

## **МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ**

**Максим Валерьевич АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>**  
**Иван Сергеевич ВОЖАКОВ<sup>2</sup>**  
**Сергей Иванович ЛЕЖНИН<sup>3</sup>**  
**Николай Алексеевич ПРИБАТУРИН<sup>4</sup>**

УДК 532.528; 532.529; 544.012

### **ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНОГО ТРЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ В СРЕДУ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ**

<sup>1</sup> кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
Институт Теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск)  
alekseev@itp.nsc.ru

<sup>2</sup> младший научный сотрудник,  
Институт Теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск)  
vozhakov@gmail.com

<sup>3</sup> доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,  
Институт Теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск)  
lezhnin@itp.nsc.ru

<sup>4</sup> доктор технических наук, главный научный сотрудник,  
Институт Теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск)  
pribaturin@itp.nsc.ru

---

**Цитирование:** Алексеев М. В. Влияние межфазного трения на характеристики истечения двухфазной смеси в среду с высокой плотностью / М. В. Алексеев, И. С. Вожаков, С. И. Лежнин, Н. А. Прибатурин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 3. С. 49-62.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-49-62

---

**Аннотация**

Выполнено численное моделирование истечения дисперсной двухфазной смеси в среду с высокой плотностью при различных размерах капель. Проведено сравнение результатов численного моделирования и расчета по асимптотической упрощенной квазистационарной модели. В работе приведены характерные параметры расчета: эволюция размеров газовой полости и давление в ней, распределение давления и объемного паросодержания по расчетной области. Установлено, что эффект скольжения фаз существенно влияет на динамику и на характеристики стационарного истечения. Показано, что скорость роста газовой полости, полученная по упрощенной модели, выше, чем при численном моделировании. Минимальная скорость роста газовой полости получена при небольших размерах капель 5-10 м, т. е. практически в отсутствие скольжения. Результаты численных расчетов по двухскоростной модели и результаты, полученные при использовании асимптотической квазистационарной модели, имеют удовлетворительное согласие на больших временах. При увеличении начального давления в объеме, из которого происходит истечение, разница между упрощенной моделью и численным расчетом уменьшается.

**Ключевые слова**

Двухфазная среда, межфазное трение, вытеснение жидкости газом, разгерметизация, сосуд высокого давления.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-49-62**

**Введение**

При решении ряда технических задач — таких как моделирование аварий (с целью их предотвращения) в жидкометаллических атомных реакторах, при разгерметизации подводных газопроводов [13], при нештатных режимах работы пневматических систем в корабельной технике [12] и т. п. — встречаются процессы быстрой разгерметизации сосудов с газом (паром) при высоком давлении и последующим нестационарным истечением газа в объем жидкости. Особенности численного моделирования подобных задач вытекают из необходимости учета комплекса связанных между собой физических явлений: сопряженного процесса генерации волн во внешней среде и в сосуде высокого давления, нестационарного истечения газа, процесса вытеснения жидкости газом.

При расчетах динамического поведения двухфазной среды очень важным является адекватность моделирования межфазного взаимодействия и задание режимной карты двухфазного потока [4]. В отсутствии фазовых переходов и пренебрежении процессами дробления и коагуляции при моделировании динамики двухфазной смеси можно считать неизменными размеры капель и пузырьков. Это приближение используется во многих квазиодномерных теплогидравлических кодах (например, [5]) — т. е. при падении давления объемное газосодержание смеси растет не за счет увеличения радиуса пузырьков, а за счет роста их количества.

Цель настоящего исследования — численное моделирование нестационарного истечения двухфазной смеси в среду с высокой плотностью в условиях сильного и слабого влияния межфазного трения и сравнение ее с асимптотической упрощенной моделью роста газовой полости в объеме жидкости.

### Модель и методика расчета

В настоящей работе рассматривается осесимметричная задача об истечении двухфазной смеси из торца трубы в область с высокой плотностью (двухфазную смесь). Моделирование процесса истечения двухфазного теплоносителя без фазового перехода было проведено с использованием двухскоростной, двухтемпературной модели [6]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) &= 0, \\ \frac{\partial(\alpha_f \rho_f)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) &= 0, \\ \frac{\partial(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g)}{\partial t} + (\vec{v}_g \vec{\nabla})(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) &= -\alpha_g \vec{\nabla} p + F_g, \\ \frac{\partial(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f)}{\partial t} + (\vec{v}_f \vec{\nabla})(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) &= -\alpha_f \vec{\nabla} p + F_f, \\ \frac{\partial(\alpha_g \rho_g E_g)}{\partial t} + \vec{\nabla} \left( \alpha_g \rho_g \vec{v}_g \left( E_g + \frac{p}{\rho_g} \right) \right) &= 0, \\ \frac{\partial(\alpha_f \rho_f E_f)}{\partial t} + \vec{\nabla} \left( \alpha_f \rho_f \vec{v}_f \left( E_f + \frac{p}{\rho_f} \right) \right) &= 0.\end{aligned}$$

Здесь  $\alpha$  — объемное содержание фазы,  $F_g = -F_f$  — межфазное трение, индексы  $g$  и  $f$  относятся к газообразной и жидкой фазе, соответственно.

