МЕХАНИКА

УДК 532.529.5

ИСТЕЧЕНИЕ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ЧЕРЕЗ СОПЛО С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ[1]

© 2010 М.Н. Галимзянов,[2] С.А. Лепихин[3]

В работе рассматриваются вопросы стационарного течения пузырьковой газожидкостной смеси в сопле кругового сечения без учета и с учетом фазовых переходов. Проанализирована возможность реализации супервысоких температур и давлений в газовой фазе на участке сопла вблизи минимального сечения.

Ключевые слова: сопло, пузырьковая жидкость, фазовый переход, газожидкостная смесь, супервысокие давления.

Введение

В настоящее время к проблеме получения высоких давлений и температур проявляется большой интерес. Успешным способом решения данной задачи, подтвержденным практикой, является возбуждение колебаний пузырьков или кластера пузырьков при взаимодействии на них импульсом давления [1]. В лабораторных условиях академиком Э.М. Галимовым при истечении бензола через сопло, сопровождаемого кавитацией, выдвинута гипотеза о возможности получения алмазоподобных систем в результате возникновения супервысоких давлений в пузырьках [2].

Следовательно, изучение закономерностей реализации таких течений с экспериментальными давлениями и температурами газа в пузырьках па-

[1]Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (08-01-97033), Программы фонда фундаментальных исследования ОЭММПУ РАН (ОЕ-15) и Программы фонда фундаментальных исследований Президиума РАН (П-17).

[2]Галимзянов Марат Назипович (monk@anrb.ru), лаборатория дифференциальных уравнений механики Учреждения Российской академии наук Института механики Уфимского научного центра РАН. 450054, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, пр. Октября, 71.

[3]Лепихин Сергей Анатольевич (sg81@bk.ru), Сургутский институт нефти и газа (филиал) Тюменского государственного нефтегазового университета. 628404, Россия, Тюменская область, г. Сургут, ул. Энтузиастов, д. 38.

рогазожидкостной смеси может в отличие от методов импульсного воздействия на "неподвижные" пузырьки стать основой для создания непрерывных технологических процессов, происходящих при супервысоких давлениях и температурах.

1. Постановка задачи и основные уравнения

Рассматривается установившееся адиабатическое течение жидкости с газовыми пузырьками в сопле кругового сечения, для которой можно задать ее исходные параметры и значение скорости на входе в сопло (рис. 1). Для описания двухфазного потока принимаем стандартные допущения для пузырьковой жидкости: смесь является монодисперсной, вязкость и теплопроводность существенны лишь в процессе межфазного взаимодействия. Отсутствуют дробление и слипание пузырьков, пузырьки сферические и одинакового радиуса. Жидкость термостатирована.

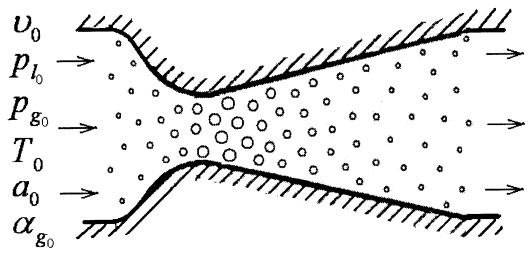

Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области

Газовую фазу пузырьковой системы будем рассматривать как газовую смесь, состоящую из двух компонент — инертного газа, не участвующего в фазовых переходах, и пара окружающей пузырьки жидкости.

Истинная плотность газа в пузырьке [3]:

$$\rho_g^0 = \rho_{gg}^0 + \rho_{gv}^0,$$

где ρ_{gg}^0, ρ_{gv}^0 – соответственно парциальные плотности инертного газа и пара жидкости.

