

**Владислав Шайхулагзамович ШАГАПОВ<sup>1</sup>**  
**Исмагилян Гарифьянович ХУСАИНОВ<sup>2</sup>**  
**Эмилия Вильевна ГАЛИАКБАРОВА<sup>3</sup>**  
**Зульфия Разифовна ХАКИМОВА<sup>4</sup>**

УДК 534.21

### **К ТЕОРИИ АНАЛИЗА ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЕМКОСТИ МЕТОДОМ ОПРЕССОВКИ\***

<sup>1</sup> доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный сотрудник,  
Институт механики им. Р. Р. Мавлютова,  
Уфимский федеральный исследовательский центр РАН  
shagapov@ Rambler.ru

<sup>2</sup> доктор физико-математических наук, профессор,  
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета  
ivt30@mail.ru

<sup>3</sup> кандидат физико-математических наук, доцент,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
emi.galiakbar@yandex.ru

<sup>4</sup> аспирант, Физико-технический институт  
Башкирского государственного университета (г. Уфа)  
zulfya.hakimova@yandex.ru

#### **Аннотация**

Исследуется процесс релаксации давления в емкости, имеющей поврежденный участок стенки, после опрессовки. Для проверки технического состояния объектов хранения

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке государственного бюджета в рамках госзадания на 2019-2020 гг. (код проекта 0246-2019-0052).

---

**Цитирование:** Шагапов В. Ш. К теории анализа герметичности емкости методом опрессовки / В. Ш. Шагапов, И. Г. Хусаинов, Э. В. Галиакбарова, З. Р. Хакимова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 4 (20). С. 129-142.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-129-142

нефтепродуктов применяются различные методы. Метод опрессовки является одним из методов диагностики, относящийся к методам неразрушающего контроля. Темп снижения давления служит характеристикой герметичности системы.

В данной работе рассмотрены случаи наземного и подземного расположения емкости. Метод опрессовки заключается в том, что внутри проверяемого сосуда создают избыточное давление и наблюдают за его релаксацией. За определенное время восстановления давления можно оценить наличие сквозного дефекта стенки сосуда. Для этого построены математические модели, учитывающие фильтрацию жидкости в зависимости от расположения емкости. Получены аналитические решения задач, а также формулы, описывающие зависимости времени релаксации давления в емкости от физических свойств жидкости и грунта, геометрических размеров емкости и поврежденного участка стенки. Отдельно рассматриваются случаи двумерной и трехмерной фильтрации жидкости для сквозного дефекта стенки подземной емкости. Представлены результаты численного расчета в зависимости от времени снижения и времени полураспада давления от площади поврежденного участка стенки. Выведено, что полученные решения позволяют оценить масштабы поврежденного участка методом опрессовки при известных значениях параметров емкости, жидкости и грунта.

#### **Ключевые слова**

Релаксация давления, емкость, фильтрация, опрессовка.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-129-142**

#### **Введение**

Существуют различные методы диагностики повреждений объектов хранения нефтепродуктов (емкостей, резервуаров и т. п.). Одним из методов обнаружения дефектов стенок емкостей является метод опрессовки, который применяется при испытаниях гидравлических систем. В работах [9-12, 14] описывается способ применения данного метода для исследования коллекторских характеристик прискважинных зон.

В работе [9] рассмотрена задача о восстановлении давления в скважине после ее вакуумирования. На основе численных методов исследована зависимость полупериода восстановления давления в скважине от коэффициента проницаемости окружающей пористой среды. В [12, 14] исследуется задача о взрыве в полости, представляющей собой трещину в пласте, окруженной насыщенной газом пористой средой, проанализированы одномерный, радиальный и сферический случаи. В [10, 11] анализируется задача о восстановлении давления в трещине пористого пласта после опрессовки, приведены численные решения, найдена аналитическая зависимость времени релаксации давления от параметров пористой среды.

Опрессовка является методом неразрушающего контроля скважины. Некоторые теоретические аспекты метода неразрушающего контроля, учитывающие

особенности распространения акустических волн, рассматриваются как для диагностики состояния трубопроводов [13], так и для определения качества перфорации [5]. Метод опрессовки, позволяющий обнаружить нарушение герметичности системы, основан на исследовании динамики релаксации давления.

