УДК 532.546

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2019.4.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАГРЕВА ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА

© И. Г. Хусаинов

*Башкирский государственный университет**Стерлитамакский филиал**Россия, Республика Башкортостан, 453103 г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.**Тел: +7 (906) 109 45 93.**Email: ivt30@mail.ru*

Рассмотрен процесс нагрева призабойной зоны пласта (пористой среды) воздействием акустического поля. В исходном состоянии пористая среда состоит из двух зон: низкопроницаемой и высокопроницаемой. На границе среды имеется излучатель акустических волн. За счет трения жидкости об стенку скелета среды при ее колебательном движении происходит выделение тепла в системе. Получено выражение для подсчета среднего притока тепловой энергии за счет акустического поля в единицу объема системы «скелет – жидкость» за единицу времени. Рассмотрено воздействие на пористую среду низкочастотным акустическим полем. Исследован процесс очистки стенок пор пористой среды от осевших частиц парафина. В результате плавления парафина и очистки ближней к излучателю акустических волн области появляется третья зона – высокопроницаемая. Изучено движение границы между очищенной и низкопроницаемой зонами в зависимости от частоты и амплитуды акустической волны, а также от параметров пористой среды. Показано, что низкочастотное акустическое поле может быть эффективно использовано для нагрева призабойной зоны пласта и очистки стенок пор от парафиновых отложений.

Ключевые слова: *нагрев, акустическое поле, уравнение, температура, частота, амплитуда, пласт, фильтрация.*

Введение

В процессе долгой эксплуатации нефтяных скважин в результате оседания парафина и других твердых частиц на стенках пор уменьшаются фильтрационные свойства призабойной зоны пласта, и происходит снижение дебита [1–2]. Восстановление фильтрационных свойств именно в этой зоне является достаточным условием возобновления исходной производительности скважин [3].

В тех случаях, когда добываемая нефть содержит смолу или парафин, то для очистки призабойной зоны пласта используют тепловое воздействие. К видам теплового воздействия относятся: закачка горячих жидкостей в скважину; электротепловая обработка; паротепловая обработка [4].

С развитием технологий появились новые методы воздействия на призабойную зону пласта для увеличения притока нефти в скважину. К числу новых технологий относится метод воздействия на пласт с помощью акустического поля.

Изучение возможности использования акустического поля для очистки призабойной зоны пласта является достаточно актуальным. Преимуществом этого способа воздействия на пласт считается, во-первых, возможность регулирования мощности энергии волн акустического поля; во-вторых, экологическая чистота метода [5–6]. В работе [7] на основе теоретических расчетов, которые подтверждены промысловыми испытаниями и экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях, отмечено о больших возможностях применения

акустического поля для очистки призабойной зоны пласта.

Глубина действия акустического поля небольшая, но она соизмерима с величиной зоны кольтматации. Поэтому применение акустического поля для очистки призабойной зоны пласта является перспективным [7]. Однако следует отметить, что эффект увеличения дебита скважины от воздействия акустическим полем на призабойную зону пласта в некоторой степени зависит также от технического состояния скважины и от свойств породы.

В работах [5; 8] показано, что при двухчасовом воздействии низкочастотным акустическим полем с мощностью $N = 1.3 \text{ кВт/м}^2$ температура призабойной зоны пласта повышается на 15–18°C. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментально полученными данными в [9–10].

Исследование уменьшения вязкости нефти при нагреве пласта воздействием ультразвукового поля выполнено в работах [11–12]. Излучатель монохроматического ультразвукового поля расположен внутри скважины. Получены мощность теплового излучателя и плотность энергии поля в окрестности скважины. Построен график зависимости температуры от радиуса. Отмечено, что в результате воздействия ультразвуковым полем происходит не только нагрев призабойной зоны, а также происходит как тиксотропические изменения свойств жидкости, так и плавление осевших на стенках пор смол и парафинов.

