

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАСТЕ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СКИН-ФАКТОРОМ

© Р. Р. Фахреева*, И. А. Зарафутдинов, Ю. А. Питюк

Башкирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

Тел.: +7 (917) 352 03 37.

*Email: regina599@mail.ru

В работе исследуется распространение температуры и давления в пласте с положительным и отрицательным скин-фактором. Данная задача представляет практический интерес, поскольку оценка состояния призабойной зоны пласта является неотъемлемым фактором при проведении геолого-технических мероприятий на скважинах. Проведен сравнительный анализ динамики температуры и давления в однородном пласте, с загрязнением призабойной зоны пласта и зоной повышенной проницаемости.

Ключевые слова: скважина, пласт, скин-фактор, температура, давление, загрязнение, повышенная проницаемость.

Введение

Интерпретация данных изменения давления при гидродинамических исследованиях (ГДИС) [1] позволяет оценить состояние пласта и решить вопрос о проведении соответствующих геолого-технических мероприятиях. Методы ГДИС [2] позволяют оценить проницаемость удаленной зоны пласта, пластовое давление, значение скин-фактора, который характеризует состояние призабойной зоны пласта (ПЗП). Однако определить значения проницаемости скин-зоны и радиуса повреждения, которые соответствуют определенному значению скин-фактора, эти методы не позволяют [3], поэтому в качестве способа расширения числа определяемых параметров в работе предлагается также рассмотреть динамику температуры в действующей или остановленной скважине.

Данная тема была частично рассмотрена в работах других авторов. В работе [4] рассмотрено распределение температуры в пласте при закачки жидкости при различных параметрах теплообмена. В работе [5] поставлена задача о построении математической модели распространения температуры и давления в нефтяном пласте после остановки закачки воды в пласт. В общем виде получено выражение, позволяющее восстановить температурное поле после остановки закачки воды. В работе [6] рассмотрено численное моделирование распространения давления и температуры вблизи нагнетательной скважины во время закачки жидкости и после остановки. Результаты моделирования позволяют оценить влияние неоднородности пласта на значения температуры на забое скважины.

Проницаемость ПЗП может быть как меньше проницаемости пласта в случае загрязнения ПЗП, так и больше при наличии трещины ГРП. Скин-фактор в значительной степени влияет на характер гидродинамических процессов, протекающих в разрабатываемом пласте [3; 7]. Если скин-фактор положителен, то проницаемость ПЗП заметно по-

нижена, в этом случае необходимо проведение геолого-технических мероприятий по увеличению проницаемости (гидроразрыв, кислотная обработка). Если же скин-фактор отрицательный, то проницаемость ПЗП повышена, т.е. имеем дело с улучшенными фильтрационными характеристиками. Поэтому значение скин-фактора также необходимо учитывать для эффективной разработки нефтяных месторождений. Таким образом, анализ термогидродинамических процессов, происходящих в пласте с положительным и отрицательным скин-фактором, является актуальной задачей для эффективной разработки месторождений.

Целью данной работы является проведение расчетов и анализа результатов численного моделирования динамики температуры и давления в однородном пласте, с загрязнением призабойной зоны пласта и зоной повышенной проницаемости.

Численное моделирование

Рассматривается трехмерная математическая модель, описывающая процессы изменения давления и температуры в одномерной скважине и в трехмерном пласте с учетом конвективного, кондуктивного теплопереноса, а также адиабатического эффекта и эффекта Джоуля–Томсона.

Математическая модель трехмерного пласта описывается следующей системой уравнений:

$$(c\rho)_t \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_t \nabla T) - (c\rho)_f \mathbf{v}(\nabla T + \varepsilon \nabla p) +$$

$$+ \eta \phi(c\rho)_f \frac{\partial p}{\partial t}, (x, y, z) \in \Omega_r \cup \Omega_u \cup \Omega_d \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(\chi(\nabla p - \rho \bar{g})), \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = -\frac{k}{\mu}(\nabla p - \rho \bar{g}), (x, y, z) \in \Omega_r \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = 0, (x, y, z) \in \Omega_u \cup \Omega_d \quad (4)$$

Области $\Omega_r, \Omega_d, \Omega_u$, показанные на *рис. 1* обозначают соответственно продуктивный пласт, подошву и кровлю.

