

Расчетный и модельный профиль температуры пласта при внутрислоеовом окислении на примере нефтяного месторождения

Альберт Альбертович Вольф, Сергей Иванович Грачев,
Жеко Митков Колев, Семён Фёдорович Мулявин [✉],
Ирина Георгиевна Стешенко, Ольга Александровна Баженова

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: muljavinsf@tyuiu.ru [✉]

Аннотация. В статье описываются физические и математические модели слоеового окисления в нефтяных залежах, разработка которых известными технологиями невозможна. Внутрислоеовое окисление реализуется в форме окисления нефти. Представлен лабораторный опыт на керне по формированию зоны горения, а также описаны проблемы, возникающие при инициировании горения в породах баженовской свиты. Выявлено, что на градиент температуры на фронте и скорость перемещения фронта окисления влияет объем закачиваемого кислорода и количество керогена в единице объема пласта. Адаптирована известная модель Томаса для аналитического решения радиальной задачи внутрислоеового горения на условия реализации процессов окисления в битуминозных пластах. Приведены результаты аналитических расчетов динамики изменения профиля слоеовой температуры в зависимости от содержания коксующегося материала и расхода закачиваемого воздуха. Установлено, что градиент температуры на фронте достигает 1 573 К/м, а также что на скорость перемещения окисления влияет объем кислорода и плотность запасов керогена в пласте. Сделаны рекомендации по дальнейшему изучению продвижения фронта внутрислоеового горения для уточнения зависимостей влияния других параметров (проницаемости, водонасыщенности и т. д.) на скорость продвижения фронта.

Ключевые слова: внутрислоеовое окисление, баженовская свита, керн, температура инициирования, удельная поверхность породы

Цитирование: Вольф А. А., Грачев С. И., Колев Ж. М., Мулявин С. Ф., Стешенко И. Г., Баженова О. А. 2023. Расчетный и модельный профиль температуры

пласта при внутрислоистовом окислении на примере нефтяного месторождения // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 4 (36). С. 91–107. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-4-91-107>

Поступила 16.05.2023; одобрена 11.12.2023; принята 15.12.2023

Calculated and model profile of reservoir temperature during in-formation oxidation on the example of an oil field

Albert A. Wolf, Sergey I. Grachev, Zheka M. Kolev, Semyon F. Mulyavin ,
Irina G. Steshenko, Olga A. Bazhenova

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: muljavinsf@tyuiu.ru 

Abstract. The article describes physical and mathematical models of reservoir oxidation in oil deposits, the development of which is impossible with known technologies. In-formation oxidation is realized in the form of oil oxidation. A laboratory experiment on the core for the formation of combustion is presented, and the problems arising during the initiation of combustion in the rocks of the Bazhenov formation are described. It was revealed that the temperature gradient at the front and the rate of movement of the oxidation front are influenced by the volume of injected oxygen and the amount of kerogen per unit volume of the formation. The well-known Thomas model has been adapted for the analytical solution of the radial problem of in-situ combustion to the conditions of the implementation of oxidation processes in bituminous formations. The results of analytical calculations of the dynamics of changes in the formation temperature profile depending on the content of coking material and the flow rate of the injected air are presented. It was found that the temperature gradient at the front reaches 1,573 K/m, and that the rate of oxidation movement is influenced by the volume of oxygen and the density of kerogen reserves in the formation. Recommendations are made for further study of the advance of the front of intra-layer combustion in order to clarify the dependencies of the influence of other parameters (permeability, water saturation, etc.) on the speed of the front advance.

Keywords: formation oxidation, Bazhenov formation, core, initiation temperature, specific rock surface

Citation: Wolf, A. A., Grachev, S. I., Kolev, Zh. M., Mulyavin, S. F., Steshenko, I. G., & Bazhenova, O. A. (2023). Calculated and model profile of reservoir temperature during in-formation oxidation on the example of an oil field. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(4), 91–107. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-4-91-107>

Received May 16, 2023; Reviewed December 11, 2023; Accepted December 15, 2023

Введение

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что большинство методов увеличения нефтеотдачи применяемых при разработке трудноизвлекаемых запасов обладают крайне низкой рентабельностью или вовсе нерентабельны. Одним из таких объектов разработки являются пласты баженовских отложений, которые по содержанию углеводородного сырья не имеют себе равных в Западной Сибири, но специфика геологического строения и особенности минералогического состава пород создают порой непреодолимые трудности при их освоении. Именно особенности геологического строения делают актуальным поиск оптимальных технологий разработки этих достаточно крупных запасов битуминозных сланцев. Одной из таких технологий, по мнению специалистов Тюменского отделения «СургутНИПИнефть», является метод гидротермовоздействия — сочетание проведения гидравлического разрыва пласта с созданием очага окислительно-восстановительных реакций путем закачки воздуха [Батурин и др., 2002].

Физическое (лабораторное) моделирование процессов, протекающих при внутрипластовом горении сланцевых отложений, проводилось неоднократно и в России, и за рубежом. Однако, как показывает литературный анализ, расчетных физико-математических моделей таких процессов создано немного.

«При создании в пласте очага горения помимо самого процесса горения осуществляется также и конвективный перенос тепла потоком воздуха и продуктами горения. Существенное влияние на изменение температуры в элементе объема пористого тела оказывают в основном выделение тепла при горении и баланс теплопроводных и теплоконвективных потоков. В качестве окислителя может использоваться атмосферный воздух, закачиваемый в пласт, в качестве топлива — часть остаточной пластовой нефти или закачиваемая в скважину газозоодушная смесь.

