

УДК 504.5: 532.59

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ИССЛЕДОВАНИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ В РЕЖИМЕ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ  
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК**

Галиакбарова Э.В., Галиакбаров В.Ф.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа

ООО «НТ-Центр» г. Уфа

e-mail: emi.galiakbar@yandex.ru

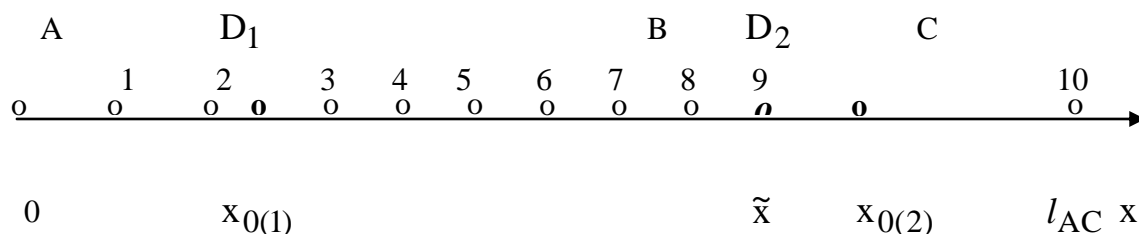
**Аннотация.** Математическое моделирование согласовывается с основными положениями механики движения жидкостей в трубах, использует методы подобия и теории размерности, методы математической физики, численные решения. Полученные решения показали возможность обнаружения места «утечки» перекачиваемого нефтепродукта при волновом сканировании магистральных трубопроводов. Импульс давления, создаваемый в начале проверяемого участка трубопровода, сталкиваясь с «утечкой» меняет фазу на противоположную. Образуются отрицательные импульсы – импульс, отраженный от «утечки» и импульс, прошедший через «утечку», которые распространяются со скоростью звука в данной среде и могут быть зафиксированными специальными интеллектуальными датчиками давления.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, математическая модель, трубопроводные системы, утечки, импульсы, нефтепродукты.

Для обеспечения экологической безопасности магистральных трубопроводов при перекачке нефтепродуктов с целью обнаружения утечек предлагается применять импульсное сканирование. Под импульсом понимается отклонение давления жидкости от установившегося значения, вызванное кратковременным внешним воздействием. Импульс, генерированный на входе системы, возбуждает колебательный процесс в линии связи. Анализ импульсов сводится к математическому решению уравнений, описывающих переходные процессы в системе.

Рассмотрим трубопроводную систему, изображенную на рисунке 1. Трубопроводная система состоит из 10 линейных трубопроводов (труб) и 9 конструктивных узлов ((1) ÷ (8) - места изменения внутреннего диаметра труб из-за изменения толщины стенок трубы; В - место образования сквозного отверстия малого диаметра в стенке трубы, так называемое место «утечки»). Под линейным трубопроводом понимаем трубопровод постоянного диаметра без

местных неоднородностей. Введем следующие обозначения: часть трубопровода, находящегося левее узла назовем 1-м линейным трубопроводом, а часть трубопровода, находящегося правее узла - 2-м линейным трубопроводом;  $R_j, S_j$  – соответственно начало и конец  $j$ -го линейного трубопровода ( $j=1 \div 10$ ).



№ участка (участок расположен левее узла)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Толщина стенки трубы, мм	10	8	10	8	10	9	10	9	10	10

Рисунок 1. Схема нефтепродуктопровода

В акустическом приближении процессы распространения давления и скорости в линейном трубопроводе, заполненном капельной жидкостью (вязкость вносит только уточнение решения в сторону уменьшения колебаний давления) можно описать [1] следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} &= \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + 2a v \right), \\ -\frac{\partial p}{\partial t} &= \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где } 2a = \left( \frac{\lambda v}{8R} \right)_{\text{ср}}, \quad c = \left( \rho \left( \frac{1}{E_0} + \frac{d}{E \delta} \right) \right)^{-0.5}.$$

Здесь  $a$  - приведенный коэффициент линейного трения;  $c$  - скорость звука в среде (сжимаемость жидкости и упругость трубы учтены в уравнениях (1) только в величине скорости звука  $c$ );  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления, величину и порядок которого можно установить [2], зная

шероховатость трубы  $\varepsilon$  и режим течения жидкости по ней согласно числу Рейнольдса  $Re$ ;  $\rho$  - плотность жидкости;  $E_0$  и  $E$  - соответственно, модуль упругости жидкости и металла трубы;  $\tilde{d}$  - внешний диаметр трубы,  $\delta$  - толщина его стенки;  $d$  - внутренний диаметр трубы ( $d = \tilde{d} - 2 \cdot \delta$ );  $R$  - гидравлический радиус сечения трубы ( $R = \frac{d}{4}$ ).

**Постановка задачи:** Пусть в трубопроводной системе установился процесс перекачки жидкости из узла (А) (площадь проходного сечения  $f_{(A)}$ , давление  $p_0$ , объемный расход  $Q_A$ ) в узел (С) (площадь проходного сечения  $f_{(C)}$ , давление  $p_e$ , объемный расход  $Q_C$ ). В момент времени  $t = 0$  в узле (А) периодически с периодом  $T$  создается прямоугольный импульс давления со значением  $p_1$  ( $p_1 < p_0$ ) и длительностью  $\tau$  ( $\tau < \frac{l_{AC}}{c}$ ,  $\tau \ll T$ ). В узле (В) происходит «утечка» жидкости с постоянным объемным расходом равным  $Q_B$ .

