УДК 532.329.5

Высокие давления и температуры в пузырьковой жидкости при истечении ее через сопло [1]

М. Н. Галимзянов, С. А. Лепихин

Институт механики УНЦ РАН, Уфа

Аннотация. Рассмотрено стационарное течение пузырьковой газожидкостной смеси в сопле кругового сечения. Проанализирована возможность реализации супервысоких температур и давлений в газовой фазе на участке сопла вблизи минимального сечения. Изучено влияние параметров (начального радиуса и объёмного содержания пузырьков, определяющих состав объёмного расхода жидкости, подаваемого в сопло) на картину течения.

Ключевые слова: волны давления, пузырьковая жидкость, волновой импульс, газовая фаза

1 Введение

В настоящее время к проблеме получения высоких давлений и температур газа в пузырьковых жидкостях проявляется большой интерес. Успешным способом решения данной задачи, подтвержденным практикой, является возбуждение колебаний пузырьков или кластера пузырьков при воздействии на них импульсом давления [1]. В работе [2] на основе экспериментального изучения истечения бензола через сопло, сопровождаемого процессом кавитации, выдвинута гипотеза о возможности получения алмазоподобных систем в результате возникновения супервысоких давлений в пузырьках. Следовательно, изучение закономерностей реализации таких течений с экстремальными давлениями и температурами газа в пузырьках

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04–01–97513), INTAS № 05–1000008–7921, Гранта Президента РФ (МК–1815.2005.1)

парогазожидкостной смеси может стать основой для создания непрерывных технологических процессов, происходящих при супервысоких давлениях и температурах.

2 Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим течение монодисперсной пузырьковой газожидкостной смеси в сопле, для которой можно задать ее исходные параметры и значение скорости на входе в сопло. При построении математической модели течения пузырьковой жидкости будем полагать: в каждом элементарном объёме все пузырьки сферические и одного радиуса, скорости движения фаз равны, вязкость и теплопроводность существенны лишь в процессе межфазного взаимодействия, в частности, при пульсации пузырьков, фазовые переходы отсутствуют, пузырьки не слипаются и не дробятся. Силами трения потока о стенки канала пренебрегаем [3].

В соответствии с отмеченными предположениями система уравнений движения для монодисперсной смеси несжимаемой жидкости с пузырьками газа при отсутствии фазовых переходов в рамках односкоростного двухтемпературного приближения примет следующий вид:

$$\frac{d}{dz}\left[\rho_l^0\left(1-\alpha_g\right)vS\right]=0, \quad \frac{d}{dz}\left(nvS\right)=0,$$
$$\rho_l^0\left(1-\alpha_g\right)v\frac{dv}{dz}=-\frac{dp_l}{dz}, \quad v\frac{dp_g}{dz}=-\frac{3\gamma p_g}{a}w-\frac{3(\gamma-1)}{a}q, \tag{1}$$
$$\alpha_l=1-\alpha_g,\ \alpha_g=\frac{V_g}{V},\ \rho_i^0=\frac{\rho_i}{\alpha_g}, w=\dot{a}(t),$$

где $S=S(z)$ — площадь поперечного сечение сопла; a — радиус пузырьков; γ — показатель адиабаты для газа; p_i — давления фаз; ρ_i^0 — истинные плотности фаз; α_i — объемные содержания фаз;, q — тепловой поток; n — число пузырьков в единице объёма; w — радиальная скорость пузырьков; v — скорость течения жидкости; z — пространственная координата; V_g и V — объем газа и общей объем рассматриваемой области; ρ_i — приведенные плотности фаз. Нижними индексами $i=l,g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

В четвёртом уравнении системы (1) связь между лагранжевой переменной z и переменной t устанавливается из общего решения уравнения

$$dz=v(z)dt \tag{2}$$

Радиальное движение пузырьков происходит в соответствии с уравнением Рэлея–Ламба:

$$av\frac{dw}{dt}+\frac{3}{2}w^2+4\nu\frac{w}{a}=\frac{p_g-p_l-\dfrac{2\sigma}{a}}{\rho_l^0}, \tag{3}$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; ν — кинематическая вязкость жидкости.