Горение в нефтяном пласте можно осуществить лишь при наличии в нем тяжелой нефти, оставляющей за собой при вытеснении и нагревании достаточное количество кокса. Горение легкоподвижной нефти не позволяет создать устойчивый очаг горения. Для стабилизации горения в нефтяной пласт необходимо доставлять недостающее количество топлива вместе с воздухом¹. По пути движения очага горения ширина горючей зоны в пласте увеличивается. Это приводит к повышению расхода тепла на тепловую обработку пласта и ускорению темпов обработки» [Мулявин и др., 2022].

¹ Подробнее также в [Байбаков, Гарушев, 1988; Байбаков и др., 1995; Барков и др., 1997; Батурин и др., 2002].

Целью настоящей работы являлось получение расчетного и модельного профиля температуры пласта при внутрислоевом окислении на примере нефтяного месторождения.

Методы

Способ возгорания нефти в поровом коллекторе состоит в следующем. Сначала спускают электронагреватель на забой скважины и начинают разогрев флюида на забое до начала его воспламенения, а далее начинают подавать воздух на забой скважины. Оптимальное воздействие происходит при максимальном темпе закачки воздуха при минимальной температуре воспламенения. При этом температура на границе горения регулируется за счет увеличения или уменьшения закачиваемого объема воздуха [Бурже и др., 1988; Батурин и др., 2002; Бетелин и др., 2015].

Особенности стратиграфии и характеристик баженовской свиты порождают серьезные проблемы при создании пластовых условий, в процессе фильтрации и моделирования трещиноватости при построении моделей фильтрации. В то же время физическое моделирование внутрислоевого окисления (ВО) в пластовых условиях становится практически невозможным.

Определяющим параметром реализации технологии ВО является стабильная температура горения (или инициирования), т. е. та температура, при которой существует процесс постоянного окисления кокса на фронте продвижения. Причем эта температура, как правило, отличается от температуры возгорания кокса. Проводимые эксперименты как зарубежных, так и российских исследователей подтверждают, что температура теплового самовоспламенения нефти находится в интервале 300...650 °С, и на нее влияет ряд параметров, таких как химический состав пластовой смеси, текущее пластовое давление и др. При увеличении давления, как выявлено учеными, температура возгорания существенно уменьшается.

Основным же источником тепловой энергии для прогрева пласта и поддержания горения является окисление кокса, образующегося при термическом разложении тяжелых углеводородов. В случае с нефтенасыщенными сланцами баженовской свиты в качестве такого топлива предположительно может выступать кероген, содержащийся в этой породе [Боксерман и др., 1974; Вольф, Петров, 2006].

Результаты и обсуждение

Дальнейшее исследование проводилось в два этапа. На первом этапе определялись теплофизические параметры, влияющие на процесс ВО, на основе лабораторного моделирования процессов теплопереноса на образцах керна, взятых из пласта ЮС₀ месторождения, где содержится большое количество органического углерода. На втором этапе созданная гидродинамическая модель была использована для расчета динамики процесса ВО с учетом полученных экспериментальных данных.

Первоначальные опыты проводились в насыпной модели при атмосферном давлении для оценки скорости окисления нефти. Для этой цели подготовлен лабораторный стенд с ретортой, находящейся в тепловом шкафу, где устанавливалась требуемая температура.

Как известно, температура инициирования ($T_{\text{иниц}}$) изменялась в зависимости от средней площади поровых каналов и величины закачиваемого окислителя. Рассмотрим подробнее влияние этих параметров на $T_{\text{иниц}}$.

Удельная поверхность ($S_{\text{уд}}$) разделенной на фракции породы рассчитывалась для двух моделей пористой среды. Первая состояла из частиц-шариков одинакового размера (фиктивный грунт), во второй частицы имели вид правильного параллелепипеда со сторонами $d \times d \times d/4$; при этом масса и плотность породы и объем реторты были известны до проведения опыта.

На рис. 1 представлены результаты определения $T_{\text{иниц}}$ горения породы в зависимости от $S_{\text{уд}}$ при объемном расходе (приведенном к атмосферному давлению) подаваемого в модель воздуха ($Q_{\text{вз}}$), равном $500 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Величина $S_{\text{уд}}$ образца определялась без учета объема пор внутри него, а только по его геометрическим характеристикам. Из рис. 1 видно, что существует линейная зависимость между $T_{\text{иниц}}$ и $S_{\text{уд}}$. Согласно представленному на рис. 1 уравнению корреляции, температура начала горения для коллектора баженовской свиты составит не более $411,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Чем больше коэффициент пористости, тем ниже температура возгорания органики.

Однако такую зависимость нельзя считать универсальной, т. к., во-первых, она определялась при атмосферном давлении без моделирования горного давления, во-вторых, абсолютная проницаемость модели была очень высокой (более 10 мкм^2), и, как следствие, на модели реализовывались невысокие градиенты порового давления. Поскольку, как показано в работах отечественных и зарубежных исследователей, $T_{\text{иниц}}$ уменьшается с увеличением давления, были проведены дополнительные исследования в этом направлении [Вольф, Петров, 2006].