Процесс распространения волны давления в такой системе описывается уравнениями (1) с начальными условиями:

$$p(x, 0) = p_0 - \frac{p_0 - p_e}{l_{AC}} \cdot x, \quad (2)$$

и граничными условиями:

$$\begin{aligned} p(0, t < 0) &= p_0, \\ p(0, 0 \leq t \leq \tau) &= p_1, \\ p(0, t > \tau) &= p_0, \\ v(0, t) &= \frac{Q_A}{f_{(A)}}, \\ p(l_{AC}, t) &= p_e, \\ v(l_{AC}, t) &= \frac{Q_C}{f_{(C)}}, \end{aligned} \quad (3)$$

Граничные условия для уравнений (1) ставятся исходя из законов сохранения массы и количества движения в конструктивных узлах трубопроводной системы [2, 3, 4].

1) узлы (1) ÷ (8):

$$v(S_j) \cdot f_j = v(R_{j+1}) \cdot f_{j+1},$$

$$p(S_j) = p(R_{j+1}) + \xi_j \left[ \frac{\rho}{2} v(S_j) \right]_{\text{ср}} \cdot v(R_{j+1}), \quad (4)$$

$$2) \text{ узел } (B) : \quad \begin{aligned} p(S_9) &= p(R_{10}) = p(B), \\ v(S_9) f_9 &= v(R_{10}) f_{10} + Q_B. \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$p(x_j, t) = \begin{cases} p(R_j), & x_j = 0, \\ p(S_j), & x_j = l_j; \end{cases} \quad v(x_j, t) = \begin{cases} v(R_j), & x_j = 0, \\ v(S_j), & x_j = l_j; \end{cases}$$

$\xi_j$  - коэффициент местного сопротивления определяется экспериментально, (числовые данные для  $\xi_j$  приведены в [3]);

$f_j$  - площадь проходного сечения  $j$ -го линейного трубопровода;

$p(B) = g(Q_B)$  - давление, определяется экспериментально исходя из объемного расхода жидкости и площади проходного сечения отверстия, через которое происходит «утечка» [3].

Вынужденные колебания давления в произвольном сечении  $x$  трубопровода могут быть найдены импедансным методом [4]. Гидравлическим импедансом (или полным гидравлическим сопротивлением трубопровода) называют отношение давления, действующего в сечении трубопровода на заданном расстоянии от входа в систему к объемной скорости потока жидкости в этом сечении.

Предполагая, что выполнены условия разложимости давления  $p(x, t)$  и средней скорости  $V(x, t)$  жидкости в ряды Фурье, что справедливо для физически осуществимых процессов, решение уравнений (1) будем искать в виде:

$$p(x, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_k(x, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k(x) \cdot e^{ik\omega t} \quad (6)$$

$$v(x, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} v_k(x, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k(x) e^{ik\omega t}$$

где  $p_k(x, t)$ ,  $v_k(x, t)$  -  $k$ -е гармоники давления и скорости,  $a_k(x)$ ,  $b_k(x)$  - комплексные амплитуды этих гармоник, соответственно равные:

$$a_k(x) = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} p(x, \tau) e^{-ik\omega\tau} d\tau$$

$$b_k(x) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(x, \tau) e^{-ik\omega\tau} d\tau, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Подставив формулы (6) в уравнения (1), получим бесконечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений для определения коэффициентов  $a_k(x)$ ,  $b_k(x)$ :

$$\frac{d a_k(x)}{d x} + \rho (2 a + i k \omega) b_k(x) = 0; \quad \frac{d b_k(x)}{d x} + \frac{i k \omega}{\rho c^2} \cdot a_k(x) = 0; \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Общее решение этой системы имеет вид:

$$a_0(x) = A_0 x + B_0, \quad b_0(x) = -\frac{A_0}{2a\rho}, \quad (7)$$

$$a_k(x) = A_k e^{\lambda_k x} + B_k e^{-\lambda_k x},$$

$$b_k(x) = \frac{1}{Z_k} (-A_k e^{\lambda_k x} + B_k e^{-\lambda_k x}), \quad k \neq 0,$$

где  $\lambda_k$  - комплексная постоянная распространения волнового процесса,  $Z_k$  - комплексный импеданс линейного трубопровода бесконечной длины, соответственно равные:

$$\lambda_k = \frac{ik\omega}{c} \sqrt{1 + \frac{2a}{ik\omega}}, \quad (8)$$

$$Z_k = \rho \left(1 + \frac{2a}{ik\omega}\right) \frac{ik\omega}{\lambda_k} = \rho c \sqrt{1 + \frac{2a}{ik\omega}}.$$

После несложных преобразований можно получить уравнения гидравлического четырехполосника [4, 7], связывающие соответствующие гармоники давления и скорости в двух произвольных сечениях  $X_1$  и  $X_2$  для  $j$ -го линейного трубопровода:

$$\begin{aligned}
 p_k(x_2, t) - p_k(x_1, t) \operatorname{ch} \lambda_k(x_2 - x_1) + Z_k v_k(x_1, t) \operatorname{sh} \lambda_k(x_2 - x_1) &= 0, \\
 v_k(x_2, t) - v_k(x_1, t) \operatorname{ch} \lambda_k(x_2 - x_1) + \frac{p_k(x_1, t)}{Z_k} \operatorname{sh} \lambda_k(x_2 - x_1) &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Вид соотношений (9) не зависит от граничных условий задачи.

