

ISSN: 2658–5782

Номер 2

Апрель–Июнь 2019

# МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

[mfs.uimech.org](http://mfs.uimech.org)





## К теории определения месторасположения гидратных отложений в газопроводах акустическим зондированием<sup>1</sup>

Шагапов В.Ш.\* , Галиакбарова Э.В.\*\* , Хакимова З.Р.\*\*

\*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

\*\*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Исследуется эволюция возмущений давления, распространяющихся в трубопроводе, заполненном газокапельной средой, представляющей собой «влажный» метан при температуре ниже точки росы и имеющем поврежденный участок в виде протяженного сужения канала из-за гидратной пробки. Образование гидрата происходит из-за наличия воды (или ее паров) и газа, компоненты которого растворяясь в воде при определенных условиях, формируют твердую фазу. Гидратные образования способствуют снижению проходимости газопроводов и поэтому их обнаружение является актуальной задачей. Предлагается решение проблемы с помощью акустических методов. Для этого рассмотрена математическая модель распространения акустических волн в длинноволновом диапазоне в газокапельной среде. Горизонтальный трубопровод представляется полубесконечным, решение ищется в виде гармонической волны. Волна – одномерная, имеет малую амплитуду колебаний. На основе дисперсионных уравнений построены зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты возмущения акустической волны и от объемного содержания взвешенной фазы (капелек воды). В области высоких частот с увеличением объемного содержания наблюдается рост коэффициента затухания. Формулы для коэффициентов отражения и прохождения выведены с учетом сужения трубопровода из-за гидратных отложений. Представлены результаты численных расчетов, иллюстрирующих динамику импульсных сигналов в зависимости от толщины газогидрата на внутренней стенке трубопровода. Расчеты проведены на основе прямых и обратных преобразований Фурье и с использованием программного обеспечения. Установлено, что, чем больше толщина гидратного отложения на стенке, тем большую амплитуду имеет возвратившийся отраженный сигнал.

**Ключевые слова:** газокапельная среда, гидратная пробка, импульс давления

### 1. Введение

При эксплуатации газопроводов возникают термодинамические условия для появления «склероза» (гидратообразования) из-за скопления на внутренней поверхности труб газогидратных отложений. Значительное сужение просвета трубопро-

вода, заполненного газокапельной средой, приводит к перебоям в эксплуатации трубопроводов. Одним из надежных способов оперативного контроля состояния трубопроводов является использование акустических методов, основанных на особенностях трансформации импульсных сигналов в зависимости от метрических параметров трубопроводов, свойств заполняющих трубопровод среды и масштабов повреждения.

Впервые теоретический анализ распространения высокочастотных акустических волн в скважинах представлен в работе [1]. Исследованию особенностей распространения звуковых волн в парогидратных системах посвящены работы [2–7].

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Академии наук Республики Башкортостан (гражданско-правовой договор на выполнение научно-исследовательской работы № 0301200057819000040\_104987).

Моделирование процессов отложения парафина при течении газонефтяной смеси в трубах и гидратообразования на стенках газопровода выполнено в [8–11]. Теория акустического зондирования применительно к области нефтяных и газовых скважин развита в [12]. Как уже отмечено, диагностика трубопроводов при помощи дистанционного способа акустического контроля основана на методах, учитывающих особенности динамики сигналов на поврежденных участках трубопровода. В работах [13–15] показано, что с помощью интеллектуальной системы контроля [16, 17] можно зафиксировать место сужения канала из-за гидратной пробки в трубопроводе на ранних стадиях изменения давления по импульсам, отраженным от места «склероза».

В настоящей работе рассматривается математическая модель эволюции акустического сигнала в трубопроводе со «склерозом», заполненном газокapельной средой. По изменению амплитуды отраженного сигнала от начала суженного участка трубопровода можно судить о наличии газогидратной пробки.

## 2. Допущения и основные уравнения

Пусть горизонтальный полубесконечный трубопровод радиуса  $R$ , находящийся на поверхности земли, содержит поврежденный участок в виде протяженного сужения канала. Причем трубопровод заполнен газокapельной средой в виде метана и взвешенных капелек воды и находится под высоким давлением. Рассмотрим малые возмущения, инициируемые изменением давления на границе трубопровода. Будем полагать, что длины волн  $\lambda$  в канале значительно больше, чем величина сужения. Это допущение в дальнейшем позволяет при теоретическом описании рассмотреть начало и конец «склеротического» участка в качестве некоторых отражающих поверхностей. Кроме того, эволюция волн (затухание акустических сигналов) происходит за счет межфазных процессов в газокapельной среде.

