



ISSN: 2658–5782

Номер 2

Апрель–Июнь 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Нестационарные характеристики процесса истечения газа в жидкость¹

Алексеев М.В.* , Вожаков И.С.*,** , Лежнин С.И.*,**

*Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

**Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Проведено численное моделирование процесса истечения газа, находящегося под давлением, в частично заполненную жидкостью закрытую емкость. Для сравнительного теоретического анализа использована асимптотическая модель с допущениями об адиабатичности процесса истечения газа и идеальности жидкости при осцилляторном одномерном движении жидкого столба. При этом движение столба жидкости и эволюция давления в газе определяются уравнением динамики и балансом энтальпии. Численное моделирование проведено в пакете OpenFOAM с использованием метода объемов жидкости (VOF-метод) и стандартной $k - \epsilon$ модели турбулентности. Получена эволюция полей объемного газосодержания, скорости, давления при истечении газа из камеры высокого давления в замкнутый заполненный жидкостью канал при наличии «подушки газа» на верхнем торце канала. Показано, что динамика пульсаций в газовой полости, возникающей при истечении газа в закрытую область, существенно зависит от физических свойств жидкости в объеме, особенно плотности. Численное моделирование показало, что инжекция газа в воду происходит в виде струйного истечения газа, а при истечении в жидкий свинец наблюдается формирование газового снаряда у дна канала. Получено удовлетворительное согласование численного расчета и расчета по асимптотической модели для пульсаций давлений в газовом снаряде в жидком свинце. Для воды результаты расчета по асимптотической модели дают существенное отличие от результатов численного расчета. Во всех случаях скорости движения среды, полученные с помощью численного моделирования и с использованием асимптотической модели, различаются на порядок и более.

Ключевые слова: истечения газа, камера высокого давления, OpenFOAM, инжекция газа в воду, инжекция газа в жидкий свинец

1. Введение

В настоящей работе рассматривается осесимметричная нестационарная задача истечения газа через трубку в замкнутую цилиндрическую область, заполненную жидкостью. Ранее моделирование процесса истечения двухфазного теплоносителя без фазового перехода было проведено в работе [1–3] в рамках двухскоростной модели [4], с помощью авторской модификации пакета про-

грамм LCPFCT [5], а также с использованием пакета OpenFoam [6] в односкоростном приближении двухфазной сжимаемой среды методом переноса объемной доли (VOF) [7].

В работе [8] проводилось сравнение результатов численного расчета и простой асимптотической модели, описывающей пульсации среднего давления в канале на больших «неволновых» временах. Согласно модели при больших расходах газа, поступающего в заполненный жидкостью канал, образуется газовая полость (снаряд), которая занимает все сечение канала. Сравнение показало неплохое соответствие на первых пульсациях. Целью настоящей работы является изучение поведения полевых величин (скорости, давления) на малых временах (порядка одного периода асимп-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственный контракт III.22.7.3, АААА-А18-118051690120-2).

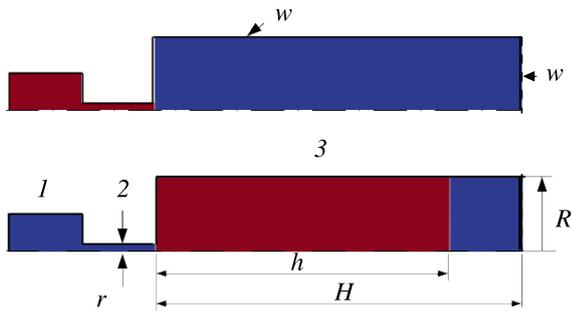


Рис. 1. Расчетная область: 1 – ресивер с воздухом под высоким давлением, 2 – инжектор, 3 – рабочий объем, w – условие типа стенки, h – уровень жидкости, H – высота рабочего объема, R – радиус рабочего канала, r – радиус инжекторной трубки

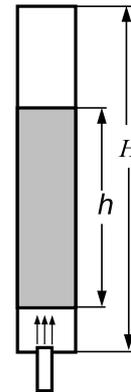


Рис. 2. Схема для асимптотической модели на больших временах

тотических пульсаций) с помощью численного моделирования с использованием пакета OpenFOAM истечения газа из камеры высокого давления (ресивера) в замкнутый заполненный жидкостью канал при наличии «подушки газа» на верхнем торце канала (рис. 1).

