

ОСОБЕННОСТИ АДИАБАТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ¹

Болотнова Р. Х. , Бузина В. А.*,** , Галимзянов М. Н.**

* Институт механики УНЦ РАН, Уфа

** ФГБОУ ВПО Башкирский государственный университет, Уфа

Аннотация. Исследованы адиабатические течения парогазожидкостной смеси. Получены зависимость давления от плотности смеси вдоль адиабаты Пуассона и адиабатическая скорость звука смеси в зависимости от давления, плотности и начального газосодержания.

Изучение процессов истечения вскипающих жидкостей является объектом повышенного внимания исследователей в связи с перспективами развития новых технологий совершенствования энергетического оборудования, связанных с возрастающими требованиями к обеспечению их безопасности.

В настоящей работе изучается влияние газосодержания на характеристики адиабатических течений таких, как давление, плотность смеси, адиабатическая скорость звука, применительно к задаче разгерметизации сосудов с недогретой жидкостью, вскипающей при резком падении давления [1].

На рис. 1 представлена схема процесса разгерметизации трубы высокого давления. В цилиндрической закрытой трубе первоначально находится недогретая до параметров насыщения вода.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (11-01-97004_r_поволжье и 11-01-00171-а), Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-4381.2010.1) и Программы фонда фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (ОЭ-14)

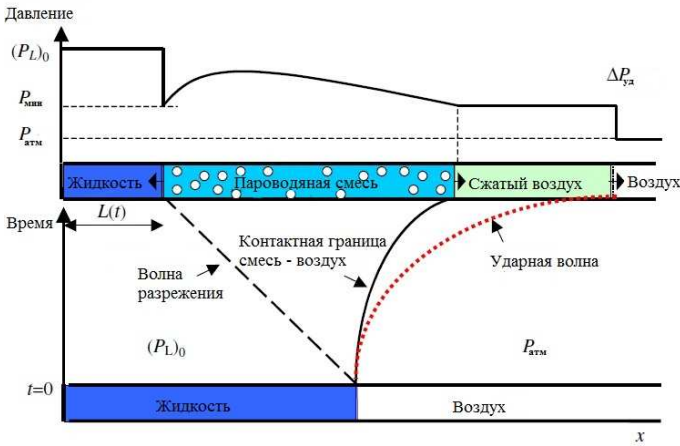


Рис. 1. Схема процесса разгерметизации трубы высокого давления

В момент времени $t = 0$ на одном из концов трубы заслонка удаляется, и начинается истечение кипящей жидкости в окружающую среду. При разгерметизации в результате распада разрыва в пузырьковую смесь распространяется волна разгрузки, а в воздух — ударная волна. Паросодержание за счет кипения существенно возрастает. На выходе из трубы скорость потока превышает скорость звука в смеси, что приводит к «запиранию» течения.

Рассмотрим выделенный объем V газожидкостной смеси с объемным содержанием жидкой α_l и газовой α_g фаз ($\alpha_l + \alpha_g = 1$). Из закона сохранения массы каждой фазы при отсутствии фазовых переходов в начальный и текущий моменты времени для выделенного объема смеси получим связь между плотностью и объемным содержанием для каждой фазы

$$m_{j0} = m_{j1} \Rightarrow \rho_{j0}^0 \frac{V_{j0}}{V_0} = \rho_{j1}^0 \frac{V_{j1}}{V_0} \Rightarrow \rho_{j0}^0 \frac{\alpha_{j0}}{\rho_j^0} = \frac{V_{j1}}{V_0} = \alpha_{j1} \frac{\rho_0}{\rho_1}. \quad (1)$$

Суммируя последнее равенство в (1) по каждой фазе, получим соотношение для определения текущей плотности смеси в зави-

симости от начальных значений плотности, газосодержания и текущих значений плотности каждой фазы:

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_0} = \frac{\alpha_{g0}\rho_{g0}^0}{\rho_{g1}^0(p)} + \frac{\alpha_{l0}\rho_{l0}^0}{\rho_{l1}^0(p)}, \quad (2)$$

где $\rho_1 = \rho_{l1}^0 \cdot \alpha_{l1} + \rho_{g1}^0 \cdot \alpha_{g1}$, ρ_0 — средняя текущая и начальная плотности смеси. Здесь и в дальнейшем нижний индекс $j = l, g$ относится к жидкой и паровой фазам воды, нижний цифровой индекс 0, 1 относится к начальному и текущему значению параметров смеси соответственно, а верхний нулевой индекс — к истинным значениям плотностей фаз.

Для описания термодинамических свойств каждой фазы используем широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара [2], в котором внутренняя энергия $e(\rho^0, T)$ и давление $p(\rho^0, T)$ представляются в виде суммы упругой и тепловой составляющих:

$$e(\rho^0, T) = e^{(p)}(\rho^0) + e^{(T)}(T), \quad (3)$$

$$p(\rho^0, T) = p^{(p)}(\rho^0) + p^{(T)}(\rho^0, T). \quad (4)$$

Холодная компонента энергии и давления описывается потенциалом типа Борна–Майера [2] и выражается в соответствии с термодинамическим тождеством [3]:

$$TdS = de + pdV. \quad (5)$$

Тепловые составляющие каждой фазы определяются в соответствии с условием термодинамической согласованности [3]:

$$p^{(T)}(\rho^0, T) = \Gamma_j(\rho^0)\rho^0 c_{V_j} T, \quad e_j^{(T)} = c_{V_j} T. \quad (6)$$

Используя первое начало термодинамики (5) при условии постоянства энтропии $dS = 0$ и с учетом уравнения состояния (3)–(6), получим адиабату Пуассона для каждой фазы, связывающую зависимость давления от плотности:

$$p(\rho^0, T) = p^{(p)}(\rho^0) + \Gamma_j(\rho^0)c_{V_j}\rho^0 T_0 \exp\left(\int_{\rho_{j0}^0}^{\rho^0} \frac{\Gamma_j(\rho)}{\rho} d\rho\right). \quad (7)$$

Адиабата Пуассона каждой фазы определялась численно методом Симпсона четвертого порядка точности. Используя уравнение для плотности смеси (2), в предположении, что каждая фаза сжимается по индивидуальной адиабате (7), получим адиабату Пуассона для смеси [4].

Дифференцируя (7) по плотности, получим адиабатическую скорость звука каждой фазы

$$C_j^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho^0} \right)_S = \frac{\partial p^{(p)}(\rho^0)}{\partial \rho} + c_{v_j} T \Gamma_j \left[\frac{\rho^0}{\Gamma_j} \frac{\partial \Gamma_j}{\partial \rho^0} + 1 + \Gamma_j \right]. \quad (8)$$

Производная (2) по давлению с учетом (1) дает уравнение для адиабатической скорости звука в газожидкостной смеси

$$C^2 = \frac{1}{\rho \left(\frac{\alpha_g}{\rho_g^0 C_g^2} + \frac{\alpha_l}{\rho_l^0 C_l^2} \right)}. \quad (9)$$

На рис. 2 представлены зависимости давления от относительной плотности смеси и различных объемных газосодержаний вдоль адиабаты Пуассона. С увеличением содержания газовой фазы пароводяная смесь сжимается сильнее. Если газовая фаза состоит из пара, то с ростом α_g сжимаемость пароводяной смеси выше, чем в случае газожидкостной смеси с газовой фазой «азот».

На рис. 3 представлены расчетные изобары скорости звука пароводяной смеси. При увеличении газосодержания адиабатическая скорость звука значительно уменьшается и приобретает минимальное значение при $0.65 < \alpha_g < 0.95$, что соответствует состоянию пенной структуры пароводяной смеси. Сравнительный анализ приведенных зависимостей показывает, что скорость звука при увеличении давления возрастает. Инверсия пузырьковой структуры в парокпельную происходит при $\alpha_g \approx 0.95$, т.е. в области газосодержаний, соответствующих минимальной скорости звука [5].