Течение в канале будем полагать одномерным (параметры течения — скорость и давление зависят от времени и координаты  $x$ , отсчитываемой от входа трубопровода). Для этого, в свою очередь, необходимо выполнение условия [12]:  $\lambda > 2R$  ( $\lambda = 2\pi C/\omega$ , где  $C$  — скорость звука в среде;  $\omega$  — частота возмущений).

Процесс эволюции возмущений давления в трубопроводе можно разбить на отдельные этапы, характерные для распространения возмущений по газокapельной среде с наличием газогидрата на стенках трубопровода (рис. 1). А, именно: распро-

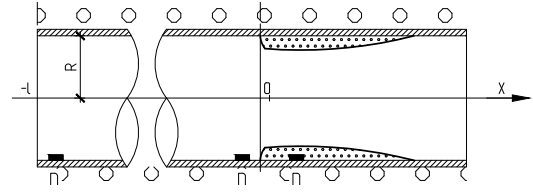


Рис. 1. Схема трубопровода со «склерозом»

странение сигнала на участке от границы трубопровода ( $x = -l$ ) до газогидратного отложения ( $x = 0$ ), отражение и прохождение через данный участок ( $x = 0$ ), распространение отраженного сигнала на участке  $-l < x < 0$ , а также распространение прошедшего сигнала на участке  $0 < x < \infty$ .

Запишем уравнения сохранения масс, числа капелек и импульсов в плоскоодномерном и линеаризованном приближении для малых возмущений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_{m0} \frac{\partial v_m}{\partial t} &= I, & \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \rho_{w0} \frac{\partial v_w}{\partial t} &= -I, \\ \frac{\partial n}{\partial t} + n_0 \frac{\partial v_w}{\partial t} &= 0, & \rho_{m0} \frac{\partial v_m}{\partial t} + \rho_{w0} \frac{\partial v_w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial v_w}{\partial t} &= \frac{v_m - v_w}{t_v} \\ \left( I = 4\pi a_0^2 n_0 j, \quad t_v = \frac{2}{9} \frac{a_0^2}{v_m^{(u)}} \frac{\rho_{w0}^0}{\rho_{m0}^0} \right). \end{aligned}$$

Здесь  $\rho_m, \rho_w, \rho_m^0, \rho_w^0, v_m, v_w$  — средние по смеси и по фазе плотности, скорости;  $t, p, a_0, n$  — время, давление, размер капелек, число капелек в единице объема;  $I, j$  — интенсивности испарения жидкости ( $I > 0$ ) или конденсации пара ( $I < 0$ ), отнесенные к единице объема смеси и к единице площади поверхности раздела фаз; нижние индексы  $m$  и  $w$  относятся к параметрам метана и воды в капельках, дополнительный нижний индекс «0» отнесен к невозмущенному состоянию.

Из уравнений сохранения масс и числа капелек с учетом кинематических зависимостей

$$\begin{aligned} \rho_m &= \rho_m^0 \alpha_m, & \rho_w &= \rho_w^0 \alpha_w, \\ \alpha_w &= \frac{4}{3} \pi a^3 n, & \alpha_m + \alpha_w &= 1, \end{aligned}$$

где  $\alpha_m, \alpha_w$  — объемные содержания, пренебрегая сжимаемостью воды в капельках, имеем

$$\begin{aligned} \alpha_{m0} \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_{w0}^0 \left( \alpha_{m0} \frac{\partial v_m}{\partial x} + \alpha_{w0} \frac{\partial v_w}{\partial x} \right) &= \\ &= 3 \frac{\rho_{m0}^0 - \rho_{w0}^0}{a_0} \alpha_{w0} \frac{\partial a}{\partial t}. \end{aligned}$$

Учет межфазного тепломассообмена произведем на основе решений уравнений

теплопроводности и диффузии:

$$\begin{aligned} \rho_{w0}^0 c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} &= r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_w r^2 \frac{\partial T_w}{\partial r} \right), \\ &(0 < r < a_0), \\ \rho_{m0}^0 c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} &= r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_m r^2 \frac{\partial T_m}{\partial r} \right) + \frac{\partial p}{\partial t}, \\ \frac{\partial k}{\partial t} &= r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D r^2 \frac{\partial k}{\partial r} \right), \\ &(a_0 < r < a_0 \alpha_{w0}^{-1/3}) \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $T_w, T_m$  — температура воды и метана;  $k$  — массовая концентрация пара в метане;  $\lambda_w, \lambda_m$  — коэффициент теплопроводности воды и метана;  $D$  — коэффициент диффузии;  $c_w$  и  $c_m$  — теплоемкость воды и метана при постоянном давлении. Возмущенные температуры и массовой концентрации пара зависят (помимо  $t$  и  $x$ ) также от микрокоординаты  $r$ , которая выражает расстояние от центра капелек. Оценка показывает, что вклад термодиффузии не существен.