Решение модельных уравнений проводилось пакетом программ LCPFCT [10]. Этот пакет программ использует метод конечных объемов вкупе с методом коррекции потоков FCT. Время расчета соответствовало характерному времени распространения волн, и, хотя эффекты турбулентности на таких временах не успевают проявиться, решение модельных уравнений этим методом эквивалентно применению некоторой подсеточной модели турбулентности [3]. Программа для расчета движения двухфазной смеси была реализована на основе расчетного комплекса, использующего односкоростную гомогенную модель в сочетании (при необходимости) с релаксационной моделью неравновесного фазового перехода [11].

Моделирование истечения газожидкостной смеси из сосуда требует одновременного расчета течения в сосуде, в трубопроводе и во внешней области. Для сопряжения течения в сосуде и в трубопроводе применяется упрощенная «модель входного участка» [1], при которой движение несжимаемой среды описывается одномерным интегралом Коши-Лагранжа и позволяет рассчитать давление и скорость жидкости при известном давлении в сосуде. Описание расчетов с использованием двухскоростной гомогенной модели представлено в работе [2].

При расчете межфазного трения  $F_i$  предполагается, что дисперсная фаза имеет форму шара (капли и пузырьки), для которой справедлива формула

$$F_i = c \frac{\rho_1 (\Delta u)^2}{2} S_2.$$

Здесь  $c$  — коэффициент сопротивления формы,  $\rho_1$  — плотность несущей фазы,  $\Delta u$  — относительная скорость фаз,  $S_2$  — эффективная площадь сечения шара. Для силы трения в единице объема получаем:

$$F_i = \frac{1}{V} \frac{\alpha_2 V}{V_2} c \frac{\rho_1 (\Delta u)^2}{2} S_2 = \frac{6\alpha_2}{\pi D_2^3} c \frac{\rho_1 (\Delta u)^2}{2} \frac{\pi D_2^2}{4} = \frac{3\alpha_2}{4D_2} c \rho_1 (\Delta u)^2.$$

Здесь  $V_2$  — объем фазы 2,  $D_2$  — диаметр шара.

Для расчета коэффициента сопротивления формы применялись следующие зависимости [7; 9]:

$$c = \begin{cases} 24/Re, & Re < 4 \\ 12/\sqrt{Re}, & 4 \leq Re < 625 \\ 0,48, & Re \geq 625 \end{cases}$$

Здесь  $Re = \rho_1 |u_2 - u_1| D_2 / \mu_1$  — число Рейнольдса. Границы режимов выбраны для обеспечения непрерывности коэффициента сопротивления.

При понижении давления во вскипающей жидкости ее структура эволюционирует: пузырьковая ( $\alpha \leq 0,4$ ), переходная ( $0,4 < \alpha < 0,6$ ), капельная ( $\alpha \leq 0,6$ ). Такая упрощенная карта может использоваться потому, что в нашем случае происходит истечение в свободную область, т. е. отсутствует влияние стенок каналов.

### Результаты расчетов

При проведении численных расчетов истечения двухфазной смеси из насадка в качестве основных параметров выбраны размеры капель  $d_k = 10^{-5}$  и  $10^{-3}$  м. Оценки показывают, что на характерных временах процессов вытеснения (миллисекунды) малые капли сразу увлекаются межфазным трением, и можно считать, что вытекает тяжелый газ (гомогенная односкоростная двухфазная смесь).

Время релаксации по трению для больших капель составляет сотни миллисекунд или секунды (на 4 порядка выше, чем для малых капель), т. е. большие капли почти не увлекаются газом и не оказывают заметного влияния на процесс истечения.

Для сравнения с результатами численного моделирования и оценок рассмотрим упрощенную асимптотическую модель истечения газа, которая должна приближенно описывать процесс на «неволновых временах»  $t > d/c$ , где  $d$  — диаметр насадка,  $c$  — характерная скорость звука.

Будем считать, что из большого сосуда с фиксированным давлением  $p_0$ , температурой  $T_0$  и плотностью  $\rho_{00}$  через отверстие диаметра  $d$  дувается воздух. При этом сразу образуется и начинает расти газовый полусферический пузырь, начальный диаметр которого равен диаметру насадка  $d$ . Давление в пузыре  $p$  зависит только от времени (однородно по пространству). Воздух —

идеальный совершенный газ с показателем адиабаты  $\gamma$  и удельной энтальпией  $H=C_p T=\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho}$ .

Удельный расход воздуха из насадка задается выражениями [8]:

$$j=\rho u=\sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_0 \rho_0 \left( \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1+\frac{1}{\gamma}} \right)} \quad \text{при } p > p_{\text{кр}},$$

$$j=\rho_{\text{кр}} u_{\text{кр}} = \sqrt{\gamma p_0 \rho_0} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad \text{при } p \leq p_{\text{кр}},$$

где  $p_{\text{кр}}=p_0 \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ .

Таким образом, предлагается использование квазистационарных соотношений, согласно которым при низком внешнем давлении на срезе насадка устанавливается постоянный, не зависящий от давления расход (критическое истечение с локальной скоростью звука).

