ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 532.528; 532.529; 544.012

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА В СРЕДУ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

GAS OUTFLOW MODELING INTO THE HIGH DENSITY ENVIRONMENT

Вожаков Иван Сергеевич,
младший научный сотрудник, E-mail: vozhakov@gmail.com
Ivan S. Vozhakov , junior research.
Лежнин Сергей Иванович,
доктор физ.-мат. наук, гл. научн. сотрудник. E-mail: lezhnin@itp.nsc.ru
Sergey I. Lezhnin, Dr. Sc., chief researcher.
Алексеев Максим Валерьевич,
канд.физ.-мат. наук, ст. научн.сотрудник. E-mail: alekseev@itp.nsc.ru
Maksim V. Alekseyev, Ph.D., senior researcher
Богомолов Александр Романович,
доктор техн. наук, ст. научн. сотрудник. E-mail: barom@kuzstu.ru
Aleksandr R. Bogomolov, Dr. Sc., senior researcher
Прибатурин Николай Алексеевич,
доктор техн. наук, гл. научн. сотрудник . E-mail: pribaturin@itp.nsc.ru
Nikolay A. Pribaturin[1], Dr. Sc., chief researcher,

ФГБУН «Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН)», Россия, 630090, г. Новосибирск-90, пр. Ак. Лаврентьева
Federal State Institution of Science Institute of Thermophysics. S.S. Kutateladze Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (RAS IT SB),1 , ave. Ak. Lavrent'eva, Novosibirsk, 630090, Russia.

***Аннотация**: Проведено численное моделирование истечения газа в среду с высокой плотностью при использовании различных вариантов режимных карт двухфазной среды и с учетом скольжения фаз. Установлен факт существенного влияния типа режимной карты на характеристики нестационарного и стационарного истечения газа в жидкость. В частности показано, что при переходе в расчетах от «капельной» режимной карты к «пузырьково-капельной» происходит существенное изменение в профилях давления внутри канала и во внешней области.*

***Abstract:** A gas outflow numerical simulation into a high density environment by using different variants two-phase medium regime maps and in view of the slip phase has been carried out. The fact of a significant influence of the regime map type at the characteristics of non-stationary gas outflow into a liquid and stationary one has been determinated. In particular it is shown that the transition in the calculations from "dropping" regime map to "bubble-dropping" one there is a significant change in the pressure profile within the channel and in the outer region takes place.*

***Ключевые слова**: двухфазная среда, межфазное трение, вытеснение жидкости газом, разгерметизация, сосуд высокого давления*

***Key words**: two-phase medium, interfacial friction, gas fluid displacement, depressurization, pressure vessel*

Исследование процессов быстрой разгерметизации сосудов с газом (паром) при высоком давлении и последующим нестационарным истечением газа в объём жидкости связано с широким кругом технических приложений таких как: моделирование а) аварийных режимов работы жидкометаллических атомных реакторах, б) аварий при разгерметизации подводных газопроводов [1], в) работы корабельной техники [2] и т.д. Численное моделирование данного процесса сопряжено с существенными трудностями при учете одновременности протекания взаимосвязанных явлений: сопряженный процесс генерации волн во внешней среде и в сосуде высокого давления, нестационарное истечение газа, процесс вытеснения жидкости газом. Другая сложность состоит в адекватности моделирования

межфазного взаимодействия, задание режимной карты двухфазного потока.

Цель настоящего исследования - численное моделирование нестационарного истечения газа в затопленную область жидкости с учетом межфазного скольжения и при использовании разных режимных карт: «капельной» и «пузырьково-капельной».