В [5] предложена математическая модель процесса воздействия низкочастотным акустическим

полем на пористую среду, насыщенную жидкостью. Рассмотрен случай, когда жидкость совершает колебательные движения относительно скелета пористой среды, а сам скелет является несжимаемым. Считая, что диссипация акустической энергии происходит только за счет вязкого трения между скелетом пористой среды и жидкостью получена формула для расчета среднего притока тепла в единицу объема пористой среды за единицу времени. Найдена формула для вычисления осредненной за период колебаний мощности сил акустического давления, приложенного на границе пористой среды на единицу площади поверхности. Построены зависимости температурного поля от параметров акустической волны.

В данной работе выполнено исследование процесса плавления парафиновых отложений на стенках пор пористой среды при воздействии низкочастотным акустическим полем. Изучено движение границы очищенной зоны в зависимости от параметров акустического поля и пористой среды.

Постановка задачи

Пусть в прискважинной зоне за счет затвердевания и отложения парафина на стенках пор образовалась низкопроницаемая зона с шириной l (рис. 1). В исходном состоянии пористость и проницаемость низкопроницаемой зоны ($0 \leq x \leq l$) соответственно равны m_1 и k_1 , а высокопроницаемой зоны ($l < x < \infty$) – m_0 и k_0 .

Рассмотрим задачу нагрева и плавления твердых парафиновых отложений в зоне $0 \leq x \leq l$ с помощью воздействия на пористую среду акустическим полем. Источник акустического поля расположен на границе $x=0$.

Рис. 1. Схематическое изображение двухзонной пористой среды с разными значениями пористости и проницаемости зон.

Решение задачи разбиваем на два этапа. На первом этапе пористая среда состоит из двух зон: низкопроницаемой и высокопроницаемой. В результате воздействия акустическим полем, температура пористой среды постепенно будет повышаться, причем в ближней зоне температура выше [5]. Как только на границе температура среды достигает значения температуры плавления парафина и начинается плавление парафиновых отложений в порах границы, то наступает второй этап решения задачи. В результате плавления и перехода парафина в жидкое состояние происходит очистка

пор и восстановление проницаемости зоны около границы $x = 0$. Поэтому на втором этапе пористая среда будет состоять из трех зон (рис. 2): I – зона очищенная от парафиновых отложений ($0 \leq x \leq a(t)$), II – низкопроницаемая зона ($a(t) < x \leq l$), III – высокопроницаемая зона ($l < x < \infty$). Пористость и проницаемость I и III зон совпадают. С течением времени ширина зоны I увеличивается, а ширина зоны II – уменьшается, т.е. граница $x = a(t)$ является подвижной. В момент времени $t = t_*$, когда $a(t_*) = l$, происходит полная очистка пор низкопроницаемой зоны от твердых парафиновых отложений.

Рис. 2. Схематическое изображение трехзонной пористой среды.

Результаты и обсуждение

Первый этап. Для описания исследуемого процесса сделаем следующие допущения: температуры скелета пористой среды и жидкости в каждой точке по координате x совпадают; пористый скелет является несжимаемым; неоднородность температуры по координате не влияет на параметры акустического поля давления.

Для описания фильтрации жидкости в пористой среде используем уравнения неразрывности и импульса

$$m_1 \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_{l0} \frac{\partial u}{\partial t} = -m_1 \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{m_1 \mu}{k_1} u, \quad 0 < x \leq l. \quad (2)$$

Здесь ρ_l – изменение плотности жидкости; ρ_{l0} – исходное значение плотности жидкости; u – скорость фильтрации жидкости; p – изменение значения давления жидкости; m_1 и k_1 – пористость и проницаемость низкопроницаемой зоны пористой среды; μ – динамическая вязкость жидкости.

Состояние жидкости в порах пористой среды описывается уравнением

$$p = C_l^2 \rho_l, \quad (3)$$

где C_l – скорость звука в жидкости.

Наличие источника гармонических волн давления на границе $x=0$ записываем в виде следующего граничного условия:

$$p = A_p \cos(\omega t), \quad x=0, \quad t>0, \quad (4)$$

где ω и A_p – круговая частота и амплитуда волны.