Так, при расчете классической газодинамической задачи истечения закритического газа [9, 10] в открытую область с газом при малом давлении формируется нестационарная структура скачков давления в ней. В нашем случае нестационарная газодинамическая структура скачков давления формируется внутри замкнутой газовой полости, возникающей при оттеснении жидкости во внешнем объеме [11].

2. Методика расчета

В верхней части рис. 1 показано начальное распределение давления (красный цвет – область высокого давления, синий цвет – область низкого давления), в нижней части – начальное распределение объемного содержания жидкости (красный цвет – область, заполненная жидкостью, синий – область, заполненная газом). В качестве модельных жидкостей рассматривались вода и свинец, в качестве газа – воздух. Реализация осесимметричной задачи на трехмерном решателе «compressibleInterFoam» в OpenFOAM выполнена с помощью расчетной области в виде сектора с малым углом. Методика расчета детально описана в предыдущих работах авторов, например [3, 12]. Внутренний радиус трубы R составлял 0.1 м (диаметр $D = 0.2$ м), длина трубы $H = 0.5$ м. Уровень жидкости равен $h = 0.4$ м. Остальная часть канала была заполнена воздухом. Давление в канале $20 \cdot 10^5$ Па. Воздух подавался через инжектор из ресивера с давлением $180 \cdot 10^5$ Па. Длина инжекторной трубки составляла 0.1 м, ее радиус $r = 0.01$ м

(диаметр $d = 0.02$ м). Начальная температура воздуха и жидкого свинца [13] равнялась 650 К, начальная температура воды – 373 К.

3. Асимптотическая квазистационарная модель пульсаций

Как отмечалось выше, в работе [8] рассматривалась квазистационарная модель для данной задачи (рис. 2). Согласно этой модели в заполненном жидкостью канале образуется газовая полость (снаряд), которая занимает все сечение канала. В результате инжекции газа и инерции жидкого столба возникают осцилляции давления в снаряде p_G [8]. При этом у верхней закрытой части трубы имеется газовая подушка. Дополнительные допущения:

- а) газ ведет себя адиабатически;
- б) вязкостью жидкости при осцилляторном движении жидкого столба пренебрегаем.

В рамках модельных предположений движение столба жидкости и эволюция давления в снаряде p_G определяются уравнением динамики и баланса энтальпии:

$$\rho_L h \frac{d^2 l_G}{dt^2} = p_G - p_{ATM} \left(\frac{H - h}{H - h - l_G} \right)^\gamma - \rho_L g h, \quad (1)$$

$$\frac{dp_G}{dt} = -\gamma \frac{p_G}{l_G} \frac{dl_G}{dt} + \frac{\gamma}{l_G} \frac{p_0}{\rho_0} \frac{d^2}{D^2} j_G, \quad (2)$$

где p_{ATM} – начальное давление газа в верхней «подушке»; p_G – давление в газовой снаряде; l_G – длина газового снаряда; γ – показатель адиабаты; ρ_L – плотность жидкости. Газ в верхней подушке ведет себя также адиабатически. Удельный расход газа j_G из насадка при выполнении условия записания потока считался постоянным, в противном

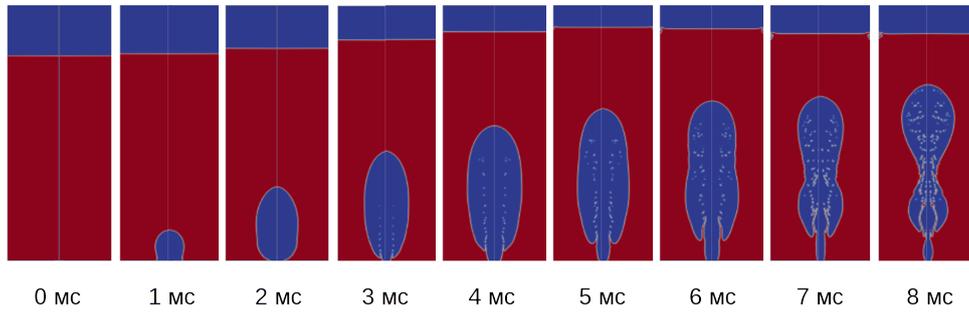


Рис. 3. Эволюция объемного газосодержания для инъекции воздуха в закрытый объем с водой (первый период колебаний)