Заменяя в уравнениях (9)  $x_2$  на  $x_j$ , а  $x_1$  на 0, получим

$$\begin{aligned}
 p_k(x_j, t) &= p_k(R_j) \left( \operatorname{ch} \lambda_{jk} x_j - \frac{Z_{jk}}{Z_k(R_j)} \operatorname{sh} \lambda_{jk} x_j \right), \\
 v_k(x_j, t) &= v_k(R_j) \left( Z_k(R_j) \operatorname{ch} \lambda_{jk} x_j - Z_{jk} \operatorname{sh} \lambda_{jk} x_j \right).
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где  $Z_k(x_j) = \frac{p_k(x_j, t)}{v_k(x_j, t)}$  - импеданс  $k$ -той гармоники  $j$ -го линейного

трубопровода, параметры  $\lambda_{jk}$  и  $Z_{jk}$  определяются для  $j$ -го линейного трубопровода по формулам (8).

С другой стороны, заменяя в уравнениях (9)  $x_1$  на  $x_j$ , а  $x_2$  на  $l_j$ , получим

$$\begin{aligned}
 p_k(x_j, t) &= p_k(S_j) \left( \operatorname{ch} \lambda_{jk} (l_j - x_j) + \frac{Z_{jk}}{Z_k(S_j)} \operatorname{sh} \lambda_{jk} (l_j - x_j) \right), \\
 v_k(x_j, t) &= v_k(S_j) \left( \operatorname{ch} \lambda_{jk} (l_j - x_j) + \frac{Z_k(S_j)}{Z_{jk}} Z_{jk} \operatorname{sh} \lambda_{jk} (l_j - x_j) \right).
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Тогда в соответствии с определением импеданса, получим

$$Z_k(x_j) = \frac{Z_k(R_j) - Z_{jk} \operatorname{th} \lambda_{jk} x_j}{1 - \frac{Z_k(R_j)}{Z_{jk}} \operatorname{th} \lambda_{jk} x_j},$$

или

$$Z_k(x_j) = \frac{Z_k(S_j) + Z_{jk} \operatorname{th} \lambda_{jk} (l_j - x_j)}{1 + \frac{Z_k(S_j)}{Z_{jk}} \operatorname{th} \lambda_{jk} (l_j - x_j)}.
 \tag{12}$$

Из формул (12) видно, что, зная один из граничных импедансов, можно вычислить импеданс в любой точке  $j$ -го линейного трубопровода и, в частности другой граничный импеданс.

Граничные условия в узловых точках для импедансов запишутся в следующем виде:

$$1) \text{ узлы (1) } \div (8): \frac{Z_k(S_j)}{f_j} = \frac{Z_k(R_{j+1})}{f_{j+1}} + \frac{\tilde{\xi}_j}{f_j}, \quad \text{где} \quad \tilde{\xi}_j = \xi_j \left[ \frac{\rho \cdot v(S_j)}{2} \right]_{\text{ср}} \quad (13)$$

$$2) \text{ узел (B):} \quad \frac{f_j}{Z_k(S_j)} = \frac{f_{j+1}}{Z_k(R_{j+1})} + \frac{f_{(B)}}{Z_k(B)}, \quad \text{где} \quad Z_k(B) = \frac{P_{(B)} \cdot f_{(B)}}{Q_B}.$$

Таким образом, если известен один из граничных импедансов, а также давление или скорость на той же границе, то можно вычислить давление и скорость в любом сечении трубопроводной системы.

Для физических параметров трубопроводной системы при перекачке нефтепродуктов приняты следующие значения:

$$p_0 = 5.2 \cdot 10^6 \text{ Па}, \quad p_1 = 4.4 \cdot 10^6 \text{ Па}, \quad p_e = 0.8 \cdot 10^6 \text{ Па}, \quad \tau = 1.2 \text{ с}, \quad T = 200 \text{ с}$$

$$\tilde{d} = 325 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \varepsilon = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \delta_1 = 10^{-2} \text{ м}, \quad \delta_2 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \xi = 0.02$$

$$\rho = 820 \text{ кг/м}^3, \quad v = 3.15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \quad E_0 = 1.2 \cdot 10^9 \text{ Па},$$

$$Q_A = 420 \text{ м}^3/\text{час}, \quad Q_B = 10 \text{ м}^3/\text{час}, \quad p_B = 0.2 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