Введем массовые концентрации инертного газа и пара в газовой фазе:

$$k_g = \frac{\rho_{gg}^0}{\rho_g^0}, \quad k_v = \frac{\rho_{gv}^0}{\rho_g^0}, \quad k_g + k_v = 1.$$

Для давления газовой фазы, согласно закону Дальтона, имеем:

$$p_g = p_{gg} + p_{gv}, \tag{1}$$

где парциальные давления инертного газа и пара определяются уравнением Менделеева — Клапейрона:

$$p_{gg} = \rho_{gg}^0 \frac{R}{\mu_g} T_g, \quad p_{gv} = \rho_{gv}^0 \frac{R}{\mu_v} T_g.$$

В этих уравнениях R — универсальная газовая постоянная, μ_v, μ_g — молярные массы пара и инертного газа, T_g — температура газа в пузырьке.

В соответствии с приведенными допущениями запишем систему уравнений в квазиодномерном и односкоростном приближении [4]:

— уравнение сохранения массы жидкости (пренебрегаем изменением массы жидкости за счет фазовых переходов):

$$\frac{d}{dz}\left[\rho_l^0\left(1-\alpha_g\right)vS\right]=0; \tag{2}$$

— уравнение сохранения числа пузырьков:

$$\frac{d}{dz}\left(nvS\right)=0;$$

— уравнение импульсов:

$$\rho_l^0\left(1-\alpha_g\right)v\frac{dv}{dz}=-\frac{dp_l}{dz};$$

— уравнение Рэлея-Ламба с учетом межфазного массообмена:

$$av\frac{dw}{dz}+\frac{3}{2}w^2+4\nu^{(v)}\frac{w}{a}=\frac{p_g-p_l-\frac{2\sigma}{a}}{\rho_l^0},$$

$$v\frac{da}{dz}=w+\frac{j}{\rho_l^0},\quad \alpha_l+\alpha_g=1,\alpha_g=\frac{4}{3}\pi a^3 n,$$

где ρ_l^0, α_l, α_g, v, p_l, p_g, n, a, w, $\nu^{(v)}$, σ, j – соответственно плотность жидкости, объемное содержание жидкой и газовой фазы, скорость, давление в жидкости и пузырьках газа, число и радиус пузырьков, скорость радиального движения, кинематическая вязкость жидкости, коэффициент поверхностного натяжения, интенсивность испарения.

Дополним эти уравнения уравнением внутренней энергии для изменения газовой смеси в пузырьке:

$$v\frac{de}{dz}=-4\pi a^2 p_g w_{g(a)}+4\pi a^2 q_g+4\pi a^2 j c_{g(a)}T_a\quad\left(e=m_g c_g T_g\right),$$

где c_g, q_g — удельная теплоемкость газовой смеси при постоянном объеме, интенсивность теплообмена, из которого получаем уравнение для давления парогазовой смеси:

$$\frac{dp_g}{dz}=\frac{3\left(\gamma-1\right)}{av}\left[-\frac{\gamma p_g}{\gamma-1}\left(w+\frac{j}{\rho_l^0}\right)+q_g+\right.$$

$$\left.+\left(B_a+c_{g(a)}\right)T_a j-\left(1-k_v\right)\left(\frac{c_{gv}-c_{gg}}{c_g}-\frac{B_v-B_g}{B}\right)c_g T_g j\right],$$

где γ — соответственно показатель адиабаты для газа, c_{gi}, B_i $(i=g,v)$ — удельная теплоемкость и приведенная газовая постоянная для инертной и паровой составляющей газовой смеси.

Уравнение для переменной плотности парогазовой смеси и концентрации пара следуют из закона сохранения массы для смеси в пузырьке и ее газовой составляющей.

Уравнение для изменения парогазовой смеси в пузырьке и ее газовой составляющей:

$$v\frac{dm_g}{dz} = 4\pi a^2 j, \;\; v\frac{d}{dz}\left[m_g\left(1-k_v\right)\right] = 0, \quad m_g = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_g^0;$$

— уравнение для плотности парогазовой смеси в пузырьке:

$$\frac{d\rho_g^0}{dz} = \frac{3\left(j - \rho_g^0 w\right)}{av};$$

— уравнение для концентрации пара в пузырьке:

$$\frac{dk_v}{dz} = \frac{3\left(1-k_v\right)}{\rho_g^0 av} j.$$

2. Условия на межфазной границе

На границе фазового перехода задаем условие баланса тепла [3]:

$$q_l - q_g = jl,$$

где l – удельная теплота парообразования. Разница потоков тепла идет на фазовый переход.

