачи на скрытую теплоту $r\left(\dot{m}_{l\nu} - \dot{m}_{\nu l}\right)$.

По формуле Герца — Кнудсена определяется поток испарения-конденсации на основе кинетической теории для плоской границы:

$$G = \beta\sqrt{\frac{Mr}{2\pi R T_ж}}\left(P^* - P_g\right).$$

Единицы потока — кг/(м^2·с), P — давление, а R — универсальная газовая постоянная. Коэффициент β — так называемый коэффициент аккомодации, который показывает часть молекул пара, поглощаемых поверхностью жидкости. Параметр P^* представляет парциальное давление пара на границе насыщения на паровой стороне, параметр $P_ж$ — давление насыщения на левой стороне. На основе уравнения Клапейрона — Клаузиуса устанавливаем зависимость между давлением и температурой для условия насыщения:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{r}{T\left(\nu_\nu - \nu_l\right)},$$

где ν_ν, ν_l — удельные объёмы для пара и жидкости соответственно, м^3/кг; r — скрытая теплота, Дж/кг.

На основании уравнения Клапейрона — Клаузиуса получаем приближённую зависимость между параметрами потока (P^* от T^*), которые близки к состоянию насыщения:

$$\left(P^* - P_ж\right) = -\frac{r}{T\left(\nu_\nu - \nu_l\right)}\left(T^* - T_ж\right).$$

Использование данного равенства в уравнении Герца — Кнудсена приводит к аналитическому выражению для потока испарения-конденсации:

$$G = \beta\sqrt{\frac{Mr}{2\pi R T_ж}}\left(\frac{\rho_\nu\rho_l}{\rho_l - \rho_\nu}\right)\frac{\left(T^* - T_ж\right)}{T_ж},$$

где значения коэффициента массоотдачи β приближаются к 1.0 в близких к равновесным состояниях.

В моделях Эйлера и многофазных моделях смеси характер потока предполагается дисперсным. Если предполагать, что все пузырьки пара в кипящей плёнке на границе раздела фаз имеют одинаковый диаметр, то получим формулу для плотности межфазовой поверхности: $A_i = 6a_\nu a_l/d_b$, где d_b — диаметр пузырька (м), а исходный член фазы (кг/(м^3·с)) должен иметь вид

$$GA_l = \frac{6}{d_b}\beta\sqrt{\frac{Mr}{2\pi RT_{\text{ж}}}}\left(\frac{a_\nu\rho_\nu}{\rho_l-\rho_\nu}\right)\frac{a_l\rho_l\left(T^*-T_{\text{ж}}\right)}{T_{\text{ж}}}.$$

Из вышеприведённого уравнения k, который является обратной величиной времени релаксации (1/с), определяется как

$$k = \frac{6}{d_b}\beta\sqrt{\frac{Mr}{2\pi RT_{\text{ж}}}}\left(\frac{a_\nu\rho_\nu}{\rho_l-\rho_\nu}\right).$$

Это приводит к окончательному выражению для процесса испарения. Подобное выражение можно получить и для конденсации, когда образуются небольшие капельки в непрерывной паровой фазе.

Полученное теоретическое выражение основывается сразу на нескольких сильных предположениях:

– плоская граница расчётной ячейки;

– дисперсный режим с постоянным диаметром;

– известный коэффициент массоотдачи β.

Диаметр пузырька и коэффициент аккомодации известны лишь приблизительно, поэтому полученное выражение коэффициента k должно уточняться по экспериментальным данным. В первом приближении коэффициент и для испарения, и для конденсации можно полагать равным 0.15.

Модель теплового фазового перехода используется для испарения-конденсации, когда многофазная модель Эйлера используется вместе с двухрезистивным подходом для вычисления коэффициентов фазовой теплопередачи (двухрезистивная модель).

Для парожидкостной смеси получаем:

от границы к жидкой фазе — $Q_l = a_l A_l\left(T_s - T_l\right) - \dot{m}_{l\nu}H_{ls}$,

от границы к паровой фазе — $Q_\nu = a_\nu A_l\left(T_s - T_\nu\right) - \dot{m}_{l\nu}H_{\nu s}$,

где a_l и a_ν — коэффициенты теплопередачи жидкой и паровой фазы, а H_{ls} и $H_{\nu s}$ — энтальпии жидкой и паровой фазы. Межфазовая температура T_s определяется из соображения термодинамического равновесия. Пренебрегая влияниями поверхностного натяжения на давление, мы можем предположить, что межфазовая температура T_s равна температуре насыщения $T_{\text{ж}}$ ($T_s = T_{\text{ж}}$).