В зоне ($l < x < \infty$) пористая среда является высокопроницаемой, поэтому для правой границы записываем условие отсутствия возмущения значения давления

$$p = 0, \quad x = l. \quad (5)$$

Так как на границе действует источник акустического поля, то жидкость внутри пористой среды будет совершать колебательные движения относительно скелета. В результате трения между скелетом и жидкостью энергия акустического поля переходит в тепловую энергию. Объемная сила трения F_{mp} при колебательном движении жидкости относительно скелета вычисляется по формуле [13–14].

$$F_{mp} = \frac{m_1 \mu}{k_1} \text{Re}(u),$$

где $\text{Re}(u)$ – действительная часть комплексной скорости u .

Используя объемную силу трения можно определить энергию, выделяющуюся за единицу времени в единице объема пористой среды в результате воздействия акустическим полем:

$$q = F_{mp} \cdot \text{Re}(w) = \frac{\mu}{k_1} \text{Re}(u)^2 \quad (6)$$

Здесь истинная скорость w определяется из формулы $u = m_1 w$.

Для использования в практических расчетах найдем средний приток тепла в единицу объема пористой среды за единицу времени

$$Q_x = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} q dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{\mu}{k_1} \text{Re}(u)^2 dt, \quad (7)$$

где $\tau = 2\pi/\omega$ период колебаний акустических волн.

При воздействии на пористую среду акустическим полем достаточно важной характеристикой поля является осредненная за период колебаний мощность сил акустического давления, приложенного на границе пористой среды ($x = 0$) на единицу площади поверхности, которая вычисляется с помощью формулы [15]

$$N = \int_0^{\tau} \text{Re } p|_{x=0} \text{Re}(u)|_{x=0} dt. \quad (8)$$

Температурная задача. Для описания температурного поля в пористой среде запишем уравнение теплопроводности с объемным источником тепла, который связан с вязкостным затуханием акустического поля [16–17]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q, \quad (9)$$

$$\rho c = 1 - m_0 \rho_s c_s + m_1 \rho_{l0} c_l + m_0 - m_1 \rho_p c_p,$$

$$\lambda = 1 - m_0 \lambda_s + m_1 \lambda_l + m_0 - m_1 \lambda_p,$$

$$Q = Q_x, 0 \leq x \leq l,$$

$$\rho c = 1 - m_0 \rho_s c_s + m_0 \rho_{l0} c_l,$$

$$\lambda = 1 - m_0 \lambda_s + m_0 \lambda_l, Q = 0, l < x < \infty.$$

Здесь c_s , ρ_s и λ_s – теплоемкость, плотность и теплопроводность скелета; c_p , ρ_p и λ_p – теплоемкость, плотность и теплопроводность парафина; λ_l и c_l – теплопроводность и теплоемкость жидкости; m_0 – пористость зоны $l < x < \infty$. При определении параметров ρc и λ учитывался тот факт, что на стенках пор зоны $0 \leq x \leq l$ содержатся парафиновые отложения.

В начальный момент времени температура пористой среды равна T_0

$$T = T_0, 0 \leq x, t = 0. \quad (10)$$

Граница при $x = 0$ теплоизолирована

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = 0. \quad (11)$$

Между низкопроницаемой ($0 \leq x \leq l$) и высокопроницаемой $l < x < \infty$ зонами происходит теплообмен, а поток тепла и температура на границе $x = l$ непрерывны:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0, T = 0, x = l. \quad (12)$$

Здесь квадратные скобки означают скачок соответствующего параметра.

Для правой границы высокопроницаемой зоны граничное условие имеет вид

$$T = T_0, x \rightarrow \infty. \quad (13)$$

Второй этап. Уравнения неразрывности, импульса и состояния для второго этапа имеют вид

$$\begin{aligned} m_j \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \\ \rho_{l0} \frac{\partial u}{\partial t} &= -m_j \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{m_j \mu}{k_j} u, \end{aligned} \quad (14)$$

$$p = C_l^2 \rho_l$$

где $j = 0$ при $0 \leq x \leq a(t)$, $j = 1$ при $(a(t) < x \leq l)$.