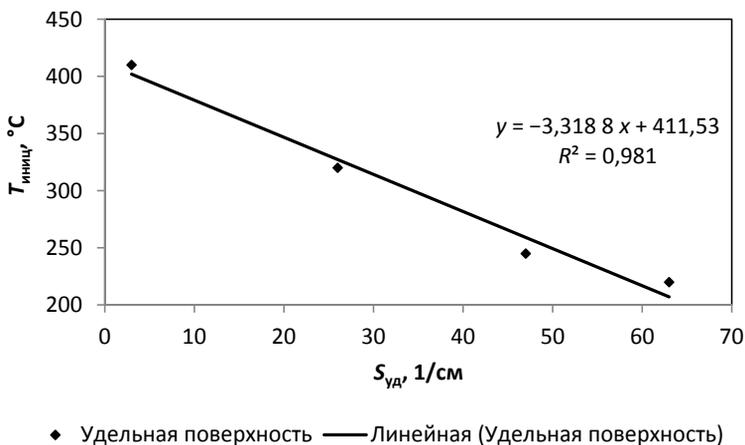


Рис. 1. Зависимость температуры инициирования ($T_{\text{иниц}}$, °C) окислительных реакций от удельной поверхности ($S_{\text{уд}}$, 1/см) при атмосферном давлении для пород баженовской свиты

Fig. 1. Dependence of the temperature of initiation ($T_{\text{иниц}}$, °C) of oxidative reactions on the specific surface ($S_{\text{уд}}$, 1/cm) at atmospheric pressure for rocks of the Bazhenov formation

Другим результатом проведенных исследований является получение зависимостей $T_{\text{иниц}}$ и максимальной температуры (T_{max}) на фронте горения от $Q_{\text{ат}}$ (рис. 2). В этом случае порода не разделялась на фракции, и в модель помещалась просто общая гомогенизированная смесь. Кроме того, преследовалась цель изучить теплотворную способность керогена, содержащегося в породе, поэтому керн не донасыщался нефтью и помещался в модель «сухим». Сравнительные опыты, проведенные на «сухом» керне и керне, донасыщенном нефтью, показали, что донасыщение керна нефтью незначительно влияет на процесс образования устойчивого фронта горения, что объясняется выносом легких углеводородов, образующихся в результате термической деструкции нефти при иницировании горения [Антониади, 1995; Аржанов и др., 1995; Чехонин и др., 2012].

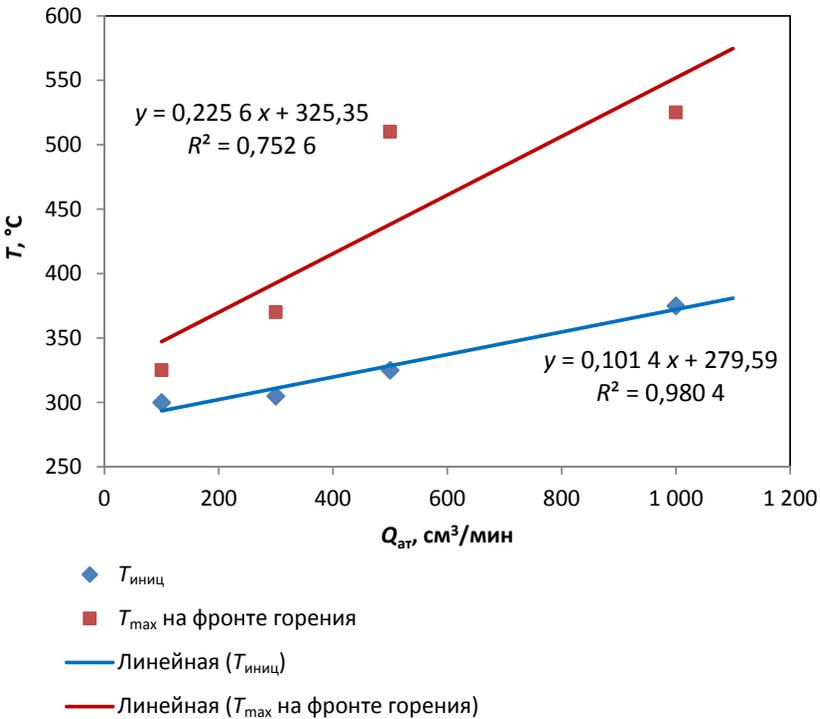


Рис. 2. Зависимость температуры инициирования ($T_{\text{иниц}}$, °C) и максимальной температуры (T_{max} , °C) на фронте горения от расхода закачиваемого воздуха при атмосферном давлении ($Q_{\text{ат}}$, см³/мин), пласт ЮС₀

Fig. 2. The dependence of the initiation temperature ($T_{\text{иниц}}$, °C) and the maximum temperature (T_{max} , °C) at the combustion front on the flow rate of the injected air at atmospheric pressure ($Q_{\text{ат}}$, cm³/min), formation of US₀

Как показано на рис. 2, T_{max} на фронте горения повышается с увеличением $Q_{\text{ат}}$. Увеличение же $T_{\text{иниц}}$ с увеличением $Q_{\text{ат}}$, кажущееся на первый взгляд парадоксальным, объясняется превалированием процесса конвективного переноса тепла закачиваемым при комнатной температуре воздухом над обычной теплопроводностью.

Определяющим параметром влияния конвекции при переносе является число Пекле (Pe), в одномерном случае имеющее вид:

$$Pe = \frac{vl}{\chi} = \frac{Ql}{S\chi}, \quad (1)$$

где χ — коэффициент температуропроводности, м²/с (для глин $\approx 9,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с); v — скорость набегающего потока, м/с, или расход воздуха на единицу поперечного сечения реторты ($v = Q/S$, где Q — дебит газа, м³/сут, S — площадь поперечного сечения трубки, м²); l — длина реторты, м.

В лабораторных опытах для $Q_{ар} = 100$ см³/мин величина $Pe = 200$ и, соответственно, для $Q_{ар} = 1\,000$ см³/мин величина $Pe = 2\,000$. В любом случае $Pe \gg 1$, что и показывает определяющую роль конвективного переноса для нашего случая. Иначе говоря, с ростом скорости закачки воздуха при комнатной температуре увеличивается конвективный вынос тепла из реторты, поэтому и необходимо создавать более высокую $T_{иниц}$ окислительных реакций. Такой эффект необходимо учитывать при иницировании внутрипластового горения в пласте.