В итоге, следуя асимптотической модели, необходимо решить простую систему обыкновенных дифференциальных уравнений динамики полусферического газового пузыря радиуса  $R$  в большом объеме жидкости и баланса энтальпии газа при внешних адиабатических условиях:

$$\frac{p - p_{\text{атм}}}{\rho_l} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2,$$

$$\gamma \frac{p_0}{\rho_0} j \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{2\pi}{3} R^3 \frac{dp}{dt} + 2\pi R^2 \gamma p \frac{dR}{dt}.$$

Были проведены численные расчеты истечения двухфазной смеси с большим объемным газосодержанием (0,99) во внешнюю среду с малым газосодержанием (0,1). Давление в объеме, из которого происходило истечение, составляло 0,5, 1,0 и 10,0 МПа, температура — 473 К, давление внешней среды — 0,1 МПа. В качестве модельной была выбрана воздушно-водяная смесь. Внутренний диаметр канала составлял 0,04 м, длина канала — 0,1 м. Расчеты проводились при различных диаметрах капель —  $10^{-3}$  м и  $10^{-5}$  м.

На рис. 1 представлены результаты приближенных модельных и численных расчетов размера воздушной полости и давления в ней в зависимости от времени. Граница полости в численных расчетах определялись по значению объемного газосодержания равному 0,5. Видно, что для низких давлений (0,5 и 1,0 МПа) имеется неплохое соответствие для обоих параметров, в то время как для давления 10,0 МПа размер полости через 2 мс начинает увеличиваться со значительной большей скоростью, нежели это предсказывает упрощенная модель. Такой эффект может происходить ввиду влияния границ области на результаты расчета, поскольку при таком начальном давлении пузырь достигает границ

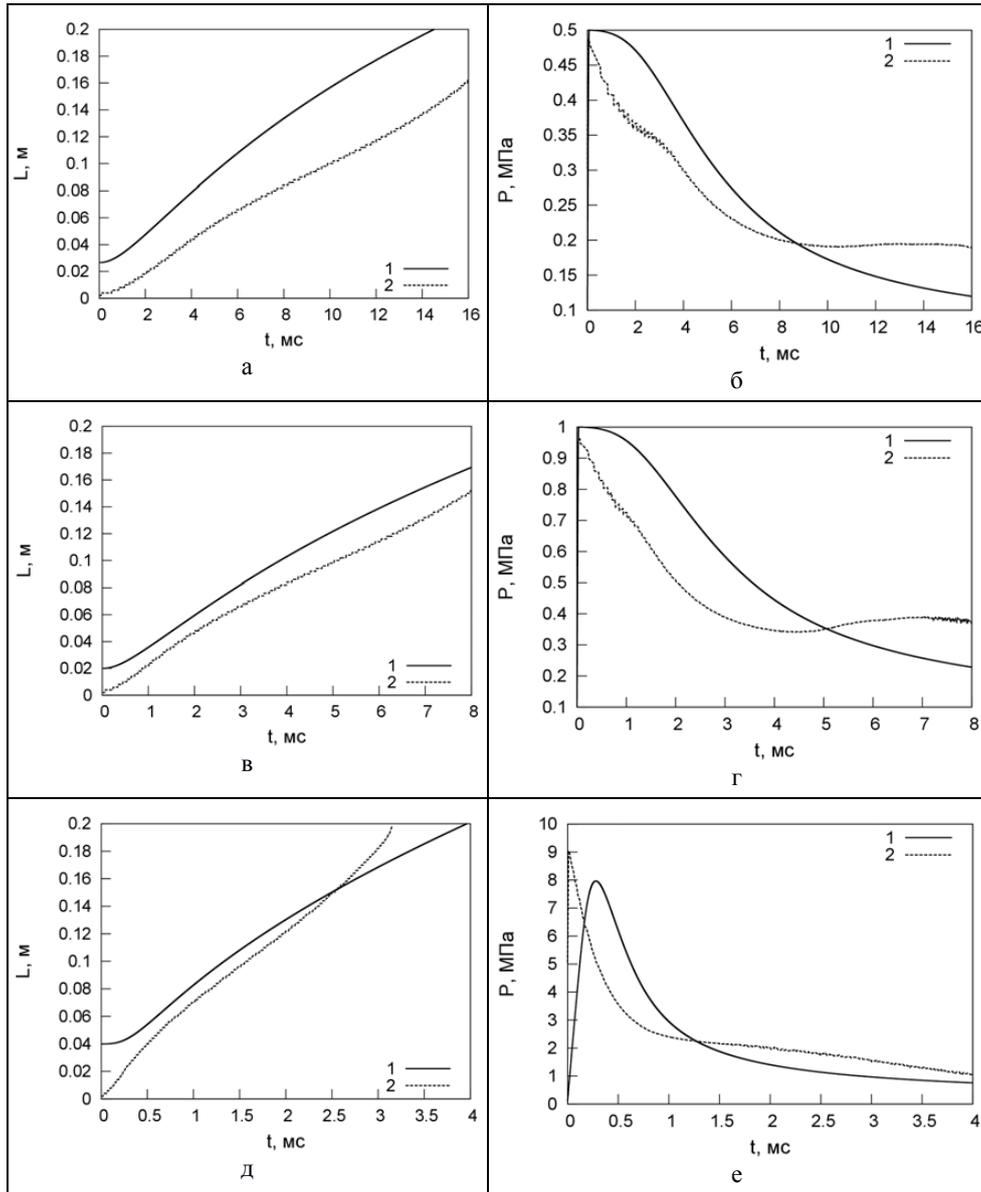


Рис. 1. Зависимость положения границы воздушной полости (а, в, д) и среднего давления внутри нее (б, г, е) от времени. Начальное давление в объеме из которого происходит истечение: а, б —  $P_0 = 0,5$  МПа; в, г —  $P_0 = 1,0$  МПа; д, е —  $P_0 = 10,0$  МПа; 1 — оценка по приближенной модели, 2 — численный счет