После того, как проведена опрессовка емкости и доказана возможность ее повреждения, можно установить специальное оборудование для обнаружения месторасположения утечки нефтепродуктов [1, 2, 7].

В данной работе метод опрессовки применяется для оценки масштаба поврежденного участка стенки для случаев наземного и подземного расположения емкости.

Отметим, что, в отличие от работ [9-12, 14], в данной работе рассмотрены случаи наземного и подземного расположения емкости, при этом предполагается, что внутри емкости отсутствует газовая фаза; получено аналитическое решение, описывающее изменение давления вокруг емкости после опрессовки; исследованы зависимость времени релаксации давления в емкости от геометрических размеров емкости и поврежденного участка стенки.

### 1. Наземная емкость в виде горизонтальной трубы

Пусть у емкости, заполненной жидкостью, нарушена герметичность, например образовалась щель, пробоина и т. п. В исходном состоянии давление и плотность жидкости соответственно равны  $p_0$  и  $\rho_0$ . В начальный момент времени при  $t = 0$  производится опрессовка емкости, т. е. давление в емкости  $p$  мгновенно повышается до некоторого значения  $p^{(M)}$ .

Для исследования зависимости динамики релаксации давления от размеров щели запишем математическую модель задачи. Будем полагать, что в процессе опорожнения жидкости через щель давление в емкости однородное, за исключением небольшого объема вблизи щели. Кроме того, податливостью стенок емкости в процессе опорожнения будем пренебрегать (емкость достаточно толстостенная и из крепкого материала).

Учитывая, что жидкость будем считать линейно сжимаемой, запишем уравнение состояния в виде:

$$p - p_0 = C^2(\rho - \rho_0), \quad (1.1)$$

где  $p$ ,  $\rho$  и  $C$  — давление, плотность и скорость звука в жидкости.

Для начального момента времени ( $t = 0$ ) из уравнения состояния (1.1) определяем максимальное значение плотности:

$$\rho^{(M)} = \rho_0 + \frac{p^{(M)} - p_0}{C^2}. \quad (1.2)$$

Запишем уравнение сохранения массы жидкости в процессе опорожнения емкости:

$$\frac{dM}{dt} = -S\rho_0 u \quad (M = \rho V), \quad (1.3)$$

где  $S$  и  $u$  — площадь сечения щели и средняя скорость истечения жидкости из емкости через щель,  $V$  — объем емкости.

В зависимости от размера щели, ее геометрических характеристик и свойств жидкости (вязкости и плотности) скорость истечения  $u$  будет определяться разгоном жидкости при ее течении к поврежденному участку и гидравлическом сопротивлении щели. Поэтому для нее можем записать уравнения:

$$\frac{u^2}{2} - \frac{p - p_{(-)}}{\rho_0} = 0, \quad u = k(p_{(-)} - p_{(+)}). \quad (1.4)$$

Первое из этих уравнений представляет собой интеграл Бернулли в приближении слабо сжимаемой жидкости, второе — скорость ламинарного истечения через щель;  $p_{(+)}$  и  $p_{(-)}$  — значения давления на входном и выходном срезе щели;  $k$  — коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от геометрических характеристик щели и вязкости жидкости. В дальнейшем будем полагать, что  $p_{(+)} = p_0$ .

Из уравнений (1.4), исключая величину  $p_{(-)}$ , для скорости истечения можем получить формулу:

$$u = \frac{1}{\rho_0 k} \left( \sqrt{1 + 2(p - p_0)\rho_0 k^2} - 1 \right). \quad (1.5)$$

Подставляя  $\rho$  и  $u$  из (1.1) и (1.5) в уравнение (1.3), получим:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{SC^2}{kV} \left( \sqrt{1 + 2(p - p_0)\rho_0 k^2} - 1 \right). \quad (1.6)$$

В том случае, когда удовлетворяется условие  $2(p^{(M)} - p_0)\rho_0 k^2 \ll 1$ , т. е. при слабых перепадах давления  $\Delta p^{(M)}$  ( $\Delta p^{(M)} = p^{(M)} - p_0$ ) и малых значениях  $k^2$ , уравнение (1.6) можно привести к виду:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p - p_0}{t_{(p)}}, \quad t_{(p)} = \frac{V}{S\rho_0 C^2 k}. \quad (1.7)$$

Решение уравнения (1.7) с учетом начального условия  $p = p^{(M)}$  при  $t = 0$  можем получить в виде:

$$p = p_0 + (p^{(M)} - p_0) \exp(-t/t_{(p)}). \quad (1.8)$$

Отсюда видно, что параметр  $t_{(p)}$  выражает характерное время снижения давления в емкости (за время  $t_{(p)}$  давление снижается в  $e$  раз).