Так как ни тепло, ни массу нельзя сохранить на границе раздела фаз, должен соблюдаться общий тепловой баланс: $Q_l + Q_\nu = 0$.

Исходя из предыдущих уравнений массообмен в результате испарения из жидкой фазы в паровую выражается в следующем виде:

$$\dot{m}_{l\nu} = -\frac{a_l A_l\left(T_{\text{ж}} - T_l\right) + a_\nu A_l\left(T_{\text{ж}} - T_\nu\right)}{H_\nu s - H_{ls}}.$$

Энтальпии фазы $H_\nu s$ и H_{ls} необходимо точно вычислить для учёта нарушения непрерывности в статической энтальпии вследствие скрытой теплоты между

двумя фазами, а также теплообмена от какой-либо фазы к границе раздела фаз. Используя формулу Пракаша со среднемассовой энтальпией жидкости, вытекающей из выходящей фазы, и энтальпией насыщения, втекающей во входящую фазу, получаем следующее:

если $\dot{m}_{l\nu} \geq 0$ (испарение, жидкая фаза — выходящая фаза), то $H_{ls} = H_l(T_l)$, $H_{\nu s} = H_\nu(T_g)$;

если $\dot{m}_{l\nu} < 0$ (конденсация, жидкая фаза — входящая фаза), то $H_{ls} = H_l(T_{\text{ж}})$, $H_{\nu s} = H_\nu(T_\nu)$.

Это приводит к формуле, которая является и физически, и численно устойчивой. Это подразумевает, что знаменатель в уравнении для $\dot{m}_{l\nu}$ является отличным от нуля, больше или равным скрытому теплу: $r = H_\nu(T_{\text{ж}}) - H_l(T_{\text{ж}})$.

Можно отметить, что при наличии массообмена H_l и H_ν — полные энтальпии фазы, которые можно выразить в общем виде

$$H(T) = H(T_{\text{ref}}) + \int\limits_{T_{\text{ref}}}^{T} C_p(T)dT,$$

где T_{ref} — опорная температура, а $H(T_{\text{ref}})$ — энтальпия стандартного состояния при T_{ref}. Это уравнение используется для фаз, а также частиц на каждой фазе.

Таким образом, в модели теплового фазового перехода процесс массопередачи при испарении-конденсации полностью обусловливается процессами межфазовой теплопередачи и общим тепловым балансом. Для установления границ раздела фаз и газодинамических параметров образующейся газовой смеси решается гидрогазодинамическая задача.

Математическое моделирование возникающих нестационарных течений среды проводится на основе численного решения уравнений Навье — Стокса методом контрольного объёма [8; 9]. В основе этого метода лежат уравнения сохранения.

В МКО в качестве основных уравнений движения среды принимаются уравнения неразрывности, движения и энергии, которые для численной реализации метода удобно записать в интегральной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int\limits_{\Omega} \rho\Phi d\Omega + \int\limits_{S} \rho\Phi\left(\vec{V}\cdot\vec{n}\right)dS = \int\limits_{S} \Gamma\left(\text{grad}\Phi\cdot\vec{n}\right)dS + Q(p, F_m),$$

где в левой части находятся нестационарный и конвективный члены, в правой — диффузионный и источниковый. Здесь также обозначены: Φ — произвольная величина, значение которой зависит от рассматриваемого уравнения (например, в уравнении движения $\Phi \cong V$, в уравнении энергии $\Phi = c_p T$); Γ — коэффициент диффузии для величины Φ; $Q(p, F_m)$ — источниковый член, который может содержать составляющие как от массовых сил, так и от перепада давления в уравнении неразрывности $\int\limits_S \dot{m}dS$, где $\dot{m}$ — массовая скорость парообразования на единицу объёма, в уравнении энергии — теплота межфазового взаимодействия

$$\int\limits_S \left[r\dot{m}_{l\nu} + \dot{m}_{isp}\left(H\left(p_\Gamma T_\Gamma\right) - H\left(p_\Gamma T_{\text{ж}}-\right)\right)\right]dS.$$

Суть метода состоит в том, что расчётную область разбивают на конечное число контрольных объёмов и для каждого из них решают уравнения законов сохранения.