Фронт горения, возникающий вследствие реакции окисления, служит тепловым источником для нагрева участков пласта вокруг него. Этот фронт соответствует изотермической поверхности с самой высокой температурой. Тепло перед фронтом горения передается путем конвективного диффузионного тепло- и массообмена. Доля кислорода в воздушной смеси и $Q_{ар}$ существенно влияют на скорость перемещения границы раздела.

С целью определения скорости продвижения фронта горения ($u_{в}$) в описанную выше методику проведения исследований внесены некоторые изменения. А именно: вовнутрь реторты по ее оси помещались на расстоянии 4 см друг от друга три термопары, которые фиксировали температуру на фронте горения.

Величина $u_{в}$ определялась по времени прохождения температурного максимума через термопары. Результаты этих опытов представлены в таблице 1 и на рис. 3.

Таблица 1. Определение скорости продвижения фронта горения ($u_{в}$, см/сут) при атмосферном давлении на примере раздробленного ядра пласта ЮС₀₇, скв. 20 бис

Table 1. Determination of the rate of advance of the combustion front ($u_{в}$, cm/day) at atmospheric pressure on the example of a fragmented core of the formation of US₀₇, well 20 bis

№ опыта	Расход воздуха ($Q_{ар}$, см ³ /мин)	Фракция дробленной породы, мм	Максимальная температура на фронте горения (T_{max} , °C)	Скорость продвижения фронта ($u_{в}$, см/сут)
1	100	общая	467	0,389
2	100	2,5...1,7	486	0,356
3	100	»	355	0,493
4	500	»	569	2,797

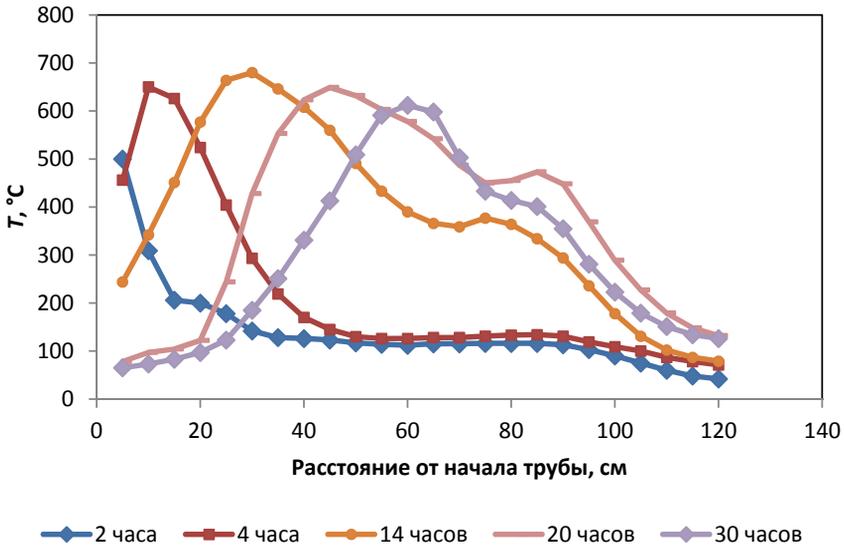


Рис. 3. Динамика движения температурного фронта в реторте
 Fig. 3. Dynamics of the temperature front movement in the retort

Необходимость продолжения исследований по определению u_b очевидна. Поскольку в представленных данных отсутствует зависимость u_b от проницаемости коллектора, водонасыщенности и других параметров, наблюдается тенденция увеличения u_b с увеличением $Q_{ат}$.

С другой стороны, в баженовской свите предполагается перед инициированием ВО провести ряд мероприятий по искусственному образованию трещин, в результате чего u_b в трещине будет отличаться от скорости распространения аналогичного фронта в матрице породы.

Как уже отмечалось выше, немаловажным фактором для инициирования и поддержания процесса ВО является наличие в достаточном количестве в нефти кокса как основного топлива.

Задача второго этапа исследований состояла в создании приближенной модели ВО. В настоящее время разработан ряд аналитических решений для моделирования ВО в попутном потоке при радиальной геометрии. При этом принимают некоторые упрощающие допущения относительно теплообмена. Пористую среду рассматривают как непрерывную и сплошную; явлениями конденсации и парообразования пренебрегают; фронт горения считают бесконечно тонким; количество воздуха, необходимого для выжигания единичного объема пласта, считается постоянным, также как и количество тепла, выделяемого на единицу массы потребляемого кислорода.

Совместное влияние процессов теплопереноса, обусловленного теплопроводностью и конвекцией, впервые было рассмотрено Бейли и Ларкиным [Bailey, Larkin, 1959; Ramey, 1959; Bailey, Larkin, 1960; Chu, 1963; Бурже и др., 1988] при специфических условиях. Они допустили, что тепловые потери в вертикальном направлении равны нулю.

Одна из наиболее удачных моделей предложена в работе [Thomas, 1963; Бурже и др., 1988]:

$$\operatorname{div}(\lambda \nabla T) + q = (\rho c)^* \frac{\partial T}{\partial t} - (\rho c)_a V \nabla T, \quad (2)$$

где λ — коэффициент теплопроводности среды, $\text{кДж/м} \cdot \text{час} \cdot \text{°C}$; ∇ — градиент, $1/\text{м}$; T — температура, °C ; q — количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива, Дж ; $(\rho c)^*$ — объемная теплоемкость среды, $\text{кДж/м}^3 \cdot \text{°C}$; t — время, с ; $(\rho c)_a$ — объемная теплоемкость воздуха, $\text{кДж/м}^3 \cdot \text{°C}$; V — скорость движения потока, м/с .