Граничные условия (4) и (5) справедливы и для второго этапа, а между зонами I и II выполняются условия отсутствия скачка скорости движения жидкости и давления

$$u = 0, p = 0, x = a(t). \quad (15)$$

Уравнение притока тепла в пористую среду имеет такой же вид, что и для первого этапа, но параметры ρc , λ и Q в уравнении (9) будут определяться по следующим формулам:

$$\rho c = 1 - m_0 \rho_s c_s + m_1 \rho_{l0} c_l,$$

$$\lambda = 1 - m_0 \lambda_s + m_1 \lambda_l,$$

$$Q = Q_x, 0 \leq x \leq a(t),$$

$$\rho c = 1 - m_0 \rho_s c_s + m_1 \rho_{l0} c_l + m_0 - m_1 \rho_p c_p,$$

$$\lambda = 1 - m_0 \lambda_s + m_1 \lambda_l + m_0 - m_1 \lambda_p,$$

$$Q = Q_x, a(t) < x \leq l,$$

$$\rho c = 1 - m_0 \rho_s c_s + m_0 \rho_{l0} c_l, \lambda = 1 - m_0 \lambda_s + m_0 \lambda_l,$$

$$Q = 0, l < x < \infty.$$

Начальное (10) и граничные (11)–(13) условия для уравнения теплопроводности для второго этапа также справедливы. Однако в этом случае появляются граничные условия для подвижной границы $x = a(t)$, которые имеют вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a-} - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a+} = L_p m_0 - m_1 \rho_p \frac{da(t)}{dt}, x = a(t), \quad (16)$$

$$T = T_{pl}, x = a(t). \quad (17)$$

Здесь L_p и T_{pl} – удельная теплота и температура плавления парафина.

Результаты расчета. Системы уравнений (1)–(3) с граничными условиями (4)–(5), а также (14) с граничными условиями (4)–(5) и (15) были решены аналитически. Для этого из системы, исключая плотность и скорость фильтрации жидкости, получили дифференциальное уравнение второго порядка от времени и координаты для давления, решение которого искали в виде бегущих волн. Аналогично получили решение для скорости фильтрации жидкости. Полученные выражения для скорости фильтрации жидкости и давления были подставлены в

формулы (7)–(8) для вычисления среднего притока тепла в единицу объема пористой среды за единицу времени и осредненной за период колебаний мощности сил акустического давления.

Уравнение теплопроводности для первого этапа решалось методом прогонки, а для второго этапа методом ловли фазового фронта в узел сетки.

При численных расчетах использовались следующие значения параметров жидкости, пористой среды и парафина: $\rho_{l0}=1000 \text{ кг/м}^3$, $C_l=1500 \text{ м/с}$, $c_l=4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\lambda_l=0.6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $l=0.25 \text{ м}$, $m_0=0.2$, $m_1=0.1$, $\rho_s=2600 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_s=0.5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $c_s=790 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $T_0=300 \text{ К}$, $T_{pl}=320 \text{ К}$, $L_p=150 \text{ кДж/кг}$.

Значение проницаемости для низкопроницаемой зоны определялось с помощью формулы Козе-ни [14]

$$k_1 = k_* m_1^3 / (1 - m_1^2),$$

где параметр $k_* = 8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

На рис. 3 приведена зависимость температуры от координаты в момент времени, когда на границе пористой среды $x = 0$ температура среды достигает значения температуры плавления парафина. Линии 1 соответствует частота $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$, а линии 2 – $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$. Амплитуда акустического поля равна $A_p = 1 \text{ МПа}$.

Из рис. 3 видно, что увеличение частоты волны не дает желаемого эффекта. В этом случае основная часть энергии волны уходит на нагрев ближней к скважине зоны. При частоте $\omega=100 \text{ с}^{-1}$ максимум температуры наблюдается не на границе, а внутри пористой среды в зоне с меньшей проницаемостью.

На рис. 4 приведены графики движения границы $x = a(t)$ в зависимости от времени. Линии 1 построены при амплитуде волны $A_p=1.5 \text{ МПа}$, а линии 2 – $A_p=1 \text{ МПа}$. Сплошные линии соответствуют частоте $\omega=100 \text{ с}^{-1}$, а штриховые – $\omega=300 \text{ с}^{-1}$.