Межфазовое взаимодействие учитывается посредством модели свободной поверхности — данная комбинация используется для течений с ярко выраженной свободной поверхностью раздела фаз. Эта модель напрямую разрешает поверхность раздела между фазами, помещая в неё специальное граничное условие. Решается один набор уравнений для каждой из фаз, и отдельно рассчитывается граница взаимодействия фаз. Выбор данной комбинации моделей связан с их относительной простотой и вычислительной эффективностью, при этом точность получаемого решения для данного типа течений удовлетворительна.

Решение проводилось в нестационарной постановке с использованием гексаэдрических и тетраэдрических сеточных моделей. В качестве модели турбулентности принималась модель Ментера — SST. В данном случае на форму поверхности раздела фаз и её формирование может оказать существенное влияние пограничный слой на стенке, поэтому для более точного его моделирования и была выбрана данная модель.

Валидация и верификация разработанного математического метода моделирования проведены путём сравнения результатов расчётов с опытными данными.

2. Сравнение расчётов с экспериментом

На рис. 3 представлено распределение избыточного давления по длине аппарата в момент выхода его из транспортного контейнера, на рис. 4 — график зависимости от времени давления в газовом пузыре, образующемся у верхнего среза транспортного контейнера, в сравнении с экспериментальными данными.

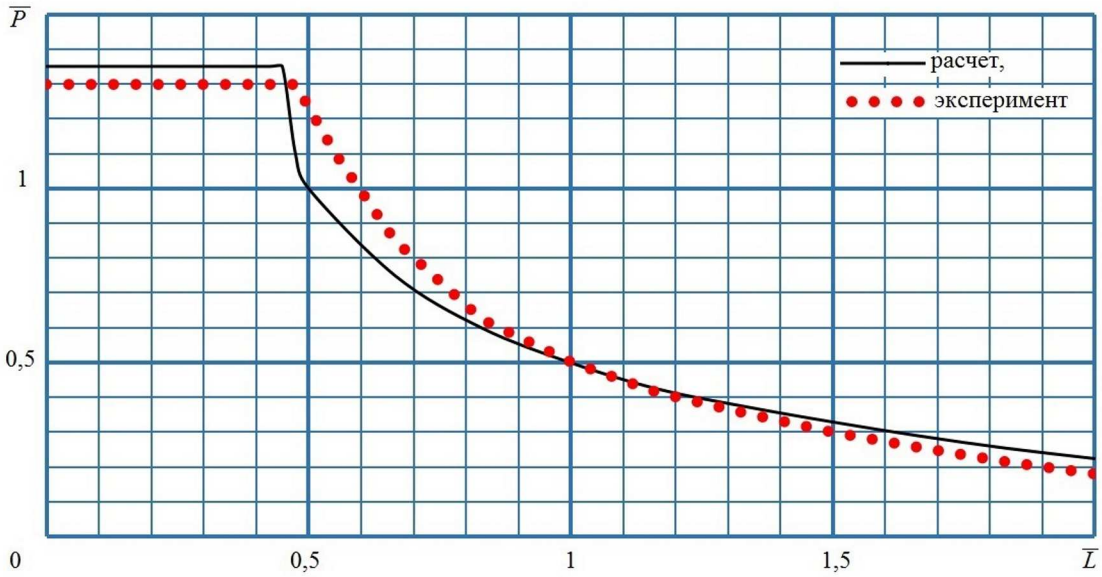


Рис. 3. Распределение давления по длине аппарата

На рис. 5, 6 приведены графики зависимостей от времени давления и температуры парогазовой смеси, образующейся при продувке затопленного водой транспортного контейнера горячей струёй газогенератора [5]. Сравнение на рис. 3–6 приведено в виде графиков зависимостей безразмерной температуры газовой среды T/T_0 и безразмерного давления P/P_0 в задонной области в зависимости от безразмерного времени, рассчитываемого по формуле $\bar{t} = t\sqrt{P_0/\rho_{\text{ж}}}/L$. Здесь T_0 — начальная температура стенки, P_0 — гидростатическое давление на верхнем срезе шахты, L — длина модели, $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости.

Хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных служит подтверждением достоверности и надёжности разработанного метода, который может

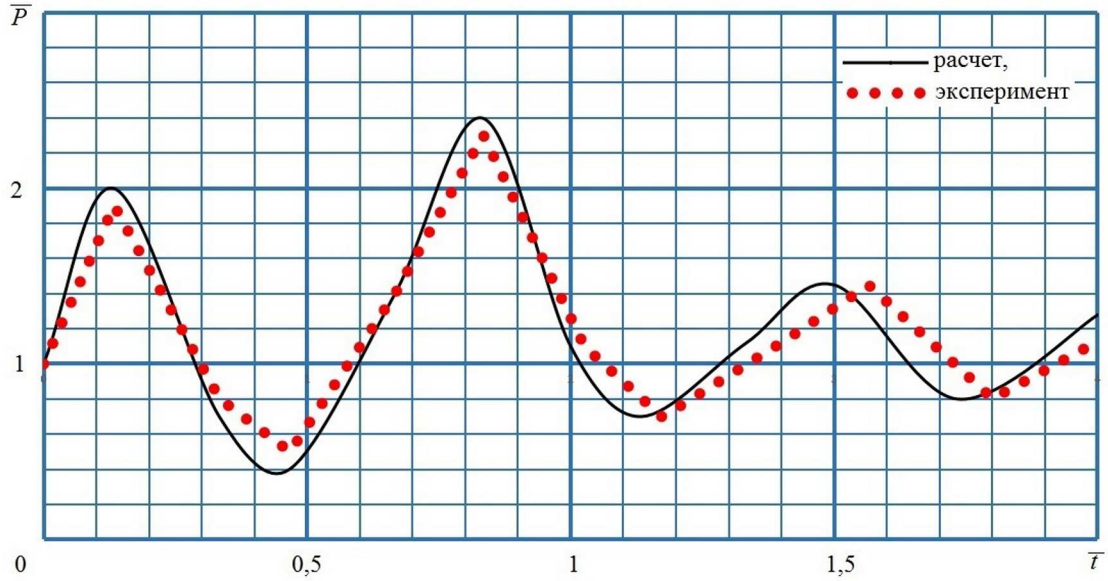


Рис. 4. Зависимость от времени давления в газовом пузыре

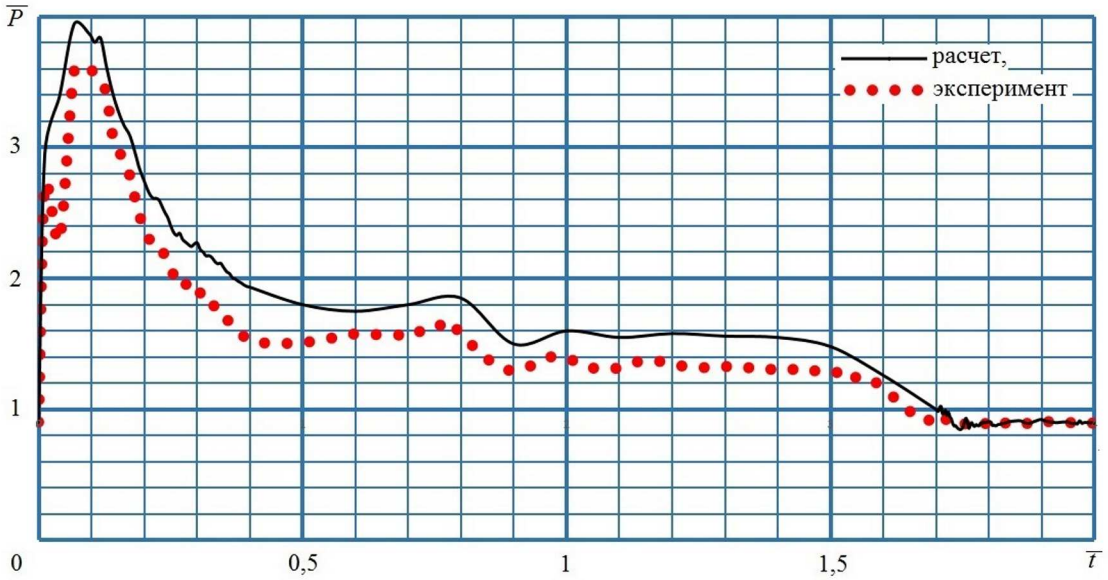


Рис. 5. Зависимость от времени давления парогазовой смеси в транспортном контейнере