Уравнение (1) получено из закона сохранения энергии и представляет собой уравнение на температуру с учетом нестационарного, конвективного и кондуктивного слагаемых, дроссельного и адиабатического эффектов. Уравнение (2) – уравнение пьезопроводности с учетом гидродинамической составляющей, которое описывает распределение давления по пласту. С помощью закона Дарси (3) определяется скорость фильтрации жидкости. В кровле и подошве жидкость не фильтруется (4).

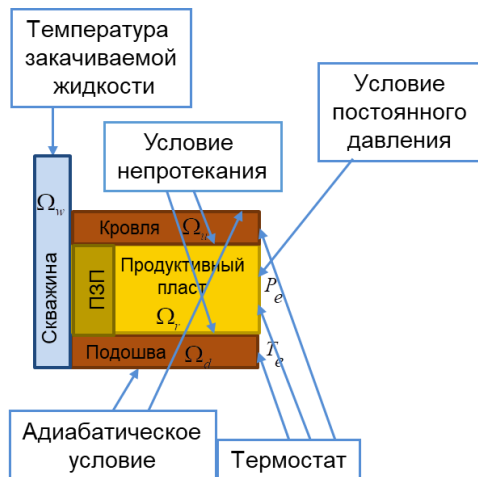


Рис. 1. Схема системы «скважина-пласт».

Рассматривается одномерная математическая модель вертикальной скважины (параметры для скважины обозначены индексом «w»), где изменение скорости, давления и температуры определяется системой уравнений:

$$\frac{\partial(\rho v_w)}{\partial z} = 2B(\rho v_l), (x_w, y_w, z) \in \Omega_w \quad (5)$$

$$\frac{\partial(p_w)}{\partial z} = -fB\rho v_w^2 - \alpha \left(2B\rho v_w v_l + \rho v_w \frac{dv_w}{dz} \right) - \rho g, (x_w, y_w, z) \in \Omega_w \quad (6)$$

$$(c\rho)_f \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w T_w)}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_f \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) + (B(c\rho)_f v_l + BU)(T_l - T_w) \quad (7)$$

где $U = \lambda_c / (r_w^{out} - r_w^{in})^2$ – коэффициент теплопередачи, $B = p_w / (2S_w)$ – отношение полупериметра сечения скважины к площади ее сечения, $f = f(Re_l, Re_w)$ – коэффициент трения, $Re = 2Rv\rho/\mu$ – число Рейнольдса.

Уравнение (5) получено из закона сохранения масс, уравнение (6) – из закона сохранения момента количества движения, уравнение (7) – из закона сохранения энергии.

Для задачи (1)–(7) задавались следующие начальные условия: пластовое давление с учетом гидростатического давления $p|_{t=0} = p_e(z)$, распреде-

ление давления по стволу скважины с учетом постоянного забойного и гидростатического давления $p_w|_{t=0} = p_{0w}(z)$, геотермальный градиент в пласте и по стволу скважины $T|_{t=0} = T_e(z)$, $T_w|_{t=0, z \neq 0} = T_g(z)$, температура закачиваемой жидкости на устье скважины $T_w|_{t=0, z=0} = T_0$. Граничные условия определялись согласно *рис. 1*.

Для учета теплообмена с окружающими породами выше кровли рассматривается цилиндрическая модель

$$(c\rho)_f \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), (x, y, z) \notin \Omega_r \cup \Omega_u \cup \Omega_d. \quad (8)$$

Здесь и далее T – температура, p – давление, v – скорость фильтрации, r_w – радиус скважины, r_e – радиус контура питания, φ – пористость, k – проницаемость, c – удельная теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности, h – толщина продуктивного пласта, h_d, h_u – толщина кровли и подошвы, h_w – длина скважины, $\chi = k/(\mu\phi c_t)$ – коэффициент пьезопроводности, c_t – сжимаемость среды, μ – динамическая вязкость жидкости, ε – коэффициент Джоуля-Томсона, η – адиабатический коэффициент. Индексы f относятся к жидкости, s – к скелету, t – к общей системе, w – к скважине, l – к данным, которые приходят из пласта в скважину.