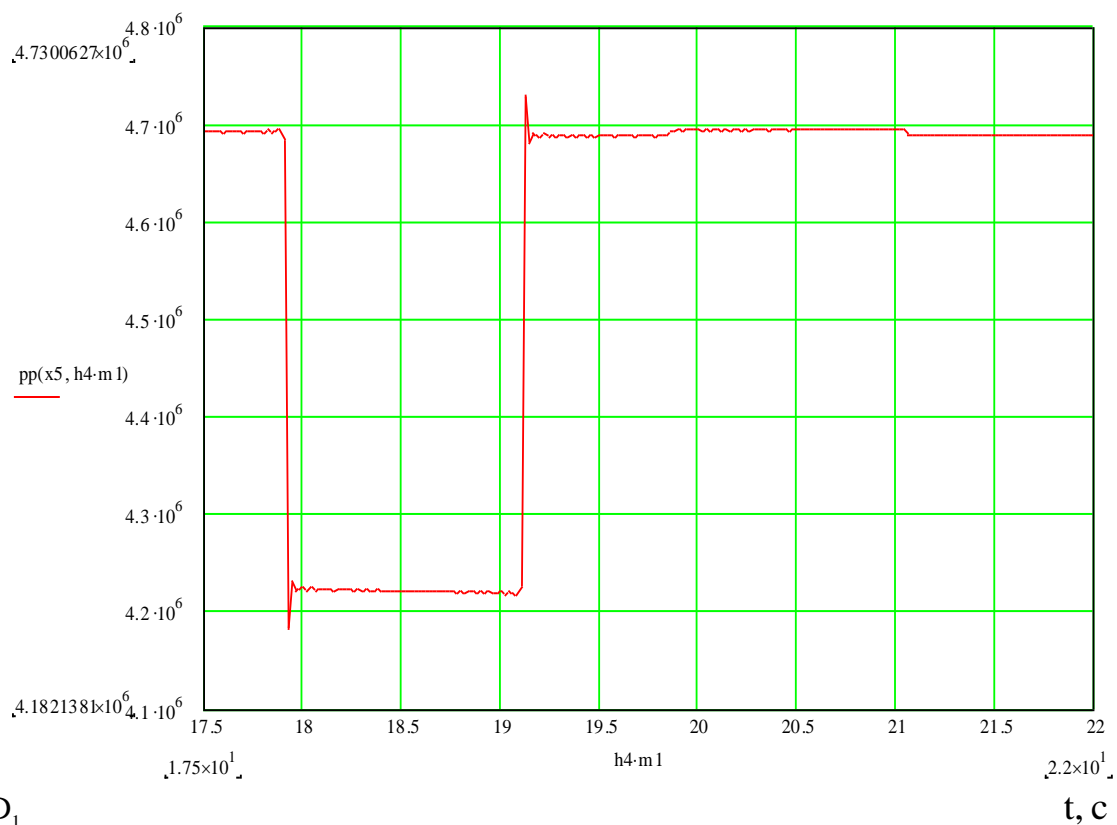
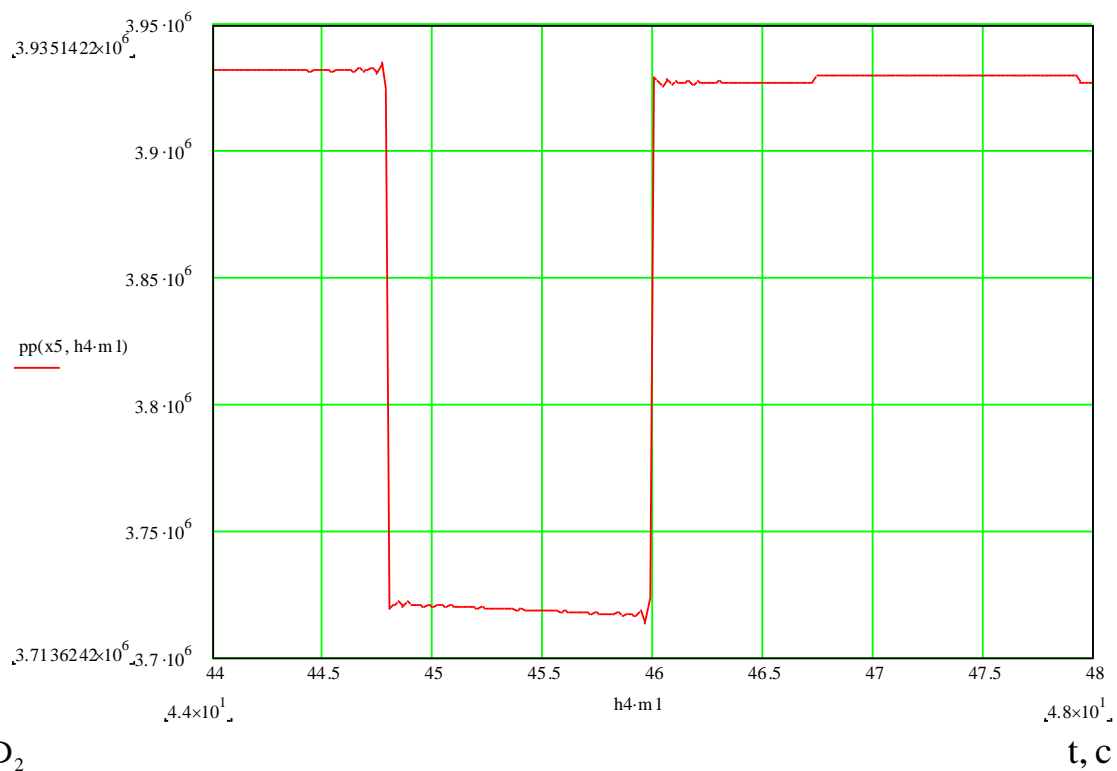
$$x_1 = 1080 \text{ м}, \quad x_2 = 13980 \text{ м}, \quad x_3 = 23580 \text{ м}, \quad x_4 = 32060 \text{ м}, \quad x_5 = 32260 \text{ м},$$

$$x_6 = 36100 \text{ м}, \quad x_7 = 40618 \text{ м}, \quad x_8 = 44279 \text{ м}, \quad x_B = 47000 \text{ м}, \quad l_{AC} = 173800 \text{ м}.$$

Тогда вычислим коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda = 0.023$ , где согласно [3]  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( 0.27 \frac{\varepsilon}{d} \right)$ ; скорость звука в среде  $c = 1116 \text{ м/с}$ ; коэффициент линейного трения  $a = 0.029 \text{ с}^{-1}$ ; коэффициент затухания ударной волны  $\beta = 2.59 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ , где  $\beta = \frac{a}{c}$ .