Для радиального случая уравнение сохранения энергии с учетом члена, описывающего источник тепла, записывается следующим образом:

$$\lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] - \frac{(\rho c)_a \omega}{2\pi r} \frac{\partial T}{\partial r} + q = (\rho c)^* \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

где r — радиус, м ; ω — расход воздуха на метр толщины пласта, $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч})$;

$$q = Q_i \frac{m_c}{v} u_b \delta(r - r_b), \quad (4)$$

где Q_i — теплотворная способность воздуха, кДж/кг ; m_c/v — масса топлива в единице объема пористой среды, кг/м^3 ; $u_b = (\omega/2\pi a)(1/r_b)$ — скорость распространения (продвижения) фронта горения, м/час ; $\delta(x)$ — функция Дирака; r_b — радиус фронта горения, м ;

$$\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] - \frac{\text{Pe}}{2r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{Q_i \frac{m_c}{v}}{\lambda} \frac{\omega}{2\pi a r_b} \delta(r - r_b) = \frac{(\rho c)^*}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (5)$$

Уравнение (2) удовлетворяет следующим условиям: $T(r, z, 0) = T_r$ — начальное условие; $T(\infty, \infty, t) = T_r$ — граничное условие.

Решение методом функций Грина приводит к следующей функции:

$$T(r, z, t) - T_r = A r^{\text{Pe}} \int_0^t f(t, \tau, z) d\tau, \quad (6)$$

$$f(t, \tau, z) = \frac{\exp\left(-\frac{r^2 + \frac{\omega\tau}{\pi a}}{4\lambda(t-\tau)}\right)}{(t-\tau) \left[\frac{\omega\tau}{\pi a}\right]^{\frac{\text{Pe}}{2}}} \cdot I_{\text{Pe}} \left[\frac{r \sqrt{\frac{\omega\tau}{\pi a}}}{2\lambda(t-\tau)} \right] \times \\ \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z + \frac{H}{2}}{2 \sqrt{\frac{\lambda(t-\tau)}{(\rho c)^*}}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{-z + \frac{H}{2}}{2 \sqrt{\frac{\lambda(t-\tau)}{(\rho c)^*}}} \right) \right], \quad (7)$$

где $A = Q_i(m_c/v)\omega/(8\pi a\lambda)$ — константа; a — необходимое количество воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$; τ — переменная интегрирования; $Pe = (\rho c)_a \omega/(H\pi\lambda)$ — число Пекле; $\text{erf}(x)$ — интеграл вероятности или функция ошибок ($\text{erf}(0) = 0$; $\text{erf}(+\infty) = 1$); $I_{Pe}(x)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода и порядка Pe ; H — толщина пласта, м. Отметим, что, согласно формуле (7), если H — бесконечная величина, то решение имеет нулевой градиент температуры в вертикальном направлении.

Кроме характеристик породы температурные условия в стволе и пласте определяются также теплофизическими свойствами нефти, воды, некоторых газов и коллекторов [Аржанов и др., 1995; Чехонин и др., 2012; Батулин и др., 2018; Хафизов, 2018]. В таблице 2 приведены значения теплофизических свойств нефти и воды при стандартных условиях [Кислицын, 2002; Школкин, 2016].

Таблица 2. Исходные значения теплофизических свойств нефти и воды при стандартных условиях

Table 2. Initial values of thermophysical properties of oil and water under standard conditions

Параметр	Значение
Теплотворная способность кокса, Q_i	25 200 кДж/кг
Плотность нефти, ρ_n	0,85 г/см ³
Необходимое кол-во воздуха, $a = V_a/u_b$	164 м ³ /м ³
Коэффициент теплопроводности окружающих пород, λ	2 Вт/м · °С
Коэффициент теплопроводности окружающих пород, λ	7,2 кДж/м · ч · °С (1 Вт = 1 Дж · с)
Теплоемкость воздуха, $(\rho c)_a$	1,29 кДж/(м ³ · °С)
Объемная теплоемкость окружающих пород, $(\rho c)^*$	2 400 кДж/м ³ · °С
Толщина пласта, H	5 м
Температура пласта, T	60 °С

Далее рассмотрим результаты расчетов процесса ВО. Ключевыми, влияющими на поведение системы, параметрами являются дебит воздуха (q_b , тыс. м³/сут) и масса топлива в единице объема ($z = m_c/v$, кг/м³). Отмечается следующее влияние q_b и z на поведение температуры (рис. 4–7):

«Так при увеличении объема подачи воздуха и количества кокса в пласте температура фронта возрастает (таблица 3). Так при $z=13$ кг/м³ и дебите воздуха, равном 6,0 тыс. м³/сут температура фронта составляет 629,9 град. С, а при дебите воздуха, равном 60,0 тыс. м³/сут температура фронта повышается до 768,5 град. С.

Также от объема закачиваемого воздуха зависит скорость движения температурного фронта (таблица 4). Так скорость движения фронта горения возрастает от 0,01 м/сут до 0,024 м/сут при увеличении дебита воздуха от 6 до 60,0 тыс. м³/сут» [Мулявин и др., 2022].