На основе описанной математической модели авторами работы был разработан программный модуль [8], в котором проведены расчеты давления и температуры в нагнетательной скважине, работающей при постоянной репрессии 200 атм (забойное давление 400 атм). Данный термогидродинамический симулятор предназначен для моделирования распространения давления и температуры в скважине и в пласте в трехмерной постановке. Температура закачиваемой воды 20°C. По мере продвижения флюида к продуктивному пласту, температура воды растет за счет кондуктивного теплообмена с колонной, которая в начальный момент времени соответствует геотермальному градиенту 0–75°C. Для расчетов использовались теплофизические параметры воды, рассматривался пласт толщиной 5 м с проницаемостью 10 мД.

Сравнительный анализ динамики температуры и давления проведен для однородного пласта (10 мД), для пласта с загрязнением ПЗП (1 мД) и с улучшением фильтрационных характеристик ПЗП (100 мД) толщиной 1 м от колонны. Анализировались кривые давления и температуры после 3 ч. и 10 дней работы скважины. Отметим, что трехмерная постановка задачи позволяет отслеживать изменение температуры и давления в любой точке пласта и скважины.

На *рис. 2* представлено распределение температуры в ПЗП во время работы нагнетательной скважины с учетом температурных эффек-

тов. В начальный момент времени распределение температуры представляет собой геотермальный градиент.

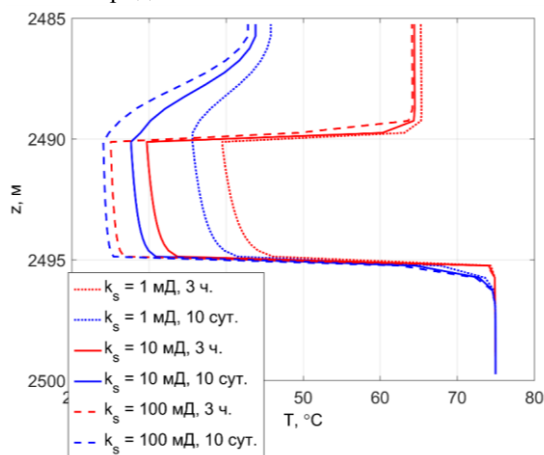


Рис. 2. Распределение температуры в призабойной зоне пласта.

Во время работы скважины наблюдается значительное понижение температуры продуктивного пласта и охлаждение близлежащих горных пород (кровля выше 2490 м и подошва ниже 2495 м), причем кровля пласта охлаждается существенно быстрее, чем подошва, что связано с кондуктивным охлаждением со стороны скважины. В пласте с за-

грязнением температура воды выше, что объясняется меньшим расходом жидкости для поддержания одинаковой репрессии на пласт. В пласте с повышенными фильтрационными характеристиками, наоборот температура воды значительно ниже, чем в однородном, что объясняется быстрой фильтрацией жидкости в пласт. Из рисунка видно, что за счет температурных эффектов ближе к забою жидкость нагревается сильнее, причем в загрязненном пласте изменение температуры вдоль ствола скважины более выражено.

На рис. 3 показано распределение температуры по стволу скважины. В начальный момент времени температура воды соответствует геотермальному градиенту 0–75°C. После прохождения точки инверсии жидкость постепенно начинает нагреваться. Как видно из графиков, чем меньше проницаемость загрязненной зоны, тем с большей температурой приходит жидкость в пласт. На рис. 3 представлено приближение, соответствующее уровню продуктивного пласта (кровля выше 2490 м, принимающий интервал и подошва ниже 2495 м, которая соответствует зумфу). Температура в зумфе начинает постепенно расти до геотермальной температуры. На уровне всего участка выше зумфа, мы видим постепенный нагрев жидкости ближе к забою, связанный с дроссельным эффектом.