Fig. 1. The dependence of the air cavity boundary position (а, в, д) and medium pressure inside it (б, г, е) versus time. The initial pressure in the volume from which the outflow happens: а, б —  $P_0 = 0.5$  MPa; в, г —  $P_0 = 1.0$  MPa; д, е —  $P_0 = 10.0$  MPa; 1 — the assessment of the approximate model, 2 — numerical calculation

расчетной области примерно через 3 мс. Давление в полости для всех расчетов имеет неплохое согласие с предсказаниями асимптотической модели.

Процесс перемешивания можно наблюдать на рис. 2-4. Видно, что в начале расчета имеется четкая граница по объемному газосодержанию, а затем происходит размытие этой границы. Поскольку в расчетах используется двухскоростная модель, то мы можем говорить о том, что в нашем случае имеет место конвективное перемешивание. Незначительный вклад в перемешивание фаз вносит численная диффузия. В нашей задаче мы рассматриваем времена малые для того, чтобы успели развиваться крупные турбулентные вихри, поэтому говорить о турбулентном перемешивании не приходится.

Можно заметить, что в расчете с большим размером капель ( $10^{-3}$  м) происходит формирование «полочки» давления на выходе из сопла, в то время как в расчете с маленьким размером капель такая полочка отсутствует. Это можно связать с тем, что маленькие капли значительно легче увлекаются потоком газа, а движущаяся двухфазная смесь в этом случае обладает большей инертностью. В расчете с большими каплями их движение развивается очень медленно, т. е. газ движется независимо от жидкой фазы, что приводит к формированию пузыря на выходе из сопла с примерно одинаковым давлением в нем. Кроме этого, в расчете с большими каплями давление в сопле изменяется значительно в ходе расчета.

Вертикальная штриховая линия на поле объемного газосодержания (рис. 2-7) указывает осевую координату границы пузыря, полученную из оценки, а горизонтальными стрелками указаны оценочный уровень давления в газовой полости. Оценка дает скорость роста выше, чем полученной при расчете. При увеличении начального давления с 0,5 МПа до 10 МПа разница в скорости роста, полученной из оценки и расчете, уменьшается.

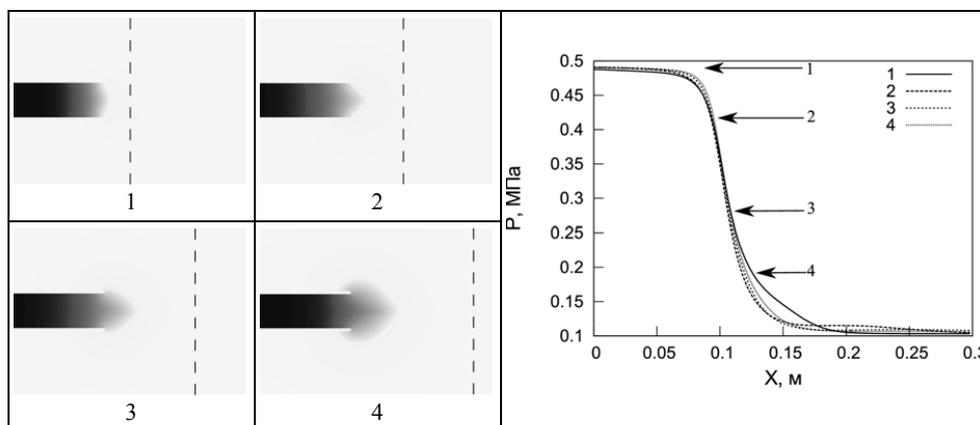


Рис. 2. Пространственное распределение объемного газосодержания (справа) и осевого профиля давления (слева) в зависимости от времени.  $P_0 = 0,5$  МПа; диаметр капель  $10^{-5}$  м; 1 —  $t = 1$  мс, 2 —  $t = 3$  мс, 3 —  $t = 6$  мс, 4 —  $t = 9$  мс

Fig. 2. The spatial distribution of void fraction (right) and the axial pressure profile (left) versus time.  $P_0 = 0.5$  МПа; droplet diameter —  $10^{-5}$  м; 1 —  $t = 1$  ms, 2 —  $t = 3$  ms, 3 —  $t = 6$  ms, 4 —  $t = 9$  ms

Средний уровень давления в газовой полости по упрощенной асимптотической модели не совпадает и завышен относительно уровня давления в полости, рассчитанного для случая с диаметром каплей  $10^{-3}$  м, а в случае с диаметром каплей  $10^{-5}$  м — давление внутри полости плавно спадает, и провести корректное сравнение невозможно.

