

Особенности распространения ударных волн в водных пенах с неоднородной плотностью¹

Болотнова Р.Х., Агишева У.О.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

Проведены численные исследования и сравнение с экспериментальными данными процесса взаимодействия ударной волны с преградой из водной пены с учетом изменения плотности пенной завесы с течением времени. Произведена оценка эффективности демпфирующих свойств пенных барьеров в зависимости от водосодержания.

1. Введение

Среди различных материалов, способных рассеивать и поглощать энергию взрыва и применяемых для защиты зданий, сооружений, транспортных средств, водные пены наиболее удобны, если время и место взрыва известны заранее. С помощью механизмов диссипации и преобразования энергии газожидкостные пены хорошо справляются с задачами шумоподавления, эффективно снижают ущерб от технологических взрывов (возникающих, например, в горнодобывающей промышленности, при сварке или резке взрывом). Способность пенных структур уменьшать все основные характеристики ударных волн (УВ) впервые была обнаружена при исследованиях ударного нагружения пузырьковых экранов, проводившихся Р.И. Нигматулиным [1], В.К. Кедринским [2].

Исследования показали, что затухание мощности УВ в таких барьерах зависит от нескольких параметров: плотности пены (объемной доли и состава фаз) и характеристик ударной волны (амплитуды, длительности). Самопроизвольное разрушение пены происходит под влиянием синерезиса, определяемого гравитационными силами, капиллярным всасыванием и процессом слияния пузырьков, вследствие чего образующаяся жидкость стекает вниз по каналам между пузырьками. Нестабильная структура пены способствует ее разрушению при воздействии УВ.

Плотность пенной защиты изменяется в зави-

симости от водосодержания $\rho_f = \alpha_l \rho_l + (1 - \alpha_l) \rho_g$, где ρ_l , ρ_g — плотности жидкости и газа соответственно. Демпфирующая способность пены существенно зависит от сжимаемости ее ячеек: меру ее сжимаемости определяет скорость звука C_f . Она уменьшается с 330 м/с в чистом газе ($\alpha_l = 0$) до ≈ 50 м/с ($\alpha_l = 0.5$) при прохождении через водную пену или пузырьковую жидкость [3]. Возрастание водосодержания постепенно увеличивает C_f до 1500 м/с соответственно. Когда содержание воды приближается к нулю в отстоявшейся пене, даже малое изменение α_l приводит к сильному изменению C_f .

Особое значение плотности пены для ослабления акустических и ударных волн было хорошо изучено в экспериментах, но ясного теоретического объяснения этого физического явления до сих пор нет [4]. В работе [5] отмечалось, что водные пены с содержанием воды $0.006 < \alpha_l < 0.05$ служат оптимальной защитой от звуковых волн. Авторы [6] экспериментально и численно исследовали роль процесса синерезиса в изменении демпфирующей способности пены в малых промежутках времени; в работе [7] экспериментально исследованы более длительные промежутки отстаивания пены, что предпочтительнее с практической точки зрения. Согласно экспериментальным данным [8] степень защиты зависит также от расстояния до заряда и его массы. В работе [9] экспериментально исследовано влияние угольной пыли на процесс синерезиса: из-за закупоривания каналов между пузырьками частицами пыли процесс старения пены замедляется, и происходит потеря энергии волны за счет трения. Следовательно, добавки из угольной пыли эффективно поддерживают демпфирующие способности пенной

¹Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (11-01-97004_р_поволжье и 11-01-00171-а), Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-834.2012.1) и Программы фонда фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (ОЭ-13)

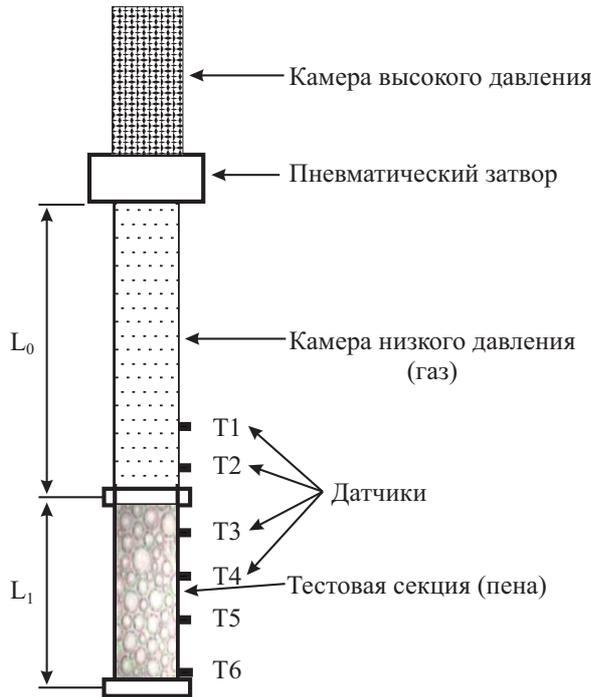


Рис. 1. Схема ударной трубы

преграды достаточно длительное время.