Тепловые потоки к межфазной поверхности определяются эмпирическими формулами:

$$q_l = Nu_l \lambda_l \frac{T_l - T_a}{2a}, \quad q_g = Nu_g \lambda_g \frac{T_a - T_g}{2a}.$$

Из уравнения баланса тепла получаем выражение для температуры межфазной поверхности:

$$T_a = \frac{\lambda_l Nu_l T_l + \lambda_g Nu_g T_g - 2ajl}{\lambda_l Nu_l + \lambda_g Nu_g}.$$

Интенсивность фазового перехода:

$$j = -\frac{\rho_{g(a)}}{1-k_{v(a)}} DSh \frac{k_v - k_{v(a)}}{2a},$$

где $\rho_{g(a)}$, $k_{v(a)}$ – соответственно плотность газовой смеси и массовая концентрация на межфазной поверхности, D – коэффициент диффузии, Sh – число Шервуда.

При описании число Нуссельта задается в виде:

$$\mathrm{Nu} = \begin{cases} \sqrt{\mathrm{Pe}}, & \text{если} \quad \mathrm{Pe} \geqslant 100, \\ 10, & \text{если} \quad \mathrm{Pe} < 100. \end{cases}$$

Для числа Пекле примем выражение:

$$\mathrm{Pe} = 12\left(\gamma - 1\right) \frac{\mathrm{T_0}}{\left|\mathrm{T_g} - \mathrm{T_0}\right|} \frac{\mathrm{a}\left|\mathrm{w}\right|}{\nu^{(\mathrm{T})}}, \quad \nu^{(\mathrm{T})} = \frac{\lambda_{\mathrm{g}}}{\mathrm{c_g}\rho_{\mathrm{g}}^0}.$$

Здесь $\nu^{(T)}$, λ_g, c_g – коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности и теплоемкость газа соответственно.

Для численного анализа задачи о стационарном течении пузырьковой жидкости система уравнений (1)–(2) была преобразована и решалась методом Рунге-Кутта 4 порядка при заданном сечении сопла и параметрах двухфазной смеси на входе в сопло.

3. Результаты численного расчета

При истечении через сопло пузырьковой жидкости в ней вследствие уменьшения давления в жидкости в сужающейся части сопла и инерционного радиального движения пузырьков в области минимального сечения могут развиваться нелинейные колебания пузырьков, интенсивность которых определяется характеристиками газожидкостной смеси и величиной минимального давления, достигаемого в горловине сопла, как показано в [4, 5].

Как показывают численные расчеты, интенсивное развитие колебаний пузырьков наблюдается в случае, когда давление в жидкости в области минимального сечения приближается к значению давления насыщения паров жидкости при соответствующей температуре жидкости и определяется возникающей разностью давлений в фазах пузырьковой жидкости, обусловленной инерционным радиальным движением пузырьков в расширяющейся части сопла вблизи горловины.

Численное исследование проводилось для сопла (рис. 2) переменного кругового сечения длиной $0,15$ м. Диаметры концов равны $0,0357$ м. Диаметр минимального сечения равен $0,0252$ м и расположен на расстоянии $0,023$ м от входа сопла. Входу сопла соответствует координата $z = 0$.

