

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДВОДНЫХ ВЫБРОСОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ВИДЕ МНОГОФАЗНОЙ СТРУИ

© 2024 г. И. К. Гималтдинов^{а, *}, М. В. Столповский^а, Е. Ю. Кочанова^а

^аФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
ул. Космонавтов 1, Уфа, 450064 Россия

*e-mail: iljas_g@mail.ru

Поступила в редакцию 09.09.2023 г.

После доработки 15.12.2023 г.

Принята к публикации 28.02.2024 г.

Численно исследовано взаимодействие импульса давления с газожидкостной зоной, являющейся сечением затопленной многофазной струи, состоящей из смеси воды и нефти и содержащей пузырьковое ядро из метана. Показана возможность определения степени расширения струи, объемного содержания нефти и газа в струе по отраженным сигналам.

Ключевые слова: импульс давления, отражение от границ, многофазная струя, газожидкостная зона, смесь нефти и воды

DOI: 10.31857/S0320791924020047, EDN: YNNBCM

ВВЕДЕНИЕ

Освоение морских ресурсов шельфовой зоны базируется на использовании современных средств и методов экологического мониторинга антропогенного воздействия на окружающую среду. Например, транспортировка нефти и газа на шельфе может сопровождаться авариями, при которых происходят выбросы нефти и газа в водную среду из поврежденных трубопроводов. Одним из основных методов исследования океана является акустический метод [1]. По характеру распространения и отражения акустической волны в результате взаимодействий с неоднородной средой в океане можно получать информацию о свойствах среды, решая так называемые обратные задачи [2, 3]. Состоящая из нефти и газа затопленная струя, истекающая из поврежденного трубопровода, из-за содержания нефти и газа является акустически более мягкой средой по сравнению с окружающей водой [4, 5]. Это дает основания полагать, что по изучению отражения и прохождения волн давления через зону, занятую многофазной струей, можно определить некоторые характеристики струи.

Данная работа посвящена численному исследованию динамики импульсов давления, отраженных от границ пузырьковой завесы, состоящей из водонефтяной смеси и пузырькового ядра из газа — метана.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Пусть на дне водоема из поврежденного трубопровода истекает смесь нефти и газа — метана в виде струй. По мере распространения вверх струя постепенно расширяется из-за вовлечения окружающей воды, т.е. струя является газожидкостной смесью, состоящей из воды, нефти и газа, причем пузырьки газа образуют пузырьковое ядро [6]. Для определения некоторых характеристик струи (степени расширения, объемных содержаний газа и нефти) рассмотрим динамику волны давления при взаимодействии со струей.

Для описания приведенной выше физической модели представим следующую математическую модель. Рассмотрим динамику двумерных волновых возмущений в канале длиной L_x и высотой L_y , заполненном водой, содержащей зону с водонефтяной смесью (x_1, x_2, x_2', x_1') , внутри которой есть пузырьковое ядро (x_1, x_2, x_2', x_1') , состоящее из пузырьков метана (рис. 1). Будем полагать, что зона с водонефтяной смесью, содержащая пузырьковое ядро, является сечением многофазной затопленной струи. Инициирование волнового импульса в области расчета происходит при кратковременном повышении давления на границе $x = 0$. Требуется определить, как изменяются амплитуда, протяженность, форма волнового импульса при взаимодействии с зоной, занятой многофазной струей, и на основе этих данных описать некоторые

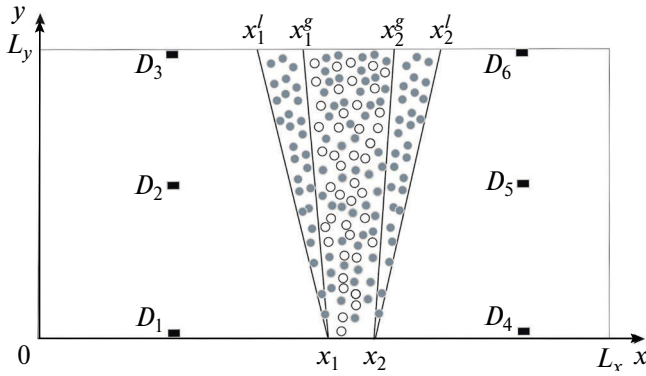


Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области. D_1 – D_6 – датчики давления.