В настоящей работе проводится численное исследование распространения ударной волны в однородных и неоднородных газожидкостных пенах на базе экспериментальных данных работы [7]. Авторы [7] провели экспериментальные исследования прохождения ударных волн в пенах на различных стадиях синерезиса. Исследование проводилось в бездиафрагмальной ударной трубе (рис. 1), состоящей из камеры высокого давления для генерации ударных волн и камеры низкого давления из двух секций: первая заполнена воздухом ($L_0 = 3$ м), вторая — пеной ($L_1 = 0.363$ м). Быстро открывающийся пневматический затвор обеспечил точное воспроизведение волны в экспериментах. Тестовая секция по всей длине заполнялась свежей пеной и присоединялась к нижней части канала. В экспериментах использовались образцы пены с постоянным начальным водосодержанием $\alpha_l = 0.2$. Скорость распространения воздушной ударной волны поддерживалась равной 430 м/с. При проведении испытаний менялся только один параметр — время отстаивания пены до прихода ударной волны ($0 \leq \Delta t \leq 60$ мин). Координаты датчиков давления от начала тестовой секции следующие: $x_{T_1} = -0.193$ м, $x_{T_2} = -0.093$ м, $x_{T_3} = 0.034$ м, $x_{T_4} = 0.128$ м, $x_{T_5} = 0.228$ м, $x_{T_6} = 0.363$ м. В настоящей работе численно моделировалось распространение УВ

в заполненной пеной секции. Расчеты проводились для свежей (время синерезиса 5 мин) и отстоявшейся (время синерезиса 20 мин) пены. Также исследовались демпфирующие свойства пенных барьеров различной плотности, находящихся перед защищаемым объектом.

2. Основные уравнения модели

Расчеты проводились на основе уравнений гидродинамики двухфазной среды [1] в одностепенном, односкоростном приближении с равным давлением в фазах. Поскольку плотность пены по толщине трубы однородна, а изменение плотности происходит только в направлении распространения УВ, то допущение одномерности модели является правомерным. Система уравнений в лагранжевых переменных включает законы сохранения массы для каждой фазы, импульса и энергии смеси.

Законы сохранения массы 1 и 2 фаз:

$$\frac{\alpha_l}{\rho} \frac{\partial \rho_l^0}{\partial t} + \frac{\rho_l^0}{\rho} \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} = -\frac{\rho_l}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r} = b_1, \quad (1)$$

$$\frac{1 - \alpha_l}{\rho} \frac{\partial \rho_g^0}{\partial t} - \frac{\rho_g^0}{\rho} \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} = -\frac{\rho_g}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r} = b_2. \quad (2)$$

Законы сохранения импульса и энергии для смеси:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r}, \quad (3)$$

$$\frac{\rho_l}{\rho} \left(\frac{\partial e_l}{\partial \rho_l^0} \right)_T \frac{\partial \rho_l^0}{\partial t} + \frac{\rho_g}{\rho} \left(\frac{\partial e_g}{\partial \rho_g^0} \right)_T \frac{\partial \rho_g^0}{\partial t} + \frac{\rho_l}{\rho} \left(\frac{\partial e_l}{\partial T} \right)_{\rho_l^0} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_g}{\rho} \left(\frac{\partial e_g}{\partial T} \right)_{\rho_g^0} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{p}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r}. \quad (4)$$