Уравнения (1) необходимо дополнить системой граничных условий:

$$\begin{aligned} T_m &= T_w = T_\sigma, \quad \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} - \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = jL, \\ \rho_{w0}^0 \frac{\partial a}{\partial t} &= \rho_{m0}^0 \frac{D}{1-k_0} \frac{\partial k}{\partial r} = -j \quad (r = a_0), \\ \frac{\partial T_w}{\partial r} &= 0 \quad (r = 0), \\ \frac{\partial T_m}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial k}{\partial r} = 0 \quad (r = a_0 \alpha_{w0}^{-1/3}). \end{aligned}$$

Здесь последние два граничных условия выражают условие отсутствия теплообмена (адиабатичность) и массообмена между ячейками [18], приходящими к соседним капелькам.

Уравнение состояния метана, представляющего парогазовую смесь, примем как

$$p = \rho_m^0 T_m B_m, \quad B_m = B_v k + B_g (1 - k),$$

где  $B_v, B_g$  — приведенные газовые постоянные для пара и газа.

Кроме того, для параметров парового компонента на поверхности раздела двух фаз запишем уравнение Клапейрона–Клаузиуса

$$\frac{dp_{vm}}{dT_\sigma} = \frac{\rho_{vm} L}{T_\sigma},$$

где  $L$  — удельная теплота парообразования воды.

Из уравнения теплопроводности пара (второе уравнение в (1)), в предположении однородности

давления в пределах сферической ячейки с радиусом  $a_0 \alpha_{w0}^{-1/3}$  может быть получено уравнение для изменения давления

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= \gamma \frac{p_0}{\rho_{m0}^0} \frac{\partial \rho_m^0}{\partial t} - \frac{\alpha_{w0}}{\alpha_{m0}} \frac{\gamma - 1}{a_0} \lambda_m \left( \frac{\partial T_m}{\partial r} \right)_{a_0}, \\ \left( \gamma = \frac{c_m}{(c_m - R_{m0})}, R_{m0} = B_v k_0 + B_g (1 - k_0) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\gamma$  — газовая постоянная.

Решения этих уравнений на участке образования гидрата ( $x = 0$ ) должны быть согласованы условиями равенства давлений и равенством потоков среды. Эти условия можно записать следующим образом:

$$p^{(1)} \Big|_{x=0} = p^{(2)} \Big|_{x=0}. \quad (3)$$

Второе условие, следующее из закона сохранения масс, имеет вид:

$$\begin{aligned} S v^{(1)} \Big|_{x=0} &= S' v^{(2)} \Big|_{x=0}, \\ S = \pi R^2, \quad S' &= \pi (R - \Delta)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь верхними индексами (1) и (2) снабжены возмущения давления  $p$  и скорости  $v$  соответственно на участках  $-l < x < 0, 0 < x < \infty$ .

### 3. Дисперсионные уравнения

Решение вышеприведенной системы ищем в виде затухающей бегущей волны:

$$\begin{aligned} (p, v, a, n) &= \\ &= A_{(p)}, A_{(v)}, A_{(a)}, A_{(n)} \exp [i(Kx - \omega t)], \\ T &= A_{(T)}(r) \exp [i(Kx - \omega t)], \\ k &= A_{(k)}(r) \exp [i(Kx - \omega t)] \\ \left( K = \text{Re}(K) + i \text{Im}(K), \right. \\ C_p &= \frac{\omega}{\text{Re}(K)}, \quad \delta = \text{Im}(K) \Big), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $K$  — волновой вектор;  $C_p$  и  $\delta$  — фазовая скорость и коэффициент затухания.