Если же в начальный момент времени для системы удовлетворяется условие  $2(p^{(M)} - p_0)\rho_0 k^2 \gg 1$ , то для начальной стадии снижения давления в емкости справедливо уравнение:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{SC^2}{V} \sqrt{2\rho_0(p - p_0)}. \quad (1.9)$$

При аналогичном, принятом выше начальном условии ( $p = p^{(M)}$  при  $t = 0$ ) решение (1.9) запишем как

$$\sqrt{p - p_0} = \sqrt{p^{(M)} - p_0} - \frac{SC^2 \sqrt{p_0}}{\sqrt{2V}} t. \quad (1.10)$$

Как видно из формулы (1.10), в этом случае снижение давления в емкости до значения  $p = p_0$  происходит за конечное время  $\bar{t}$ , значение которого определяется из выражения:

$$\bar{t} = \sqrt{\frac{2(p^{(M)} - p_0)}{\rho_0}} \frac{V}{SC^2}. \quad (1.11)$$

## 2. Подземная емкость

Рассмотрим подземную емкость с объемом  $V$ . Пусть часть ее стенок с площадью, равной  $S$ , повреждена, например имеется сквозное повреждение. При описании задачи примем следующие допущения: емкость и окружающее ее пористое пространство заполнены одной и той же жидкостью; характерные линейные размеры поврежденного участка стенки (характерная длина и ширина, например) значительно больше пристеночной области распространения фильтрационных течений в грунте вытекшей из емкости жидкости за время снижения давления в нем.

Уравнение состояния запишем в виде:

$$p - p_0 = C^2(\rho - \rho_0), \quad (2.1)$$

где  $p$  и  $\rho$  — плотность и давление жидкости,  $p_0$  — давление насыщающей грунт жидкости,  $C$  — скорость звука в жидкости.

Запишем уравнение сохранения массы жидкости в емкости:

$$\frac{dM}{dt} = -\rho_0 S u, \quad M = V\rho, \quad (2.2)$$

где  $u$  — скорость истечения жидкости из емкости через разрушенную поверхность стенки, которая считается одинаковой по поверхности стенки и зависит только от времени  $t$ .

Для определения скорости истечения жидкости  $u$  запишем уравнение пьезопроводности в плоскоодномерном приближении и закон Дарси:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}, \quad \kappa = \frac{k_G \rho_0 C^2}{m_G \mu}, \quad u' = -\frac{k_G}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial x}, \quad 0 < x < \infty, \quad (2.3)$$

где  $p'$  и  $u'$  — распределение давления и скорости фильтрации в жидкости в грунте возле поврежденного участка;  $k_G$  и  $m_G$  — коэффициенты проницаемости и пористости грунта;  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости;  $\kappa$  — коэффициент пьезопроводности.

Начальное условие для давления запишем в виде:

$$p' = p_0, \quad (0 < x < \infty, t \leq 0). \quad (2.4)$$

Кроме того, будем полагать, что скорость истечения полностью определяется вязкостными силами трения жидкости при ее движении в грунте. Тогда граничные условия на поврежденной стенке емкости можно записать в виде:

$$u' = u, p' = p \quad (x = 0, t > 0). \quad (2.5)$$

Уравнение, описывающее изменение давления в емкости, получим из закона сохранения массы жидкости (2.2) с учетом уравнения состояния (2.1):

$$p^{(M)} - p = \frac{S}{V} \rho_0 C^2 \int_0^t u(\tau) d\tau. \quad (2.6)$$

Решение уравнения пьезопроводности (2.3) при переменном граничном условии (2.5) записывается в виде [6, 8]:

$$p' - p_0 = \int_0^t \frac{\partial U(x, t-t')}{\partial t} (p(t') - p_0) dt', \quad (2.7)$$