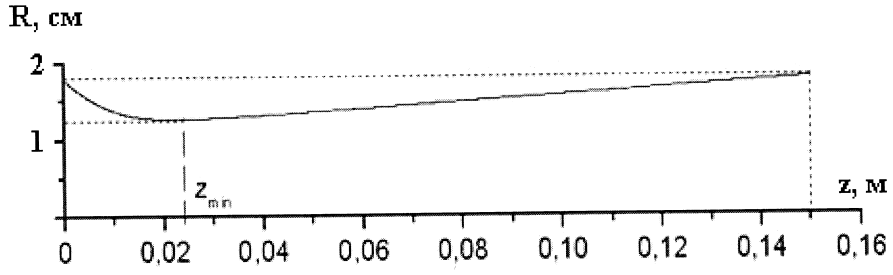

Рис. 2. Профиль сопла

В расчетах жидкой фазой является вода, инертным газом — воздух.

Теплофизические параметры, принятые для воздуха: $\rho_{g0}^0 = 1,29$ кг/м^3, $\lambda_g = 2,6 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·град, $c_g = 1000$ Дж/кг·град; для воды: $\rho_{l0}^0 = 1000$ кг/м^3, $T_0 = 293$ К, $\nu_l = 1.01 \cdot 10^{-6}$ Па·сек, $\lambda_l = 0,567$ Вт/м·град, $c_l = 4200$ Дж/кг·град, $\sigma_l = 7,3 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Для параметров на входном сечении сопла ($z = 0$) приняты следующие величины: скорость течения $v_0 = 11,4$ м/с, давления в жидкости и в газо-

вой фазе $p_{l0} = p_{g0} = 0,2$ МПа, температура $T_{g0} = 300$ К, начальный радиус пузырьков $a_0 = 10^{-4}$ м, начальное объемное газосодержание $\alpha_{g0} = 10^{-4}$.

Для более наглядного представления о влиянии фазовых переходов рассмотрим сначала динамику пузырьковой жидкости при истечении ее из сопла без учета фазовых переходов. Из рис. 3 видно, что в результате снижения давления в жидкости в сужающейся части сопла и инерционного радиального движения в области минимального сечения происходит более чем шестикратное увеличение пузырьков с последующим быстрым их сжатием, вследствие чего в расширяющейся части сопла развиваются интенсивные колебания пузырьков, в которых в моменты максимального сжатия пиковые значения давления и температуры газа достигают порядка 70 МПа и 3700 К соответственно.

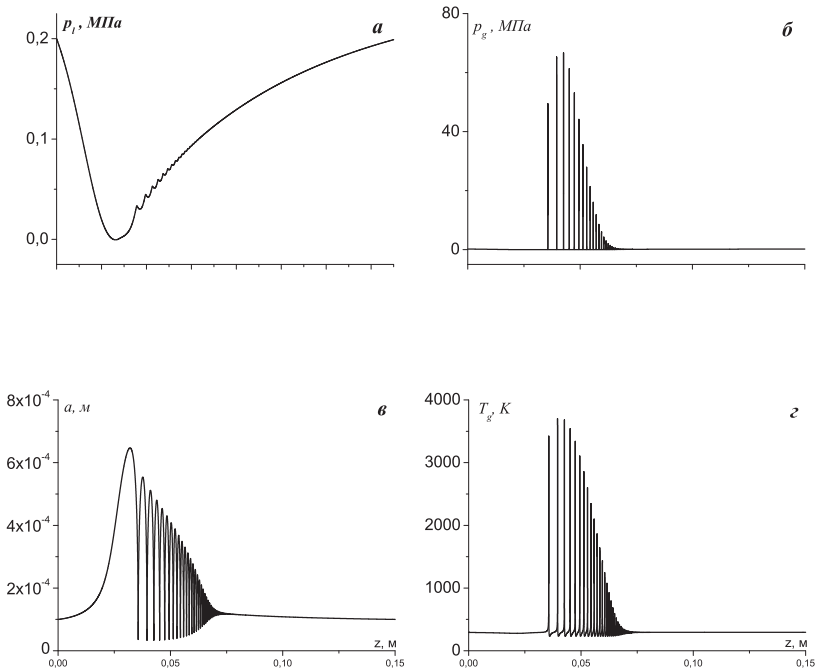

Рис. 3. Распределение основных параметров двухфазного потока в сопле без учета фазовых переходов: давления в жидкости *(а)* и в газовой фазе *(б)*, радиуса пузырьков *(в)* и температуры газа *(г)*

Заметим, что достижение таких высоких температур в газе приводит к свечению пузырьков и неизбежной потере энергии при излучении. Однако этот факт и необходимость учета соответствующих энергетических превращений не отменяют, с нашей точки зрения, принципиальную возможность достижения высоких давлений и температур в пузырьках в рассматриваемом процессе.