Из условия существования решения вида (5)

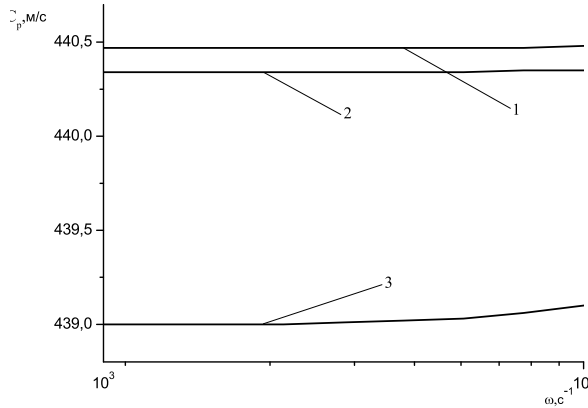


Рис. 2. Фазовая скорость в зависимости от частоты для трубопровода  $2R = 0.22$  м при различных значениях объемного содержания капелек: 1, 2, 3 –  $\alpha_{w0} = 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$

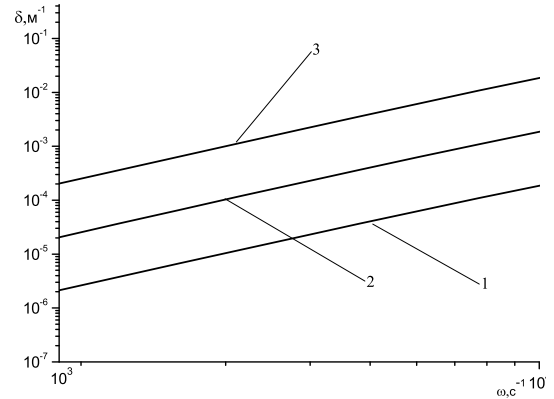


Рис. 3. Коэффициент затухания в зависимости от частоты для трубопровода  $2R = 0.22$  м при различных значениях объемного содержания капелек: 1, 2, 3 –  $\alpha_{w0} = 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}$

следует дисперсионное уравнение

$$\frac{K^2}{\omega^2} = \frac{\rho_0 + i\omega\rho_{m0}t_v}{\rho_0(1 - i\omega\alpha_{m0})} \left( \frac{\alpha_{m0}}{\gamma} + \frac{\alpha_{w0}}{Q} \right),$$

$$\rho_0 = \rho_{m0} + \rho_{w0}, \quad Q = E/F,$$

$$E = H_v H_g (\eta kh(y_w) + \text{sh}(y_m)) + \frac{k_0}{1 - k_0} \frac{\text{sh } v(z)}{\chi^2(1 - \gamma^{-1})},$$

$$F = (1 - \gamma^{-1}) H_v H_g \eta kh(y_w) \text{sh}(y_m) + \frac{k_0}{1 - k_0} \text{sh } v(z) [(\chi^{-1} - H_v)(\chi^{-1} - 1) + H_v \eta kh(y_w)],$$

$$\text{kh}(x) = 3(x \text{cth}(x) - 1)x^{-2},$$

$$\text{sh } v(x) = 3 \left( 1 + x \frac{A_0 x \text{th}(x(A_0 - 1)) - 1}{A_0 x - \text{th}(x(A_0 - 1))} \right) x^{-2},$$

где

$$y_{m,w} = \left( \frac{-i\omega a_0^2}{v_{m,w}^{(T)}} \right)^{1/2}, \quad v_{m,w}^{(T)} = \frac{\lambda_{m,w}}{\rho_{m0,w0}^0 c_{m,w}},$$

$$z = \left( \frac{-i\omega a_0^2}{D} \right)^{1/2}, \quad \eta = \frac{\rho_{w0}^0 c_w}{\rho_{m0}^0 c_m},$$

$$\chi = \frac{c_{m0} T_0}{L}, \quad H_{v,g} = \frac{B_{v,g}}{B_0}.$$

Дисперсионное уравнение написано с учетом пренебрежения величин порядка  $\bar{\rho} = \rho_{m0}^0 / \rho_{w0}^0$  по сравнению с единицей.

В рамках принятых допущений равновесные массовые содержания пара в метане  $k_0$  и темпера-

тура  $T_0$  связаны соотношением

$$P_*(T_0) = \frac{p_0 k_0}{k_0 + (1 - k_0) B_g / B_v},$$

где  $P_*(T_0)$  — парциальное давление насыщенных паров воды при температуре  $T_0$ .

На основе дисперсионного уравнения (6) были проведены численные расчеты. В расчетах использовались следующие физические параметры:  $p_0 = 3.2$  МПа,  $T_0 = 280$  К,  $\rho_{m0}^0 = 21$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{w0}^0 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_w = 4.2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К),  $c_m = 2.3 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К),  $D = 0.2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. На рис. 2 и 3 представлены зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания от частоты для различных значений объемного содержания капелек  $\alpha_{w0}$ . Линии 1–3 соответствуют различным значениям объемного содержания капелек в смеси.

Из графика на рис. 2 видно, что фазовая скорость остается постоянной в рассматриваемом диапазоне частот для каждого значения  $\alpha_{w0}$ .