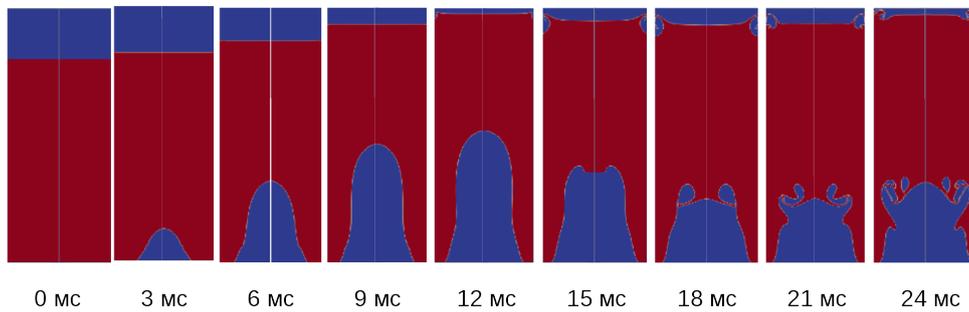


Рис. 4. Эволюция объемного газосодержания для инъекции воздуха в закрытый объем с жидким свинцом (первый период колебаний)

случае — по уравнению Бернулли для сжимаемой среды [8]. Газ идеальный (и совершенный) с показателем адиабаты γ (то есть, удельная энтальпия газа $C_p T = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho}$).

Можно ожидать, что модель будет приближенно, но качественно верно, описывать поведение давления в канале на «неволновых временах» ($t > L/c$, где L — характерный размер; c — характерная скорость звука) [8]. Более точно, при $t > \max(2D/c_G, 2H/c_L)$, где c_G — скорость звука в газе; c_L — скорость звука в жидкости. Для выбранных расчетных параметров (п. 2) это примерно соответствует временам 1 мс и более.

4. Результаты расчета

Расчет показал, что характер пульсаций в газовой полости, возникающих при истечении газа в закрытую область, существенно зависит от физических свойств жидкости в объеме. Для воды (рис. 3) в начальный момент времени отмечается образование газового снаряда. Рост газового снаряда происходит в вертикальном направлении, вытесняя жидкость и сжимая газовый объем в верхней области. В момент времени 5 мс (рис. 3) сжатие газового объема прекращается и далее следует фаза

расширения. Движение жидкости формирует сжатие газового снаряда в его центральной части в радиальном направлении (8 мс). У жидкого свинца и воды кинематические вязкости близки, плотности различаются на порядок. Из-за этого динамика пульсаций газового снаряда в жидком свинце существенно отличается (рис. 4). Рост газового снаряда происходит как в радиальном, так и в вертикальном направлении. При этом рост снаряда вдоль торцевой стенки выше, из-за этого форма газового снаряда приобретает «колоколообразный» вид. Вытеснение жидкости сжатием верхнего газового объема заканчивается через 12 мс (рис. 4). Далее происходит возвратное движение жидкости и сжатие снаряда. На верхней границе образуется кумулятивная струя, которая при движении вниз разбивается от встречной струи газа внутри снаряда, а межфазная граница снаряда становится неустойчивой, приводя к отделению мелких пузырей от снаряда и возникновению струй и капель внутри снаряда.

На рис. 5 и 6 представлены эволюции давления от времени для воды и свинца соответственно. Линия 1 — расчет давления на срезе насадка, линия 2 — расчет давления на расстоянии 0.05 м от насадка, линия 3 — расчет по асимптотической модели на расстоянии 0.05 м, линия 4 — уровень критиче-

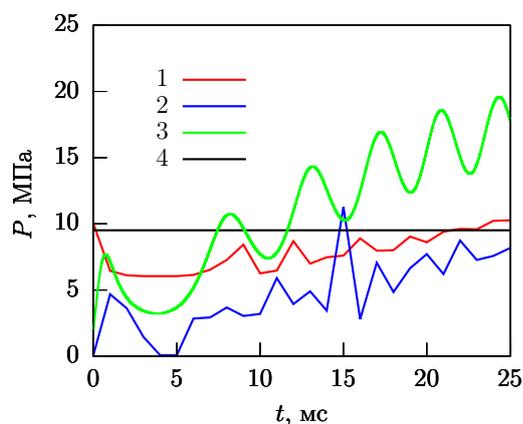


Рис. 5. Пульсации давления при инжекции в воду: 1 — на выходе из инжектора газа (отверстия насадка), 2 — на расстоянии 0.05 м, 3 — асимптотическая модель на расстоянии 0.05 м, 4 — значение критического давления