характеристики (степень расширения, объемные содержания газа и нефти) струи.

Для описания волнового движения, принимая общие допущения для пузырьковых жидкостей, запишем систему макроскопических уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках [7]

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= 0 \quad (i = l, g), \\ \frac{dn}{dt} + n \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= 0, \quad \rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \\ \rho \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial y} &= 0, \quad \rho = \rho_g + \rho_l, \\ \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right), \\ \alpha_l + \alpha_g &= 1, \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_i^0 , α_i , p_l , n , a – соответственно плотность, объемное содержание i -й фазы, давление несущей жидкости, число и радиус пузырьков, u и v – проекции скорости на оси координат x и y соответственно. Нижними индексами $i = l, g$ отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

Будем полагать, что жидкая фаза в области струи состоит из смеси нефти и воды с объемными содержаниями α_{o0} и α_{w0} , поэтому плотность жидкости запишем в виде

$$\rho_l^0 = \alpha_o \rho_o^0 + \alpha_w \rho_w^0.$$

При описании радиального движения вблизи пузырьков будем полагать, что $w = w_A + w_R$, где w_R определяется из уравнения Рэлея–Ламба, w_A

определяется из решения задачи о сферической разгрузке на сфере радиуса a в несущей жидкости в акустическом приближении:

$$a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4\nu_l \frac{w_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0}, \quad w_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

где $\nu_l = \alpha_o \nu_o + \alpha_w \nu_w$ – вязкость жидкости, $C_l = \alpha_o C_o + \alpha_w C_w$ – скорость звука в водонефтяной смеси.

Будем полагать, что жидкость является акустически сжимаемой, а газ – калорически совершенным,

$$p_l = p_0 + C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad p_g = \rho_g^0 B T_g,$$

где B – газовая постоянная. Здесь и в дальнейшем нижний индекс 0 относится к начальному невозмущенному состоянию.

Уравнение для давления внутри пузырьков с учетом однородности давления записывается в виде [7]:

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma - 1)}{a} q.$$

Интенсивность межфазного теплообмена примем в виде:

$$q = \frac{\lambda_g \text{Nu} (T_g - T_0)}{2a},$$

где температура жидкости $T_0 = \text{const}$.

Числа Нуссельта и Пекле имеют вид:

$$\text{Nu} = \begin{cases} \sqrt{\text{Pe}}, & \text{Pe} \geq 100 \\ 10, & \text{Pe} < 100 \end{cases}, \quad \text{Pe} = 12(\gamma - 1) \frac{T_0}{|T_g - T_0|} \frac{a|w|}{\kappa_g},$$

$$\kappa_g = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_{g0}}.$$

Методика численного решения задачи описана в [8].

НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Условия при $t = 0$, соответствующие исходному состоянию системы, состоящей из областей воды, водонефтяной смеси и пузырькового ядра, разделенных границами с наклоном, запишутся в виде:

$$u = v = 0, \quad p_l = p_0, \quad p_g = p_0, \quad a = a_0, \quad w = 0,$$

$$T_g = T_0, \quad \rho = \rho_{l0}^0 (1 - \alpha_{g0}),$$

$$\alpha_l = \begin{cases} \alpha_{w0} + \alpha_{o0}, & (x, y) \in \Omega_1, \\ \alpha_{w0}, & (x, y) \notin \Omega_1, \end{cases}$$

$$\alpha_g = \begin{cases} \alpha_{g0}, (x, y) \in \Omega_2, \\ 0, (x, y) \notin \Omega_2, \end{cases}$$