Из рис. 3 видно, что при увеличении объемного содержания коэффициент затухания возрастает. При частоте  $\omega = 5 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup> затухание волны в  $e$  раз происходит на расстоянии 20; 2; 0.2 км соответственно.

#### 4. Коэффициенты отражения и прохождения

Пусть в трубопроводе на плоскую границу между газокapельной смесью и гидратом падает волна, часть отражается, часть проходит дальше. Будем полагать, что рассматриваемые волны представляют плоские гармонические волны.

На основе условий (3)–(4) при  $x = 0$  для коэффициентов отражения и прохождения гармонических волн, определенных как  $N = A_p^{(R)} / A_p^{(O)}$  и  $M = A_p^{(G)} / A_p^{(O)}$ , получим [19]:

$$M = \frac{2S}{(S + S')}, \quad N = M - 1.$$

## 5. Эволюция импульсных сигналов

Пусть через левую границу трубопровода ( $x = -l$ ) запускается сигнал конечной длительности  $p = \tilde{p}^{(0)}(t)$ . Тогда, используя преобразование Фурье, для дошедшего до отражающей границы  $x = 0$  сигнала можем записать

$$p^{(O)}(0, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}^{(0)}(\tau) \exp(iK(\omega)l) \times \\ \times \exp[i\omega(t - \tau)] d\omega d\tau.$$

Аналогичные соотношения можно записать для сигнала, отраженного от границы и прошедшего через границу:

$$p^{(R)}(0, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}^{(0)}(\tau) N(\omega) \exp[i\omega(t - \tau)] d\omega d\tau, \\ p^{(G)}(0, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}^{(0)}(\tau) M(\omega) \exp[i\omega(t - \tau)] d\omega d\tau.$$

В качестве исходного сигнала возьмем давление колоколообразной формы с амплитудой  $\Delta p_0$ :

$$\tilde{p}^{(0)}(t) = \Delta p_0 \exp\left(-\left(\frac{t - t_0}{\Delta t/6}\right)^2\right).$$

На рис. 4 приведены расчетные осциллограммы, иллюстрирующие эволюцию импульса давления в трубопроводе радиуса  $2R = 0.22$  м, заполненном газок капельной смесью. Осциллограммы 1, 2 и 3 соответствуют показаниям датчиков  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  расположенных на близком расстоянии от точки запуска сигнала, вблизи гидратного образования. Исходный импульс представляет собой импульс давления колоколообразной формы с единичной амплитудой. Временная протяженность его равна  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-3}$  с. Первый всплеск в осциллограмме датчика  $D_1$  на рис. 4 выражает исходный сигнал, запущенный с расстояния  $l = 2000$  м. Исходный импульс (первый всплеск в осциллограмме датчика  $D_2$ ) достигает гидратной пробки с меньшей амплитудой из-за проявления тепловой и вязкостной диссипации в газок капельной среде. В осциллограмме датчика  $D_2$  вторые всплески соответствуют толщине гидратного слоя  $\Delta = 0.02, 0.05$  м.

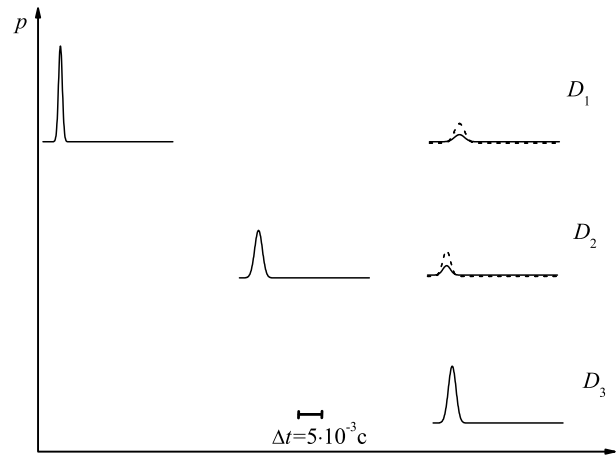


Рис. 4. Эволюция импульсного сигнала в трубопроводе протяженностью  $l = 2000$  м, радиуса  $2R = 0.22$  м, сплошные и пунктирные линии при толщине гидратного слоя:  $\Delta = 0.02; 0.05$  м

Прошедший через границу  $x = 0$  импульс фиксируется датчиком  $D_3$ . Второй всплеск на  $D_1$  показывает возвратившийся отраженный от суженного участка импульс.

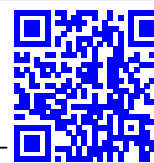
## 6. Заключение

Анализ полученных результатов при исследовании эволюции гармонических волн в трубопроводе с газок капельной смесью (газовая составляющая — метан) показывает возможность обнаружения местоположения гидратного слоя на стенке для дальнейшего определения толщины слоя.