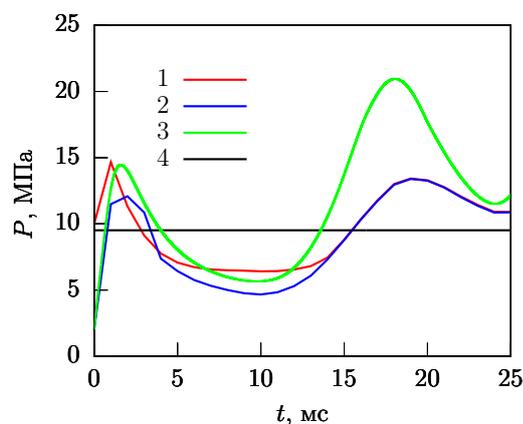


Рис. 6. Пульсации давления при инжекции в жидкий свинец: 1 — на выходе из инжектора газа (отверстия насадка), 2 — на расстоянии 0.05 м, 3 — асимптотическая модель на расстоянии 0.05 м, 4 — значение критического давления

ского давления для заданных начальных условий.

Численный расчет (рис. 5) давления при инжекции газа в воду показывает существенную пространственную неоднородность по давлению в газовой полости. Сильное различие расчетных значений давления в близких точках связано с тем, что при инжекции в воду формируется струя газа, которая проходит через столб жидкости. При этом внутри газового снаряда формируется нестационарная газодинамическая структура скачков давления [11]. При истечении газа в воду «на первой пульсации» давление около насадка всегда ниже критического давления (линия 4), что характеризует возможное запирание потока.

При численном расчете инжекции газа в свинец (рис. 6) струйного истечения газа не наблюдается. Расчет давления при первой пульсации снаряда хорошо согласуется с давлением, полученным по асимптотической модели, поскольку из-за малых скоростей в газе неоднородность по давлению снижается, а асимптотическая модель подразумевает полную однородность по давлению в газовой полости. Асимптотическая модель также более консервативна на больших временах по амплитуде давления, чем численная модель. Это связано с тем, что в полной модели учитывается дополнительная диссипация «энергии осциллятора» из-за деформации межфазной границы и реальной неоднородности движения. Консервативность асимптотической модели позволяет использовать ее для оценок амплитуд давления сверху.

На рис. 7 и 8 представлены зависимости пульсаций скорости от времени для воды и свинца соот-

ветственно. Линия 1 — численный расчет скорости на срезе насадка, линия 2 — на расстоянии 0.05 м от насадка, линия 3 — расчет по асимптотической модели на расстоянии 0.05 м.

Скорости движения среды, полученные с помощью численного моделирования и при использовании асимптотической модели, как и следовало ожидать, существенно отличаются. Скорость газа в асимптотической модели отражает усредненную скорость по сечению рабочего участка на расстоянии 0.05 м. В численном расчете приведены локальные скорости среды на срезе насадка и на расстоянии 0.05 м.

5. Заключение

В работе исследованы эволюции полей объемного газосодержания и поведение полевых величин (скорости, давления) на малых временах (порядка одного периода асимптотических пульсаций) при истечении газа из камеры высокого давления (ресивера) в замкнутый, заполненный жидкостью канал, при наличии «подушки газа» на верхнем торце канала. Численное моделирование проводилось с использованием пакета OpenFOAM.

Выявлено, что при инжекции газа в воду возникает струйное истечение газа, а при истечении в жидкий свинец происходит формирование газового снаряда у дна канала. В отличие от воды получено удовлетворительное согласование численного расчета и расчета по асимптотической модели для пульсаций давлений в газовом снаряде в жидком свинце.

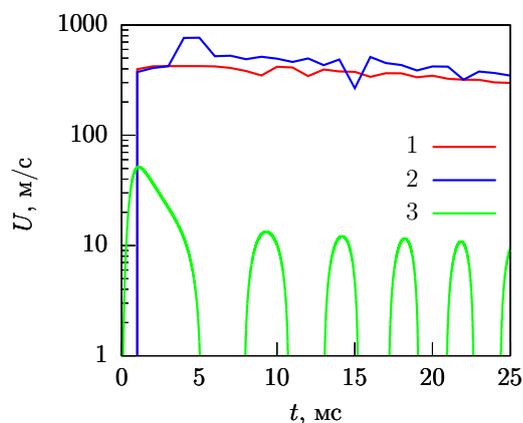


Рис. 7. Пульсации скорости при инъекции в воду: 1 — на выходе из инжектора газа (отверстия насадка), 2 — на расстоянии 0.05 м, 3 — асимптотическая модель на расстоянии 0.05 м