$$\Omega_1 = \begin{cases} 0 \leq y \leq L_y, \\ x_1' - \frac{y - L_y}{L_y}(x_1 - x_1') \leq x \leq x_2' + \frac{y - L_y}{L_y}(x_2 - x_2'), \end{cases}$$

$$\Omega_2 = \begin{cases} 0 \leq y \leq L_y, \\ x_1^g - \frac{y - L_y}{L_y}(x_1 - x_1^g) \leq x \leq x_2^g + \frac{y - L_y}{L_y}(x_2 - x_2^g). \end{cases}$$

Иницирующее возмущение давления на границе пузырьковой жидкости ($x = 0$) задается в виде колоколообразного импульса. Соответствующее граничное условие запишется в виде:

$$p_l(t, y) = \begin{cases} p_0 + \Delta p_0 \exp\left(-\left(\frac{t - t_*/2}{t_*/6}\right)^2\right), & 0 < t < t_*, \\ p_0, & t > t_* \end{cases},$$

при $x = 0$, где Δp_0 – амплитуда давления, t_* – характерная протяженность импульса. На границах $y = 0$ и $y = L_y$ расчетной области приняты условия как на жесткой стенке, т.е. равенство нулю нормальной компоненты скорости. На границе $x = L_x$ задается неотражающее граничное условие на основе импедансного соотношения [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Под действием граничного давления в канале формируется колоколообразный импульс давления амплитудой 5 бар, распространяющийся по направлению оси Ox (рис. 2а). При взаимодействии импульса с границами “вода–водонефтяная смесь” и “водонефтяная смесь–газожидкостное ядро” происходит его частичное отражение,

которое для обеих границ аналогично отражению от свободной поверхности [10] (рис. 2б), т.е. водонефтяная зона акустически более мягкая среда, чем вода, а пузырьковое ядро акустически более мягкое, чем водонефтяная смесь. В дальнейшем импульс проходит через границы “газожидкостное ядро–водонефтяная смесь” и “водонефтяная смесь–вода”. На этих границах отражение импульса аналогично отражению от жесткой стенки. На рис. 2в видны отраженные волны от границ газожидкостной зоны, распространяющиеся к границе $x = 0$, и первоначальный импульс, распространяющийся в положительном направлении оси Ox .

Осциллограммы для датчиков D_3, D_2, D_1 представлены на рис. 3. Для датчика D_3 первый всплеск (эпюра i) соответствует первоначальному импульсу амплитудой 5 бар. После взаимодействия с границей “вода–водонефтяная смесь–пузырьковое ядро” импульс отражается как от свободной границы [10] с амплитудой около 0.5 бар – сигнал r_1 , далее импульс отражается от границы “газожидкостная среда–водонефтяная смесь–вода” как от твердой стенки – сигнал r_2 .

Как было отмечено выше, отраженный сигнал r_1 является волной разрежения из-за меньшего значения акустического сопротивления зоны, значительного многофазной струей, по сравнению с аналогичным значением для воды. Чем больше расстояние от датчика до границы газожидкостной зоны, тем позже отраженный сигнал доходит до датчика. По времени появления отраженных сигналов до датчиков можно судить о степени расширения струи, при условии, что расположение датчиков по оси абсцисс одинаково. Кроме этого, по временному промежутку между отраженными сигналами r_1 и r_2 можно рассчитать положение границ, если известны параметры газожидкостной смеси. Отметим, что амплитуда отраженных сигналов r_2 растет с увеличением координаты y , т.е. датчик D_3 регистрирует сигнал r_2 , больший по амплитуде, чем регистрирует датчик D_1 . Такое увеличение