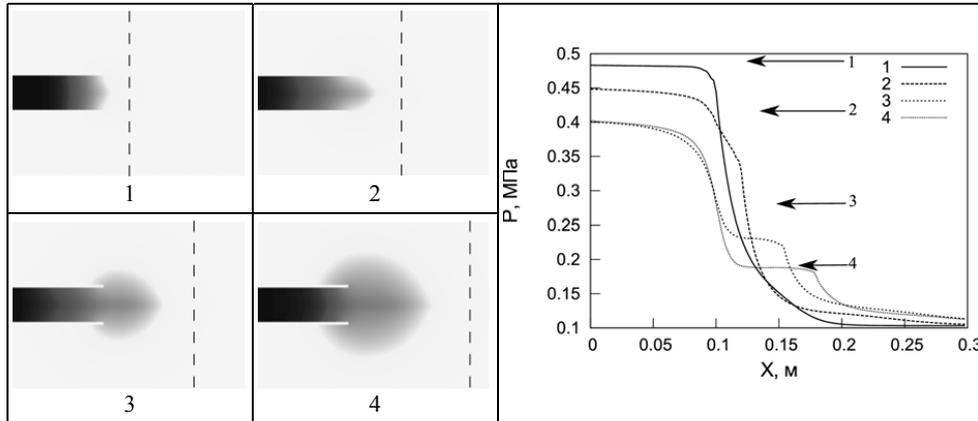


Рис. 3. Пространственное распределение объемного газосодержания (справа) и осевого профиля давления (слева) в зависимости от времени.  $P_0=0,5$  МПа; диаметр каплей  $10^{-3}$  м; 1 —  $t=1$  мс, 2 —  $t=3$  мс, 3 —  $t=6$  мс, 4 —  $t=9$  мс

Fig. 3. The spatial distribution of void fraction (right) and the axial pressure profile (left) versus time.  $P_0 = 0.5$  MPa; droplet diameter of  $10^{-3}$  m; 1 —  $t = 1$  ms, 2 —  $t = 3$  ms, 3 —  $t = 6$  ms, 4 —  $t = 9$  ms

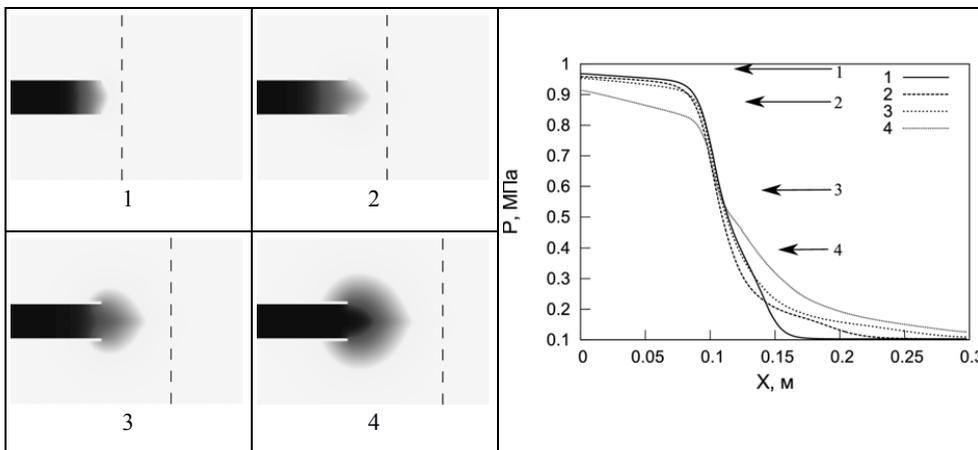


Рис. 4. Пространственное распределение объемного газосодержания (справа) и осевого профиля давления (слева) в зависимости от времени.  $P_0=1,0$  МПа; диаметр каплей  $10^{-5}$  м; 1 —  $t=0,5$  мс, 2 —  $t=1,5$  мс, 3 —  $t=3$  мс, 4 —  $t=4,5$  мс

Fig. 4. The spatial distribution of void fraction (right) and the axial pressure profile (left) versus time.  $P_0 = 1.0$  MPa; droplet diameter of  $10^{-5}$  m; 1 —  $t = 0.5$  ms, 2 —  $t = 1.5$  ms, 3 —  $t = 3$  ms, 4 —  $t = 4.5$  ms

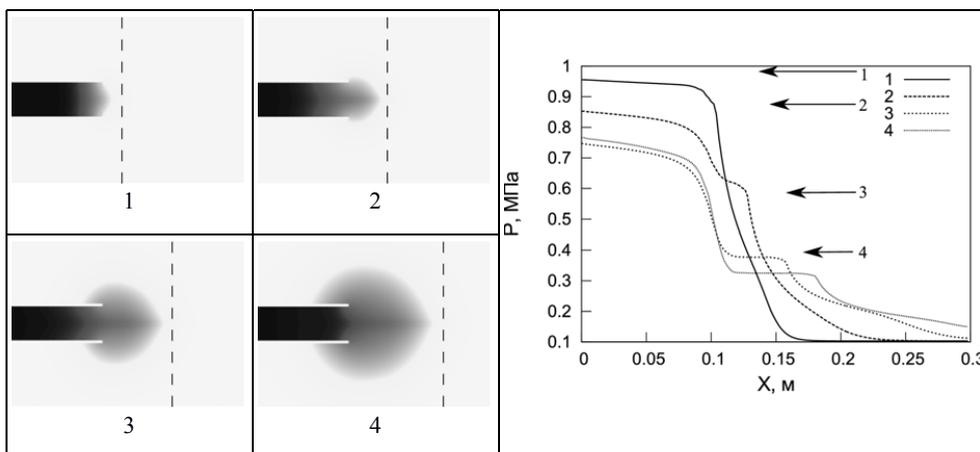


Рис. 5. Пространственное распределение объемного газосодержания (справа) и осевого профиля давления (слева) в зависимости от времени.  $P_0 = 1,0$  МПа; диаметр капель  $10^{-3}$  м; 1 —  $t = 0,5$  мс, 2 —  $t = 1,5$  мс, 3 —  $t = 3$  мс, 4 —  $t = 4,5$  мс