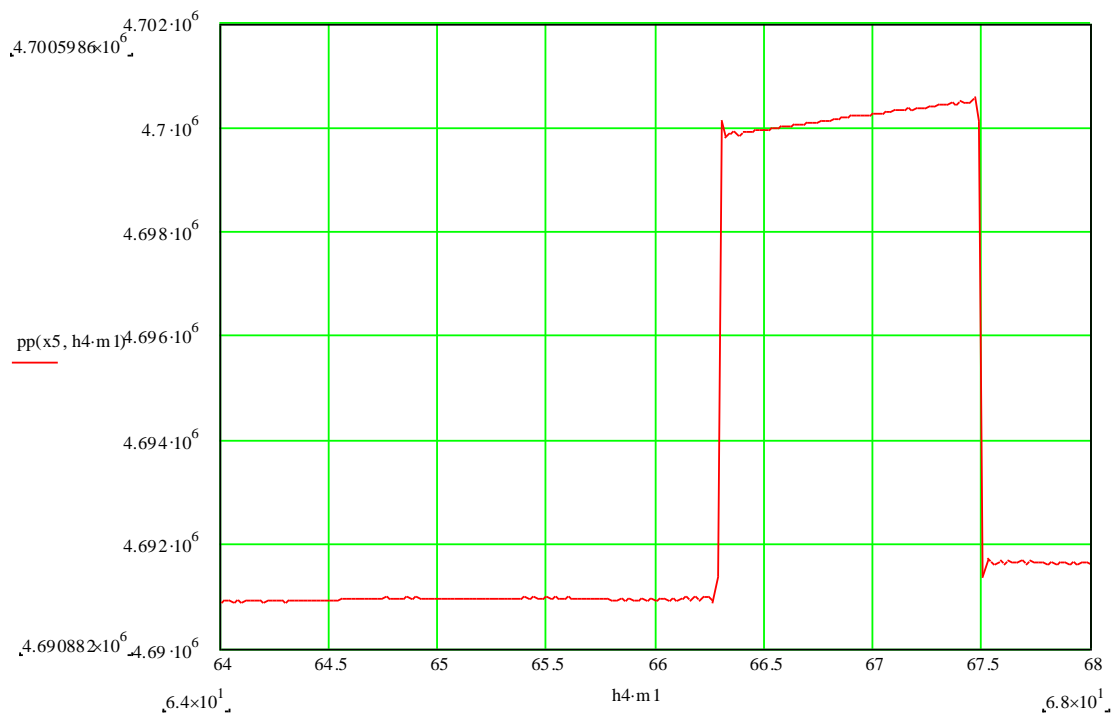
Результаты численных расчетов поставленной задачи приведены на рисунках 2 – 4. Здесь показаниям датчика  $D_1$  соответствуют кривые сверху, а показаниям датчика  $D_2$  - кривые снизу. Датчик  $D_1$  расположен до «утечки» и имеет координату  $x_{0(1)} = 20000 \text{ м}$ , а датчик  $D_2$  расположен после «утечки» и имеет координату  $x_{0(2)} = 50000 \text{ м}$ .

$p, \text{ Па}$

 $D_1$  $p, \text{Па}$  $t, \text{с}$  $D_2$ Рисунок 2. Исходный импульс, зафиксированный датчиками  $D_1$  и  $D_2$ .