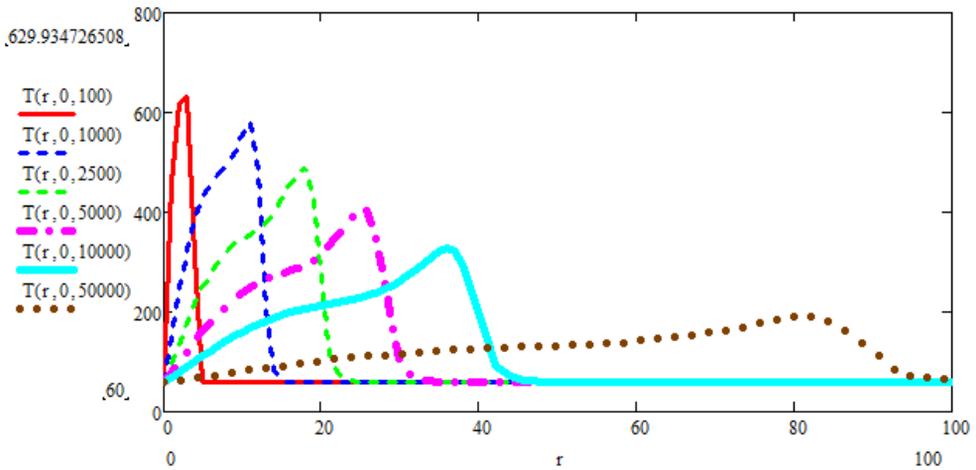


Рис. 4. Динамика изменения профиля температур в пласте от времени.
Дебит воздуха: $q_a = 6$ тыс. м³/сут; масса топлива в единице объема: $z = 13$ кг/м³
($Pe = 0,587$)

Fig. 4. Dynamics of temperature profile changes in the formation from time to time.
Air flow rate: $q_a = 6$ thousand m³/day; mass of fuel per unit volume: $z = 13$ kg/m³
($Pe = 0.587$)

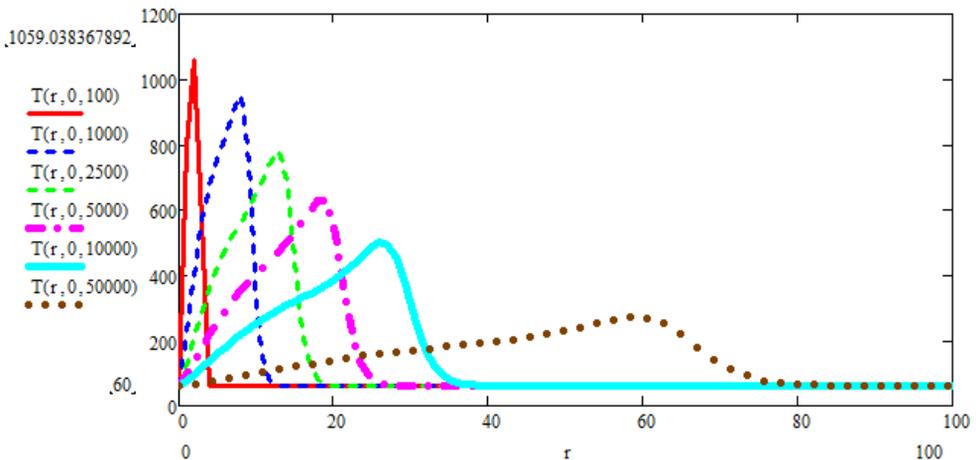


Рис. 5. Динамика изменения профиля температур в пласте от времени.
Дебит воздуха: $q_a = 6$ тыс. м³/сут; масса топлива в единице объема: $z = 24$ кг/м³
($Pe = 0,587$)

Fig. 5. Dynamics of temperature profile changes in the formation from time to time.
Air flow rate: $q_a = 6$ thousand m³/day; mass of fuel per unit volume: $z = 24$ kg/m³
($Pe = 0.587$)

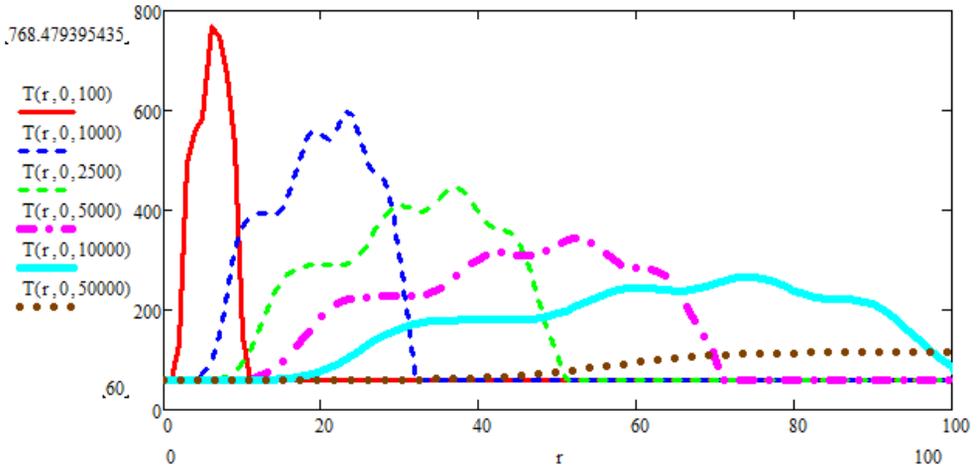


Рис. 6. Динамика изменения профиля температур в пласте от времени.
Дебит воздуха: $q_b = 60$ тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$; масса топлива в единице объема: $z = 13 \text{ кг}/\text{м}^3$
($Pe = 5,87$)

Fig. 6. Dynamics of temperature profile changes in the formation from time to time.
Air flow rate: $q_b = 60$ thousand m^3/day ; mass of fuel per unit volume: $z = 13 \text{ kg}/\text{m}^3$
($Pe = 5.87$)

