

Исследование температурного поля в неоднородных по проницаемости пластах при двухфазной фильтрации

Малика Джалилевно Сулейманова✉, Рамиль Фаизырович Шарафутдинов,
Ильдар Вакифович Канафин

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
Контакт для переписки: malika_sul@mail.ru✉

Аннотация. Целью работы является исследование температурного поля в неоднородном по проницаемости пласте при нестационарной неизотермической двухфазной фильтрации нефти и воды с учетом влияния эффекта Джоуля — Томсона и адиабатического эффекта. Новизна проведенного исследования заключается в установлении закономерностей распределения температуры при двухфазной фильтрации в неоднородном по проницаемости пласте и немоноготонного изменения температуры, связанного с двухфазной фильтрацией.

Проведенные численные эксперименты показали, что при нестационарной двухфазной неизотермической фильтрации воды и нефти в призабойной области пласта в неоднородной его зоне формирование температуры происходит с разным темпом в угловом распределении в начальные моменты работы скважины. В зависимости от соотношения проницаемостей пласта и зоны неоднородности и от начальной водонасыщенности пласта, при двухфазной фильтрации в неоднородной области относительно однородной может наблюдаться либо снижение температуры, либо, наоборот, ее повышение.

Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации данных температурных измерений многодатчиковой скважинной аппаратурой в неоднородных по проницаемости пластах с многофазными потоками, в частности при решении задач экологии пресноводных горизонтов.

Ключевые слова: проницаемость пласта, неоднородные пласты, термогидродинамические процессы, эффект Джоуля — Томсона, адиабатический эффект, неизотермическая двухфазная фильтрация, термометрия скважин

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-20017, <https://rscf.ru/project/23-17-20017/>).

Цитирование: Сулейманова М. Д., Шарафутдинов Р. Ф., Канафин И. В. 2023. Исследование температурного поля в неоднородных по проницаемости пластах при двухфазной фильтрации // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 4 (36). С. 6–17. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-4-6-17>

Поступила 04.09.2023; одобрена 09.11.2023; принята 15.12.2023

Investigation of the temperature distribution in a heterogeneous reservoir during fluid filtration, taking into account thermodynamic effects

Malika D. Suleimanova[✉], Ramil F. Sharafutdinov, Ildar V. Kanafin

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Corresponding author: malika_sul@mail.ru[✉]

Abstract. The purpose of the work is to study the temperature field in a formation with heterogeneous permeability during non-stationary non-isothermal two-phase filtration of oil and water, taking into account Joule–Thomson and adiabatic effects. The novelty of the study lies in the establishment of patterns of temperature distribution during two-phase filtration in a formation with heterogeneous permeability, non-monotonic temperature changes associated with two-phase filtration.

Numerical experiments have shown that during non-stationary two-phase non-isothermal filtration of water and oil in the bottomhole region of the formation in its heterogeneous zone, temperature formation occurs at different rates in the angular distribution at the initial moments of well operation. In this case, depending on the ratio of the permeabilities of the formation and the heterogeneity zone and on the initial water saturation of the formation, during two-phase filtration in the heterogeneity region relative to the homogeneous one, either a decrease in temperature or, vice versa, an increase in temperature can be observed.

The results obtained can be used when interpreting temperature measurement data using multi-sensor borehole equipment in formations with heterogeneous permeability in the presence of multiphase flows, and solving problems of the ecology of freshwater horizons.

Keywords: reservoir permeability, heterogeneous reservoirs, thermohydrodynamic processes, Joule–Thomson effect, adiabatic effect, non-isothermal two-phase filtration, wellbore temperature logging

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-20017, <https://rscf.ru/en/project/23-17-20017/>).

Citation: Suleimanova, M. D., Sharafutdinov, R. F., & Kanafin, I. V. (2023). Investigation of the temperature distribution in a heterogeneous reservoir during fluid filtration, taking into account thermodynamic effects. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(4), 6–17. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-4-6-17>

Received September 4, 2023; Reviewed November 9, 2023; Accepted December 15, 2023

Введение

Получив широкое распространение начиная с 1960-80-х гг. [Люшин и др., 1961; Чекалюк, 1965; Требин и др., 1978], исследование температурного поля в скважинах по сей день является одним из основных методов изучения и диагностики состояния скважины и пласта.