Fig. 5. The spatial distribution of void fraction (right) and the axial pressure profile (left) versus time.  $P_0 = 1.0$  MPa; droplet diameter of  $10^{-3}$  m; 1 —  $t = 0.5$  ms, 2 —  $t = 1.5$  ms, 3 —  $t = 3$  ms, 4 —  $t = 4.5$  ms

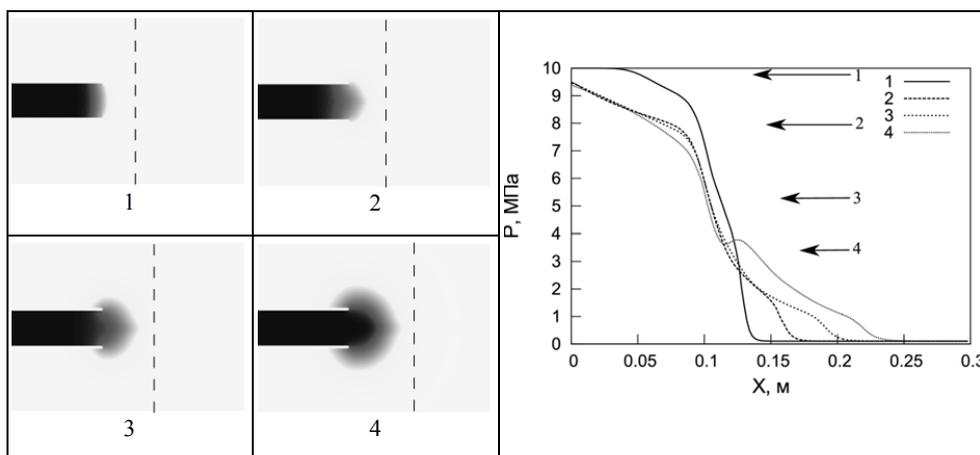


Рис. 6. Пространственное распределение объемного газосодержания (справа) и осевого профиля давления (слева) в зависимости от времени.  $P_0 = 10,0$  МПа; диаметр капель  $10^{-5}$  м; 1 —  $t = 0,1$  мс, 2 —  $t = 0,3$  мс, 3 —  $t = 0,6$  мс, 4 —  $t = 0,9$  мс

Fig. 6. The spatial distribution of void fraction (right) and the axial pressure profile (left) versus time.  $P_0 = 10.0$  MPa; droplet diameter of  $10^{-5}$  m; 1 —  $t = 0.1$  ms, 2 —  $t = 0.3$  ms, 3 —  $t = 0.6$  ms, 4 —  $t = 0.9$  ms

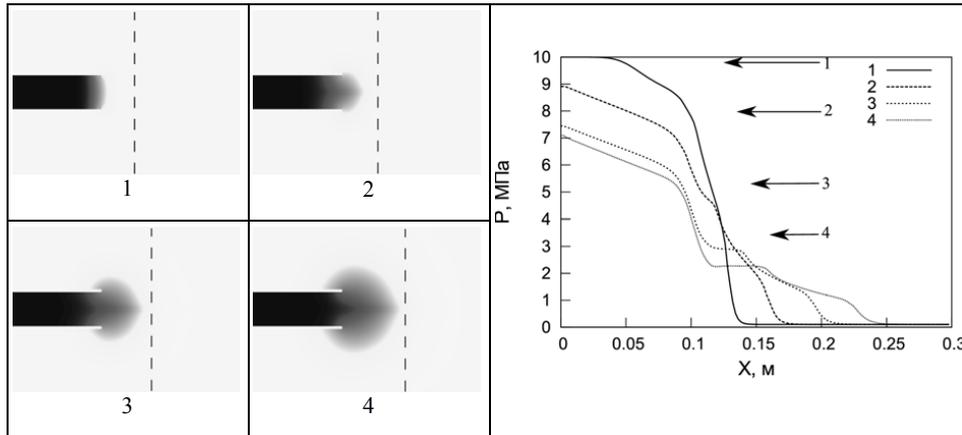


Рис. 7. Пространственное распределение объемного газосодержания (справа) и осевого профиля давления (слева) в зависимости от времени.  $P_0 = 10,0$  МПа; диаметр капель  $10^{-3}$  м; 1 —  $t = 0,1$  мс, 2 —  $t = 0,3$  мс, 3 —  $t = 0,6$  мс, 4 —  $t = 0,9$  мс