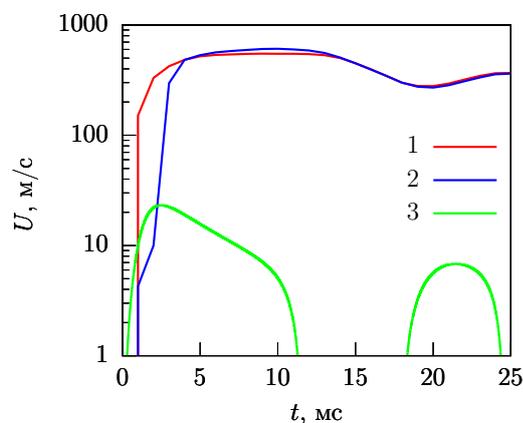


Рис. 8. Пульсации скорости при инъекции в жидкий свинец: 1 — на выходе из инжектора газа (отверстия насадка), 2 — на расстоянии 0.05 м, 3 — асимптотическая модель на расстоянии 0.05 м

Список литературы

- [1] Вожаков И.С., Лежнин С.И., Алексеев М.В., Богомолов А.Р., Прибатурин Н.А. Моделирование истечения газа в среду с высокой плотностью // Вест. Кузбасс. госунивер. 2016. № 5. С. 86–92. <https://journals.kuzstu.ru/article/3120.pdf>
- [2] Алексеев М. В., Вожаков И. С., Лежнин С. И., Прибатурин Н.А., Влияние межфазного трения на характеристики истечения двухфазной смеси в среду с высокой плотностью // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2, № 3. С. 49–62. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-49-62
- [3] Lezhnin S.I., Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Pribaturin N.A. Simulating gas (vapor) outflow into a liquid // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1105, № 1. PP. 012081. IOP Publishing DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012081
- [4] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 360 с.
- [5] Boris J.P., Landsberg A.M., Oran E.S., Garder J.H. LCPFCT - Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations. NRL/MR/6410-93-7192 <https://pdfs.semanticscholar.org/250a/7bd3e46de18e0af13d43011956f31a0880af.pdf>
- [6] The OpenFOAM Foundation. Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. 2019. openfoam.org. <https://cfdirect.openfoam/user-guide/>
- [7] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // Journal of Computational Physics. 1992. Vol. 100. P. 335–354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y
- [8] Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И. Пульсации давления при инъекции газа в заполненный жидкостью закрытый объем при больших перепадах давления // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 5 С. 833–836.
- [9] Болотнова Р.Х. Исследование динамики формирования полой струи при истечении пара из сверхкритического состояния // Многофазные системы. 2018. Т. 13, № 4. С. 73–78. DOI: 10.21662/mfs2018.4.011
- [10] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Особенности формирования полой струи водяного пара сверхкритических параметров состояния, истекающего через тонкое сопло // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 783–789. <https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=174876>
- [11] Алексеев М.В., Вожаков И.С., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А. Трехмерное моделирование инъекции газа в открытую, заполненную жидкостью трубную область // Тезисы Докладов XXXV Сибирского теплофизического семинара, посвященного 75-летию д.т.н., профессора В.И. Терехова. Новосибирск. 2019 г. С. 104. http://www.itp.nsc.ru/conferences/sts35/files/STS35_abstracts.pdf
- [12] Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lobanov P.D., Svetonosov A.I., and Mohan V.K., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. Numerical simulation of pulsed gas-to-liquid injection modes using open source CFD software package OpenFoam // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1105. № 1. P=012085., IOP Publishing DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012085
- [13] Савченко И.В., Лежнин С.И., Мосунова Н.А. Рекомендации по значениям и расчетным соотношениям для теплофизических и кинетических свойств жидкого свинца // Теплоэнергетика. 2015. № 6. С. 51–54. DOI: 10.1134/S0040363615060077