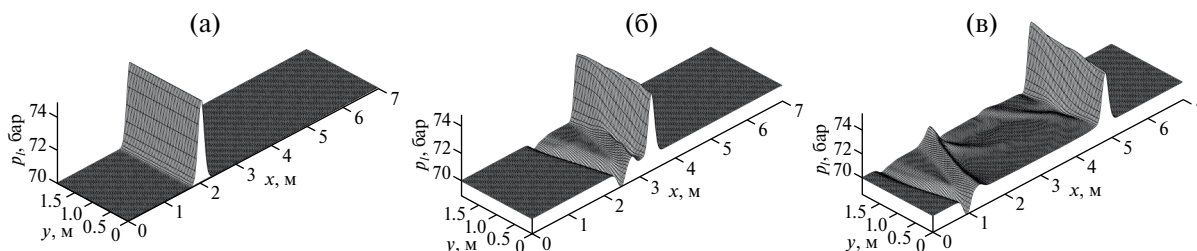


Рис. 2. Эпюры давления в моменты (а) – 1.62 мс, (б) – 2.5 мс, (в) – 3.5 мс. Параметры расчета: жидкость – в области газожидкостной зоны: смесь нефти и воды с объемными содержаниями $\alpha_{o0} = 0.75$ и $\alpha_{w0} = 0.25$, газ – метан: $\alpha_{g0} = 0.001$, $a = 1.25$ мм, $x_1 = 2.95$ м, $x_2 = 3.05$ м, $x_2' = 3.3$ м, $x_1' = 2.7$ м, $x_2^g = 3.2$ м, $x_1^g = 2.8$ м, $\Delta p_0 = 0.5$ МПа, $\rho_{o0}^0 = 830$ кг/м³, $\rho_{w0}^0 = 1000$ кг/м³, $v_o = 10^{-2}$ м²/с, $v_w = 10^{-6}$ м²/с, $C_o = 1225$ м/с, $C_w = 1500$ м/с, $\rho_{g0}^0 = 50.19$ кг/м³, $c_g = 2220$ Дж/кг К, $\lambda_g = 0.03$ Вт/м К, $T_0 = 300$ К, $p_0 = 7.0$ МПа.

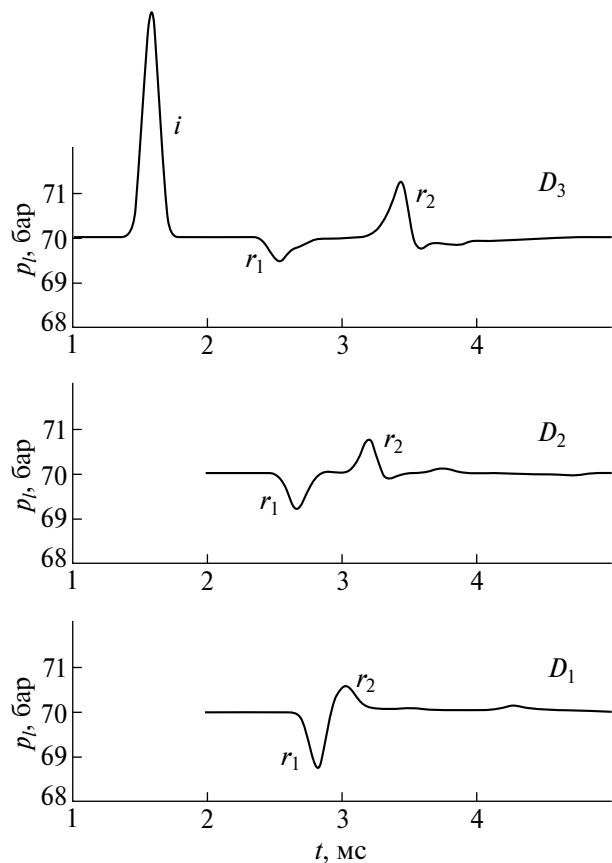


Рис. 3. Осциллограммы для датчиков D_3 , D_2 , D_1 , имеющих координаты (2;2), (2;1) и (2;0) м, буквами r_1 и r_2 обозначены сигналы, отраженные от границ “вода–водонефтяная смесь–газожидкостное ядро” и “газожидкостное ядро–водонефтяная смесь–вода”. Все параметры такие же, как для рис. 2.