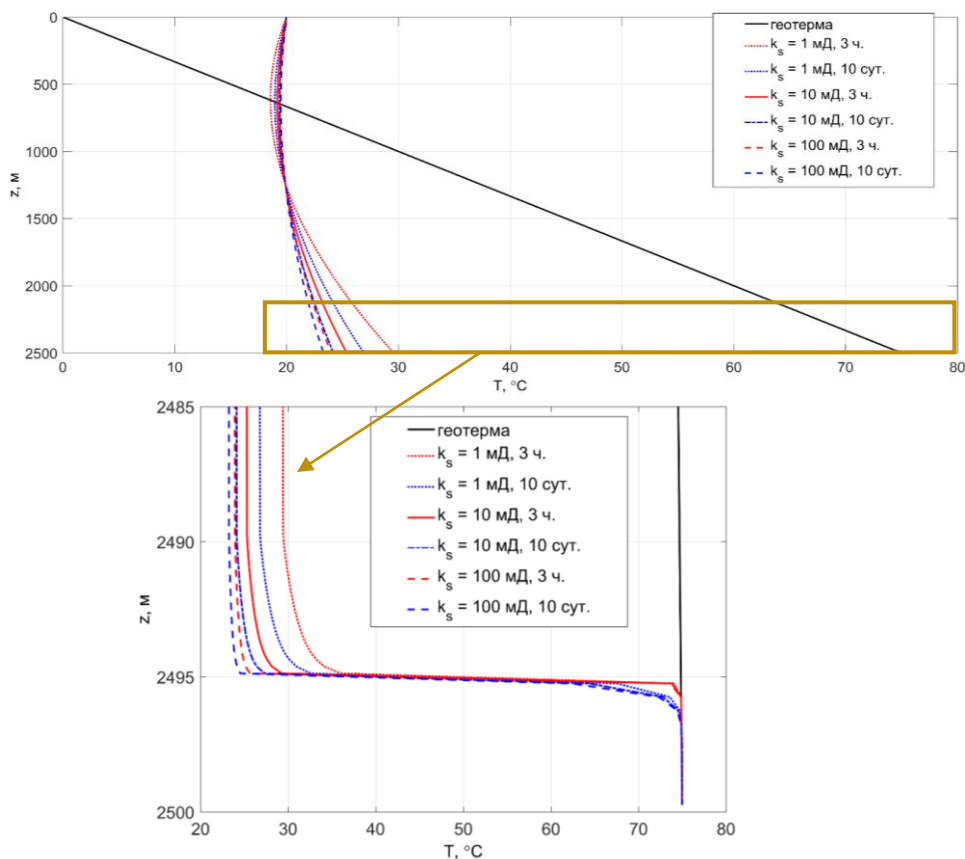


Рис. 3. Распределение температуры в скважине (верхний рисунок) и на уровне продуктивного участка (нижний).

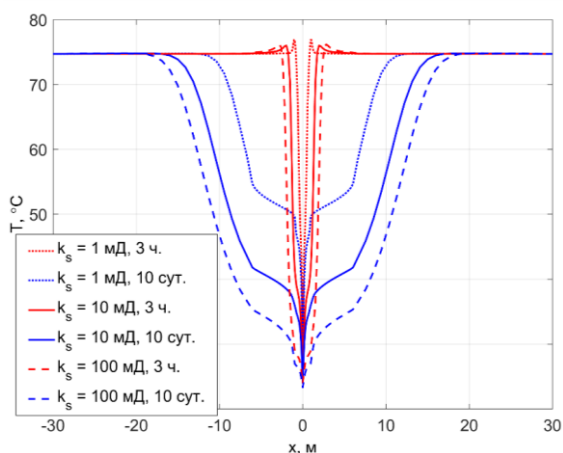


Рис. 4. Распространение температуры по пласту.

На рис. 4 представлен сравнительный анализ распространения холодного фронта при различных фильтрационных параметрах ПЗП. Из рисунка видно, что в ПЗП с улучшенной проницаемостью пласт охлаждается быстрее, так как жидкость фильтруется быстрее, чем в однородном пласте и в пласте с загрязнением. По мере продвижения по пласту по-

ступающая холодная жидкость постепенно нагревается за счет дроссельного разогрева.

Отметим, что распределение температуры по пласту существенно зависит от давления. На рис. 5 показано распределение давления на уровне ВДП (верхние дыры перфорации – первая точка по оси z в области продуктивного пласта) в разрезе по x . На нижнем рисунке представлена увеличенная средняя часть. Постепенно давление в пласте выравнивается. В начальный момент времени наблюдаем забойное давление 400 атм. Через 3 ч. после начала работы скважины можем заметить, что давление распространилось лишь на небольшой участок пласта, при этом в пласте с улучшенной проницаемостью фронт распространился дальше, чем в однородном пласте и в пласте с загрязнением. Тот же результат мы видим и через 10 сут. Отметим, что через 5 дней скважина перешла в установившийся режим. Из рисунка видно, что установившиеся профили давления во всех пластах существенно отличаются, а на границе скин-зоны наблюдаются характерные изломы.