Условие равенства давлений фаз используется в дифференциальной форме:

$$\left(\frac{\partial p_l}{\partial \rho_l^0} \right)_T \frac{\partial \rho_l^0}{\partial t} - \left(\frac{\partial p_g}{\partial \rho_g^0} \right)_T \frac{\partial \rho_g^0}{\partial t} + \left(\frac{\partial p_l}{\partial T} \right)_{\rho_l^0} \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\frac{\partial p_g}{\partial T} \right)_{\rho_g^0} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

$$v(t, r) = \frac{dx}{dt},$$

где ρ_i^0 и $\rho_i = \rho_i^0 \cdot \alpha_i$ — текущая и приведенная плотности i -ой фазы; $\rho = \rho_l^0 \cdot \alpha_l + \rho_g^0 \cdot \alpha_g$ — средняя плотность смеси; ρ_0 — начальная средняя плотность среды; α_i — объемное содержание ($i = l$ — жидкая фаза, $i = g$ — газовая); T — температура фаз; r — лагранжева координата; x — эйлерова координата; v — массовая скорость. $p_i(\rho_i^0, T)$ и $e_i(\rho_i^0, T)$ — давление и внутренняя энергия фаз, определяемые с помощью уравнения состояния.

Для жидкости примем используемое в работе [10] уравнение состояния воды в форме Ми-Грюнайзена в виде суммы потенциальной $(p^{(p)}, e^{(p)})$ и тепловой $(p^{(T)}, e^{(T)})$ составляющих для давления и внутренней энергии соответственно, где коэффициент Грюнайзена Γ не зависит от температуры и теплоемкости газаб и жидкости постоянны. Холодные составляющие давления и энергии описываются потенциалом типа Борна-Майера и связаны между собой:

$$e^{(p)}(\rho_l) = \int_{\rho^0}^{\rho_l} \frac{p^{(p)}(\rho_l)}{\rho_l^2} d\rho_l.$$

Тепловая составляющая определяется следующим образом:

$$p^{(T)}(\rho_l, T) = \Gamma(\rho_l) c_{Vl} \rho_l T, \quad e^{(T)} = c_{Vl} T.$$

Для газовой фазы принимается уравнение состояния совершенного газа:

$$p = \rho_g R T = \rho_g (\gamma - 1) c_{Vg} T, \quad \gamma = c_{pg} / c_{Vg}.$$

Начальные и граничные условия для задачи соответствуют схеме эксперимента:

$$t=0: 0 \leq r \leq L_0 + L_1: v(0, r) = 0, p(0, r) = 1 \text{ bar},$$

$$\alpha_l(0, r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq L_0, \\ \alpha_{l0}(0, r), & L_0 \leq r \leq L_0 + L_1. \end{cases} \quad (6)$$

$$T_1 = T_2 = 293 \text{ K},$$

$$\rho_l^0(0, r) = \rho_l^0(p_0, T_0), \rho_g^0(0, r) = \rho_g^0(p_0, T_0).$$

где $r = 0: v(t, 0) = v(t)$ — закон движения поршня; $r = L: v(t, L) = 0$ — условие жесткой стенки.

3. Моделирование процесса распространения ударной волны в пене и сравнение с экспериментальными данными

Прохождение ударной волны резко изменяет свойства пены: ее плотность возрастает, меняется содержание жидкой фазы, граница пены сдвигается. В свою очередь структура пены влияет на интенсивность волны. Были проведены численные исследования основных закономерностей распространения волны в пенах с различной плотностью в условиях экспериментов [7]. Расчеты по приведенной модели сравнивались с показаниями датчиков, находящихся на стенках ударной трубы в различных точках согласно рис. 1. На левой границе использовалось неотражающее условие, на правой — жесткой стенки.

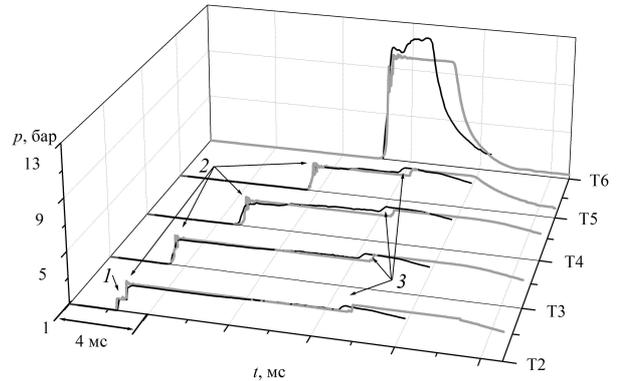


Рис. 2. Сравнение расчетных (светлые линии) и экспериментальных (темные линии) осциллограмм давления на датчиках в ударной трубе. Время синерезиса $t_S = 5$ мин