где  $U(x, t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{\kappa t}}} e^{-\xi^2} d\xi$ . С учетом решения (2.7), а также закона Дарси (2.3) и граничного условия (2.5) из (2.6) следует интегральное уравнение для описания зависимости релаксации давления в емкости от параметров системы:

$$p^{(M)} - p = 2 \frac{k_G S}{\mu V} \rho_0 C^2 \int_0^t \frac{(p(t') - p_0) dt'}{\sqrt{\pi \kappa (t-t')}}. \quad (2.8)$$

Это уравнение можно представить в виде:

$$1 - \Delta P = \int_0^t \frac{\Delta P(t') dt'}{\sqrt{\pi (t-t') \tilde{t}}}, \quad (2.9)$$

$$\Delta P = (p - p_0) / (p^{(M)} - p_0), \tilde{t} = 1 / (2\sqrt{\kappa} m_G S / V)^2.$$

Применяя к уравнению (2.9) преобразование Лапласа, найдем изображение для  $\Delta P$ :

$$\Delta \tilde{P} = \frac{1}{q + \sqrt{q/\tilde{t}}}, \quad \text{где } \Delta \tilde{P} = \int_0^\infty e^{-qt} \Delta P(t) dt. \quad (2.10)$$

Решение для изображения (2.10) является табличным [3, 4] и имеет вид:

$$\Delta P = \exp(\tau) \Phi(\sqrt{\tau}), \quad \tau = t/\tilde{t}, \quad \Phi(\xi) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-\lambda^2} d\lambda. \quad (2.11)$$

Таким образом, нашли универсальную зависимость безразмерного давления  $\Delta P$  от безразмерной времени  $\tau$ . Отсюда для характерного значения безразмерного времени, при котором происходит полураспад давления ( $\Delta P = 0,5$ ), получим  $\tau^{(0,5)} = 0,59$ . Тогда для характерного размерного времени полураспада давления с учетом выражения для  $\tau$  из (2.11) будем иметь:

$$t^{(0,5)} = 0,59 \tilde{t} = 0,59 \left( V / 2\sqrt{\kappa} m_G S \right)^2. \quad (2.12)$$

Отсюда, подставляя вместо коэффициента пьезопроводности формулу из (2.3), получим:

$$t^{(0,5)} = \frac{0,15V^2\mu}{S^2m_Gk_G\rho_0C^2}. \quad (2.13)$$

Процесс изменения давления в малом расстоянии от повреждения с внешней стороны стенки можно представить в виде, который выводится из формул (2.7), (2.11):

$$\Delta p' = \exp\left(\tau - \frac{x - V/S}{V/4Sm_G^2}\right) \Phi\left(\sqrt{\tau} + \frac{x - V/S}{\sqrt{\tau}V/2Sm_G^2}\right), \quad (2.14)$$

$$(\Delta p' = (p' - p_0)/(p^{(M)} - p_0)).$$

Если же линейные размеры поврежденного участка стенки емкости значительно меньше области распространения фильтрационных течений в грунте, то проявляются трехмерные эффекты фильтрации. Введем величину  $a$ , допустив, что длина и ширина поврежденного участка одного порядка:

$$a = \sqrt{S/\pi}. \quad (2.15)$$

Для приближенного учета эффектов трехмерной фильтрации вблизи поврежденного участка примем, что поврежденный участок представляет собой полусферическую поверхность радиуса  $a$ , а истечение жидкости из емкости является радиально-симметричным. Тогда массовый расход и скорость истечения жидкости удовлетворяют уравнению:

$$J = 2\rho_0\pi a^2 u = 2\rho_0 S u. \quad (2.16)$$

Для определения скорости истечения жидкости  $u$  запишем уравнение пьезопроводности и закон Дарси:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \frac{\kappa}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p'}{\partial r} \right), \quad u' = -\frac{k_G}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial r}, \quad (a < r < \infty). \quad (2.17)$$

Начальное и граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} p' &= p_0 \quad (t < 0, a < r < \infty), \\ p' &= p \quad (t \geq 0, r = a), \\ p' &= p_0 \quad (t \geq 0, r = \infty), \\ u &= u'|_{r=a} = -\frac{k_G}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial r} \Big|_{r=a} \quad (t \geq 0). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Решение уравнения пьезопроводности (2.17) при граничных условиях (2.18) имеет вид:

$$p' - p_0 = \frac{a}{r} \int_0^t \frac{\partial U(r-a, t-t')}{\partial t} (p(t') - p_0) dt', \quad (2.19)$$

где функция  $U(x, t)$  определяется из (2.7).