## Список литературы

- [1] Biot M.A. Propagation of elastic waves in a cylindrical bore containing a fluid // J. Appl. Phys. 1952. Vol. 23, No 9. Pp. 497–509. DOI: 10.1063/1.1702365
- [2] Шагапов В.Ш. О распространении малых возмущений в парогазок капельной системе // Теплофизика высоких температур. 1987. Т. 25, № 6. С. 1148–1154. <http://mi.mathnet.ru/tvt4833>
- [3] Губайдуллин Д.А., Ивандаев А. И. Скорость и затухание звука в парогазок капельных системах. Роль тепло- и массообменных процессов // ПМТФ. 1987. № 3. С. 115–123. [http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=148583&ARTICLE\\_ID=148641](http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=148583&ARTICLE_ID=148641)
- [4] Губайдуллин Д.А., Ивандаев А. И. Динамика импульсных волн малой амплитуды в парогазок капельных системах // ПМТФ. 1991. № 2. С. 106–113. [http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=119935&ARTICLE\\_ID=133821](http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=119935&ARTICLE_ID=133821)
- [5] Губайдуллин Д.А. Динамика слабых импульсных возмущений в полидисперсных смесях газа с паром и каплями жидкости // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36, № 6. С. 944–949. <http://mi.mathnet.ru/tvt2674>

- [6] Шагапов В.Ш., Сарапулова В.В. Особенности преломления и отражения звука на границе пузырьковой жидкости // Акустический журнал. 2015. Т. 61, № 1. С. 40–48.  
DOI: 10.7868/S032079191406015X
- [7] Шагапов В.Ш., Сарапулова В.В. Особенности отражения и преломления акустических волн на границе раздела между газом и дисперсной системой // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5 (333). С. 119–129.  
DOI: 10.15372/PMTF20150510
- [8] Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Моделирование процесса отложения парафина при течении газонефтяной смеси в трубах // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72, № 4. С. 771–774.  
<https://www.itmo.by/jepeter/721999r/720771.html>
- [9] Шагапов В.Ш., Уразов Р.Р., Мусакаев Н.Г. Математическое моделирование течения углеводородного газа в трубопроводе с учетом гидратообразования на внутренних стенках трубы // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4. С. 164–168.  
<http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/823/685>
- [10] Мусакаев Н.Г., Уразов Р.Р., Шагапов В.Ш. Динамика образования гидратов при транспортировке природного газа // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 2. С. 295–302.  
<https://www.sibran.ru/upload/iblock/ee1/ee1d32c52e660d90e71ace667b6b4447.pdf>
- [11] Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г., Уразов Р.Р. Математическая модель течения природного газа в трубопроводах с учетом диссоциации газогидратов // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, №2. С. 271–279.  
<https://www.itmo.by/jepeter/812008r/8120271.html>
- [12] Nigmatulin R. I., Gubaydullin A. A. and Shagapov V. Sh. Numerical Investigation of Shock and Thermal Waves in Porous Saturated Medium with Phase Transitions // Porous Media: Physics, Models, Simulation (World Scientific Publishing). 2000. Pp. 3–31.  
DOI: 10.1142/9789812817617\_0001
- [13] Галиакбарова Э.В., Галиакбаров В.Ф., Каримов М.С. Теоретические аспекты для организации мониторинга давления в газопроводной системе для поддержания пожарной и промышленной безопасности // Нефтегазовое дело: науч.-техн. журн. / УГНТУ. 2014. Т. 12, № 3. С. 140–146.  
[http://ngdelo.ru/files/old\\_ngdelo/2014/3/ngdelo-3-2014-p140-145.pdf](http://ngdelo.ru/files/old_ngdelo/2014/3/ngdelo-3-2014-p140-145.pdf)
- [14] Галиакбарова Э.В., Бахтизин Р.Н., Галиакбаров В.Ф., Ковшов В.Д., Хакимова З.Р. Использование энергии потоков для диагностики магистральных газопроводов с использованием интеллектуальной системы контроля // Нефтегазовое дело: науч.-техн. журн. 2016. Т. 15, № 2. С. 104–113.  
<http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/2/ngdelo-2-2016-p104-113.pdf>
- [15] Галиакбаров В.Ф., Ковшов В.Д., Галиакбарова Э.В., Нагаева З.М. Построение интеллектуальной системы обнаружения несанкционированных скачков давления в магистральных трубопроводах для поддержания промышленной и пожарной безопасности // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов. 2015. № 2. С. 188–195.  
<http://ntj-oil.ru/article/view/1986>
- [16] Галиакбаров В.Ф., Гольянов А.А.; Коробков Г.Е. Способ определения места утечки жидкости из трубопровода. Патент № 2197679 РФ, F17D5/02. Оpubл. 27.01.2003. Бюл. № 3.  
[https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2197679&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2197679&TypeFile=html)
- [17] Галиакбаров В.Ф., Галиакбарова Э.В., Ковшов В.Д., Аминев Ф.М., Хакимова З.Р. Система контроля состояния трубопровода. Патент № 2606719 РФ, F17D05/00. Оpubл. 10.01.2017, Бюл. № 1.  
[https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2606719&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2606719&TypeFile=html)
- [18] Нигматулин Р.И. Механика сплошной среды. Кинематика. Динамика. Термодинамика. Статистическая динамика. М.: ГЭОТАР–Медиа, 2014. 640 с.
- [19] Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.