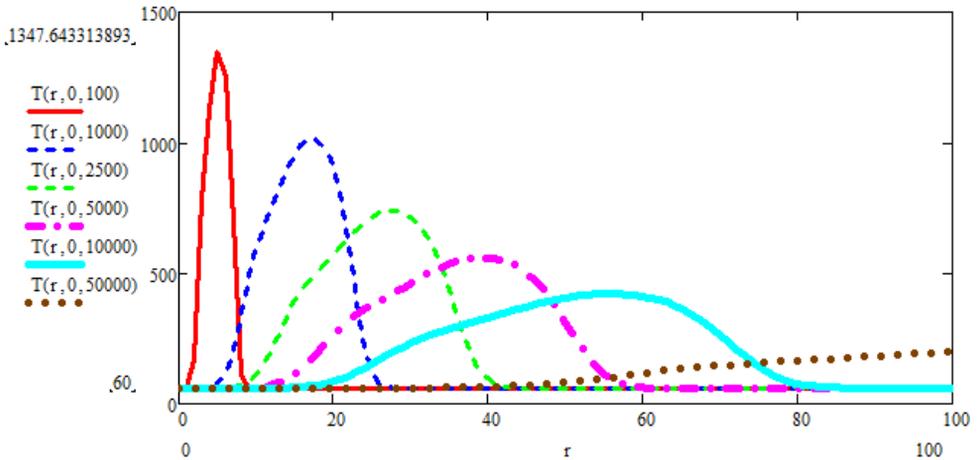


Рис. 7. Динамика изменения профиля температур в пласте от времени.
Дебит воздуха: $q_b = 60$ тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$; масса топлива в единице объема: $z = 24 \text{ кг}/\text{м}^3$
($Pe = 5,87$)

Fig. 7. Dynamics of temperature profile changes in the formation from time to time.
Air flow rate: $q_b = 60$ thousand m^3/day ; mass of fuel per unit volume: $z = 24 \text{ kg}/\text{m}^3$
($Pe = 5.87$)

Таблица 3. Максимальная температура фронта горения (T_{\max} , °C)

Table 3. Maximum temperature of the combustion front (T_{\max} , °C)

$z = m_c/v$, кг/м ³	q_b , тыс. м ³ /сут	
	6,0	60,0
13	629,9	768,5
24	1 059,0	1 347,6

Источник: [Мулявин и др., 2022]

Source: [Mulyavin et al., 2022]

Таблица 4. Скорость движения фронта горения (u_b , см/сут)

Table 4. The speed of movement of the combustion front (u_b , cm/day)

$z = m_c/v$, кг/м ³	q_b , тыс. м ³ /сут	
	6,0	60,0
13	1,14	2,37
24	0,79	1,75

Источник: [Мулявин и др., 2022]

Source: [Mulyavin et al., 2022]

Заклучение

Таким образом, в статье представлены результаты лабораторных работ с дробленным керном для определения основных характеристик коллектора, параметров процесса возгорания нефти в модели, числа Пекле, а также скорости протекания реакций. Полученные данные были использованы в радиальной модели [Thomas, 1963], описывающей процесс теплопереноса при внутрислоево́м горении. Рассчитанная теоретическая скорость перемещения границы горения кокса, динамика температуры для радиального случая пласта подтверждаются лабораторными опытами. Установлено, что градиент температуры на фронте достигает 1 573 К/м, а также что на скорость перемещения окисления влияет объем кислорода и плотность запасов керогена в пласте. При этом температура фронта горения по аналитической модели изменяется от 600 до 1 300 °C, в лабораторном опыте она достигла 688 °C. Исходя из полученных результатов, авторы рекомендуют продолжать дальнейшие исследования по изучению продвижения фронта внутрислоево́го горения для уточнения зависимостей влияния других параметров (проницаемости, водонасыщенности и т. д.) на скорость продвижения фронта.

Список источников

- Амелин И. Д. 1980. Внутрислоево́е горение. М.: Недрa. 230 с.
- Антониади Д. Г. 1995. Научные основы разработки нефтяных месторождений термическими методами. М.: Недрa. 313 с.
- Аржанов Ф. Г., Антониади Д. Г., Гарушев А. Р., Ишханов В. Г., Бекух И. И. 1995. Термические методы воздействия на нефтяные пласты: справ. пос. М.: Недрa. 192 с.

- Афанаскин И. В. 2013. Повышение технологической эффективности метода направленной закачки воздуха в нефтяные пласты на основе численного моделирования и результатов гидродинамических исследований скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИнефть. 33 с.
- Байбаков Н. К., Гарушев А. Р. 1988. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра. 343 с.
- Байбаков Н. К., Гарушев А. Р., Антониади Д. Г., Шиханов В. Г. 1995. Термические методы добычи нефти в России и за рубежом. М.: ВНИИОЭНГ. 181 с.
- Барков С. Л., Воробьев М. А., Сонич В. П. 1997. Условия и критерии реализации влажного внутрипластового горения. М.: ВНИИОЭНГ.
- Батурин Ю. Е., Сонич В. П., Малышев А. Г., Зарипов О. Г. 2002. Оценка перспектив применения метода гидротермовоздействия в пласте Ю₀ месторождений ОАО «Сургутнефтегаз» // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. № 1 (1).
- Батурин Ю. Е., Бахтий Н., Вольф А. А. и др. 2018. Технологическая схема опытно-промышленных работ по испытанию эффективности гидротермовоздействия на пласте АС₁^{***} месторождения. Тюмень: ТО СургутНИПИнефть. 47 с.
- Бетелин В. Б., Юдин В. А., Афанаскин И. В., Вольпин С. Г., Кац Р. М., Королёв А. В. 2015. Создание отечественного термогидросимулятора — необходимый этап освоения нетрадиционных залежей углеводородов России. М.: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. 206 с.
- Боксерман А. А., Желтов Ю. П., Жданов С. А. 1974. Внутрипластовое горение с заводнением при разработке нефтяных месторождений. М.: Недра. 168 с.
- Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. 1988. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов: пер. с франц. М.: Недра. 422 с.
- Вольф А. А., Петров А. А. 2006. Особенности инициирования процесса внутрипластового горения в низкопроницаемых керогеносодержащих породах // Нефтяное хозяйство. № 4. С. 56–58.
- Кислицын А. А. 2002. Основы теплофизики: лекции и семинары. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та. 152 с.
- Мулявин С. Ф., Грачев С. И., Колев Ж. М., Вольф А. А., Батурин Ю. Е. 2022. Определение профиля температуры пласта при внутрипластовом горении на примере пласта АС₁ нефтяного месторождения // Решение прикладных задач нефтегазодобычи на основе классических работ А. П. Телкова и А. Н. Лапердина: материалы Нац. науч.-техн. конф. С. 147–158.
- Хафизов Р. И. 2018. Исследование процессов разработки залежей сверхвязкой нефти с применением тепловых методов воздействия в условиях влияния газа на основе термогидродинамического моделирования: дис. ... канд. техн. наук. Бугульма: ТатНИПИнефть. 126 с.
- Чехонин Е., Паршин А., Писаренко Д., Попов Ю., Ромушкевич Р., Сафонов С., Спасенных М. 2012. Теплофизические свойства пород-коллекторов // Нефтегазовое обозрение. Том 24. № 3. С. 1–22.
- Щеколдин К. А. 2016. Обоснование технологических режимов термогазового воздействия на залежи баженовской свиты: дис. ... канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 105 с.