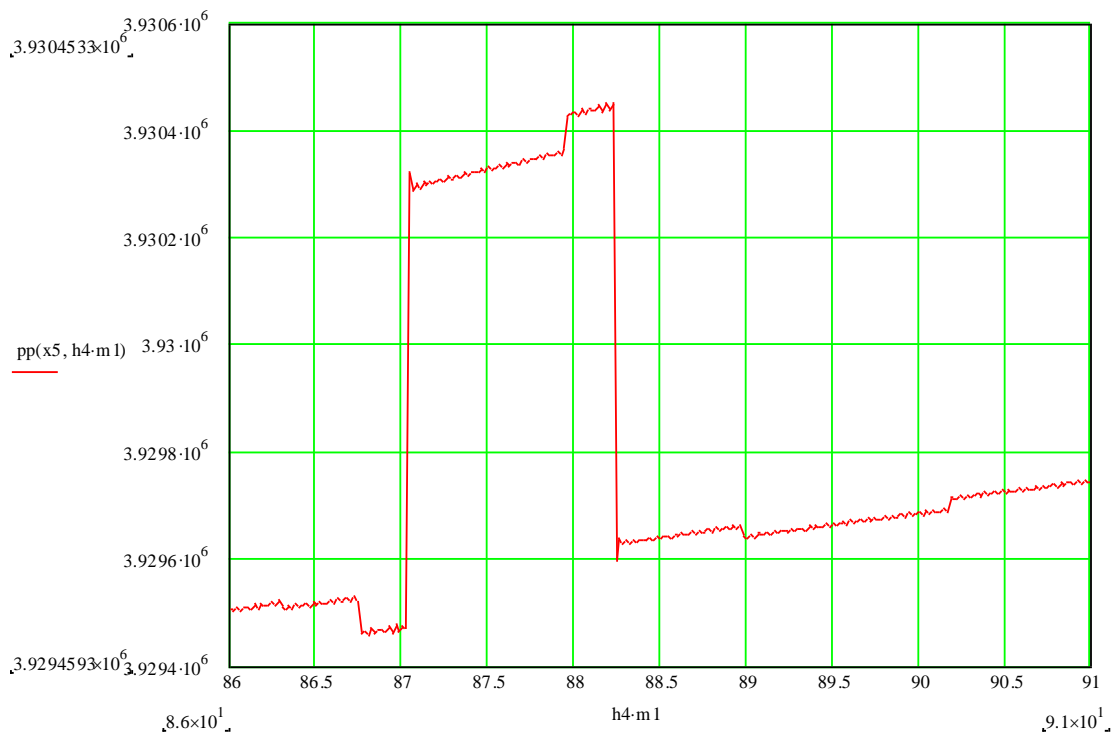


$p, \text{Па}$



$D_1$

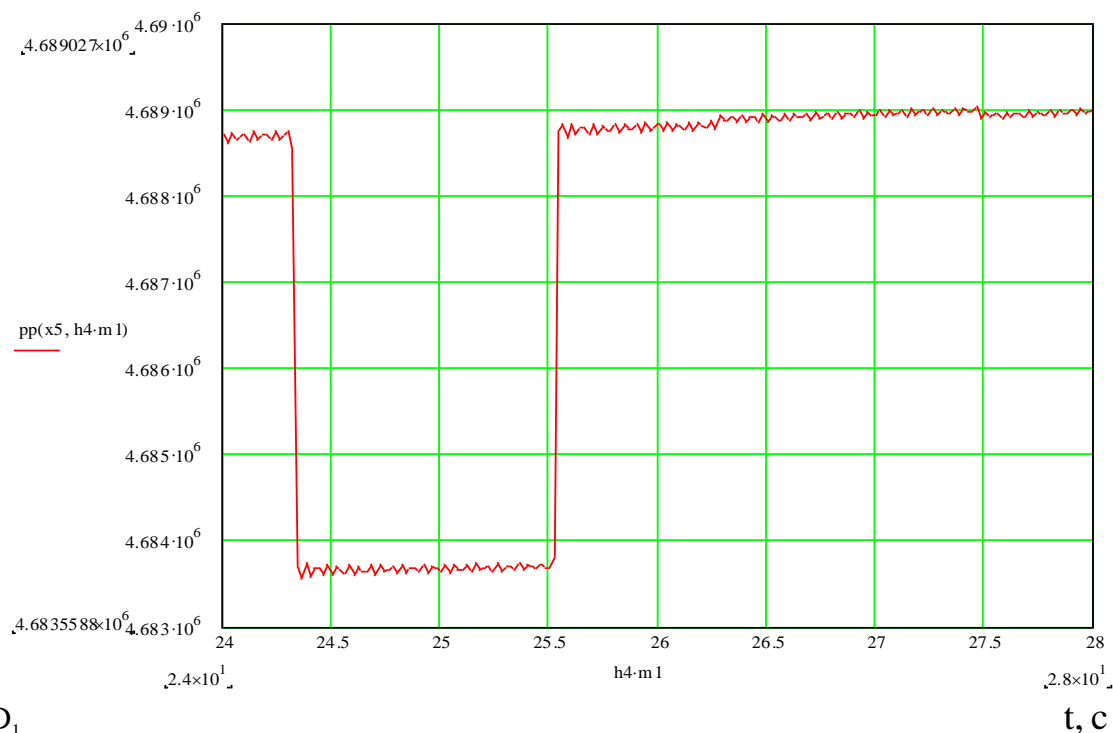
$p, \text{Па}$



$D_2$

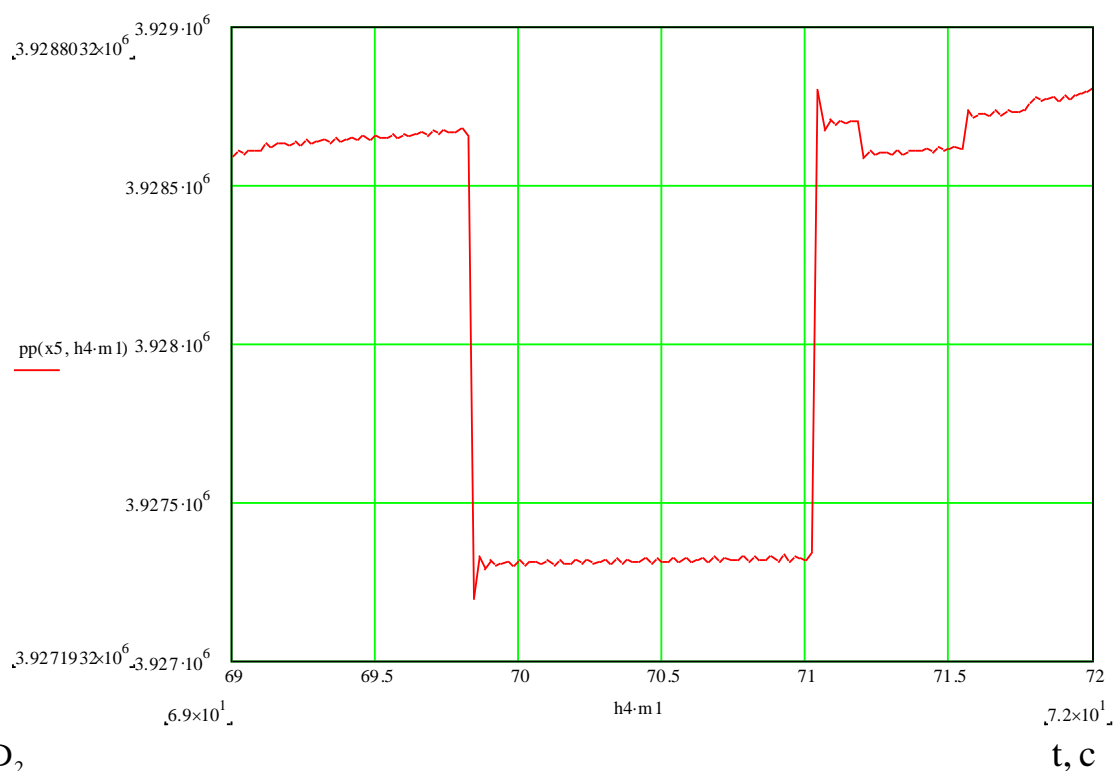
Рисунок 3. Импульсы, отраженные от «утечки»  $x_B = 47000 \text{ м}$  и зафиксированные датчиками  $D_1$  и  $D_2$

$p, \text{Па}$



$D_1$

$p, \text{Па}$



$D_2$

Рисунок 4. Импульсы, отраженные от узла  $x_3 = 23580$  м и зафиксированные датчиками  $D_1$  и  $D_2$ .

При прохождении импульса давления по трубопроводной системе через «утечку» возникают отрицательные импульсы давления (фаза импульса противоположна фазе исходного импульса), распространяющиеся вправо и влево от узла (В) со скоростью звука в данной среде и могут быть зафиксированы датчиками - рисунок 3. Кроме того, возникают положительные импульсы давления от узлов (1) ÷ (8) - рисунок 4, которые также распространяются в обе стороны по трубопроводу со скоростью звука.

Координату местонахождения «утечки»  $\tilde{x}$  можно найти следующим образом:

$$\tilde{x} = \frac{\tilde{x}_{(1)} + \tilde{x}_{(2)}}{2}, \quad (14)$$

$$\tilde{x}_{(1)} = \frac{x_{0(1)} + c \cdot t_{(1)}}{2}; \quad \tilde{x}_{(2)} = c \cdot t_{(2)} - x_{0(2)}.$$

Здесь  $t_{(1)}$  - время, в которое зафиксирован отрицательный импульс давления от «утечки» датчиком, расположенным до нее;  $t_{(2)}$  - время, в которое зафиксирован отрицательный импульс от «утечки» датчиком, расположенным после нее;  $x_{0(1)}$  - координата местонахождения датчика, расположенного до «утечки»;  $x_{0(2)}$  - координата местонахождения датчика, расположенного после «утечки».

Для рассматриваемой задачи имеем

$$x_{0(1)} = 20000 \text{ м}, \quad x_{0(2)} = 50000 \text{ м}, \quad c = 1116 \text{ м/с}, \quad t_{(1)} = 66,3 \text{ с}, \quad t_{(2)} = 87 \text{ с}.$$