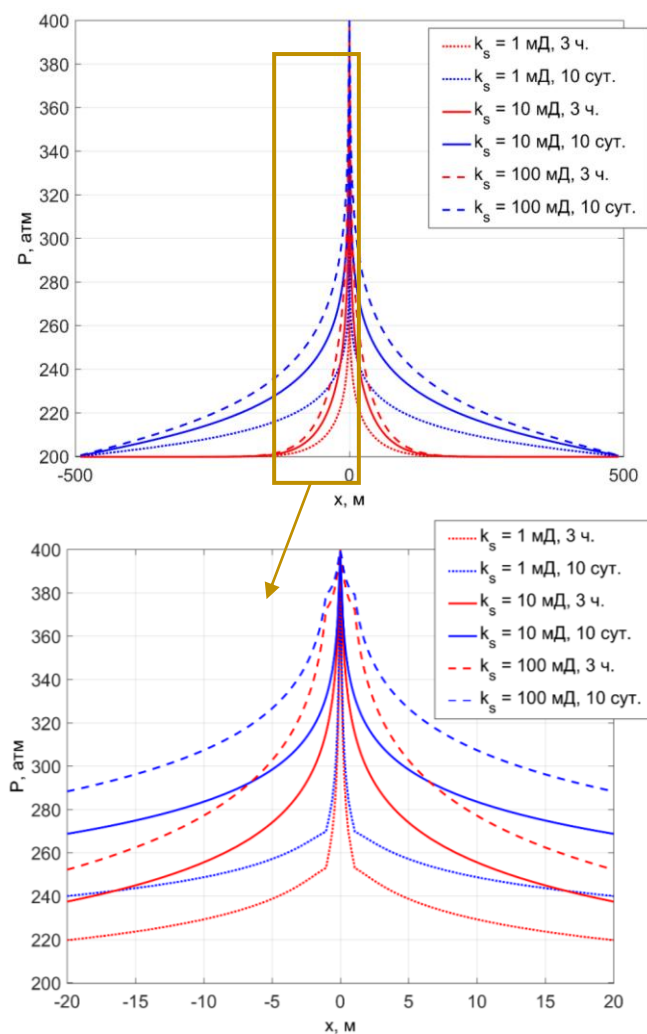


Рис. 5. Распределение давления по пласту (верхний рисунок) и в ПЗП (нижний).

Заключение

Таким образом, температура жидкости, поступающей в пласт, существенно зависит от фильтрационных характеристик ПЗП. В загрязненном пласте температура поступающего флюида выше, чем в однородном, а в пласте с улучшенными фильтрационными характеристиками ПЗП – значительно ниже однородного. Давление в загрязненном пласте выравнивается медленнее, а в пласте с улучшенной проницаемостью намного быстрее. Дроссельный эффект приводит к дополнительному нагреву жидкости как в латеральном, так и в вертикальном направлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-3503.2017.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деева Т. А., Камартинов М. Р., Кулагина Т. Е., Мангазеев П. В. Гидродинамические исследования скважин: анализ и интерпретация данных. Томск: изд-во ТПУ, 2009. 243 с.
2. Earlougher R. C. Advances in well test analysis // Society of Petroleum Engineer's Monograph 5. 1977. 264 p
3. Hawkins M. F.: A Note on the Skin Effect, vol. 207, pp. 356–357. Trans. AIME (1956).
4. Перова Е. А., Хабибуллин И. Л. Моделирование температурного поля пласта при плоскорадиальной фильтрации флюида с учетом теплообмена с окружающей средой // Мат-лы 7-ой Междунар. молодеж. научно-практ. конф. «Математическое моделирование процессов и систем». Уфа. 2017. С. 198–202.
5. Хабибуллин И. Л., Давлетбаев А. Я., Марьин Д. Ф., Хисамов А. А. Моделирование восстановления температурного поля в нефтяном пласте // Инженерно-физический журнал. Минск. Т. 91. №2. 2018. С. 329–337.
6. Назмутдинов Ф. Ф., Хабибуллин И. Л. Моделирование температурного поля после вокруг нагнетательной скважины после прекращения закачки воды // Сб. трудов первой летней школы конф. Физико-хим. гидродинамика. Уфа. 2016. С. 121–129.
7. Ибатуллин Р. Р., Насыбуллин А. В., Салимов О. В. Планирование гидроразрыва пласта в скважинах с отрицательным скин-фактором // Нефтяное хозяйство. 2013. №05. С. 66–68.
8. Pityuk Yu. A., Davletbayev A. Ya., Musin A. A., Seltikova E. V., Zarafutdinov I. A., Kovaleva L. A., Fursov G. A., Nazargalin E. R., Mustafin D. A. 3D numerical simulation of pressure/temperature dynamics in well with fracture // Proc. Society of Petroleum Engineers, 2016. SPE-181971-MS.