Non-stationary process characteristics of the gas outflow into a liquid

Alekseev M.V.* , Vozhakov I.S.*,** , Lezhnin S.I.*,**

*Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

**Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

A numerical simulation of the process of the outflow of gas under pressure into a closed container partially filled with liquid was carried out. For comparative theoretical analysis, an asymptotic model was used with assumptions about the adiabaticity of the gas outflow process and the ideality of the liquid during the oscillatory one-dimensional motion of the liquid column. In this case, the motion of the liquid column and the evolution of pressure in the gas are determined by the equation of dynamics and the balance of enthalpy. Numerical simulation was performed in the OpenFOAM package using the fluid volume method (VOF method) and the standard k-ε turbulence model. The evolution of the fields of volumetric gas content, velocity, and pressure during the flow of gas from the high-pressure chamber into a closed channel filled with liquid in the presence of a "gas blanket" at the upper end of the channel is obtained. It was shown that the dynamics of pulsations in the gas cavity that occurs when the gas flows into the closed region substantially depends on the physical properties of the liquid in the volume, especially the density. Numerical modeling showed that the injection of gas into water occurs in the form of a jet outflow of gas, and for the outflow into liquid lead, a gas slug is formed at the bottom of the channel. Satisfactory agreement was obtained between the numerical calculation and the calculation according to the asymptotic model for pressure pulsations in a gas projectile in liquid lead. For water, the results of calculations using the asymptotic model give a significant difference from the results of numerical calculations. In all cases, the velocity of the medium obtained by numerical simulation and when using the asymptotic model differ by an order of magnitude or more.

Keywords: gas outflow, high pressure chamber, OpenFOAM, gas injection into water, gas injection into liquid lead

References

- [1] Vozhakov I.S., Lezhnin S.I., Alekseev M.V., Bogomolov A.R., Pribaturin N.A. Gas outflow modeling into the high density environment // Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2016. № 5. C. 86–92. (in Russian)
<https://journals.kuzstu.ru/article/3120.pdf>
- [2] Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A., 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. 2016. T. 2, № 3. C. 49–62. (in Russian)
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-49-62
- [3] Lezhnin S.I., Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Pribaturin N.A. Simulating gas (vapor) outflow into a liquid // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1105, № 1. PP. 012081.
IOP Publishing
DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012081
- [4] Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media: v. 1. Hemisphere Publ. Corp New York, United States, 1990. 507 p.
- [5] Boris J.P., Landsberg A.M., Oran E.S., Garder J.H. LCPFCT - Flux-Corrected Transport Algorithm for Solving Generalized Continuity Equations. NRL/MR/6410-93-7192
<https://pdfs.semanticscholar.org/250a/7bd3e46de18e0af13d43011956f31a0880af.pdf>
- [6] The OpenFOAM Foundation. Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. 2019. openfoam.org.
<https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>
- [7] Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // Journal of Computational Physics. 1992. Vol. 100. P. 335–54.
DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y
- [8] Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I. Pressure pulsations while gas injection into a liquid- filled closed vessel at high pressure drop // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26, № 5 (in press).
- [9] Bolotnova R.Kh. Study the dynamics of hollow jet formation under vaporoutflow from the supercritical state // Multiphase Systems. 2018. V. 13, № 4. P. 73–78
DOI: 10.21662/mfs2018.4.011

- [10] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Supercritical steam outflow through a thin nozzle: forming a hollow jet // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018. № 5. P. 751–757.
DOI: [10.1134/S0869864318050116](https://doi.org/10.1134/S0869864318050116)
- [11] Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. [Three-Dimensional modeling of gas injection into an open, liquid-filled pipe region] *Trehmernoje modelirovanie inzhetskii gaza v otkrytuju, zapolnennuju zhidkost'ju trubnuju oblast'* // [Abstracts of the XXXV Siberian Thermophysical Seminar dedicated to the 75th anniversary of doctor of technical Sciences, Professor V.I. Terekhov.] *Tezisy Dokladov XXXV Sibirskogo Teplofizicheskogo Seminara, posvjashhjonnyj 75-letiju d.t.n., professora V.I. Terehova*. 27–29 August 2019, Novosibirsk, Russia, P. 104. (in Russian)
http://www.itp.nsc.ru/conferences/sts35/files/STS35_abstracts.pdf
- [12] Alekseev M.V., Vozhakov I.S., Lobanov P.D., Svetonosov A.I., and Mohan V.K., Lezhnin S.I., Pribaturin N.A. Numerical simulation of pulsed gas-to-liquid injection modes using open source CFD software package OpenFoam // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1105, № 1. P. 012085.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1105/1/012085/pdf>
DOI: [10.1088/1742-6596/1105/1/012085](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1105/1/012085)
- [13] Lezhnin S.I., Mosunova N.A., Savchenko I.V. Recommendations on adopting the values and correlations for calculating the thermophysical and kinetic properties of liquid lead // *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62, № 6. P. 434–437.
DOI: [10.1134/S0040363615060077](https://doi.org/10.1134/S0040363615060077)