В настоящей работе рассматривается осесимметричная задача об истечении газа из торца трубы в область с высокой плотностью (двухфазную смесь). Моделирование процесса истечения двухфазного теплоносителя без фазового перехода было проведено с использованием двухскоростной модели [1], которая решалась пакетом программ LCPFCT[3]:

$$\frac{\partial\left(\alpha_g\rho_g\right)}{\partial t}+div\left(\alpha_g\rho_g\vec{v}_g\right)=0$$

$$\frac{\partial\left(\alpha_f\rho_f\right)}{\partial t}+div\left(\alpha_f\rho_f\vec{v}_f\right)=0$$

$$\frac{\partial\left(\alpha_g\rho_g\vec{v}_g\right)}{\partial t}+\left(\vec{v}_g\cdot\vec{\nabla}\right)\left(\alpha_g\rho_g\vec{v}_g\right)=-\alpha_g\vec{\nabla}p+\vec{F}_g$$

$$\frac{\partial\left(\alpha_f\rho_f\vec{v}_f\right)}{\partial t}+\left(\vec{v}_f\cdot\vec{\nabla}\right)\left(\alpha_f\rho_f\vec{v}_f\right)=-\alpha_f\vec{\nabla}p+\vec{F}_f$$

$$\frac{\partial\left(\alpha_g\rho_gE_g\right)}{\partial t}+div\left(\alpha_g\rho_g\vec{v}_g\left(E_g+\frac{p}{\rho_g}\right)\right)=0$$

$$\frac{\partial\left(\alpha_f\rho_fE_f\right)}{\partial t}+div\left(\alpha_f\rho_f\vec{v}_f\left(E_f+\frac{p}{\rho_f}\right)\right)=0$$

Здесь α – объемное содержание фазы, $\vec{F}_g=-\vec{F}_f$ – межфазное трение, индексы g и f относятся к газообразной и жидкой фазе, соответственно.

Решение исходной дивергентной системы уравнений получено с помощью пакета программ [3], который использует метод конечных объемов вкупе с метод коррекции потоков FCT. Времена расчета в настоящем исследовании соответствуют характерным волновым временам, и хотя эффекты турбулентности на таких временах не успевают проявиться, решение модельных уравнений этим методом эквивалентно применению некоторой подсеточной модели турбулентности [5].

Программа для расчета движения двухфазной смеси была реализована на основе расчетного комплекса, использующего односкоростную гомогенную модель вкупе с релаксационной моделью неравновесного фазового перехода [6]. Подробное описание расчетов с использованием односкоростной гомогенной модели представлено в работе [7].

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» [9], 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 [8].

При расчете межфазного трения F_i будем предполагать, что имеет место несущая фаза – газ или жидкость, в которой движутся капли или пузырьки в зависимости от объемного содержания фаз. Сила сопротивления одиночного шарообразного объекта в несущей фазе выражается формулой:

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

Здесь c – коэффициент сопротивления формы, ρ_1 – плотность несущей фазы, Δu – относительная скорость фаз, S_2 – эффективная площадь сечения шара. Тогда, для силы трения в единице объема получаем:

$$F_i=\frac{1}{V}\frac{\alpha_2V}{V_2}c\frac{\rho_1\Delta u^2}{2}S_2=$$

$$=\frac{6\alpha_2}{\pi D_2^3}c\frac{\rho_1\Delta u^2}{2}\frac{\pi D_2^2}{4}=\frac{3\alpha_2}{4D_2}c\rho_1\Delta u^2$$

Здесь V_2 – объем фазы 2, D_2 – диаметр шара.

Простейшая формула для коэффициента сопротивления формы при ламинарном обтекании сферы получена Стоксом [10] и применяется для чисел Рейнольдса

$$Re=\rho_1\,|u_2-u_1|\,D_2/\mu_1<4:\quad c=\frac{24}{Re}$$

При умеренных числах Рейнольдса Re < 625 будем использовать формулу [11]:

$$c=\frac{12}{\sqrt{Re}}$$

а при более высоких числах Рейнольдса Re > 625 – постоянный коэффициент сопротивления c = 0,48 [11]. Границы режимов выбраны для обеспечения непрерывности коэффициента сопротивления при увеличении числа Рейнольдса.

При понижении давления во вскипающей жидкости ее структура эволюционирует: пузырьковая, переходная, капельная [3]. Такая упрощенная карта может использоваться потому, что в нашем случае происходит истечение в свободную область, т.е. отсутствует влияние стенок каналов. Предложим, что пузырьковый режим скачком переходит в капельный при неком значении $\alpha = \alpha_0$ [12]. Пусть средний радиус

паровых пузырьков и водяных капель – R_{BUBB} и R_{DROP} , соответственно, а число пузырьков и капель в единице массы парожидкостной смеси – N_{BUBB} и N_{DROP} , соответственно.