## To the theory of determining the location of hydrate deposits in gas pipelines by acoustic sounding

Shagapov V.Sh.\* , Galiakbarova E.V.\*\* , Khakimova Z.R.\*\*

\*Mavlutov Institute of Mechanics, UFRS RAS, Ufa

\*\*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

Evolution of pressure perturbations propagating in pipeline filled with gas-and-drop medium representing “wet” methane at temperature below dew point and having damaged section, in form of extended narrowing of channel due to hydrate plug, is investigated. Hydrate formation is due to the presence of water (or its vapours) and gas, the components of which dissolve in water under certain conditions form a solid phase. Hydrate deposits help to reduce the cross-country capacity of gas pipelines and therefore their detection is a pressing task. It is proposed to solve the problem using acoustic methods. For this purpose mathematical model of propagation of acoustic waves in long-wave range in gas-and-droplet medium is considered. The horizontal pipeline appears semi-pointed, the solution is sought in the form of a harmonic wave. Wave - one-dimensional, having small amplitude of oscillations. Based on dispersion equations, dependence of phase velocity and attenuation coefficient on frequency of acoustic wave disturbance and on volume content of suspended phase (water droplets) are built. In the high frequency region, the attenuation coefficient increases with the volume content. The formulas for reflection and passage coefficients are derived taking into account pipeline narrowing due to hydrate deposits. The results of numerical calculations illustrating the dynamics of pulse signals depending on the thickness of the gas hydrate on the inner wall of the pipeline are presented. Calculations are based on forward and backward Fourier transformations and the use of software. It is established that the greater the hydrate deposit on the wall in thickness, the greater the amplitude of the returned reflected signal.

**Keywords:** gas-and-drop mixture, hydrate deposit, pressure impulses

### References

- [1] Biot M.A. Propagation of elastic waves in a cylindrical bore containing a fluid // *J. Appl. Phys.* 1952. Vol. 23, No 9. Pp. 497–509.  
DOI: 10.1063/1.1702365
- [2] Shagapov V.Sh. Propagation of small perturbations in a vapor gas droplet medium // *High Temperature.* 1987. Vol. 25, № 6. Pp. 843–849.  
<http://mi.mathnet.ru/tvt4833>
- [3] Gubaidullin D.A., Ivandaev A.I. Speed and attenuation of sound in gas-vapor-liquid systems. Role of heat and mass exchange // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 1987. Vol. 28, № 3. Pp. 423–430.  
DOI: 10.1007/BF00910630
- [4] Gubaidullin D.A., Ivandaev A.I. Dynamics of low-amplitude pulse waves in vapor-gas-drop systems // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 1991. Vol. 32, № 2. Pp. 240–247.  
<https://doi.org/10.1007/BF00858043>
- [5] Gubaidullin D.A. The dynamics of small impulsive disturbances in polydisperse mixtures of gas with vapor and liquid droplets // *High Temperature.* 1998. Vol. 36, № 6. Pp. 920–925.  
<http://pleiades.online/cgi-perl/search.pl?type=abstract&name=hightemp&number=6&year=98&page=920>
- [6] Shagapov V.S., Sarapulova V.V. Refraction and reflection of sound at the boundary of a bubbly liquid // *Acoustical Physics.* 2015. Vol. 61, № 1. Pp. 37–44.  
DOI: 10.1134/S1065771014060153
- [7] Shagapov V.S., Sarapulova V.V. Reflection and refraction of acoustic waves at the interface between a gas and a disperse systems // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2015. Vol. 56, № 5. Pp. 838–847.  
DOI: 10.1134/S0021894415050107
- [8] Shagapov V.Sh., Musakaev N.G. Modeling of Paraffin Deposition in Flow of a Gas-Oil Mixture in Tubes // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 1999. Vol. 72, No. 4. Pp. 744–747.  
DOI: 10.1007/BF02699285
- [9] Shagapov V.Sh., Urazov R.R., Musakaev N.G. [The mathematical modeling of hydrocarbon gas flow in a pipeline, taking into account formation of gas hydrates on inner walls of the pipe]. *Vestnik UGATU[Vestnik USATU].* 2011. V. 15, № 4(44). Pp. 164–168 (in Russian).  
<http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/823/685>