Жидкость считаем несжимаемой, газ — калорически совершенным:

$$\rho_l^0=\mathrm{const},\quad u_l=c_lT_0$$

$$p_g=\rho_g^0RT_g,\quad u_g=c_gT_g$$

где R — универсальная газовая постоянная; T_g — температура газа; c_i — теплоемкость i -ой фазы.

Тепловой поток q задается приближенным конечным соотношением [3]

$$q=\mathrm{Nu}\lambda_g\frac{T_g-T_0}{2a},$$

$$\mathrm{Nu}=\sqrt{\mathrm{Pe}},\quad \mathrm{Pe}\geq 100,\quad \mathrm{Nu}=10,\quad \mathrm{Pe}<100,$$

$$\mathrm{Pe}=12(\gamma-1)\frac{T_0}{|T_g-T_0|}\frac{a|w|}{\nu^T},\quad \nu^T=\frac{\lambda_g}{c_g\rho_g^0},$$

где $T_0=\mathrm{const}$ — температура жидкости; λ_g и ν^T — теплопроводность и температуропроводность газа; Nu, Pe — числа Нуссельта и Пекле.

С учетом уравнения состояния и неразрывности для температуры газа в пузырьках можно получить [3]

$$\frac{T_g}{T_0}=\frac{p_g}{p_{g0}}\left(\frac{a}{a_0}\right)^3.$$

Здесь и в дальнейшем индексами 0 внизу снабжены параметры, относящиеся к начальному невозмущенному состоянию.

3 Методика численного расчёта

Для численного анализа задачи о стационарном течении пузырьковой жидкости преобразуем уравнения (1) и (3), с учетом уравнения (2), к виду:

$$\frac{dv}{dz}=\frac{3\alpha_gw}{a}-\frac{v}{S}\frac{dS}{dz},$$

$$\frac{dp_l}{dz}=\rho_l^0\left(\alpha_g-1\right)v\left(\frac{3\alpha_gw}{a}-\frac{v}{S}\frac{dS}{dz}\right),$$

$$\frac{dp_g}{dz}=-\frac{1}{av}\left(3\gamma p_gw+3(\gamma-1)q\right),$$

$$\frac{dw}{dz} = \frac{1}{av}\left(\frac{p_g - p_l - \dfrac{2\sigma}{a}}{\rho_l^0} - \frac{3}{2}w^2 + 4\nu^v\frac{w}{a}\right),$$

$$\frac{da}{dz} = \frac{w}{v}.$$

По определению концентрации пузырьков

$$n = \frac{3}{4}\frac{\alpha_g V}{\pi a^3}.$$

Тогда для объёмного содержания газовой фазы в произвольном сечении сопла интегральное уравнение сохранения числа пузырьков имеет вид:

$$\alpha_g = \alpha_{g0}\left(\frac{a}{a_0}\right)^3\frac{v_0 S_0}{vS},$$

где S_0, a_0, v_0 и α_{g0} — площадь входного сечения сопла, начальный радиус пузырьков, начальная скорость потока и начальное объемное содержание газовой фазы на входном сечении.

4 Результаты расчётов

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 колебаний определяется характеристиками газожидкостной смеси и величиной минимального давления, достигаемого в горловине сопла.

Уменьшение давления в жидкости в сужающейся части сопла приводит к начальному росту пузырьков. В горловине сопла давление в жидкой фазе достигает своего минимального значения и начинает увеличиваться в расширяющейся части сопла [4]. При этом пузырьки газа, увеличивающиеся в сужающейся части сопла, в минимальном сечении «проскакивают»равновесное состояние и, продолжая расти вследствие инерционного движения стенок пузырьков, достигают максимальных размеров в расширяющейся части сопла вблизи горловины. Под действием возрастающего давления в жидкости пузырьки в расширяющейся области резко схлопываются. В процессе схлопывания пузырьки вновь «проскакивают» равновесное состояние, уменьшаясь до минимальных размеров, что приводит к значительному росту давления газа в пузырьках и последующему новому расширению пузырьков, обусловленному разностью давлений газа в пузырьках и в жидкости в момент наибольшего сжатия. Впоследствии эти нелинейные колебания пузырьков в расширяющейся части сопла за счёт