Тогда из выражений [12]:

$$\frac{4\pi}{3} R_{BUBB}^3 N_{BUBB} \rho = \alpha$$

$$\frac{4\pi}{3} R_{DROP}^3 N_{DROP} \rho = 1 - \alpha \qquad (1)$$

следует, что при режимном переходе ($\alpha = \alpha_0$) выполняется соотношение

$$R_{BUBB}^3 N_{BUBB} \left(1 - \alpha_0\right) = R_{DROP}^3 N_{DROP} \alpha_0 \qquad (2)$$

Если дополнительно предположить, что при переходе сохраняется свободная энергия межфазной поверхности единицы объема [12], то, с учетом (1), получим:

$$4\pi\sigma R_{BUBB}^2 N_{BUBB} \rho = \frac{3\alpha_0}{R_{BUBB}} = \\ = 4\pi\sigma R_{DROP}^2 N_{DROP} \rho = \frac{3\left(1-\alpha_0\right)}{R_{DROP}} \qquad (3)$$

Из (2) и (3) имеем

$$\frac{R_{DROP}}{R_{BUBB}} = \frac{\left(1-\alpha_0\right)}{\alpha_0}, \quad \frac{N_{BUBB}}{N_{DROP}} = \frac{\left(1-\alpha_0\right)^2}{\alpha_0^2} \qquad (4)$$

Из симметрии можно считать $\alpha_0 = 0{,}5$. Откуда

$$R_{BUBB} = R_{DROP}. \qquad (5)$$

Поэтому, в момент перехода размеры капель и пузырьков можно считать одинаковыми. Конечно, следует учитывать, что после инверсии, размеры частиц будут изменяться, пока не установится равновесный размер дисперсной фазы. Однако, время установления в нашем случае может быть гораздо больше характерного времени истечения. Поэтому мы рассматриваем предельный случай, в котором время установления равновесного размера равняется бесконечности. Заметим, что предположение о фиксированном размере частиц, которое используется в нашем рассуждении, является обычной практикой при расчете различных межфазных взаимодействий в теплогидравлических кодах [13,14].

Проведены расчеты истечения двухфазной смеси с большим объемным газосодержанием (0.99) во внешнюю среду с малым газосодержанием (0.1) в отсутствие фазового перехода. Давление в объеме из которого происходит истечение составляло 3 атм. Давление внешней среды – 1 атм. Температуры истекающей смеси 100 ^{0}C. Газовые параметры соответствовали параметрам водяного пара. Параметры жидкости соответствовали параметрам воды. Внутренний диаметр канала соответствовал 40 мм, длинна канала 100 мм. Расчеты проводились при различных вариантах расчета силы межфазного трения (пузырьково-капельная и капельная режимная карта).