Разрабатываемые пласты-коллекторы практически во всех случаях являются неоднородными. Неоднородный характер пластов обуславливается сложной структурой и минералогическим фракционным составом горных пород, что приводит также к неоднородности по фильтрационным способностям пласта. Зона неоднородности может располагаться как непосредственно вблизи стенок скважины, так и вдали от призабойной зоны пласта. В этой области проницаемость пласта может быть значительно снижена по сравнению с остальной его частью. Подобное снижение проницаемости обычно связано с физическими и геологическими факторами, например выщелачиванием минералов и разрушением породы; оно также является следствием происходящих при эксплуатации скважины процессов, таких как выпадение асфальтосмолопарафинистых отложений, образование газоконденсатной пробки и т. д. [Люшин и др., 1961]. В других случаях (в частности, при гидроразрыве пласта или солянокислотной обработке) проницаемость призабойной зоны повышается. Это повышение может приводить к возникновению заколонных перетоков и осолонению пресноводных горизонтов. Исследованию влияния неоднородности пласта посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных исследователей [Люшин и др., 1961; Чекалюк, 1965; Требин и др., 1978; Гиматулинов, Ширковский, 1982; Фёдоров, Шарафутдинов, 1989; Валиуллин, Рамазанов, 1992; Валиуллин и др., 1994, 1995; Газизов, 2002; Durlifsky, Aziz, 2004; Валиуллин и др., 2008; Li, 2010; Muradov, 2010; Ramazanov и др., 2010; Bahonar и др., 2011; Lucia и др., 2013; Palabiyik и др., 2013; Ribeiro, Horne, 2013; Aslanyan и др., 2014; Valiullin и др., 2014; Шарафутдинов и др., 2017; Исламов, Рамазанов, 2022].

Как показали исследования [Валиуллин и др., 2008], изменение проницаемости в ближней зоне пласта, которая примыкает к скважине, приводит к немонотонному характеру распределения температуры и поля насыщенностей фаз в этой зоне. При этом закономерность этого распределения в значительной степени будет зависеть от соотношения проницаемостей однородной части пласта и зоны неоднородности. В статье [Исламов, Рамазанов, 2022] анализировалось поле температуры по аналогии с другой

публикацией [Валиуллин и др., 2008], но с учетом того, что пласт имеет слоистую неоднородность в вертикальном направлении. В работе [Шарафутдинов и др., 2017] исследовалась численная модель двухфазной фильтрации нефти и газа с учетом дегазации нефти и наличия области с измененной проницаемостью относительно остальной области пласта. В уравнении энергии учитывались теплота разгазирования нефти, эффект Джоуля — Томсона и адиабатический эффект. В этом случае наблюдалась значительная температурная аномалия охлаждения вследствие интенсивного газовыделения в зоне с высокой проницаемостью [Шарафутдинов и др., 2017].

Таким образом, изучение температурного поля, обусловленного эффектом Джоуля — Томсона и адиабатическим эффектом, в неоднородных пластах представляет научный и практический интерес в области термометрии скважин.

Методы

Математическая модель двухфазной неізотермической фильтрации флюида в неоднородном пласте с учетом термодинамических эффектов основывается на уравнениях сохранения массы и тепла. При составлении математической модели пренебрегается неравновесными процессами, капиллярным давлением, диффузионными эффектами, теплообменом с окружающей средой, выполняется закон Дарси. Неоднородность проницаемости находится в области $r_{1н} \leq r \leq r_{2н}$, $-\alpha_n \leq \alpha \leq \alpha_n$ (рис. 1).