Здесь стоит отметить, что течение жидкости с сильными нелинейными пульсациями пузырьков в сопле наблюдается, когда давление в горловине уменьшается до тысячных долей атмосферы и определяется величиной ско-

рости на входе сопла и отношением площади входного сечения к площади сечения в горловине сопла. Повышение скорости до предельного значения, при котором давление жидкости в горловине стремится к нулю, приводит к наиболее интенсивным колебаниям пузырьков и реализации в них огромных давлений и температур газа в моменты максимального сжатия.

На рис. 4 представлено распределение основных параметров пузырьковой жидкости при течении в сопле с учетом и без учета фазовых переходов. Скорость смеси на входе сопла $v_0 = 11,37$ м/с. Для параметров на входном сечении сопла ($z = 0$) приняты следующие величины: давления в жидкости и в газовой фазе $p_{l0} = p_{g0} = 0,2$ МПа, температура $T_{g0} = 300$ К, радиус пузырьков $a_0 = 10^{-4}$ м, объемное газосодержание $\alpha_{g0} = 10^{-4}$.

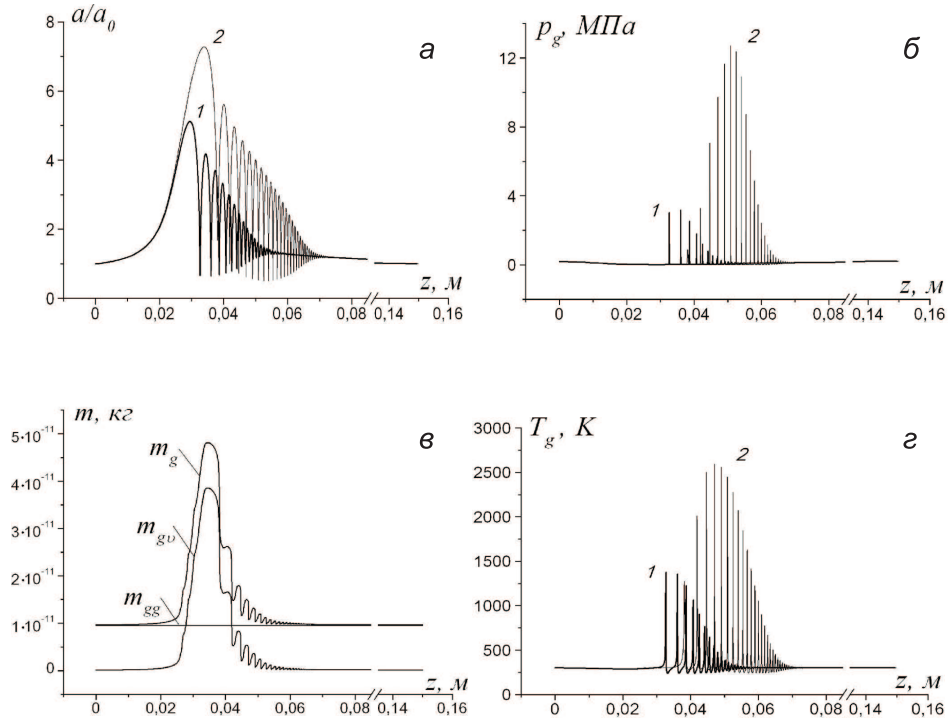

Рис. 4. Распределение основных параметров двухфазного потока в сопле: безразмерного радиуса пузырьков *(а)*, давления *(б)*, температуры газа *(в)* в пузырьках, а также массы газовой смеси и ее составляющих *(г)*