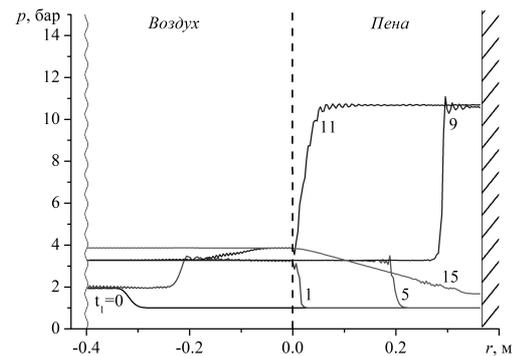


Рис. 3. Расчетные профили давления в зависимости от лагранжевой координаты r вблизи границы пены. Время стекания $t_S = 5$ мин

На первом этапе исследований (рис. 2–3) проводилось моделирование экспериментов по прохождению ударной волны по свежей пене, находящейся в тестовой секции в течение 5 мин.

Отметим несколько основных закономерностей: на датчике $T2$ первое повышение давления (обозначено 1) связано с приходом воздушной ударной волны. На рис. 3 этому соответствует волна, проходящая по заполненной газом секции в момент времени t_1 , принятый на рис. 3, 6–8 за начальный. Взаимодействие воздушной волны с более плотным пенным слоем создает отраженную ударную волну и вызывает второе повышение давления на датчике $T2$ (см. рис. 3 при $t = 1$ мс). Величина этого скачка зависит от плотности пены: чем меньше жидкости на ее поверхности, тем более слабой будет отражен-

ная ударная волна. Первые скачки давления на последующих датчиках ($T3-T6$) — это время прихода ударной волны, прошедшей в пену. В образце пены волна значительно теряет скорость, доходит до жесткой стенки, отражается от нее (см. рис. 3 при $t = 9$ мс) и возвращается назад по уже сжатому проходящей волной образцу. Далее волна возвращается из пены в воздушную секцию (см. рис. 3 при $t = 11$ мс), при этом давление на фронте существенно понижается и начинается постепенное падение давления в пене (см. рис. 3 при $t = 15$ мс). Прибытие на датчики отраженной от твердой стенки волны на рис. 2 обозначено цифрой 3, и из сравнения видно, что в расчетах эта волна незначительно запаздывает, что, вероятно, объясняется различием в распределении жидкой фазы (в эксперименте за 5 мин жидкость может успеть немного стечь, следовательно, поверхность пены отразит более слабую ударную волну, а волна, прошедшая в пену, будет иметь большую скорость; в расчетах же использовалась однородная пена с содержанием воды 0.2 по всей длине столба).

Спустя 20 мин в процессе синерезиса структура пены становится существенно неоднородной: в силу вертикальности ударной трубы содержание воды резко уменьшается в верхней части и увеличивается в нижней. К тому же отток воды во время старения пены приводит к образованию прослойки воды у твердой стенки, толщина которой со временем растет, что ухудшает демпфирующие способности пены. Для численного моделирования содержание воды в пене подбиралось в соответствии с экспериментальными данными в нескольких точках столба пены и высоте прослойки воды. На рис. 4 показана линия, аппроксимирующая водосодержание в пене по экспериментальным данным [7] и используемая в расчетах в качестве начального распределения α_l .

Процесс прохождения ударной волны в таких пенах аналогичен предыдущему эксперименту на свежей пене (рис. 5, 6). Отличительной особенностью является более низкое водосодержание в верхних слоях пены, которые отражают более слабую волну, а проходящая волна выше по давлению и имеет большую скорость в силу неоднородности пены. По мере того, как волна входит в среднюю область образца пены, плотность постепенно растет, и скорость движения волны уменьшается. Сравнивая экспериментальные и расчетные кривые на рис. 5, можно заметить что в расчетах волна запаздывает на датчиках $T3$, $T4$, что объясняется различием между реальным содержанием жидкости в пене в эксперименте и ее приближением. Появление на датчиках отраженной волны, отмеченное цифрой 3, происходит своевременно на всех датчиках, кроме

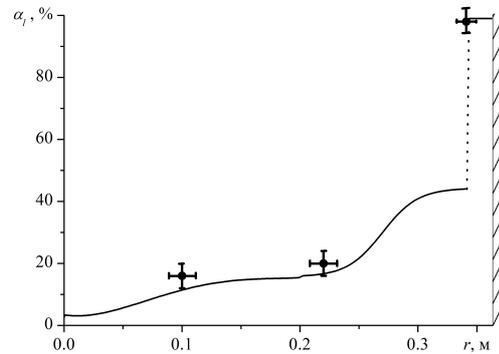


Рис. 4. Линия, определяющая в расчетах водосодержание в пене, полученная на основе аппроксимации экспериментальных данных [7]. Время синерезиса $t_S = 20$ мин (● экспериментальные данные)