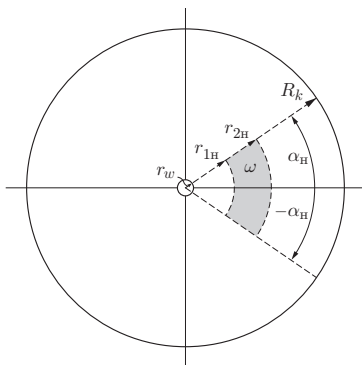


Рис. 1. Схема расположения неоднородности [Валиуллин и др., 2008]

Fig. 1. The layout of the inhomogeneity [Valiullin et al., 2008]

Постановка задачи для двухфазной неізотермической фильтрации в координатах (r, α) имеет вид:

$$m \frac{\partial S_1}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{K \cdot k_1(S_1)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{K \cdot k_1(S_1)}{\mu_1} \frac{\partial P}{\partial \alpha} \right), \quad (1)$$

$$m \frac{\partial S_2}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{K \cdot k_2(S_2)}{\mu_2} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{K \cdot k_2(S_2)}{\mu_2} \frac{\partial P}{\partial \alpha} \right), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} (m[\rho_1 c_1 S_1 + \rho_2 c_2 S_2]T + [1-m]\rho_0 c_0 T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r[\rho_1 c_1 u + \rho_2 c_2 v_2]T) + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \alpha} ([\rho_1 c_1 u + \rho_2 c_2 v_2]T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\lambda_\alpha \frac{\partial T}{\partial \alpha} \right) + m(\rho_1 c_1 S_1 \eta_1 + \rho_2 c_2 S_2 \eta_2) \frac{\partial P}{\partial \alpha} + \\ & + (\varepsilon_1 \rho_1 c_1 u + \varepsilon_2 \rho_2 c_2 v_2) \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} (\varepsilon_1 \rho_1 c_1 u + \varepsilon_2 \rho_2 c_2 v_2) \frac{\partial P}{\partial \alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь S_i — насыщенность фаз, отн. ед.; T — температура, К; P — давление, атм; v_i — скорость фаз, м/с; c_i — теплоемкость фаз, Дж/(кг · К); c_0 — теплоемкость скелета горной породы, Дж/(кг · К); ρ_i — плотность фаз, кг/м³; K, k_i — абсолютная и фазовая проницаемость, мД и отн. ед. соответственно; m — пористость, отн. ед.; μ_i — вязкость, сП; ε_i — коэффициент Джоуля — Томсона, К/атм; η_i — адиабатический коэффициент, К/атм; $\lambda_r, \lambda_\alpha$ — радиальная и угловая теплопроводности, Вт/(м · К).

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} P(r, \alpha) \Big|_{\substack{t=0 \\ 0 \leq r \leq R_k \\ 0 \leq \alpha \leq 2\pi}} &= P_{pl}, \quad S_1(r, \alpha) \Big|_{\substack{t=0 \\ 0 \leq r \leq R_k \\ 0 \leq \alpha \leq 2\pi}} &= S_0, \quad T(r, \alpha) \Big|_{\substack{t=0 \\ 0 \leq r \leq R_k \\ 0 \leq \alpha \leq 2\pi}} &= T_0, \\ P(r_w, \alpha, t) \Big|_{0 \leq \alpha \leq 2\pi} &= P_w, \quad P(R_k, \alpha, t) \Big|_{0 \leq \alpha \leq 2\pi} &= P_{pl}, \\ S_2(R_k, \alpha, t) \Big|_{0 \leq \alpha \leq 2\pi} &= 1, \quad T(R_k, \alpha) \Big|_{0 \leq \alpha \leq 2\pi} &= T_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где P_w — давление в скважине, атм; P_{pl} — пластовое давление, атм; S_0 — начальная нефтенасыщенность, отн. ед.; T_0 — пластовая температура, К; r_w — радиус скважины, м; R_k — радиус контура питания, м.

Теплофизические параметры фаз постоянны и заданы из работы [Гиматудинов, Широковский, 1982]. Фазовые проницаемости, как и решение уравнений, аналогичны статье [Валиуллин и др., 2008].