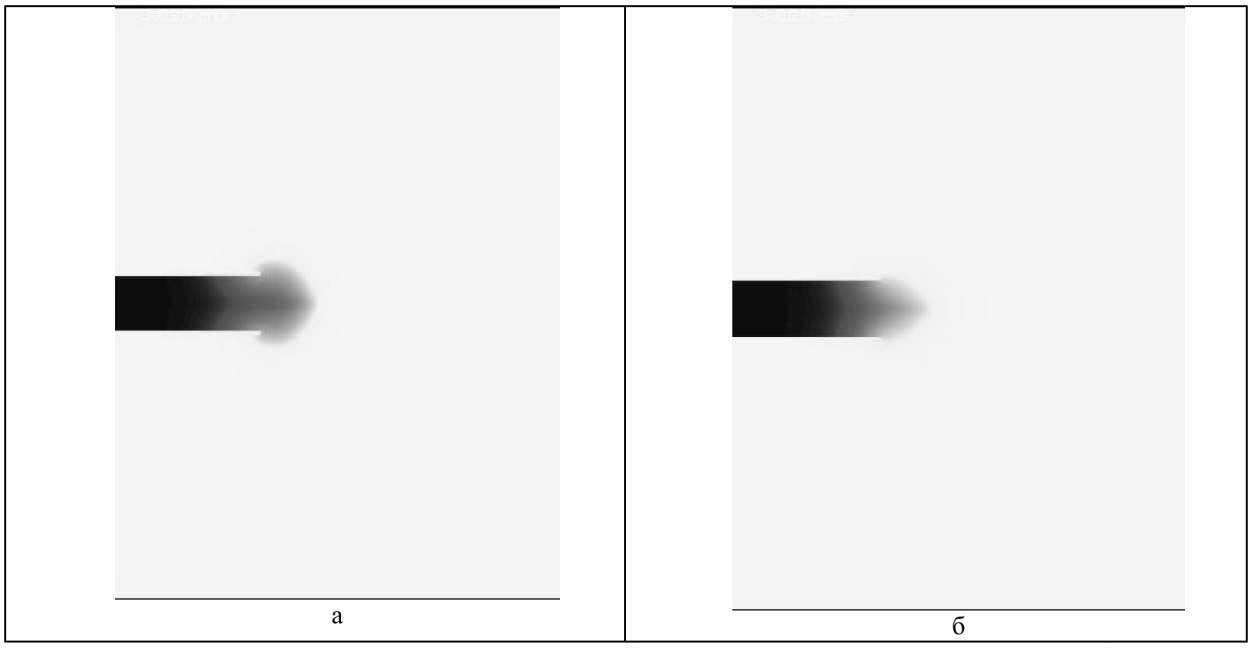

Рисунок 1 – Пространственное распределение объемного газосодержания по расчетной области (градация серого, белый – $\alpha = 0$, черный – $\alpha = 1$) для различных вариантов расчета межфазной силы трения (пузырьково-капельная режимная карта (а) и капельная режимная карта (б)) в момент времени 3 мс после начала истечения.

Figure 1 – The spatial distribution of void fraction for the calculation region (gradation of gray, white – $\alpha = 0$, black – $\alpha = 1$) for different variants of calculation of interfacial friction force (bubble-drop map (a) and a drop map (b)) at time 3 ms after the onset of expiration.