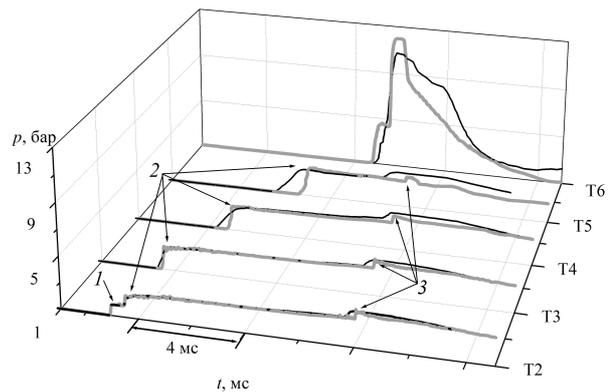


Рис. 5. Сравнение расчетных (светлые линии) и экспериментальных (темные линии) осциллограмм давления на датчиках в ударной трубе. Время стекания пены $t_S = 20$ мин

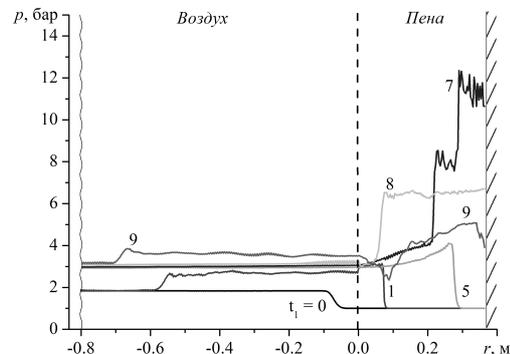


Рис. 6. Расчетные профили давления в зависимости от лагранжевой координаты r вблизи границы пены. Время стекания $t_S = 20$ мин

T_5 , вблизи которого имеются различия в водосодержании между расчетом и экспериментом.

Таким образом, экспериментальные и численные исследования наглядно показали роль синерезиса пены в снижении ее демпфирующей способности: чем дольше происходит процесс старения пены, тем меньше она ослабляет проходящий импульс давления.

4. Исследование демпфирующих характеристик пенного барьера

Для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов резки, сварки и обработки материалов с использованием энергии взрыва в городских условиях и ликвидации последствий аварий технически удобно использовать мобильные преграды из водных пен, эффективно локализирующие действие взрыва, но при этом не снижающих его эффективности. Создание такого барьера требует тщательного анализа структуры и плотности пены, подходящей для заложенной силы взрыва, поскольку из-за нестабильной структуры барьер может быть разрушен ударной волной, не уменьшив значительно ее силы. Как показывает практика, основное поглощение энергии УВ происходит за счет увеличения массовой скорости пены и сжимаемости ее ячеек.

Численное моделирование взаимодействия ударной волны с пенным барьером толщиной 0.5 м (содержание воды $\alpha_{l0} = 0.2$) проиллюстрировано на рис. 7–8. За начальный момент принято время формирования импульса вблизи пенного барьера. Как показано на рис. 8 через 2 мс УВ достигает пенного барьера, и происходит сжатие пены (содержание воды α_l в первых ячейках пены растет с 0.2 до 0.45, наблюдается незначительное уменьшение ширины барьера). Предельное содержание воды в пене при сжатии ударной волной не превышает $\alpha_l = 0.5$, поскольку при этом значении α_l достигается минимальная скорость звука [3]. Постепенно вся преграда приходит в движение с уменьшением толщины и ростом α_l . Когда УВ выходит в газ, ее интенсивность снижается в 1.5 раза, и в слое пены начинается постепенное падение давления, приводящее к расширению пенного барьера и уменьшению α_l (см. рис. 7–8 при $t = 14$ мс).