амплитуды связано с тем, что время прохождения импульсом узкой области струи меньше времени прохождения широкой части и, следовательно, появляется волновое движение, направленное вверх по координате y , части импульса, который проходит в зону струи. Далее происходит наложение волн, прошедших через широкую часть струи, и возмущений, которые уже прошли узкую часть струи и распространяются вверх по координате y . Кроме этого, отметим, что область многофазной струи из-за акустической мягкости по сравнению с окружающей водой обладает свойствами подводного звукового канала [11], т.е. волновые возмущения при падении под углом на границы “пузырьковое ядро–водонефтяная смесь” и “водонефтяная смесь–вода” проходят эти границы незначительно. На рис. 4 представлено поле скоростей, из которого следует, что в момент 2.8 мс появляется волновое движение, направленное вверх по координате y .

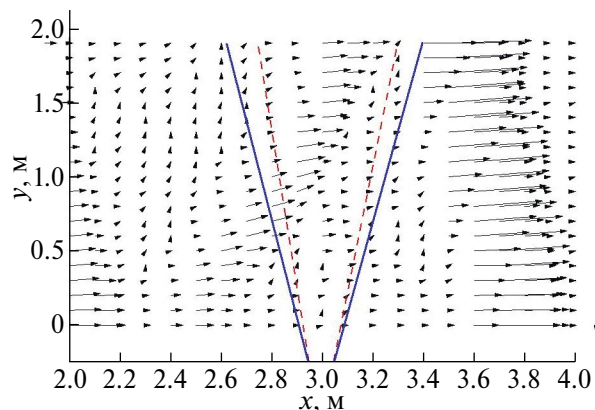


Рис. 4. Поле скоростей в момент 2.8 мс. Объемное содержание газа $\alpha_{g0} = 0.01$. Остальные параметры такие же, как на рис. 2.

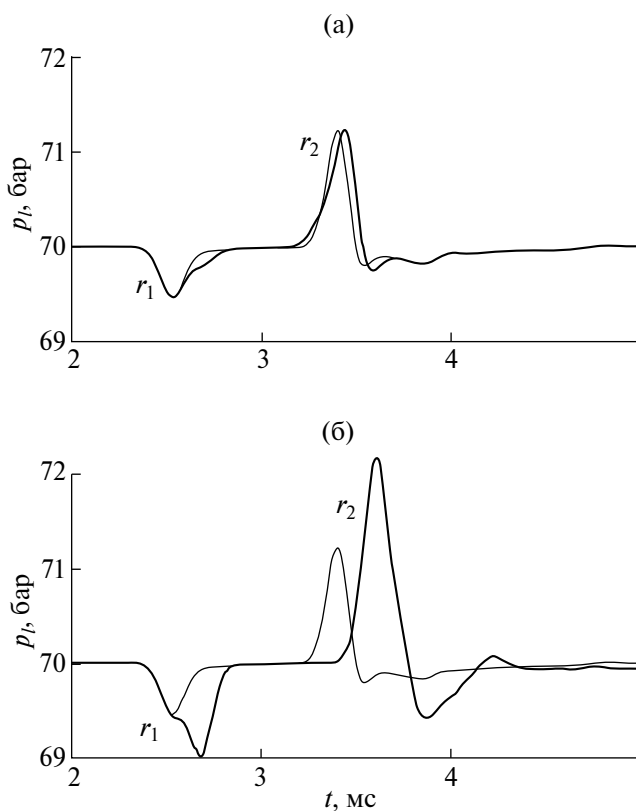


Рис. 5. Осциллограммы отраженных сигналов для датчика D_3 : жирные линии соответствуют объемному содержанию газа в пузырьковом ядре (а) – $\alpha_{g0} = 0.001$ и (б) – $\alpha_{g0} = 0.01$, тонкие линии соответствуют случаю отсутствия пузырькового ядра в струе ($\alpha_{g0} = 0$). Объемное содержание нефти и газа в области многофазной струи: $\alpha_{o0} = 0.75$, $\alpha_{w0} = 0.25$. Остальные параметры такие же, как на рис. 2.