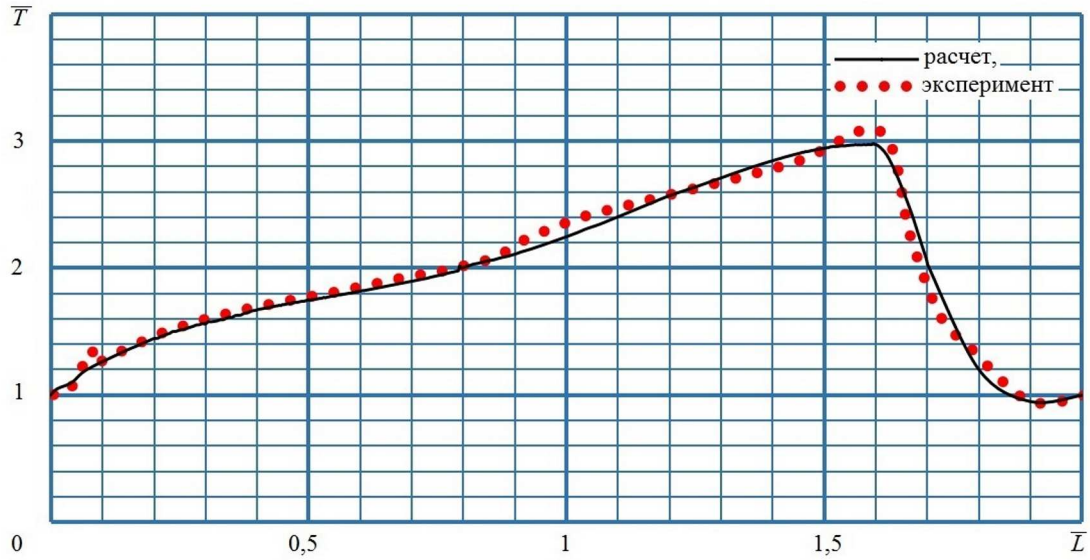


Рис. 6. Зависимость от времени температуры парогазовой смеси в транспортном контейнере

стать основой при проектировании современных автономных самоходных подводных и надводных аппаратов, обеспечивающих изучение арктического шельфа, поиска полезных ископаемых на дне Северного Ледовитого океана, а также доставку грузов в труднодоступные районы Арктики, эвакуацию людей, проведение подводных и спасательных работ.

Список литературы

1. **Дегтярь, В. Г.** Гидродинамика подводного старта ракет / В. Г. Дегтярь, В. И. Пегов. — М. : Машиностроение, 2009. — 448 с.
2. **Дегтярь, В. Г.** Исследование запуска реактивного двигателя в воде / В. Г. Дегтярь, В. И. Пегов, А. Д. Чешко // Науч.-техн. вестн. Поволжья. — 2016. — № 5. — С. 181–189.
3. **Пегов, В. И.** Численное моделирование гидродинамических нагрузок на стартующую ракету и подводную лодку / В. И. Пегов, И. Ю. Мошкин, Е. С. Меркулов, А. Д. Чешко // Вестн. Концерна ПВО «Алмаз-Антей». — 2016. — № 3(18). — С. 65–70.
4. **Пегов, В. И.** Экспериментальное и численное моделирование стартового воздействия на подводную лодку / В. И. Пегов, А. Д. Чешко, И. Ю. Мошкин, Е. С. Меркулов // Взгляд в будущее — 2016. — СПб. : ЦКБ МТ «Рубин», 2016. — С. 598–605.
5. **Пегов, В. И.** Расчёт гидродинамики кавитационного способа старта ракет / В. И. Пегов, И. Ю. Мошкин // Челяб. физ.-мат. журн. — 2018. — Т. 3, № 4. — С. 476–485.
6. **Эккерт, Э. Р.** Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. — М. : Госэнергоиздат, 1981. — 576 с.
7. **Соу, С.** Гидродинамика многофазных систем : пер. с англ. / С. Соу; под ред. М. Е. Дейга. — М. : Мир, 1981. — 536 с.
8. **Роуч, П.** Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. — М. : Мир, 1980. — 616 с.
9. **Патанкар, С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

Поступила в редакцию 05.10.2020.
После переработки 09.11.2020.