Fig. 7. The spatial distribution of void fraction (right) and the axial pressure profile (left) versus time.  $P_0 = 10.0$  MPa; droplet diameter of  $10^{-3}$  m; 1 —  $t = 0.1$  ms, 2 —  $t = 0.3$  ms, 3 —  $t = 0.6$  ms, 4 —  $t = 0.9$  ms

## Выводы

В результате проведенного численного моделирования истечения двухфазной смеси в среду с высокой плотностью для различных размеров капель и сравнения с асимптотической упрощенной моделью роста газовой полости в объеме жидкости было установлено следующее: 1) скорость роста газовой полости для асимптотической упрощенной модели выше, чем при численном моделировании истечения двухфазной смеси в среду с высокой плотностью; 2) эффект скольжения фаз существенно влияет на динамику и стационарное истечение теплоносителя. Минимальная скорость роста газовой полости получена при небольших размерах капель-пузырьков  $10^{-5}$  м, т. е. практически в отсутствие скольжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев М. В. Генерация ударноволновых и вихревых структур при истечении струи вскипающей воды / М. В. Алексеев, С. И. Лежнин, Н. А. Прибатурин, А. Л. Сорокин // Теплофизика и аэромеханика. 2014. № 6. С. 795-798.
2. Алексеев М. В. Особенности эволюции волн давления, генерируемых вскипающим теплоносителем / М. В. Алексеев, И. С. Вожаков, С. И. Лежнин, Н. А. Прибатурин // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Том 23. № 6. С. 897-906.
3. Белоцерковский О. М. Прямое численное моделирование свободной развитой турбулентности / О. М. Белоцерковский // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1985. Том 25. № 12. С. 1856-1882.
4. Вожаков И. С. Моделирование истечения газа в среду с высокой плотностью / С. И. Лежнин, М. В. Алексеев, А. Р. Богомолов, Н. А. Прибатурин // Вестник

- Кузбасского Государственного Технического Университета. 2016. № 5(117). С. 81-87.
5. Кудашов И. Г. Модели теплообмена кода СОКРАТ-БН для расчета кипения натрия в каналах разной геометрии / И. Г. Кудашов, Э. В. Усов, А. А. Бутов, И. С. Вожаков, Н. А. Прибатурин, С. И. Лежнин, М. Е. Кузнецова, Ю. Ю. Виноградова, Р. В. Чальый, В. Н. Семенов, А. Л. Фокин, Н. И. Рыжов // Атомная энергия. 2014. № 11 (Том 117. Вып. 5). С. 261-265.
  6. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука; Глав. ред. физико-математической лит-ры, 1987. Том 1.
  7. Салтанов Г. А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и двухфазных сред / Г. А. Салтанов. Москва: Наука, 1979.
  8. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. М.: Наука; Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1970. Том 2. 568 с.
  9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. М.: Наука, 1974.
  10. Boris J. P. LCPFCT — Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations / J. P. Boris, A. M. Landsberg, E. S. Oran, J. H. Garder // Naval Research Laboratory Report No 6410-93-7192. 1993.
  11. Downar-Zapolski P. The Non-Equilibrium Relaxation Model for One-Dimensional Liquid Flow / P. Downar-Zapolski, Z. Bilicky, L. Bolle, J. Franco // International Journal of Multiphase Flow. 1996. Vol. 22. No 3. Pp. 473-483. DOI: 10.1016/0301-9322(95)00078-X
  12. Liu H. The Phenomenon Analysis of Different Blowing Stages under High Pressure Air Blowing the Submarine Main Ballast Tanks / H. Liu, J. Y. Pu, Q. X. Li // Proceedings SPIE 8349, Fourth International Conference on Machine Vision (ICMV 2011): Machine Vision, Image Processing, and Pattern Analysis (January 11,2012), 83492C.
  13. Nakai H. Numerical Model for Bubble Growth and Gas Decompression during Longitudinal Fracture in Underwater Pipelines / H. Nakai, S. Aihara, A. Morita // The Twenty-Fifth International Ocean and Polar Engineering Conference (June 21-26, 2015, Kona, Hawaii, USA). International Society of Offshore and Polar Engineering, ISOPE-I-15-711.

**Maksim V. ALEKSEYEV<sup>1</sup>**

**Ivan S. VOZHAKOV<sup>2</sup>**

**Sergey I. LEZHININ<sup>3</sup>**

**Nikolay A. PRIBATURIN<sup>4</sup>**

**THE EFFECT OF INTERPHASE FRICTION  
ON THE TWO-PHASE MIXTURE  
OUTFLOWING CHARACTERISTICS  
INTO A HIGH DENSITY MEDIUM**

<sup>1</sup> Cand. Sci. (Phys-Math.), Senior Research Associate,  
SB RAS Kutateladze Institute of Thermophysics (Novosibirsk)  
alekseev@itp.nsc.ru

<sup>2</sup> Junior researcher,  
SB RAS Kutateladze Institute of Thermophysics (Novosibirsk)  
vozhakov@gmail.com

<sup>3</sup> Dr. Sci. (Phys-Math.), Chief Researcher,  
SB RAS Kutateladze Institute of Thermophysics (Novosibirsk)  
lezhnin@itp.nsc.ru

<sup>4</sup> Dr. Sci. (Tech.), Chief Researcher,  
SB RAS Kutateladze Institute of Thermophysics (Novosibirsk)  
pribaturin@itp.nsc.ru