На основании закона сохранения (2.2) и полученного решения (2.19) для характерного времени  $\tilde{t}$  будем иметь:

$$\tilde{t} = 1/(4\sqrt{\kappa}m_G S/V)^2. \quad (2.20)$$

При этом  $\tilde{t}$  для трехмерной модели в 4 раза меньше, чем для плоского случая фильтрации.

Тогда для размерного времени полураспада давления будем иметь:

$$t^{(0,5)} = 0,04 \frac{V^2 \mu}{S^2 m_G k_G \rho_0 C^2}. \quad (2.21)$$

### 3. Численные расчеты

На рис. 1 представлены зависимости времени  $\tilde{t}$  снижения давления от величины  $S$  для различных жидкостей, построенные по формуле (1.11). Для физических параметров воды, керосина, дизельного топлива и нефти приняты значения:  $\rho_0 = 10^3, 819, 879$  и  $890$  кг/м<sup>3</sup>;  $C = 1\,500, 1\,330, 1\,250$  и  $1\,225$  м/с. Значения изменения давления и объема соответственно приняты:  $\Delta p^{(M)} = 0,1$  МПа,  $V = 100$  м<sup>3</sup>. Из сравнения следует, что величина плотности не является решающим фактором. В нефти наблюдается наибольшее время снижения давления (жидкость с наименьшей скоростью звука).

На рис. 2 представлены зависимости времени полураспада давления  $t^{(0,5)}$  ( $t^{(0,5)} = 0,59 \tilde{t}$ ) от размера площади поврежденного участка стенки емкости  $S$ . Емкость заполнена керосином (рис. 2а) и дизельным топливом (рис. 2б), которые имеют следующие значения параметров соответственно:  $\mu = 1,5 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

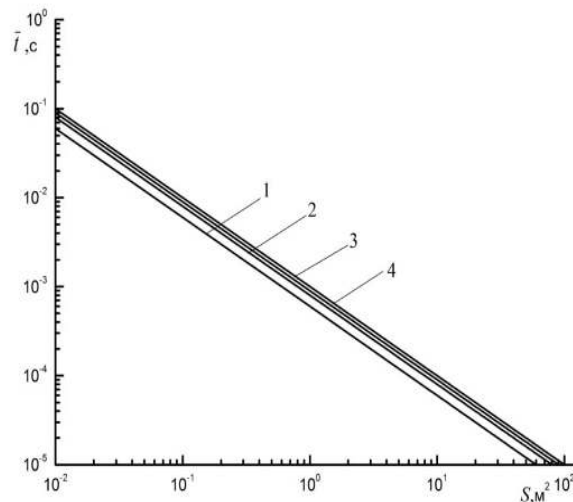


Рис. 1. Зависимости времени  $\tilde{t}$  снижения давления от размера площади поврежденного участка стенки  $S$  в емкости, заполненной жидкостью: 1 — вода, 2 — керосин, 3 — дизельное топливо, 4 — нефть

Fig. 1. Dependences of the time  $\tilde{t}$  of pressure reduction on the size of the area of the damaged section of the wall  $S$  in the tank filled with liquid: 1 — water, 2 — kerosene, 3 — diesel fuel, 4 — oil