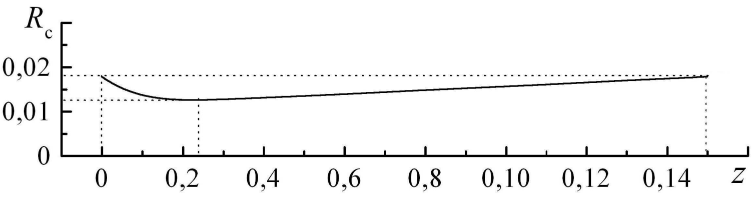

Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области

диссипации из-за теплообмена и вязкости жидкости постепенно затухают. При этом, как показывает расчёт, в процессе схлопывания пузырьков средние значения давления и температуры газа в пузырьках достигают величин, намного превышающих начальные значения.

Численное исследование проводилось для сопла (Рис. 1) переменного кругового сечения длиной 0.15 м. Диаметры концов равны $3.57 \cdot 10^{-2}$ м. Диаметр минимального сечения равен $2.52 \cdot 10^{-2}$ м и расположен на расстоянии $2.3 \cdot 10^{-2}$ м от входа сопла, где $z = 0$.

В расчётах в качестве жидкости была принята вода, в качестве газовой фазы —воздух. Рассмотрено истечение пузырьковой жидкости с начальным радиусом пузырьков от $3 \cdot 10^{-5}$ м до $2 \cdot 10^{-4}$ м при начальном объёмном газосодержании $5 \cdot 10^{-5} \leq \alpha_{g0} \leq 2 \cdot 10^{-4}$. На входе сопла задавались значения давления фаз и скорости течения жидкости. Температура жидкости во всех случаях принималась равной $T_0 = 300$ K.

Истечение жидкости с сильными нелинейными колебаниями пузырьков наблюдается, когда давление её в горловине сопла уменьшается до нескольких тысячных долей атмосферы, и определяется величиной скорости 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. К примеру, в случае газожидкостной смеси с пузырьками радиусом $a_0 = 9 \cdot 10^{-5}$ м и объёмным газосодержанием $\alpha_{g0} = 10^{-4}$ при заданных на входе сопла параметрах давления фаз $p_{l0} = p_{g0} = 0.2$ МПа и скорости течения жидкости $v_0 = 11.46$ м/с в моменты максимального сжатия пузырьков в них реализуются давления и температуры, достигающие значений $p_g^m = 32$ МПа и $T_g^m = 2900$ K соответственно (Рис. 2 (а)). Здесь и далее на графике распределения давлений штриховая кривая соответствует давлению в жидкости, сплошная - давлению газа в пузырьках.

Причём наиболее высокие давления и температуры в газовой фазе (превышающие 100 МПа) при максимальной скорости течения пузырьковой жидкости на входе сопла, для которой давление жидкости в области