Результаты и обсуждение

Расчеты проводились для параметров: $c_0 = 800$ Дж/(кг · К); $c_1 = 1880$ Дж/(кг · К); $\varepsilon_1 = 0,4$ К/МПа; $\eta_1 = 0,17$ К/МПа; $c_2 = 4200$ Дж/(кг · К); $\varepsilon_2 = 0,2$ К/МПа; $\eta_2 = 0,015$ К/МПа; $\mu_1 = 0,005$ мПа · с; $\mu_2 = 0,001$ мПа · с. Давление в пласте $P_{pl} = 10$ МПа, давление на скважине $P_w = 5$ МПа.

На рис. 2 приведены изменения температуры для следующих условий: область неоднородной части пласта задана в пределах от $r_{1н} = 0,14$ м до $r_{2н} = 1,4$ м, ее проницаемость $k_n = 0,1K$ (где K — проницаемость однородной части пласта, $K = 0,01 \cdot 10^{-12}$ м²). Начальная водонасыщенность пласта — 0,3, на границе закачивается смесь воды и нефти в соотношении 0,7 и 0,3 соответственно. В численных экспериментах варьированию подвергался один параметр — угол неоднородной зоны пласта. Рассматриваемая модель пласта характерна для месторождений с трудноизвлекаемыми углеводородами. Видно, что с течением времени происходит установление температуры, при этом угол охвата

влияет на немонотонную зависимость температурной аномалии, т. е. с постепенным увеличением угла охвата величина температурной аномалии сначала уменьшается (рис. 2, кривая 2), а затем увеличивается (рис. 3, кривая 3).

На рис. 3 показано влияние граничной (закачиваемой) обводненности пласта на температурное поле. Здесь начальное обводнение пласта составляет 0,3, граничная обводненность — 0,3. Проницаемость неоднородности — $0,01 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, проницаемость пласта — $0,1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

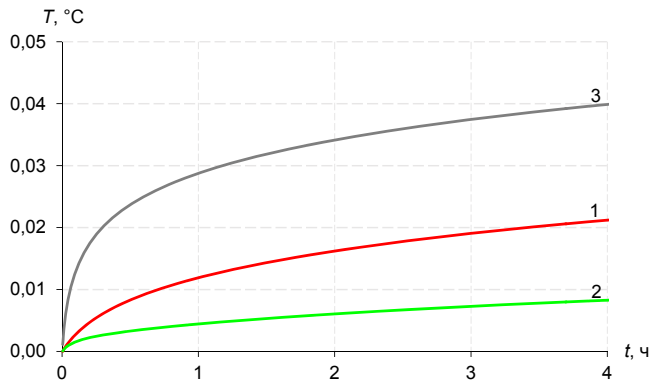


Рис. 2. Распределение температуры во времени для разных углов неоднородной зоны: кривая 1 — 10°; кривая 2 — 60°; кривая 3 — 150°. Начальная водонасыщенность пласта — 0,3, водонасыщенность на границе пласта — 0,7

Fig. 2. Dependence of temperature change on time at different angles of location of the heterogeneity: curve 1 — 10°; curve 2 — 60°; curve 3 — 150°. Initial water saturation — 0.3, boundary water saturation — 0.7

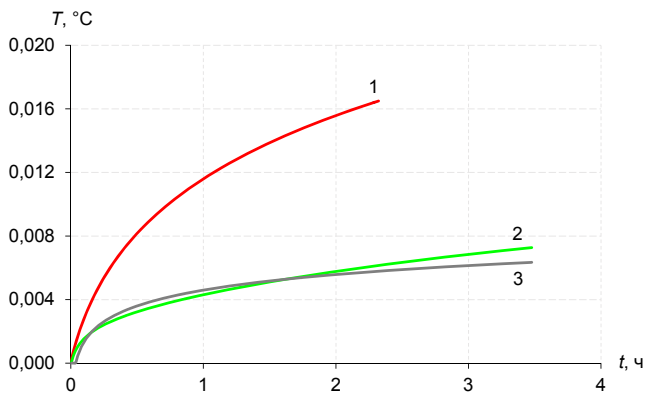


Рис. 3. Распределение температуры во времени для разных углов неоднородной зоны: кривая 1 — 10°; кривая 2 — 60°; кривая 3 — 150°. Начальная водонасыщенность пласта — 0,3, водонасыщенность на границе пласта — 0,3

Fig. 3. Dependence of temperature change on time at different angles of location of the heterogeneity: curve 1 — 10°; curve 2 — 60°; curve 3 — 150°. Initial water saturation — 0.3, boundary water saturation — 0.3

В отличие от случая на рис. 2, изменение граничного значения величины обводненности приводит к увеличению величины температурной аномалии при меньшем угле охвата области неоднородности.