Сведения об авторах

Пегов Валентин Иванович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский научный центр УрО РАН, Миасс, Россия; главный научный сотрудник, Государственный ракетный центр им. академика В. П. Макеева, Миасс, Россия; e-mail: ofpat@mail.ru.

Мошкин Игорь Юрьевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Южно-Уральский научный центр УрО РАН, Миасс, Россия; ведущий научный сотрудник, Государственный ракетный центр им. академика В. П. Макеева, Миасс, Россия; e-mail: ofpat@mail.ru.

Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal. 2020. Vol. 5, iss. 4, part 1. P. 451–462.

DOI: 10.47475/2500-0101-2020-15405

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER OF HOT GAS JETS WITH FLUID DURING UNDERWATER VEHICLE LAUNCH

V.I. Pegov[1,2], **I.Yu. Moshkin**[1,2]

[1] *South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of RAS, Miass, Russia*
[2] *Academician V.P. Makeyev State Rocket Center, Miass, Russia*
ofpat@mail.ru

The paper contains a solution of heat and the mass transfer problem of hot gas jets with fluid. The problem is presented as two interdependent problems: a problem of the heat and mass transfer of a two-phase (gas–fluid) flow and a hydrodynamic problem. Processes of the heat and mass transfer in two-phase flows happen in interfaces of phases. Profiles of rates of the heat and mass transfer versus properties of phases and mode parameters are described with the Nusselt criterion equation. The hydrodynamic problem is solved by numerical integrating of a set of equations of the continuity, the Navier — Stokes equations and the energy equations using a method of a control volume. The predicted results are compared with the experimental data.

Keywords: *heat and mass transfer, hydrodynamics, gas jets, two-phase flow, method of a control volume, nonstationary flow.*

References

1. **Degtiar V.G., Pegov V.I.** *Gidrodinamika podvodnogo starta raket* [Hydrodynamics of rocket launches from underwaters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 448 p. (In Russ.).
2. **Degtiar V.G., Pegov V.I., Cheshko A.D.** *Issledovaniye zapuska reaktivnogo dvigatelya v vode* [Investigation of ignition of a submerged jet engine]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya* [Science and Technical Bulletin of the Volga Region], 2016, no. 5, pp. 181–189. (In Russ.).
3. **Pegov V.I., Moshkin I.Yu., Merkulov E.S., Cheshko A.D.** Chislennoye modelirovaniye gidrodinamicheskikh nagruzok na startuyushchuyu raketu i podvodnuyu lodku [Numerical simulation of hydrodynamic loads on a starting rocket and a submarine]. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey»* [Bulletin of Almaz-Antey JSC], 2016, no. 3 (18), pp. 65–70. (In Russ.).
4. **Pegov V.I., Cheshko A.D., Moshkin I.Yu., Merkulov E.S.** Eksperimentalnoye i chislennoye modelirovaniye startovogo vozdeystviya na podvodnuyu lodku [Experimental modeling and simulation of launching effect on a submarine]. *Proceedings of ISTC «A look into the future — 2016»*, Saint Petersburg, CDB ME «Rubin», 2016. Pp. 598–605. (In Russ.).
5. **Pegov V.I., Moshkin I.Yu.** Raschyot gidrodinamiki kavitatsionnogo sposoba starta raket [Analysis of fluid dynamics of cavitational launch technique]. *Chelyabinskiy Physical and Mathematical Journal*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 476–485. (In Russ.).
6. **Eckert E.R., Drake R.M.** *Teoriya teplo- i massoobmena* [Heat and mass transfer theory]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1981. 576 p. (In Russ.).
7. **Soo S.** *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem* [Fluid Dynamics of Multiphase Systems], Engl. transl. / ed. by M.E. Deig. Moscow, Mir Publ., 1981. 536 p. (In Russ.).

8. **Roache P.** *Vychislitel'naya gidrodinamika* [Computational Fluid Dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1980. 616 p.
9. **Patankar S.** *Chislennye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical methods to solve problems of heat transfer and fluid dynamics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p.

Accepted article received 05.10.2020.
Corrections received 09.11.2020.