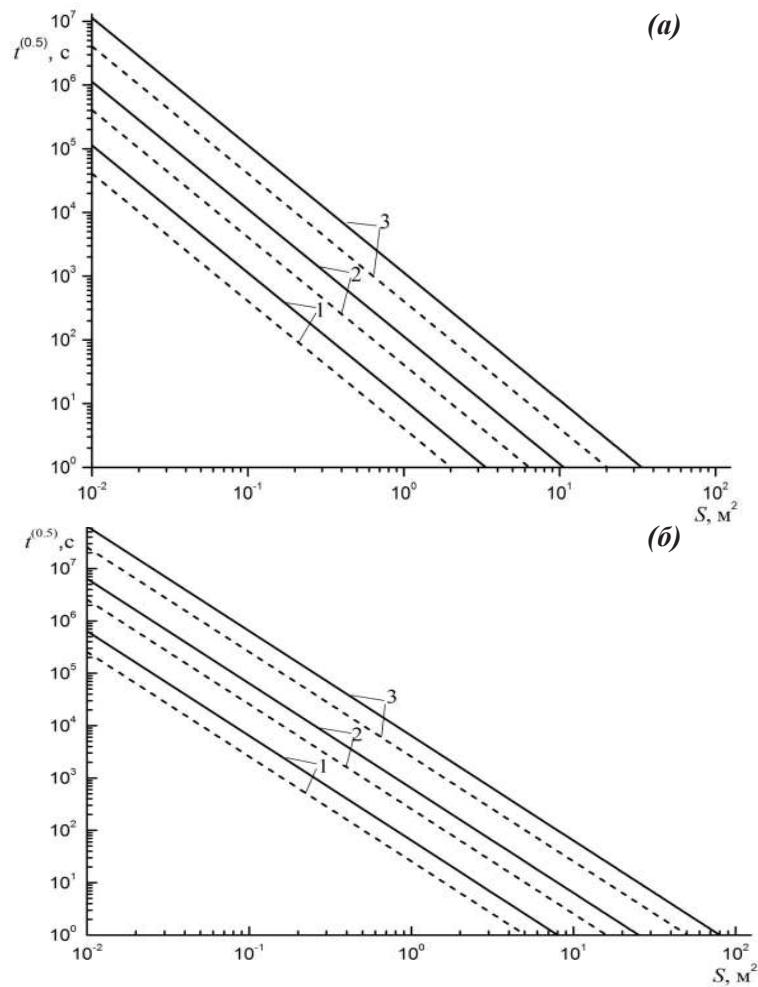


Рис. 2. Предельные зависимости времени полураспада давления  $t^{(0,5)}$  в емкости, содержащей керосин (а) и дизельное топливо (б), от размера площади поврежденного участка стенки  $S$  при различных значениях коэффициента проницаемости грунта:  
 1 —  $k_G = 10^{-9} \text{ м}^2$ ; 2 —  $k_G = 10^{-10} \text{ м}^2$ ;  
 3 —  $k_G = 10^{-11} \text{ м}^2$

Fig. 2. Limit dependences of the half-life of pressure  $t^{(0,5)}$  in a tank containing kerosene (a) and diesel fuel (б) on the size of the area of the damaged section of the wall  $S$  for various values of the soil permeability coefficient:  
 1 —  $k_G = 10^{-9} \text{ m}^2$ ; 2 —  $k_G = 10^{-10} \text{ m}^2$ ;  
 3 —  $k_G = 10^{-11} \text{ m}^2$

Рассматривается емкость объема  $V = 100 \text{ м}^3$ , пористость грунта  $m_G = 0,1$ . Сплошные линии построены по формуле (2.13), а пунктирные — по (2.21); номерами 1-3 обозначены линии, соответствующие значениям проницаемости грунта  $k_G = 10^{-9}, 10^{-10}, 10^{-11} \text{ м}^2$ .

Из графиков видно, что чем меньше коэффициент проницаемости грунта, тем больше время релаксации давления. В емкости, содержащей дизельное топливо, у которого коэффициент вязкости больше, чем у керосина, процесс релаксации происходит медленнее примерно в 5 раз.

### Заключение

Получены аналитические решения, описывающие динамику релаксации давления в наземной и подземной емкостях, имеющих поврежденный участок, после опрессовки. Эти решения позволяют оценить масштабы поврежденного участка стенок емкости по времени полураспада давления при известных значениях параметров емкости, жидкости и грунта.

### Обозначения

$a$  — радиус, м;  $C$  — скорость звука, м/с;  $J$  — массовый расход, кг/с;  $k_G$  — коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>;  $m$  — масса, кг;  $m_G$  — коэффициент пористости;  $p$  — давление, МПа;  $p'$  — распределение давления в грунте, МПа;  $u$  — скорость истечения жидкости из емкости, м/с;  $u'$  — скорость фильтрации, м/с;  $S$  — площадь повреждения, м<sup>2</sup>;  $t$  — время, с;  $t^{(0,5)}$  — время полураспада, с;  $V$  — объем емкости, м<sup>3</sup>;  $\kappa$  — коэффициент пьезопроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>.