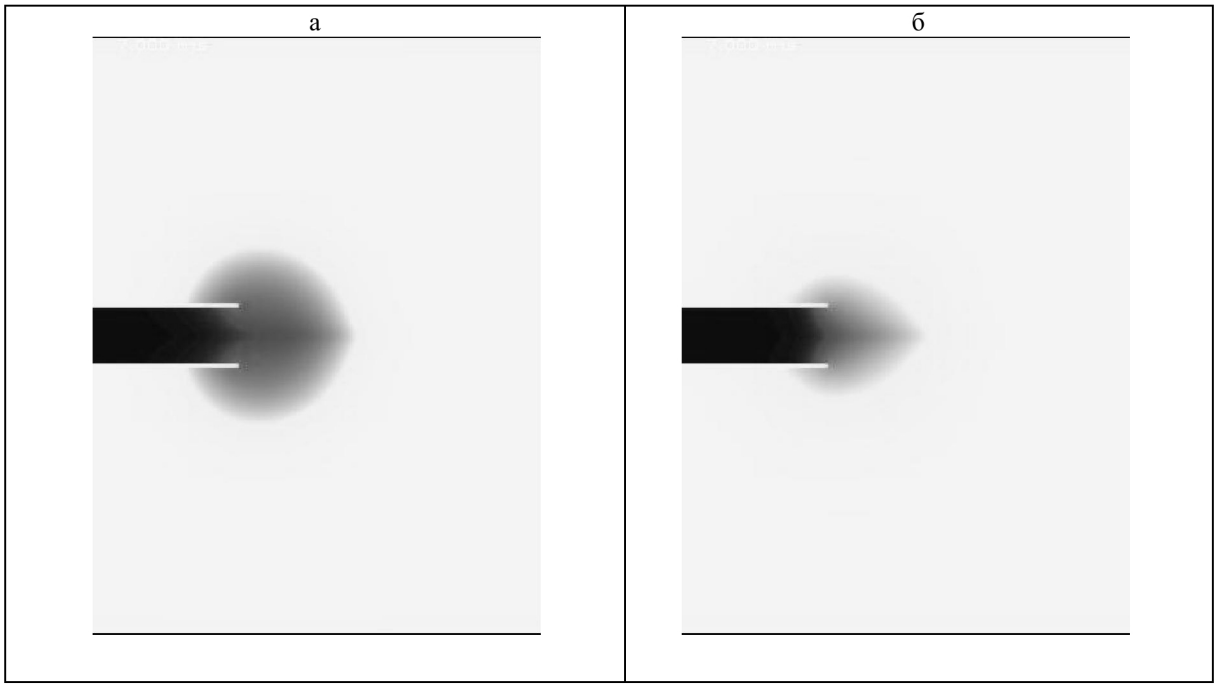

Рисунок 2 – Пространственное распределение объемного газосодержания по расчетной области (градация серого, белый – $\alpha = 0$, черный – $\alpha = 1$) для различных вариантов расчета межфазной силы трения (пузырьково-капельная режимная карта (а) и капельная режимная карта (б)) в момент времени 7 мс после начала истечения.

Figure 2 – The spatial distribution of void fraction on the computational domain (gray scale, white – $\alpha = 0$, black – $\alpha = 1$) for different calculation interfacial frictional force (bubble-drop map (a) and a drop map (b)) at time 7 ms after the beginning of expiration.

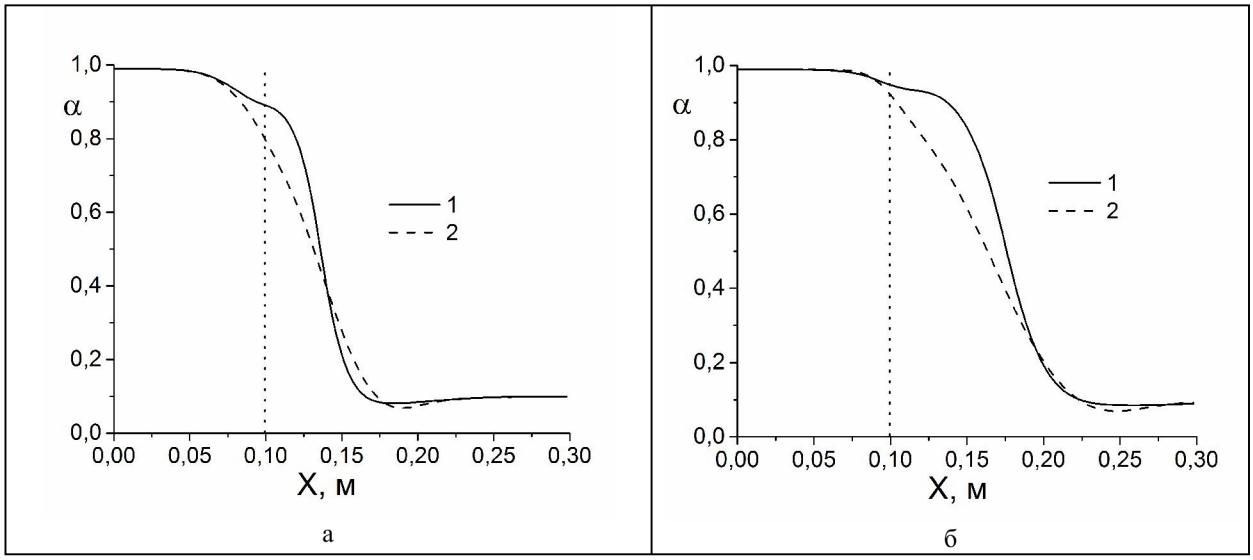

Рисунок 3 – Распределение объемного газосодержания на оси симметрии для различных вариантов расчета силы межфазного трения в моменты времени 3 мс (а) и 7мс (б) мс после начала истечения. 1 – пузырьково-капельный режим, 2 – капельный режим.

Figure 3 – Distribution of void fraction on the axis of symmetry for the various variants of calculating the interfacial friction forces in times of 3 ms (a) and 7ms (b) after the beginning of expiration. 1 – Bubble-drop mode, 2 – drop mode.