- [10] Musakaev N.G., Urazov R.R., Shagapov V.Sh. Hydrate formation kinetics in piped natural-gas flows // Thermophysics and Aeromechanics. 2006. V. 13, No. 2. Pp. 275–281.  
DOI: [10.1134/S0869864306020090](https://doi.org/10.1134/S0869864306020090)
- [11] Shagapov V.Sh., Musakaev N.G. and Urazov R.R. Mathematical model of natural gas flow in pipelines with allowance for the dissociation of gas hydrates // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2008. Vol. 81, No. 2. Pp. 287–296.  
DOI: [10.1007/s10891-008-0036-1](https://doi.org/10.1007/s10891-008-0036-1)
- [12] Nigmatulin R.I., Gubaydullin A.A. and Shagapov V.Sh. Numerical Investigation of Shock and Thermal Waves in Porous Saturated Medium with Phase Transitions // Porous Media: Physics, Models, Simulation (World Scientific Publishing). 2000. Pp. 3–31.  
DOI: [10.1142/9789812817617\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789812817617_0001)
- [13] Galiakbarova E.V., Galiakbarov V.F., Karimov M.S. [Theoretical aspects for the organization of monitoring of pressure in the gas pipeline system for maintaining of the fire and production safety]. Neftegazovoe delo: nauchno–tehnicheskij zhurnal / UGNTU [Oil and gas business. Ufa: USPTU]. 2014. Vol. 12, No. 3. Pp. 140–146 (in Russian).  
[http://ngdelo.ru/files/old\\_ngdelo/2014/3/ngdelo-3-2014-p140-145.pdf](http://ngdelo.ru/files/old_ngdelo/2014/3/ngdelo-3-2014-p140-145.pdf)
- [14] Galiakbarova E.V., Bakhtizin R.N. Galiakbarov V.F., Kovshov V.D., Khakimova Z.R. [Use of energy of streams for diagnostics of the main gas pipelines with use of the intelligent control system] Neftegazovoe delo: nauchno–tehnicheskij zhurnal / UGNTU [Oil and gas business. Ufa: USPTU]. 2016. Vol. 15, No. 2. Pp. 104–113 (in Russian).  
<http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/2/ngdelo-2-2016-p104-113.pdf>
- [15] Galiakbarov V.F., Kovshov V.D., Galiakbarova E.V., Nagaeva Z.M. [Development of intelligent system of pressure drop detection in the main pipelines aimed to maintain industrial and fire safety]. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefteproduktov: nauchno – tehnicheskij zhurnal [Problems of collecting, preparation and transport of oil products: Scientific technical journal]. 2015. No. 2(100). Pp. 188–195 (in Russian).  
<http://ntj-oil.ru/article/view/1986>
- [16] Galiakbarov V.F., Gil'yanov A.A., Korobkov G.E. [Way of definition of the leak of liquid from the pipeline] Sposob opredeleniya mesta utechki zhidkosti iz truboprovoda. Patent No. 2197679 C2 RF, F17D5/02, publ. 27.01.2003. byul. No. 3 (in Russian)  
[https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2197679&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2197679&TypeFile=html)
- [17] Galiakbarov V.F., Galiakbarova E.V., Kovshov V.D., Aminev F.M., Khakimova Z.R. [Control system of a condition of the pipeline] Sistema kontrolya sostoyaniya truboprovoda. Patent No. 2606719 C1 RF, F17D5/00, publ.10.01.2017, byul. No. 1 (in Russian).  
[https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2606719&TypeFile=html](https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2606719&TypeFile=html)
- [18] Nigmatulin R.I. [Solid medium mechanics. Kinematics. Dynamics. Thermodynamics. Statistical dynamics] Mekhanika sploshnoj sredy. Kinematika. Dinamika. Termodinamika. Statisticheskaya dinamika. M: GEOTAR–Media, 2014. Pp. 640 (in Russian).
- [19] Isakov M.A. [General Acoustics] Obshchaya akustika. M: Nauka, 1973. Pp. 496 (in Russian).