Исследования при варьировании начальной плотности пенного барьера показали, что возрастание начального α_l улучшает демпфирующие способности пены, и волна, прошедшая через барьер, имеет все меньшую интенсивность (рис. 9). В дальнейшем важно оценить какого снижения давления требует обеспечение пожаро- и взрывобезопасности

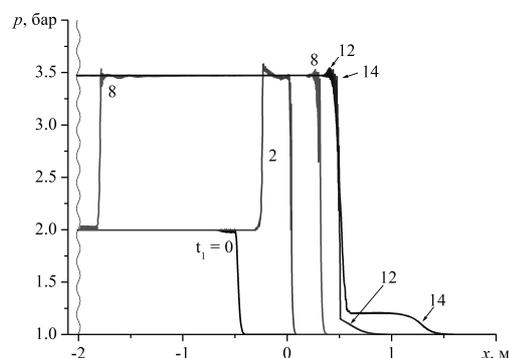


Рис. 7. Расчетные профили давления в зависимости от эйлеровой координаты x вблизи границы пены

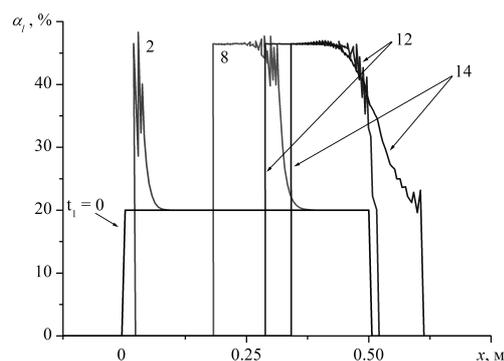


Рис. 8. Расчетные профили водосодержания α_l в зависимости от эйлеровой координаты x вблизи границы пены

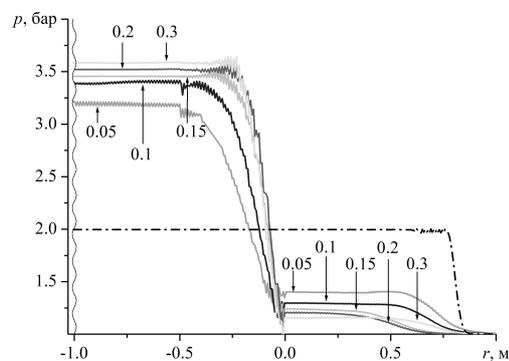


Рис. 9. Расчетные профили давления на фронте ударной волны при выходе из пены с различным содержанием воды α_l

выбранного технологического процесса, учесть наличие пара в газовой фазе и потери энергии на конденсацию при прохождении УВ.

5. Заключение

В работе проведено численное исследование процесса взаимодействия ударной волны с преградой из водной пены на основе уравнений гидродинамики двухфазной среды в однотемпературном, однокоростном приближении с равным давлением в фазах. Было получено удовлетворительное согласование с экспериментальными данными по динамике ударной волны в однородной (время синерезиса 5 мин) и неоднородной (время синерезиса 20 мин) водных пенах. Численно подтверждено снижение защитных способностей такой преграды с течением времени.

Исследования эффективности барьеров из водных пен различной плотности показали, что снижение интенсивности волны в преграде тем больше, чем выше α_l . Если газожидкостная смесь находится в парокпельном состоянии, существенного снижения давления не происходит. В дальнейших исследованиях планируется учесть наличие пара в газовой фазе и оценить влияние фазовых переходов в пене на демпфирующие свойства пенного барьера в УВ.

Список литературы

- [1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. 1987. 360 с.
- [2] Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. 435 с.
- [3] Агишева У.О., Болотнова Р.Х., Бузина В.А., Галимзянов М.Н. Параметрический анализ режимов ударно-волнового воздействия на газожидкостные среды // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2012. № 5. (в печати).
- [4] Schmidt E.M., Kahl G.D. Gaseous blast reducer. US Patent N4, 392412. 1983.
- [5] Shea J.W., Pater L.L. Foam filled muzzle blast reducing device. US Patent N4, 454798. 1984.
- [6] Васильев Е.И., Митичкин С.Ю., Тестов В.Г., Ху Хайбо. Численное моделирование и экспериментальное исследование влияния процесса синерезиса на распространение ударных волн в газожидкостной пене // Журнал технической физики. 1997. № 11. С.1–9.
- [7] Britan A., Ben-Dor G., Shapiro H., Liverts M., Shreiber I. Drainage effects on shock wave propagating through aqueous foams // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2007. № 309. Pp. 137–150.
- [8] Raspet R., Griffiths S. K. The reduction of blast noise with aqueous foam. // Journal of Acoustical Society of America. 1983. № 74. Pp. 1757–1763.
- [9] Britan A., Liverts M., Ben-Dor G. Shock wave propagation through wet particulate foam // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2011. № 382. Pp. 145–153.
- [10] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.