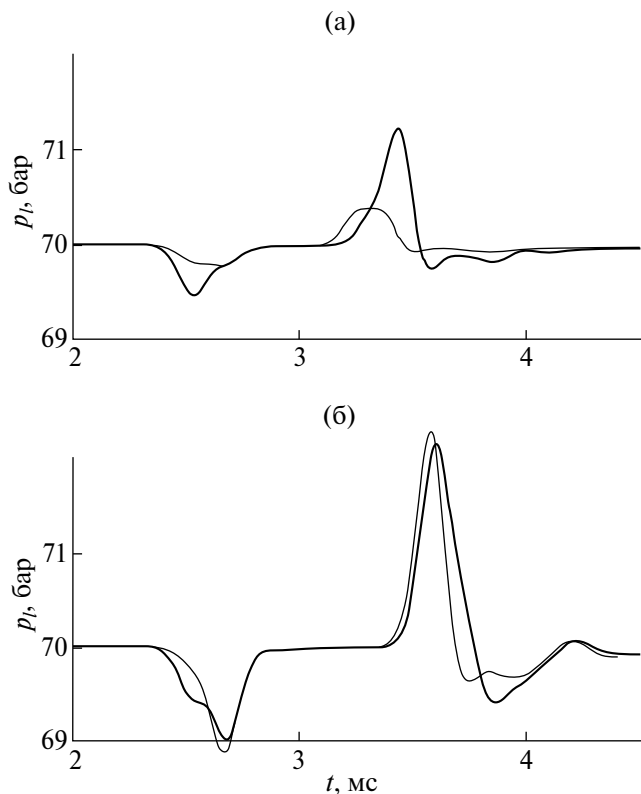


Рис. 6. То же, что на рис. 5. Жирная линия на обеих картинках соответствует случаю, когда объемная доля нефти в жидкой фазе пузырьковой зоны $\alpha_{o0} = 0.75$ ($\alpha_{w0} = 0.25$), тонкая – $\alpha_{o0} = 0.25$ ($\alpha_{w0} = 0.75$). Объемное содержание газа (а) – $\alpha_{g0} = 0.001$, (б) – $\alpha_{g0} = 0.01$. Остальные параметры такие же, как на рис. 2.

Влияние объемного содержания газа в пузырьковом ядре на динамику отраженных сигналов от границ многофазной струи показано на рис. 5. Для малых объемных содержаний газа $\alpha_{g0} \leq 0.001$ наличие пузырькового ядра практически не влияет на динамику отраженных от границ струи сигналов (рис. 5а), в этом случае отражение волнового импульса происходит на границах “вода–водонефтяная смесь” и “водонефтяная смесь–вода”. Так как акустический импеданс водонефтяной смеси меньше, чем аналогичный параметр у воды, то импульс отражается как от свободной границы [10]. В случае большего объемного содержания газа в пузырьковом ядре $\alpha_{g0} = 0.01$ (рис. 5б) из анализа отраженного сигнала r_1 следует, что сначала волновой импульс отражается от границы “вода–водонефтяная смесь”, а потом от границы “водонефтяная смесь–пузырьковое ядро”. Амплитуда отраженного сигнала на границе “вода–водонефтяная смесь” приблизительно равна 0.5 бар, далее сигнал отражается от пузырькового ядра, поэтому амплитуда отраженного сигнала r_1 достигает значения 1 бар. Амплитуда отраженного сигнала r_2 при наличии

пузырькового ядра достигает значения 2 бар. Таким образом, анализируя отраженные сигналы от многофазной затопленной струи, можно приблизительно определить объемное содержание нефти и газа в зоне струи.