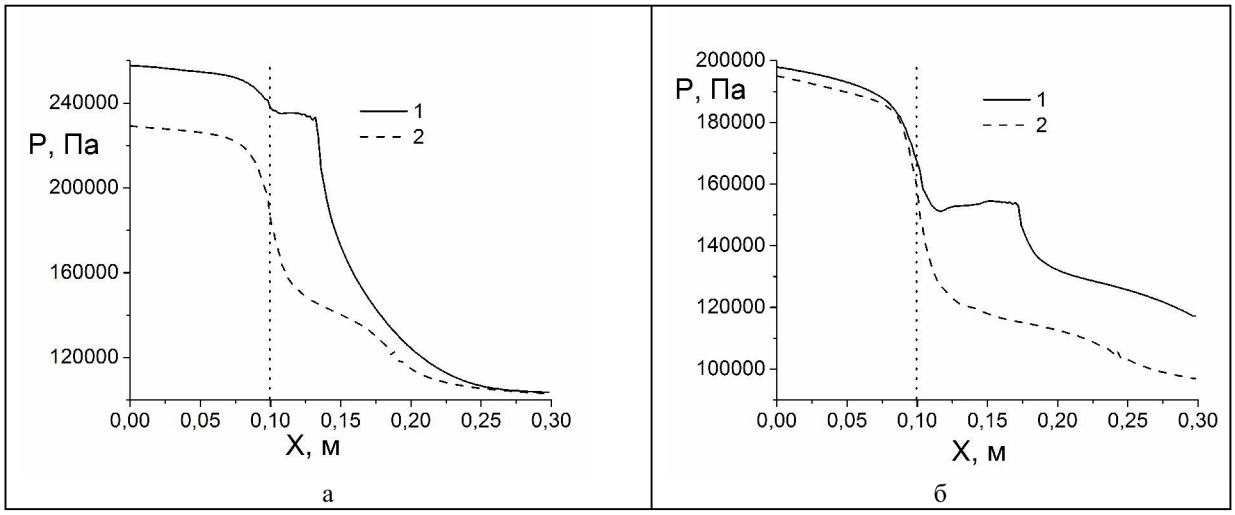

Рисунок 4 – Распределение давления на оси симметрии для различных вариантов расчета силы межфазного трения в моменты времени 3 (а) и 7 (б) мс после начала истечения. 1- пузырьково-капельный режим, 2- капельный режим.

Figure 4 – Distribution of pressure on the axis of symmetry for the various variants of calculating the interfacial friction forces in times of 3 ms (a) and 7ms (b) after the beginning of expiration. 1 – Bubble-drop mode, 2 – drop mode.

На рис.1 представлены пространственные распределения объемного газосодержания по расчетной области. Видно, что пространственное распределение газосодержания в случае пузырьково-капельной режимной карты занимает больший объем и имеет более выраженные границы по сравнению со случаем с капельной режимной картой. Причем, различия между режимами заметны уже после 3 мс истечения, после 7 мс истечения разница становится более выраженной.

На рис. 3 представлено осевое распределение газосодержания для различных режимных карт двухфазной среды. Вертикальной пунктирной линией указана граница торца канала. Как видно из рис. 1 и 2 во время истечения газа наблюдаются заметные различия в пространственном распределении объемного газосодержания. Как можно заметить, различие в газосодержаниях существенно увеличивается со временем. При использовании «пузырьково-капельной» режимной карты профиль объёмного газосодержания спадает ближе к границы области истечения (рисунок 3.б линия 1). Для «капельной» карты спад газосодержания происходит равномерно во всей области истечения (рисунок 3.б линия 2).

На рис. 4 представлено осевое распределение давления для различных режимных карт при разном времени истечения при 3 и 7 мс, соответственно.