Рис. 3. Температурное поле призабойной зоны пласта в момент времени, когда на границе $x = 0$ температура достигает значения температуры плавления парафина.

Из рис. 4 видно, что увеличение амплитуды волны в полтора раза приводит к большему эффекту по времени при частоте $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ (сплошная

линия 1). В этом случае время полного плавления твердых парафиновых отложений в порах низкопроницаемой зоны почти в два раза меньше по сравнению со временем, полученным при значениях амплитуды и частоты волны: $A_p=1 \text{ МПа}$ и $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ (сплошная линия 2).

Рис. 4. Графики движения фазового фронта при разных значениях амплитуды и частоты акустической волны.

Хотя при параметрах $A_p = 1.5 \text{ МПа}$ и $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$ время полного плавления парафиновых отложений в низкопроницаемой зоне меньше, но расчеты показывают, что затраты общей энергии источника волны в этом случае больше по сравнению с остальными вариантами, рассмотренными в работе. Общая энергия источника волны вычислялась как произведение мощности сил акустического давления, определенной по формуле (8), на время действия источника.

Наименее энергозатратным является вариант, когда значения амплитуды и частоты волны равны: $A_p = 1 \text{ МПа}$ и $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ (сплошная линия 2). В этом случае низкопроницаемая зона нагревается равномерно, и вся энергия уходит на плавление парафина.

Заключение

Получены формулы вычисления среднего за период колебаний притока тепла в единицу объема пористой среды за единицу времени и мощности сил акустического давления. Изучено движение границы очищенной зоны в зависимости от параметров акустического поля и пористой среды. Показано, что подбирая частоту и амплитуду волны можно добиваться эффективного воздействия акустическим полем на призабойную зону пласта с целью ее нагрева и плавления парафиновых отложений на стенках пор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gruesbeck C. R., Collins R. E. Entrainment and deposition of fine particles in porous media // Society of Petroleum Engineers Journal, 1982. Vol. 22(06). Pp. 847–856.
2. Muecke T. W. Formation fines and factors controlling their movement in porous media // Journal of Petroleum Technology, 1979. Vol. 2. Pp. 144–150.
3. Митрофанов В. П., Дзюбенко А. И., Нечаева Н. Ю., Дрягин В. В. Результаты промысловых испытаний акустического воздействия на призабойную зону пласта // Геоло-

- гия, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1998. №10. С. 36–41.
4. Крец В. Г., Лене Г. В. Основы нефтегазодобычи: учебн. пособие / Томск: изд-во Том. ун-та, 2003. 230 с.
  5. Шагапов В. Ш., Хусаинов И. Г., Юмагузина А. Г. Нагрев пористой среды, насыщенной жидкостью, с помощью акустического поля // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, №1. С. 11–16.
  6. Мерсон Э., Митрофанов В. П., Сафин Д. В. Возможности ультразвука в нефтедобыче // Нефть России. 1999. №1. С. 17–24.
  7. Кузнецов О. Л., Ефимова С. А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983. 221 с.
  8. Хусаинов И. Г. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник БашГУ. 2013. Т. 18, № 2. С. 350–353.
  9. Печков А. А., Шубин А. В. Результаты работ по повышению продуктивности скважин методом акустического воздействия // Геоинформатика. 1998. №3. С. 16–23.
  10. Горбачев Ю. И., Кузнецов О. Л., Рафиков Р. С., Печков А. А. Физические основы акустического метода воздействия на коллекторы // Геофизика. 1998. №4. С. 5–9.
  11. Максимов Г. А., Радченко А. В. Моделирование интенсификации нефтедобычи при акустическом воздействии на пласт из скважины // Техническая акустика. 2003. №10. С. 1–12.
  12. Максимов Г. А., Радченко А. В. Роль нагрева при акустическом воздействии на пласт // Геофизика. 2001. №6. С. 38–44.
  13. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970. 339 с.
  14. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
  15. Eugen Skudrzyk. The foundations of acoustics. New York. 1971. 782 p.
  16. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
  17. Хусаинов И. Г. Релаксация температуры пластины, помещенной в среду с более низкой температурой // Вестник Тюменского гос. ун-та. Физико-матем. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Т. 3. №4. С. 132–141.