С увеличением объемного содержания нефти в зоне многофазной струи амплитуды отраженных сигналов r_1 и r_2 для объемного содержания газа $\alpha_{g0} = 0.001$ незначительно увеличиваются (рис. 6а). В случае $\alpha_{g0} = 0.01$ увеличение доли нефти приводит к тому, что отраженный сигнал r_1 становится заметным, амплитуда его составляет 0.5 бар. В случае малой доли нефти в зоне многофазной струи при $\alpha_{g0} = 0.01$ импульс не чувствует границы “вода–водонефтяная смесь”, отражение происходит только от пузырькового ядра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована динамика волнового импульса в канале, содержащем газожидкостную зону, представляющую собой сечение многофазной затопленной струи.

Установлено:

- 1) по анализу времени прихода отраженных сигналов можно определить степень раскрытия струи;
- 2) по амплитуде отраженных сигналов можно приблизительно определить объемное содержание нефти и газа в зоне многофазной струи;
- 3) многофазная затопленная струя обладает свойством акустического волновода.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ на тему “Разработка и создание малотоннажных продуктов и реагентов (ингибиторы коррозии и солеотложения, антиоксиданты, биоциды, присадки и др.) для процессов нефтегазохимии и очистки водных сред от загрязнений, замещающих импортные вещества и материалы. Теоретические и экспериментальные подходы (FEUR –2023–0006)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Есипов И.Б.* Семинар “Актуальные проблемы акустики – Успехи акустики 2019” Научного совета РАН по акустике // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 6. С. 861–862.
2. *Диденкулов И.Н., Кустов А.М., Мартянов А.И., Прончатов-Рубцов Н.В.* Акустическая диагностика пузырьковых объектов в жидкости // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 2. С. 246–251.
3. *Максимов А.О.* Спектр шума “газового факела” // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 511–519.
4. *Губайдуллин Д.А.* Особенности отражения акустических волн от границы или слоя двухфазной среды // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 2. С. 162–173.

5. Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К. Об эволюции линейных волн в жидкости при наличии пузырьковой завесы // Инженерно-физический журнал. 1998. Т. 71. № 6. С. 987–992.
6. Yara P.D., Dasanayaka L.K., Bandara U.C., Nakata K.A. Model (MEGADEEP) to simulate the transport and Fate of gas and hydrates released in deep water // Journal of hydraulic research, IAHR. 2010. V. 48. № 5. P. 559–572.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1, 2. М.: Наука, 1987. 386 с.
8. Гималтдинов И.К., Кочанова Е.Ю. Условия фокусировки волны давления в пузырьковом клине // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 4. С. 351–356.
9. Ильгамов М.А., Гильманов А.Н. Неотражающие условия на границах расчетной области. М.: Физматлит, 2003. 240 с.
10. Исакович М.А. Общая акустика. Учебное пособие. М.: Наука, 1973. 502 с.
11. Вадов Р.А. Открытие подводного звукового канала, экспериментальные исследования, региональные различия // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 3. С. 313–328.

Acoustic Diagnostics of Underwater Emissions Propagating in the Form of a Multiphase Jet

I. K. Gimaldinov¹, M. V. Stolpovsky¹, E. Y. Kochanova¹

¹FSBEI HE Ufa State Petroleum Technological University, 450064, Ufa

iljas_g@mail.ru

The interaction of a pressure pulse with a gas-liquid zone, which is a section of a flooded multiphase jet consisting of a mixture of water and oil and containing a bubble core of methane, is numerically investigated. The possibility of determining the degree of expansion of the jet, the volume content of oil and gas in the jet from reflected signals is shown.

Keywords: pressure pulse, reflection from boundaries, multiphase jet, gas-liquid zone, mixture of oil and water