Из анализа приведенных на рис. 2 и 3 изменений температуры относительно угла охвата области неоднородности видно, что наличие области с проницаемостью, отличной от основной области пласта, приводит к различному темпу установления температуры напротив неоднородной области. Так, наибольший темп установления температуры наблюдается для углов 10 и 150° (рис. 2, кривая 3; рис. 3, кривая 1), а наименьший — для угла 60°.

Дальнейшие расчеты по изучению распределения температуры в пластах с неоднородной по проницаемости зоной проведены в программном пакете Ansys, в котором включены опции для учета эффекта Джоуля — Томсона при двухфазной фильтрации нефти и воды. Область неоднородности находится в пределах от $r_{1н} = 0,14$ м до $r_{2н} = 1,4$ м. Проницаемость области неоднородности $k_n = 0,001K$, при этом проницаемость пласта $K = 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. На рис. 4 приведено распределение температуры вдоль линии симметрии в разные моменты времени. Наблюдается различный темп установления температуры вдоль линии симметрии относительно однородной и неоднородной области, т. е. в области неоднородности по радиусу в начальные моменты работы скважины температурная аномалия понижена, а в дальнейшем прослеживаются повышенные ее значения.

На рис. 5 приведено изменение температуры во времени. Видно, что скорость формирования температурного поля в однородной и неоднородной зоне различается. Вначале, в первые моменты работы скважины, быстрее нагревается однородная область, а напротив неоднородной области наблюдается замедленный темп повышения температуры за счет дроссельного разогрева. Далее в однородной области наблюдается снижение температуры, связанное с прорывом воды (рис. 5, кривая 1). В дальнейшем, после прорыва воды, во всей области, включая область неоднородной проницаемости, наблюдается выравнивание температурных аномалий разогрева для двухфазной смеси нефти и воды.

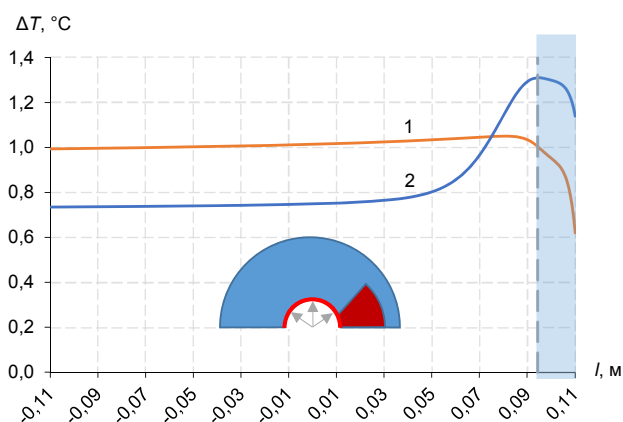


Рис. 4. Распределение температуры вдоль линии симметрии во времени: кривая 1 — 0,5 ч; кривая 2 — 2 ч

Fig. 4. Temperature distribution along the line of symmetry in time: curve 1 — 0.5 hr; curve 2 — 2 hr

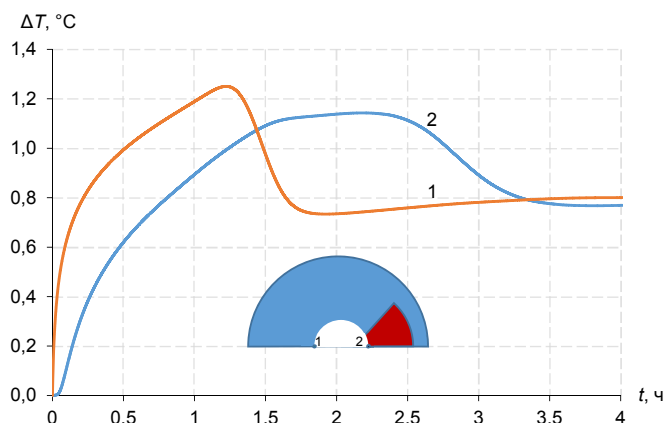


Рис. 5. Зависимость температуры в точке: кривая 1 — напротив однородной части пласта; кривая 2 — напротив участка неоднородности