При времени истечения 3 мс профили давления для разных режимов существенно различается как в канале, так и в области истечения (рисунок 4а). Можно заметить, что для «капельной» карты происходить быстрое уменьшение уровня давление в канале, чем для «пузырьково–капельной». В области истечения для обоих режимных карт можно выделить три области: узкая область падения давления у торца канала, область с малым изменением давлением и область спадания давления. Для «пузырьково–капельной» карты данное расслоение более существенно (рис. 4.а линия 1) При увеличении времени истечения до 7 мс (рис. 4.б) профиль давления внутри канала для «капельной» карты находится относительно близко к профилю для «пузырьково–капельной» карты. В области истечения зона с малым изменением давления становится наиболее выраженной для «пузырьково–капельной» режимной карты (рис. 4.б, линия 1).

Выводы

Проведено моделирование истечения газообразного теплоносителя в среду с высокой плотностью для различных вариантов расчета межфазного трения. Установлено, что эффект скольжения фаз может существенно влиять на динамику и стационарное истечение теплоносителя. Показано, что при инверсии пузырькового режима течения в капельный для сохранения поверхностной энергии должны сохраняться характерные размеры дисперсной фазы. Следует учитывать, что после инверсии, размеры частиц будут изменяться, пока не установится равновесный размер дисперсной фазы. Однако, время установления в нашем случае может быть гораздо больше характерного времени истечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nakai Hiroaki Numerical model for bubble growth and gas decompression during longitudinal fracture in underwater pipelines / Hiroaki Nakai, Shuji Aihara, Akiyasu Morita// The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, 21-26 June, Kona, Hawaii, USA – 2015, Int. Soc. of Offshore and Polar Eng., ISOPE-I-15-711

2. Liu Hui The phenomenon analysis of different blowing stages under high pressure air blowing the submarine main ballast tanks/ Hui Liu, Jin-yun Pu, Qi-xiu Li // Proc. SPIE 8349, Fourth International Conference on Machine Vision (ICMV 2011): Machine Vision, Image Processing, and Pattern Analysis, – 2012, 83492C (January 11)

3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 1 / Р. И. Нигматулин – , "Наука" , Глав. ред. физико-математической лит-ры,. – 1987.

4. Boris Jay P. LCPFCT - Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations /Jay P. Boris, Alexandra M. Landsberg, Elaine S. Oran, John H. Garder.. - Naval Research Laboratory Report No. 6410-93-7192, – 1993.

5. Белоцерковский О. М., “Прямое численное моделирование свободной развитой турбулентности”/ О. М. Белоцерковский // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., – 1985, – Т.25, №12. – С. 1856–1882

6. Downar-Zapolski P., The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional liquid flow/ P. Downar-Zapolski, Z. Bilicky, L. Bolle, J. Franco // Int. J. Multiphase Flow. – 1996, – V. 22, No 3. – PP. 473-483.

7. 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.

8. 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. – Т.23, № 6. – С.897-906.

9. Гофман Г. В. Нестационарное волновое истечение вскипающей жидкости из сосудов / Г. В. Гофман, А. Е. Крошилин, Б. И. Нигматулин // Теплофизика высоких температур. – 1981. – Т. 19. № 6. – С. 1240-1250.

10. Stokes G. G., Mathematical and physical papers, vol 1/ G. G Stokes - Cambridge University Press, London. – 1880.

11. Салтанов Г. А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и двухфазных сред./ Г. А. Салтанов – Наука, – 1979.

12. Зайчик Л.И. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости./ Л.И. Зайчик, В.М. Алипченков – М: Физматлит, – 2007. – 312 с.

13. 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. Чалый, В.Н. Семенов, А.Л. Фокин, Н.И. Рыжов // Атомная энергия, - 2014;№11(Том 117, Вып. 5), – С. 261-265

14. Бутов А.А Программный модуль кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета малой течи в парогенераторе вода-натрий/ А.А. Бутов, Э.В. Усов, С.И. Лежнин, А.Э. Кутлиметов, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов // Сб. тезисов докладов научно-технической конференции Теплофизика-2015 “Теплофизика реакторов нового поколения”, – 2015, 06 - 09 окт., Обнинск. – С.234-235.