Тогда по (14) найдем

$$\tilde{x}_{(1)} = 46995,4 \text{ м}; \quad \tilde{x}_{(2)} = 47092 \text{ м}; \quad \tilde{x} = 47043,2 \text{ м}.$$

Абсолютная погрешность местонахождения утечки

$$\Delta = |47043,2 - 47000| = 43,2 \text{ м};$$

относительная погрешность  $\varepsilon = \frac{43,2}{47000} \cdot 100\% \approx 0,09\%$  при длине

сканируемого участка 173000 м.

## Выводы

Решения поставленной задачи, а также исследования, проводимые в [7, 8] показали возможность обнаружения места «утечки» перекачиваемого нефтепродукта при волновом сканировании трубопроводной системы. Для этого необходимо создать в начале линейного участка трубопровода импульсы давления с заданными фазой и амплитудно-частотной характеристиками, а также установить в начале и конце линейных участков трубопровода специальные интеллектуальные датчики давления. Такие интеллектуальных датчиков должны характеризоваться большой дискретностью и частотой опроса, а также способностью распознать импульсы, отличающиеся фазой и амплитудно-частотной характеристикой от сканируемого импульса.

Перечисленным требованиям удовлетворяют интеллектуальные датчики давления, разработанные в ООО «НТ- Центр». Данные интеллектуальные датчики давления представляют собой интегрируемый чувствительный элемент, изготовленный из полупроводникового материала и измерительный преобразователь (ИП). Датчики характеризуются высокой чувствительностью, надежностью и стабильностью работы, малой погрешностью от влияния случайных выбросов экспериментальных данных, получаемых в результате градуировочного эксперимента, высокой точностью измерительных преобразователей за счет используемого способа коррекции статистических характеристик [9].

## Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гостехиздат, 1950. 676 с.
2. Пустовойт Б.В. Механика движения жидкостей в трубах. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Недра, 1980 .159с.
3. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учебник для вузов. В 2-х кн. М.: Энергоатомиздат, 1991.- Кн. 1. 351 с.
4. Галиакбарова Э.В. Математическое моделирование процесса распространения импульса давления по трубопроводной системе, заполненной капельной жидкостью // Региональная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых по математике и физике: сб. тр./ БГУ. Уфа, 2001. С. 55 -60.
5. Галиакбарова Э.В., Гольянов А.А. Математическое моделирование распространения импульса давления в трубопроводной системе // Транспорт и хранение нефтепродуктов: науч.-исслед. сб./ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ. 2002. Вып. 10-11. С.35-41.

6. Галиакбарова Э.В. Математическая модель трубопроводных систем для исследования «утечек» // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2006. Т.13, вып. 3. С.485.

7. Галиакбарова Э.В. Галиакбаров В.Ф. Импульсное сканирование нефтепроводов для обнаружения утечек // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов: сб. науч. тр. / ИПТЭР. Уфа, 2012. № 3. С.162-168.

8. Пат. 2197679 РФ, МПК F 17 D 5/02. Способ определения места утечки жидкости из трубопровода / В.Ф. Галиакбаров, А.А. Гольянов, Г.Е. Коробков (РФ). 2001108766/06; Заявлено 03.04.2001; Оpubл. 27.01.2003. // Бюл. изобретений. №2003. 3. С. 652

9. Пат. 2199088 РФ, МПК G 01 D 3/02, G 01 R 35/00. Способ коррекции статических характеристик измерительных преобразователей/ Асадуллин М.З., Аминев Ф.М., Галиакбаров В.Ф., Емец С.В., Ковшов В. Д., Коробков Г. Е., Полищук И.Н. - 2002121952/28(023559); Заявлено 11.04.02; Оpubл. 20.02.2003 //Бюл. изобретений 2003. №5. С. 490

## MATHEMATICAL MODELING WHEN PULSED STUDY MAIN PIPELINE MODE PUMPING OIL TO DETECT LEAKS

E.V. Galiakbarova, V.F. Galiakbarov  
FSBEI Ufa state petroleum technical university, LLC "NT-Center"  
e-mail: emi.galiakbar@yandex.ru

**Abstract.** Mathematical modeling agreed with the basic provisions of the mechanics of movement of liquids in pipes, using methods of similarity and dimension theory, methods of mathematical physics, numerical solutions. The resulting solutions have shown the ability to detect areas of "leakage" of pumped oil product at a wave scanning pipelines. Pressure pulse generated at the beginning of the inspected pipeline in the face of the "brain" changes the phase reversal. Formed negative pulses - pulses reflected from the "brain" and pulse passing through a "leak" that travel at the speed of sound in the environment and can be fixed by special intelligent pressure sensors.

**Keywords:** environmental security, mathematical model, pipelines, pulses, leaks oil.

### References

1. Loitsyansky L.G. Fluid mechanics. Leningrad, RI, 1950.676 c.
2. Pustovoit B.V. Mechanical movement of fluids in pipes. 2nd ed. Pererab.i add. Nedra, 1980 .159 s.
3. Shterenliht D.V. Hydraulics: a textbook for high schools. In 2 books. Energoatomizdat, Moscow, 1991. - Pr. 1. 351.
4. Galiakbarova E.V. Mathematical modeling of the pulse pressure piping system filled with liquid droplet // Regional School conference for graduate students and young researchers in mathematics and physics: Sat. papers / BSU. Ufa, 2001. Pp. 55 -60.
5. Galiakbarova E.V. Minnows A.A. Mathematical modeling of the pressure pulse in the piping // Transport and storage of petroleum products: Scientific-issled. Sat / TSNIITENEFTEHIM. 2002. No. 10-11. P.35-41.
6. Galiakbarova E.V. Mathematical model of pipeline systems for the study "leaks" // Review of Applied and Industrial Mathematics. 2006. T.13, no. 3. S. 485.
7. Galiakbarova E.V., V.F. Galiakbarov. Pulsed scanning pipeline leak detection // Problems of collection, treatment and transportation of petroleum products: Sat. scientific. mp. / IPTER. Ufa, 2012. Number 3. P.162-168.

8. Pat. 2197679 RF MIC F 17 D 5/02. The method for determining the leak of fluid from the pipeline / V.F. Galiakbarov, A.A. Minnows, G.E. Boxes (RF). 2001108766/06; Announced 03.04.2001, Publ. 01/27/2003 // Bull. 2003. 3. P. 652

9. Pat. 2199088 RF, IPC G 01 D 3/02, G 01 R 35/00. Method for correcting the static characteristics transmitters / M.Z. Asadullin, F.M. Amin, V.F. Galiakbarov Yemets, bucket V.D., Korobkov G.E., I.N. Polishchuk. 2002121952/28 (023559); Announced 11/04/02, publ. 02/20/2003 // Bull. 2003. 5. P. C. 490

### **Сведения об авторах**

Галиакбарова Э. В., канд. физ.- мат. наук, доцент кафедры «Математика»,  
ФГБОУ ВПО УГНТУ

E. Galiakbarova, cand. phys. - math. sci., associate professor of chair "Mathematics"  
FSBEI USPTU

e-mail: emi.galiakbar@yandex.ru

Галиакбаров В. Ф., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «НТ-Центр»

W. Galiakbarov, dr. tech sci., general director, Ltd. "NT-Center"

e-mail: nt-centr@mail.ru