Поступила в редакцию 04.12.2018 г.

После доработки – 26.05.2019 г.

NUMERICAL SIMULATION OF PRESSURE AND TEMPERATURE CHANGES IN A RESERVOIR WITH POSITIVE AND NEGATIVE VALUES OF SKIN FACTOR

© R. R. Fakhreeva*, I. A. Zarafutdinov, Yu. A. Pityuk

*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (917) 352 03 37.

**Email: regina599@mail.ru*

In the present study, the distribution of temperature and pressure in the reservoir with positive and negative values of skin factor is considered. This problem is of practical interest as the analysis of the bottomhole formation zone is a necessary factor in realization of geological and technical measures on wells. The comparative analysis of the dynamics of temperature and pressure in a homogeneous reservoir, in a reservoir with contamination of bottomhole formation zone, and in a reservoir with highly permeable zone was conducted. Graphs of the dynamics of temperature and pressure were made after 3 hours and 10 days of work of the well. According to the conducted comparative analysis, the authors concluded that the temperature of the incoming fluid depends greatly on the filtration properties of the bottomhole formation zone, as well as on the pressure. Temperature of the fluid in reservoir with contamination of bottomhole formation zone is higher than temperature in homogeneous reservoir, while temperature of the fluid in reservoir with highly permeable zone is way lower than in homogeneous reservoir. As for the pressure, it equalizes slower in reservoir with contamination of bottomhole formation zone and faster in reservoir with highly permeable zone.

Keywords: well, reservoir, skin factor, temperature, pressure, contamination, highly permeable zone.

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

REFERENCES

1. Deeva T. A., Kamartdinov M. R., Kulagina T. E., Mangazeev P. V. *Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin: analiz i interpretatsiya dannykh* [Hydrodynamic studies of well: analysis and interpretation of data]. Tomsk: izd-vo TPU, 2009.
2. Earlougher R. C. *Society of Petroleum Engineer's Monograph* 5. 1977. 264 p
3. Hawkins M. F.: A Note on the Skin Effect, vol. 207, pp. 356–357. *Trans. AIME* (1956).
4. Perova E. A., Khabibullin I. L. *Mat-ly 7-oi Mezhdunar. molodezh. nauchno-prakt. konf. «Matematicheskoe modelirovanie protsessov i sistem»*. Ufa. 2017. Pp. 198–202.
5. Khabibullin I. L., Davletbaev A. Ya., Mar'in D. F., Khisamov A. A. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. Minsk. Vol. 91. No. 2. 2018. Pp. 329–337.
6. Nazmutdinov F. F., Khabibullin I. L. *Sb. trudov pervoi letnei shkoly konf. Fiziko-khim. gidrodinamika*. Ufa. 2016. Pp. 121–129.
7. Ibatullin R. R., Nasybullin A. V., Salimov O. V. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2013. No. 05. Pp. 66–68.
8. Pityuk Yu. A., Davletbayev A. Ya., Musin A. A., Seltikova E. V., Zarafutdinov I. A., Kovaleva L. A., Fursov G. A., Nazargalin E. R., Mustafin D. A. *Proc. Society of Petroleum Engineers*, 2016. SPE-181971-MS.

Received 04.12.2018.

Revised 26.05.2019.