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2019.4.2

THE USE OF AN ACOUSTIC FIELD FOR HEATING BOTTOMHOLE ZONE OF A LAYER

© I. G. Khusainov

*Bashkir State University, Sterlitamak branch
49 Lenin Avenue, 453103 Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (906) 109 45 93.

Email: ivt30@mail.ru

The process of heating bottomhole zone of a layer (the porous environment) is considered by influence of an acoustic field. During the initial state, the porous environment consists of two zones: the low-permeability and high-permeability ones. On the border of the environment, there is a radiator of acoustic waves. Oscillating motion of the liquid accompanied by the friction at the wall of an environment skeleton, providing the heat in the system. The expression for calculating average inflow of thermal energy produced by application of acoustic field within unit of volume of the “skeleton-liquid” system was formed for unit of time. The impact of the low-frequency acoustic field on the porous environment was considered. The process of cleaning of walls of the porous environment from the settled paraffin particles was studied. Due to melting of paraffin and cleaning of area closest to the radiator of acoustic waves, the third zone appears, the highly permeable one. The movement of border between the cleaned and low-permeability zones was studied, considering its dependence on frequency and amplitude of an acoustic wave and also on parameters of the porous environment. It was shown that the low-frequency acoustic field can be effectively used for heating of a bottomhole zone of a layer and cleaning of walls from paraffin sediments.

Keywords: heating, acoustic field, equation, temperature, frequency, amplitude, layer, filtration.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Gruesbeck C. R., Collins R. E. Society of Petroleum Engineers Journal, 1982. Vol. 22(06). Pp. 847–856.
2. Muecke T. W. Journal of Petroleum Technology, 1979. Vol. 2. Pp. 144–150.
3. Mitrofanov V. P., Dzyubenko A. I., Nechaeva N. Yu., Dryagin V. V. Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdenii. 1998. No. 10. Pp. 36–41.
4. Kretz V. G., Lene G. V. Osnovy neftegazodobychi: uchebn. posobie [Basics of oil and gas production: textbook] / Tomsk: izd-vo Tom. un-ta, 2003.
5. Shagapov V. Sh., Khusainov I. G., Yumaguzina A. G. Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 2003. Vol. 76, No. 1. Pp. 11–16.
6. Merson E., Mitrofanov V. P., Safin D. V. Neft' Rossii. 1999. No. 1. Pp. 17–24.
7. Kuznetsov O. L., Efimova S. A. Primenenie ul'trazvuka v neftyanoi promyshlennosti [Application of ultrasound in the oil industry]. Moscow: Nedra, 1983.
8. Khusainov I. G. Vestnik BashGU. 2013. Vol. 18, No. 2. Pp. 350–353.
9. Pechkov A. A., Shubin A. V. Geoinformatika. 1998. No. 3. Pp. 16–23.
10. Gorbachev Yu. I., Kuznetsov O. L., Rafikov R. S., Pechkov A. A. Geofizika. 1998. No. 4. Pp. 5–9.
11. Maksimov G. A., Radchenko A. V. Tekhnicheskaya akustika. 2003. No. 10. Pp. 1–12.
12. Maksimov G. A., Radchenko A. V. Geofizika. 2001. No. 6. Pp. 38–44.
13. Nikolaevskii V. N., Basniev K. S., Gorbunov A. T., Zotov G. A. Mekhanika nasyshchennykh poristyykh sred [Mechanics of saturated porous media]. Moscow: Nedra, 1970.
14. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. Dvizhenie zhidkostei i gazov v prirodnykh plastakh [The movement of liquids and gases in natural reservoirs]. Moscow: Nedra, 1984.
15. Eugen Skudrzyk. The foundations of acoustics. New York. 1971.
16. Karslow G., Eger D. Teploprovodnost' tverdykh tel [Thermal conductivity of solids]. Moscow: Nauka, 1964.
17. Khusainov I. G. Vestnik Tyumenskogo gos. un-ta. Fiziko-matem. modelirovanie. Neft', gaz, energetika. 2017. Vol. 3. No. 4. Pp. 132–141.

Received 29.04.2019.