Fig. 5. Dependence of temperature at a point: curve 1 — opposite the homogeneous part of the formation; curve 2 — opposite the heterogeneity section

Заключение

В работе рассматриваются особенности формирования нестационарных температурных полей в пласте с неоднородной по проницаемости зоной при фильтрации нефти и воды.

Показано, что наблюдается различный темп установления температуры в однородной и неоднородной области (различие по проницаемости) в процессе вытеснения нефти водой. Ранний прорыв воды в однородной области (т. е. более проницаемой зоне) приводит к повышенному темпу изменения температуры относительно неоднородной области в начальные моменты до прорыва воды, а в дальнейшем наблюдается снижение температуры.

Выявленные в ходе данной работы закономерности поведения температурного поля в неоднородных пластах расширяют известные данные о двухфазной неизотермической фильтрации с учетом термодинамических эффектов. Полученные выводы могут быть применены при интерпретации данных многодатчиковой аппаратуры температурных исследований скважин в условиях двухфазной фильтрации в неоднородных по проницаемости пластах.

Список источников

- Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш. 1992. Термические исследования при компрессорном освоении скважин. Уфа: Изд-во Башкир. ун-та. 119 с.
- Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш., Шарафутдинов Р. Ф. 1994. Баротермический эффект при трехфазной фильтрации с фазовыми переходами // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 6. С. 113–117.
- Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш., Шарафутдинов Р. Ф. 1995. Термометрия многофазных потоков. Уфа: Изд-во Башкир. ун-та.

- Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Садретдинов А. А., Бочков А. С. 2008. Исследование радиально-углового распределения температуры при неизотермической двухфазной фильтрации нефти и воды // Прикладная механика и техническая физика. Том 49. № 6 (292). С. 124–130.
- Газизов А. А. 2002. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. М.: Недра. 639 с.
- Гиматуллин Ш. К., Ширковский А. И. 1982. Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра. 311 с.
- Исламов Д. Ф., Рамазанов А. Ш. 2022. Исследование неизотермической двумерной фильтрации в слоистом пласте // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. № 75. С. 100–112. <https://doi.org/10.17223/19988621/75/9>
- Люшин С. Ф., Рассказов В. А., Шейх-Али Д. М. и др. 1961. Борьба с отложениями парафина при добыче нефти. М.: Гостоптехиздат. 150 с.
- Требин Г. Ф., Капырин Ю. Ф., Лиманский О. Г. 1978. Оценка температурной депрессии в призабойной зоне эксплуатационных скважин // Труды ВНИИ. № 64. С. 16–22.
- Фёдоров К. М., Шарафутдинов Р. Ф. 1989. К теории неизотермической фильтрации с фазовыми переходами // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. № 5. С. 78–85.
- Чекалюк Э. Б. 1965. Термодинамика нефтяного пласта. М.: Недра. 238 с.
- Шарафутдинов Р. Ф., Бочков А. С., Шарипов А. М., Садретдинов А. А. 2017. Фильтрация газированной нефти при наличии фазовых переходов в пористой среде с неоднородной проницаемостью // Прикладная механика и техническая физика. Том 58. № 2 (342). С. 98–102. <https://doi.org/10.15372/PMTF20170210>
- Aslanyan A., Aslanyan I., Salamatina A., Karuzinm A., Fesina Yu., Zaripov I., Skutin V., Al Ghafri Z., Khalid Yarabi M., Ali Al-Maharbi A. 2014. Numerical temperature modelling for quantitative analysis of low-compressible fluid production // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference (10–13 November 2014, Abu Dhabi, UAE). Paper SPE-172090-MS. <https://doi.org/10.2118/172090-MS>
- Bahonar M., Azaiez J., John Chen Zh. 2011. Transient nonisothermal fully coupled wellbore/reservoir model for gas-well testing, Part 1: Modelling // Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 50. No. 9. Pp. 37–50. Paper SPE-149617-PA. <https://doi.org/10.2118/149617-PA>
- Durlofsky L., Aziz K. 2004. Advanced Techniques for Reservoir Simulation and Modeling of Nonconventional Wells. Final Report. Stanford University. 224 p.
- Li Z. 2010. Interpreting Horizontal Well Flow Profiles and Optimizing Well Performance by Downhole Temperature and Pressure Data: Ph. D. diss. Texas A&M University. 190 p.
- Lucia A., Voskov D., James S. C., Zaydullin R., Henley H. 2013. Fully compositional and thermal reservoir simulations efficiently compare EOR techniques // SPE Unconventional Resources Conference (5–7 November 2013, Calgary, Alberta, Canada). Paper SPE-167184-MS. <https://doi.org/10.2118/167184-MS>
- Muradov K. 2010. Temperature Modelling and Real-Time Flow Rate Allocation in Wells with Advanced Completion: Ph. D. diss. Heriot-Watt University. 210 p.
- Palabiyik Yi., Tureyen O. I., Onur M., Deniz M. 2013. A study on pressure and temperature behaviors of geothermal wells in single-phase liquid reservoirs // Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (11–13 February 2013, Stanford, California, USA). Paper SGP-TR-198.