### Индексы

Нижний индекс (0) — значение параметра в исходном состоянии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиакбаров В. Ф. Построение интеллектуальной системы обнаружения несанкционированных скачков давления в магистральных трубопроводах для поддержания промышленной и пожарной безопасности / В. Ф. Галиакбаров, В. Д. Ковшов, Э. В. Галиакбарова, З. М. Нагаева // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов. 2015. № 2. С. 188-195.
2. Галиакбарова Э. В. Волновые исследования нефтепродуктопроводов для обнаружения «утечек» / Э. В. Галиакбарова // Нефтегазовое дело. 2012. № 10. С. 44-49.
3. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования / Г. Дёч. М.: Наука, 1971. 288 с.
4. Диткин В. А. Справочник по операционному исчислению / В. А. Диткин, А. П. Прудников. М.: Высшая школа, 1965. 466 с.
5. Ишмухаметова А. А. Определение качества перфорации скважины с помощью импульсов давления / А. А. Ишмухаметова, И. Г. Хусаинов // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. № 6. 2008. С. 89-94.
6. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. М.: Высшая школа, 2001. 550 с.
7. Система контроля состояния трубопровода: пат. 2606719 Рос. Федерация: F17D05/00 / В. Ф. Галиакбаров, Э. В. Галиакбарова, В. Д. Ковшов, Ф. М. Аминев, З. Р. Хакимова. № 2015154274; заявл. 16.12.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

8. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. М.: Наука, 1972. 535 с.
9. Хафизов Р. М. Динамика восстановления давления в «вакуумированной» скважине / Р. М. Хафизов, И. Г. Хусаинов, В. Ш. Шагапов // Прикладная математика и механика. 2009. Том 73. № 4. С. 615-621.
10. Хафизов Р. М. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой породой, при ее опрессовке введением газа / Р. М. Хафизов, И. Г. Хусаинов, В. Ш. Шагапов // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Том 47. № 1. С. 109-118.
11. Хусаинов И. Г. Динамика релаксации давления в полости с плоско-параллельными стенками после ее опрессовки / И. Г. Хусаинов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 794-805.
12. Хусаинов И. Г. Исследование параметров пласта методом опрессовки / И. Г. Хусаинов, Г. Я. Хусаинова // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 705-713.
13. Шагапов В. Ш. К теории акустического сканирования трубопроводов с поврежденными участками / В. Ш. Шагапов, Э. В. Галиакбарова, З. Р. Хакимова // Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Том 11. № 2. С. 263-271.
14. Шагапов В. Ш. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой горной породой / В. Ш. Шагапов, Г. Я. Хусаинова, И. Г. Хусаинов, Р. М. Хафизов // Физика горения и взрыва. 2002. Том 38. № 3. С. 106-112.

Vladislav Sh. SHAGAPOV<sup>1</sup>  
Ismagilyan G. KHUSAINOV<sup>2</sup>  
Emiliya V. GALIAKBAROVA<sup>3</sup>  
Zulfya R. KHAKIMOVA<sup>4</sup>

UDC 534.21

### TO THE THEORY ANALYSIS OF TIGHTNESS OF TANK OF PRESSURE TESTING\*

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher,  
Mavlyutov Institute of Mechanics,  
Ufa Investigation Center of the Russian Academy of Sciences  
shagapov@rambler.ru

<sup>2</sup> Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,  
Sterlitamak Branch of Bashkir State University  
ivt30@mail.ru

<sup>3</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,  
Ufa State Petroleum Technological University  
emi.galiakbar@yandex.ru

<sup>4</sup> Postgraduate Student, Bashkir State University (Ufa)  
zulfya.hakimova@yandex.ru

#### Abstract

This article studies the process of relaxation of the pressure in a tank with the damaged area of the wall after pressure-testing. The authors use different methods for the diagnosis of the technical condition of objects of petroleum products storage. Pressure testing is one of nondestructive methods. The rate of pressure decrease is characteristic of the system tightness.

---

\* This work was performed with the financial support of the state budget within the framework of the state task for 2019-2020 (project code 0246-2019-0052).