**Abstract**

Numerical modeling of dispersed two-phase mixture outflowing into a high density medium with the droplets of different sizes has been done. The results of the numerical simulation and the quasi-stationary asymptotic simplified model have been compared. The paper presents the characteristic parameters of the calculation: the evolution of both the gas cavity size and cavity pressure, the pressure and void fraction distribution in the computational domain as well. It was found that the interface slipping effect significantly affects the dynamics and the characteristics of coolant steady-state outflow. It is shown that the growth rate of the gas cavity,

---

**Citation:** Alekseyev M. V., Vozhakov I. S., Lezhnin S. I., Pribaturin N. A. 2016. "The Effect of Interphase Friction on the Two-Phase Mixture Outflowing Characteristics into a High Density Medium". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 3, pp. 49–62.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-49-62

---

obtained by the simplified model, is higher than in the numerical simulation one. Minimal growth rate has been obtained with a gas cavity of small droplet size 5-10 m, virtually in the absence of slipping. The results of numerical calculations for two-velocity model and the results obtained using the asymptotic quasi-stationary model, have a satisfactory agreement at large times. The difference between the approximate and exact calculation is reduced, when the vessel pressure is increased.

**Keywords**

Two-phase medium, interfacial friction, gas fluid displacement, depressurization, pressure vessel.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-49-62**

**REFERENCES**

1. Alekseev M. V., Lezhnin S. I., Pribaturin N. A., Sorokin A. L. 2014. "Generatsiya udarnovolnovnykh i vikhrevykh struktur pri istechenii strui vskipayushchey vody" [Generation of Shock Wave and Vortex Structures at the Expiration of a Jet of Boiling Water]. *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 6, pp. 795-798.
2. Alekseev M. V., Vozhakov I. S., Lezhnin S. I., Pribaturin N. A. 2016. "Osobennosti evolyutsii voln davleniya, generiruemykh vskipayushchim teplonositelem" [Features of the Evolution of the Pressure Waves Generated by the Coolant Boils]. *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 23, no 6, pp. 897-906.
3. Belotserkovskiy O. M. 1985. "Pryamoe chislennoe modelirovanie svobodnoy razvitoy turbulentnosti" [Direct Numerical Simulation of Fully Developed Turbulence]. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 25, no 12, pp. 1856-1882.
4. Boris J. P., Landsberg A. M., Oran E. S., Garder J. H. 1993. "LCPFCT — Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations." *Naval Research Laboratory Report No 6410-93-7192*.
5. Downar-Zapolski P., Bilicky Z., Bolle L., Franco J. 1996. "The Non-Equilibrium Relaxation Model For One-Dimensional Liquid Flow." *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 22, no 3, pp. 473-483. DOI: 10.1016/0301-9322(95)00078-X
6. Kudashov I. G., Usov E. V., Butov A. A., Vozhakov I. S., Pribaturin N. A., Lezhnin S. I., Kuznetsova M. E., Vinogradova Yu. Yu., Chalyy R. V., Semenov V. N., Fokin A. L., Ryzhov N. I. 2014. "Modeli teploobmena koda SOKRAT-BN dlya rascheta kipeniya natriya v kanalakh raznoy geometrii" [Models Heat SOKRAT -BN Code to Calculate the Sodium Boiling in Channels of Different Geometries]. *Atomic Energy*, no 11 (vol. 117, no 5), pp. 261-265.
7. Liu H., Pu J. Y., Li Q. X. 2012. "The Phenomenon Analysis of Different Blowing Stages under High Pressure Air Blowing the Submarine Main Ballast Tanks." *Proceedings of SPIE 8349, Fourth International Conference on Machine Vision (ICMV 2011): Machine Vision, Image Processing, and Pattern Analysis, 83492C (January 11)*.
8. Nakai H., Aihara S., Morita A. 2015. "Numerical Model for Bubble Growth and Gas Decompression during Longitudinal Fracture in Underwater Pipelines." *The Twenty-*

- Fifth International Ocean and Polar Engineering Conference (June 21-26, Kona, Hawaii, USA). International Society of Offshore and Polar Engineering, ISOPE-I-15-711.
9. Nigmatulin R. I. 1987. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of Multiphase Media], vol. 1. Moscow: Nauka; Glav. red. fiz.-mat. lit-ry.
  10. Saltanov G. A. 1979. *Neravnovesnye i nestatsionarnye protsessy v gazodinamike odnofaznykh i dvukhfaznykh sred* [Non-Equilibrium and Non-Stationary Processes in Gas Dynamics of Single-Phase and Two-Phase Media]. Moscow: Nauka.
  11. Schlichting H. 1968. *Teoriya pogranichnogo sloya* [Boundary-Layer Theory]. Moscow: Nauka.
  12. Sedov L. I. 1997. *Mekhanika sploshnoy sredy* [Mechanics of Continuous Media], vol. 2. Moscow: Nauka.
  13. Vozhakov I. S., Lezhnin S. I., Alekseyev M. V., Bogomolov A. R., Pribaturin N. A. 2016. "Modelirovanie istecheniya gaza v sredu s vysokoy plotnostyu" [Gas Outflow Modeling into the High Density Environment]. *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, no 5(117), pp. 81-87.