REFERENCES

1. Nakai Hiroaki Numerical model for bubble growth and gas decompression during longitudinal fracture in underwater pipelines / Hiroaki Nakai, Shuji Aihara, Akiyasu Morita// The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, 21-26 June, Kona, Hawaii, USA – 2015, Int. Soc. of Offshore and Polar Eng., ISOPE-I-15-711

2. Liu Hui The phenomenon analysis of different blowing stages under high pressure air blowing the submarine main ballast tanks/ Hui Liu, Jin-yun Pu, Qi-xiu Li // Proc. SPIE 8349, Fourth International Conference on Machine Vision (ICMV 2011): Machine Vision, Image Processing, and Pattern Analysis, – 2012, 83492C (January 11)

3. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred, Tom I [Dynamics of multiphase media , Volum I] – 1987 – M: Nauka, Glav. red. fiz.-mat. lit-ry, – 330 P.

4. Boris Jay P. LCPFCT - Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations /Jay P. Boris, Alexandra M. Landsberg, Elaine S. Oran, John H. Garder.. - Naval Research Laboratory Report No. 6410-93-7192, – 1993.

5. Belotserkovskiy O. M. Pryamoe chislennoe modelirovanie svobodnoy razvitoy turbulentnosti [Direct numerical simulation of fully developed turbulence] Zhurnal vychislitel'noy matematiki i

matematicheskoy fiziki [Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal], – 1985. – V. 25, N.12 – PP. 1856–1882

6. Downar-Zapolski P., The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional liquid flow/ P. Downar-Zapolski, Z. Bilicky, L. Bolle, J. Franco // Int. J. Multiphase Flow. – 1996, V. 22, No 3. – PP. 473 - 483.

7. Alekseev M.V., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A., Sorokin A.L. Generatsiya udarno-volnovykh i vikhrevykh struktur pri istechenii strui vskipayushchey vody [Generation of shock wave and vortex structures at the expiration of a jet of boiling water] Teplofizika i aeromekhanika [Thermophysics and Aeromechanics] – 2014, H 6, – C. 795-798.

8. Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. Osobennosti evolyutsii voln davleniya, generiruemykh vskipayushchim teplonositelem [Features of the evolution of the pressure waves generated by the coolant boils] Теплофизика и аэромеханика. [Thermophysics and Aeromechanics] – 2016, V.23, N6. – PP.897-906.

9. Gofman G. V., Kroshilin A. E., Nigmatulin B. I. Nestatsionarnoe volnovoe istechenie vskipayushchey zhidkosti iz sosudov [Unsteady wave outflow of liquid from boiling vessels] Teplofizika vysokikh temperatur [High Temperature] – 1981. V. 19. N. 6. – PP. 1240-1250.

10. Stokes G. G., Mathematical and physical papers, vol 1/ G. G Stokes - Cambridge University Press, London, – 1880.

11. Saltanov G. A. 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] – Nauka, – 1979.

12. Zaychik L.I., Alipchenkov V.M. Statisticheskie modeli dvizheniya chastits v turbulentnoy zhidkosti [Statistical models of the motion of particles in a turbulent fluid] – M: Fizmatlit, – 2007. – 312 P.

13. 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. Modeli teploobmena koda SOKRAT-BN dlya rascheta kipeniya natriya v kanalakh raznoy geometrii [Models heat SOCRATES-BN code to calculate the sodium boiling in channels of different geometries] Atomnaya energiya [Atomic Energy] , – 2014; N.11(V. 117, I. 5), – PP. 261-265

14. Butov A.A, Usov E.V., Lezhnin S.I., Kutlimetov A.E., Mosunova N.A., Strizhov V.F. Programmnyy modul' koda HYDRA-IBRAE/LM/V1 dlya rascheta maloy techi v parogeneratore voda-natriy [A software module code HYDRA-IBRAE / LM / V1 to calculate the small leak in the steam generator water-sodium] Sbornik tezisov dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Teplofizika-2015 “Teplofizika reaktorov novogo pokoleniya” [Abstracts of the scientific and technical conference of Thermal Physics-2015 "Thermal Physics of reactors of the new generation"] – 2015, 06 - 09 okt., Obninsk, – PP.234-235.

Поступило в редакцию 16.09.2016
Received 16 September 2016