- Ramazanov A. Sh., Valiullin R. A., Sadretdinov A. A., Shako V. V., Pimenov V. P., Fedorov V. N., Belov K. V. 2010. Thermal modeling for characterization of near wellbore zone and zonal allocation // SPE Russian Oil & Gas Conference and Exhibition (26–28 October 2010, Moscow, Russia). Paper SPE-136256-MS. <https://doi.org/10.2118/136256-MS>
- Ribeiro P. M., Horne R. N. 2013. Pressure and temperature transient analysis: Hydraulic fractured well application // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (30 September — 2 October 2013, New Orleans, Louisiana, USA). Paper SPE-166222-MS. <https://doi.org/10.2118/166222-MS>
- Valiullin R., Ramazanov A., Sadretdinov A., Sharafutdinov R., Shako V., Sidorova M., Kryuchatov D. 2014. Field study of temperature simulators application for quantitative interpretation of transient thermal logging in a multipay well // SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition (14–16 October 2014, Moscow, Russia). Paper SPE-171233-MS. <https://doi.org/10.2118/171233-MS>

References

- Valiullin, R. A., & Ramazanov, A. Sh. (1992). *Thermal research during compressor development of wells*. Bashkir State University Publishing House. [In Russian]
- Valiullin, R. A., Ramazanov, A. Sh., & Sharafutdinov, R. F. (1994). Barothermic effect in three-phase filtration with phase transitions. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, (6), 113–117. [In Russian]
- Valiullin, R. A., Ramazanov, A. Sh., & Sharafutdinov, R. F. (1995). *Thermometry of multiphase flows*. Bashkir State University Publishing House. [In Russian]
- Valiullin, R. A., Sharafutdinov, R. F., Sadretdinov, A. A., & Bochkov, A. S. (2008). Radial angular temperature distributions for nonisothermal two-phase filtration of oil and water. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 49(6), 992–997. <https://doi.org/10.1007/s10808-008-0123-2>
- Gazizov, A. A. (2002). *Increased oil recovery of heterogeneous reservoirs at a late stage of development*. Nedra. [In Russian]
- Gimatudinov, Sh. K., & Shirkovsky, A. I. (1982). *Physics of the oil and gas reservoir*. Nedra. [In Russian]
- Islamov, D. F., & Ramazanov, A. Sh. (2022). Investigation of nonisothermal two-dimensional filtration in multilayer reservoir. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, (75), 100–112. <https://doi.org/10.17223/19988621/75/9> [In Russian]
- Lyushin, S. F., Rasskazov, V. A., Sheikh-Ali, D. M. et al. (1961). *Fight against paraffin deposits during oil production*. Gostoptekhizdat. [In Russian]
- Trebin, G. F., Kapyrin, Ju. F., & Limanskij, O. G. (1978). Estimation of temperature depression in the bottomhole zone of production wells. *Trudy VNII*, (64), 16–22. [In Russian]
- Fedorov, K. M., & Sharafutdinov, R. F. (1989). On the theory of non-isothermal filtration with phase transitions. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*, (5), 78–85. [In Russian]
- Chekalyuk, E. B. (1965). *Thermodynamics of an oil reservoir*. Nedra. [In Russian]
- Sharafutdinov, R. F., Bochkov, A. S., Sharipov, A. M., & Sadretdinov, A. A. (2017). Filtration of live oil in the presence of phase transitions in a porous medium with inhomogeneous permeability. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 58(2), 271–274. <https://doi.org/10.1134/S0021894417020109>