---

**Citation:** Shagapov V. Sh., Khusainov I. G., Galiakbarova E. V., Khakimova Z. R. 2019. "To the theory analysis of tightness of tank of pressure testing". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 4 (20), pp. 129-142.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-129-142

This article studies the cases of ground and underground location of the tank. Pressure testing involves excess pressure inside of a tank and observing its decrease. Over time, one can assess the integrity of the system. This has required creating mathematical models to account the filtration of the liquid depending on the location of the tank. The results include the analytical solution of the task and the formulas for describing the dependence of the relaxation time of pressure in the tank from the liquid and soil parameters, geometry of the tank, and the damaged portion of the wall. The two- and three-dimensional cases of liquids filtration for the case of underground location of the tank were considered. The results of some numerical calculations of the dependence of reduction time and the time of half-life pressure from the area of the damaged portion of the wall were shown. The obtained solutions allow assessing the extent of the damaged area by the pressure testing with known values of tank, liquid, and soil.

**Keywords**

Relaxation of the pressure, tank, filtration, pressure-testing.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-4-129-142**

**REFERENCES**

1. Galiakbarov V. F., Kovshov V. D., Galiakbarova E. V., Nagayeva Z. M. 2015. "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*, no 2, pp. 188-195. [In Russian]
2. Galiakbarova E. V. 2012. "Wave study products pipelines for leak detection". *Neftegazovoye delo*, no 10, pp. 44-49. [In Russian]
3. Doetsch G. 1971. *Manual for Using Laplace Transform Z-transformation [Anleitung zum praktischen gebrauch der Laplace-transformation und der Z-transformation]*. Translated from German. Moscow: Nauka. [In Russian]
4. Ditkin V. A., Prudnikov A. P. 1965. *Handbook of Operational Calculus*. Moscow: Vysshaya shkola. [In Russian]
5. Ishmukhametova A. A., Khusainov I. G. 2008. "Determination of quality of borehole perforation by means of pressure impulses". *Trudy Instituta mekhaniki im. R. R. Mavlyutova Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, no 6, pp. 89-94. [In Russian]
6. Kartashov E. M. 2001. *Analytical Methods in the Theory of heat Transfer of the Solid Bodies*. Moscow: Vysshaya shkola. [In Russian]
7. Galiakbarov V. F., Galiakbarova E. V., Kovshov V. D., Aminev F. M., Khakimova Z. R. 2017. RF Patent No 2606719, F17D05/00. "Control system of a condition of the pipeline". No 2015154274; declared 16 December 2015; published 10 January 2017. *Bulletin* no 1. [In Russian]
8. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. 1972. *Calculations in Mathematical Physics*. Moscow: Nauka. [In Russian]
9. Khafizov R. M., Khusainov I. G., Shagapov V. Sh. 2009. "Dynamics of the pressure relaxation in a 'depressurized' borehole". *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 73, no 4, pp. 443-448. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2009.08.006

10. Khafizov R. M., Khusainov I. G., Shagapov V. Sh. 2006. "Pressure relaxation in a hole surrounded by porous and permeable rock in hole pressure tests with gas injection". *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 47, no 1, pp. 91-98. DOI: 10.1007/s10808-006-0012-5
11. Khusainov I. G. 2014. "Dynamics of the relaxation of pressure in the cavity with plainly-parallel walls after it pressure tests". *Modern Problems of Science and Education*, no 5, pp. 794-805. [In Russian]
12. Khusainov I. G., Khusainova G. Ya. 2014. "Research of parameters of the stratum by method pressure tests". *Modern Problems of Science and Education*, no 3, pp. 705-713. [In Russian]
13. Shagapov V. Sh., Galiakbarova E. V., Khakimova Z. R. 2016. "To the theory of acoustic scanning of pipelines with the damaged areas". *Trudy Instituta mekhaniki im. R. R. Mavlyutova Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, vol. 11, no 2, pp. 263-271. [In Russian]
14. Shagapov V. Sh., Khusainova G. Ya., Khusainov I. G., Khafizov R. N. 2002. "Pressure relaxation in a hole surrounded by a porous and permeable rock". *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 38, no 3, pp. 346-351. DOI: 10.1023/A:1015885122011