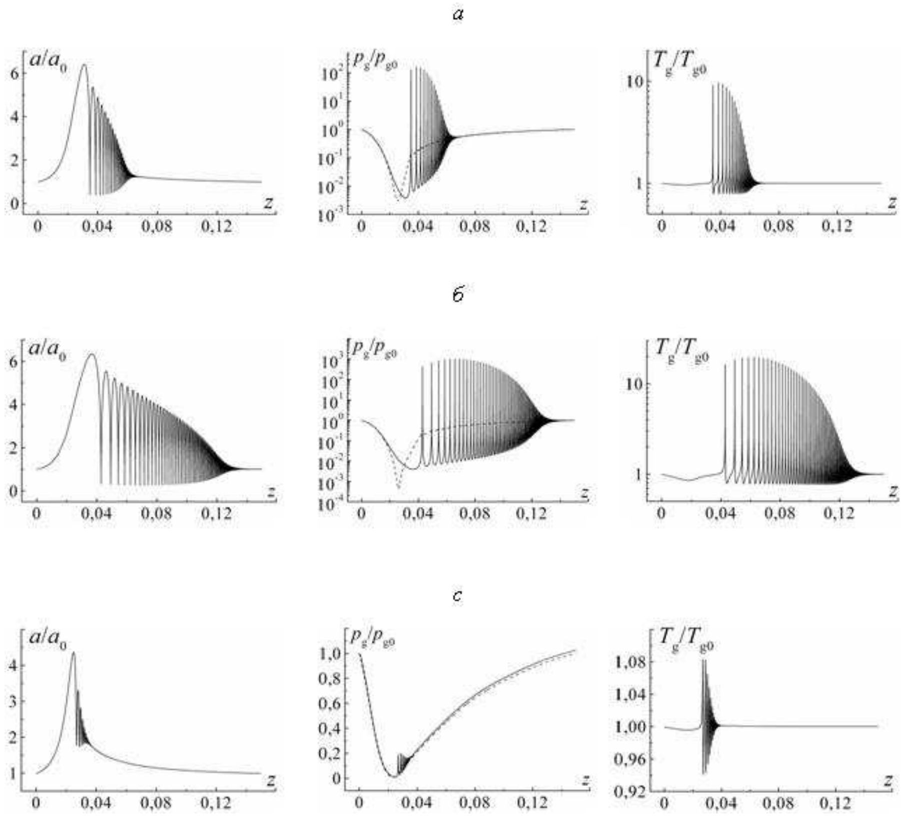

Рис. 2. Расчетные распределения безразмерного радиуса пузырьков, давления и температуры газа по длине сопла: **а)** $a_0 = 9 \cdot 10^{-5}$ м, $\alpha_{g0} = 10^{-4}$, $v_0 = 11.46$ м/с, $p_g^m = 32$ МПа, $T_g^m = 2900$ K; **б)** $a_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ м, $\alpha_{g0} = 2 \cdot 10^{-4}$, $v_0 = 11.45$ м/с, $p_g^m = 200$ МПа, $T_g^m = 5900$ K; **в)** $a_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ м, $\alpha_{g0} = 10^{-4}$, $v_0 = 11.45$ м/с

минимального сечения близко к нулю, возникают в более крупнодисперсных пузырьковых системах ($a_0 \geq 10^{-4}$ м). Это объясняется тем, что в данном случае удельная поверхность, через которую происходит теплообмен между газом в пузырьках и жидкостью, меньше и пузырьки в стадии сжатия ведут себя практически адиабатически (Рис. 2 (б)).

Колебания пузырьков в жидкостях с «меньшими» начальными радиусами ($a_0 \leq 5 \cdot 10^{-5}$ м) вследствие более сильного проявления поверхностных сил развиваются слабее и супервысокие давления и температуры в них практически не реализуются (Рис. 2 (в)).

Проведённые расчёты показывают, что характерная ширина зоны колебания пузырьков в сопле определяется начальными размерами пузырьков и расширяется при увеличении объёмного содержания газовой фазы смеси.

Отметим, что приведённые величины для распределений давления и температуры газа вдоль сопла соответствуют средним по пузырьку значениям. На самом деле процесс инерциального сжатия каждого отдельного пузырька представляет движение, сопровождаемое нелинейными газодинамическими эффектами, такими как образование ударных волн. Поэтому в центральных зонах пузырьков могут реализовываться в определённые моменты времени, существенно более высокие температуры и давления, чем полученные значения.

5 Заключение

Численный анализ для течения газожидкостной пузырьковой смеси в сопле подтверждает возможность получения супервысоких давлений и температур в газовой фазе изначально «холодной» пузырьковой системы в результате возникновения интенсивных нелинейных колебаний пузырьков в расширяющейся части сопла вблизи его минимального сечения. Отмечается, что наиболее высокие температуры и давления газа, при максимальной скорости течения жидкости на входе сопла реализуются в пузырьках превышающих 10^{-4} м в радиусе, вследствие их практически адиабатического поведения при пульсациях. Приведённые оценки и расчёты позволяют судить о том, что система пузырьковая жидкость - сопло может служить подходящим инструментом для реализации непрерывных технологических процессов, сопровождаемых супервысокими температурами и давлениями.

Список литературы

[1] Нигматулин Р. И., Шагапов В. Ш., Вахитова Н. К., Лэхи Р. Т. Метод сверхсильного сжатия газового пузырька в жидкости непериодическим вибрационным воздействием давления умеренной амплитуды // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 1. С. 37–41.

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

[3] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 2. М.: Наука, 1987. 356 с.

[4] Черный Г. Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988. 424 с.