- Aslanyan, A., Aslanyan, I., Salamatin, A., Karuzinm, A., Fesina, Yu., Zaripov, I., Skutin, V., Al Ghafri, Z., Khalid Yarabi, M., & Ali Al-Maharbi, A. (2014, November 10–13). *Numerical temperature modelling for quantitative analysis of low-compressible fluid production* [Conference paper SPE-172090-MS]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE. <https://doi.org/10.2118/172090-MS>
- Bahonar, M., Azaiez, J., & John Chen, Zh. (2011). Transient nonisothermal fully coupled wellbore/reservoir model for gas-well testing, Part 1: Modelling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 50(9), 37–50, Paper SPE-149617-PA. <https://doi.org/10.2118/149617-PA>
- Durlowsky, L., & Aziz, K. (2004). *Advanced techniques for reservoir simulation and modeling of non-conventional wells. Final Report*. Stanford University.
- Li, Z. (2010). *Interpreting horizontal well flow profiles and optimizing well performance by downhole temperature and pressure data* [Doctoral dissertation, Texas A&M University].
- Lucia, A., Voskov, D., James, S. C., Zaydullin, R., & Henley, H. (2013, November 5–7). *Fully compositional and thermal reservoir simulations efficiently compare EOR techniques* [Conference paper SPE-167184-MS]. SPE Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.2118/167184-MS>
- Muradov, K. (2010). *Temperature modelling and real-time flow rate allocation in wells with advanced completion* [Doctoral dissertation, Heriot-Watt University].
- Palabiyik, Yi., Tureyen, O. I., Onur, M., & Deniz, M. (2013, February 11–13). *A study on pressure and temperature behaviors of geothermal wells in single-phase liquid reservoirs* [Conference paper SGP-TR-198]. Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, USA.
- Ramazanov, A. Sh., Valiullin, R. A., Sadretdinov, A. A., Shako, V. V., Pimenov, V. P., Fedorov, V. N., & Belov, K. V. (2010, October 26–28). *Thermal modeling for characterization of near wellbore zone and zonal allocation* [Conference paper SPE-136256-MS]. SPE Russian Oil & Gas Conference and Exhibition, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/136256-MS>
- Ribeiro, P. M., & Horne, R. N. (2013, September 30–October 2). *Pressure and temperature transient analysis: Hydraulic fractured well application* [Conference paper SPE-166222-MS]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA. <https://doi.org/10.2118/166222-MS>
- Valiullin, R., Ramazanov, A., Sadretdinov, A., Sharafutdinov, R., Shako, V., Sidorova, M., & Kryuchatov, D. (2014, October 14–16). *Field study of temperature simulators application for quantitative interpretation of transient thermal logging in a multipay well* [Conference paper SPE-171233-MS]. SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/171233-MS>

Информация об авторах

Малика Джалилевна Сулейманова, аспирант кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
malika_sul@mail.ru

Рамиль Фаизырович Шарафутдинов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
gframil@inbox.ru

Ильдар Вакифович Канафин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
vradlik@gmail.com

Information about the authors

Malika D. Suleimanova, Postgraduate Student, Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
malika_sul@mail.ru

Ramil F. Sharafutdinov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
gframil@inbox.ru

Ildar V. Kanafin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
vradlik@gmail.com