Кривые *1* соответствуют случаю, когда не учитываются фазовые переходы, кривые *2* — случаю с учетом фазовых превращений. Для числа Нуссельта принято значение $Nu_l = 10^3$. Как отмечено в [5], учет межфазного массообмена оказывает двоякое воздействие: во-первых, происходит более сильное начальное расширение пузырьков в области минимального сечения сопла, поскольку пузырьки становятся более мягкими вследствие интенсивного испарения жидкости внутрь пузырьков, приводящего к уменьшению их сопротивляемости к расширению. При этом масса парогазовой смеси в пузырьках может увеличиваться в несколько раз по сравнению с

первоначальной. Во-вторых, при последующем быстром сжатии пузырьков это набранное значительное количество пара не успевает конденсироваться обратно, что в свою очередь способствует значительному демпфированию процесса сжатия пузырьков. Поэтому в парогазовых пузырьках наиболее высокие значения пиковых давлений и температур реализуются не при первых схлопываниях, как это имеет место в пузырьковой жидкости при отсутствии фазовых переходов, а при последующих колебаниях, когда масса парогазовой смеси внутри пузырьков уменьшается.

Из анализа результатов численного расчета видно, что интенсивность испарения жидкости в пузырьки возрастает вблизи горловины сопла, что объясняется увеличением межфазной поверхности, через которую происходит массообмен, ростом пузырьков и приближением давления в жидкости к давлению насыщенных паров.

Авторы выражают благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Владиславу Шайхулагзамовичу Шагапову и доктору физико-математических наук Ильясу Кадировичу Гималтдинову за полезные замечания и постоянный интерес к их исследовательской работе.

Литература

[1] Метод сверхсильного сжатия газового пузырька в жидкости непериодическим вибрационным воздействием давления умеренной амплитуды / Р.И. Нигматулин [и др.] // Докл. РАН. 1995. Т. 341. №1. С. 37–47.

[2] Экспериментальное подтверждение синтеза алмаза в процессе кавитации / Э.М. Галимов [и др.] // Докл. РАН. 2004. Т. 395. №2. С. 187–191.

[3] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 360 с.

[4] Шагапов В.Ш., Лепихин С.А., Галимзянов М.Н. Реализация высоких давлений и температур в газовой фазе при истечении пузырьковой жидкости через сопло // ИФЖ. 2007. Т. 80. №6. С. 134–137.

[5] Лепихин С.А., Галимзянов М.Н. Численное исследование реализации высоких давлений и температур в газовой фазе пузырьковой жидкости при ее истечении через сопла: сб. науч. трудов XV Зимней школы по механике сплошных сред. Пермь, 2007. С. 225–229.

Поступила в редакцию 20/*I*/2010;
в окончательном варианте — 3/*II*/2010.

THE OUTFLOW OF THE TWO-PHASE MIXTURE THROUGH THE NOZZLE WITH PHASE TRANSITIONS

© 2010 M.N. Galimzyanov[4], S.A. Lepikhin[5]

This paper considers questions of a stationary current of bubble gas-liquid mixtures in a nozzle of circular cross-section without and with phase transitions are considered. Possibility of realisation of superheats and superhigh pressure in a gas phase on a site of a nozzle near to the minimum cross-section is analysed.

Key words: nozzle, bubble liquid, phase transitions, gas-liquid mixture, superhigh pressure.

Paper received 20/*I*/2010.
Paper accepted 3/*II*/2010.

[4]Galimzyanov Marat Nazipovich (monk@anrb.ru), Dept. of Differential Equations of Mechanics, Institute of Mechanics of Ufa Branch, RAS, Ufa, 450054, Russia.

[5]Lepikhin Sergey Anatoljevich (sg81@bk.ru), Surgut Institute of Oil and Gas (branch). Tyumen State Oil and Gas University, Surgut, 628404, Russia.