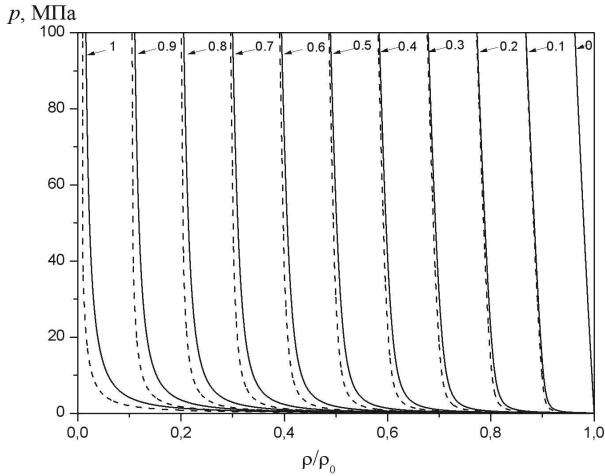


Рис. 2. Адиабаты Пуассона для газожидкостной смеси в случае газовой фазы «пар» (пунктир) и «азот» (сплошная) в зависимости от плотности смеси при различных начальных газосодержаниях

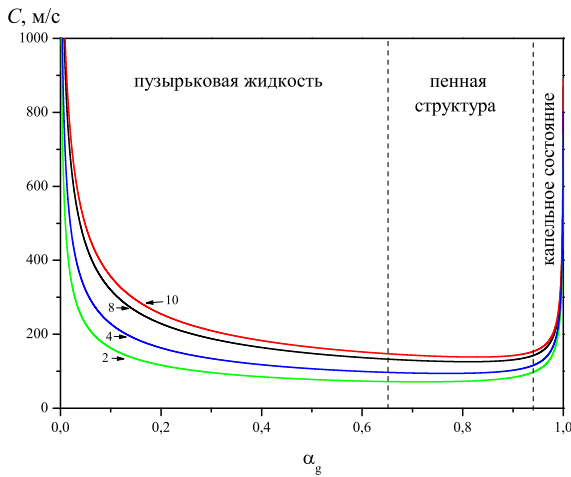


Рис. 3. Расчетные изобары адиабатической скорости звука пароводяной смеси при $T = 515K$ в зависимости от паросодержания. Числовые указатели соответствуют давлению (МПа)

Таким образом, в работе получены параметры адиабатических течений парожидкостной смеси на основе законов сохранения массы каждой фазы. С использованием широкодиапазонного уравнения состояния воды и пара рассчитана адиабатическая скорость звука в пароводяной смеси в зависимости от давления, плотности и газосодержания.

Полученные в работе решения для скорости звука в пароводяной смеси позволили оценить режимы скоростных потоков вскипающей жидкости при разгерметизации трубы высокого давления, приводящих к звуковому запираанию, наблюдаемому в экспериментах [1]. Были определены величины газосодержаний, при которых происходит инверсия пузырьковой структуры в парокапельную [5].

Список литературы

- [1] Edwards A. R., O' Brien T. P. Studies of phenomena connected with the depressurization of water reactors // Journal of The British Nuclear Energy Society. 1970. Vol. 9, № 1–4. P. 125–135.
- [2] Нигматулин Р. И., Болотнова Р. Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.
- [3] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред // М.: Наука. 1987. Ч. 1. 464 с. Ч. 2. 360 с.
- [4] Бузина В. А. Характеристики адиабатических течений и скорости звука в парожидкостной смеси // Сборник трудов Всероссийской научной конференции с международным участием «Дифференциальные уравнения и их приложения». Стерлитамак. 2011. С. 240–243.
- [5] Фисенко В. В. Критические двухфазные потоки // М.: Атомиздат. 1978. 160 с.