- Bailey H. R., Larkin B. K. 1959. Heat conduction in underground combustion // Transactions of the AIME. Vol. 216. Pp. 123–129.
- Bailey H. R., Larkin B. K. 1960. Conduction-convection in underground combustion // Transactions of the AIME. Vol. 219. No. 1. Pp. 320–331. <https://doi.org/10.2118/1482-G>
- Chu Ch. 1963. Two-dimensional analysis of a radial heat wave // Journal of Petroleum Technology. Vol. 15. No. 10. Pp. 1137–1144. <https://doi.org/10.2118/S60-PA>
- Ramey H. J. 1959. Transient heat conduction during radial movement of a cylindrical heat source — Applications to the thermal recovery process // Transactions of the AIME. Vol. 216. No. 1. Pp. 115–122. <https://doi.org/10.2118/1133-G>
- Thomas G. W. 1963. A study of forward combustion in a radial system bounded by permeable media // Journal of Petroleum Technology. Vol. 15. No. 10. Pp. 1145–1149. <https://doi.org/10.2118/681-PA>

References

- Amelin, I. D. (1980). *In-situ combustion*. Nedra. [In Russian]
- Antoniadi, D. G. (1995). *Scientific basis for developing oil fields using thermal methods*. Nedra. [In Russian]
- Arzhanov, F. G., Antoniadi, D. G., Garushev, A. R., Ishkhanov, V. G., & Bekuh, I. I. (1995). *Thermal methods of influencing oil reservoirs*. Nedra. [In Russian]
- Afanaskin, I. V. (2013). *Increasing the technological efficiency of the method of directed air injection into oil reservoirs based on numerical modeling and the results of hydrodynamic studies of wells*. [Cand. Sci. (Tech.) abstract of the dissertation, VNIIneft]. [In Russian]
- Baibakov, N. K., & Garushev, A. R. (1988). *Thermal methods for developing oil fields* (3rd ed.). Nedra. [In Russian]
- Baibakov, N. K., Garushev, A. R., Antoniadi, D. G., & Shikhanov, V. G. (1995). *Thermal methods of oil production in Russia and abroad*. VNIIOENG. [In Russian]
- Barkov, S. L., Vorobiev, M. A., & Sonich, V. P. (1997). *Conditions and criteria for the implementation of wet in-situ combustion*. VNIIOENG. [In Russian]
- Baturin, Yu. E., Sonich, V. P., Malyshev, A. G., & Zaripov, O. G. (2002). Assessment of the prospects for using the hydrothermal stimulation method in the Yu₀ formation of the fields of OJSC “Surgutneftegas”. *Interval. Peredovye neftegazovye tekhnologii*, (1). [In Russian]
- Baturin, Yu. E., Bahtij, N., Volf, A. A. et al. (2018). *Technological scheme of pilot work to test the effectiveness of hydrothermal stimulation on the AC₁*** formation of the field*. Tyumen Branch of SurgutNIPIneft. [In Russian]
- Betelin, V. B., Yudin, V. A., Afanaskin, I. V., Volpin, S. G., Kats, R. M., & Korolev, A. V. (2015). *The creation of a domestic thermal hydraulic simulator is a necessary stage in the development of unconventional hydrocarbon deposits in Russia*. Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences. [In Russian]
- Bokserman, A. A., Zheltov, Yu. P., & Zhdanov, S. A. (1974). *In-situ combustion with waterflooding in oil field development*. Nedra. [In Russian]
- Burger, J., Sourieau, P., & Combarous, M. (1984). *Récupération assistée du pétrole: les méthodes thermiques* (Vol. 25). Editions Technip. [In French]

- Volf, A. A., & Petrov, A. A. (2006). Features of initiating the process of in-situ combustion in low-permeability kerogen-containing rocks. *Oil Industry*, (4), 56–58. [In Russian]
- Kislitsin, A. A. (2002). *Fundamentals of thermophysics*. University of Tyumen. [In Russian]
- Mulyavin, S. F., Grachev, S. I., Kolev, Zh. M., Volf, A. A., & Baturin, Yu. E. (2022). Determination of the formation temperature profile during in-situ combustion using the example of formation AC_1 of an oil field. In *Solving applied problems of oil and gas production based on the classical works of A. P. Telkov and A. N. Laperdin* (pp. 147–158). [In Russian]
- Hafizov, R. I. (2018). *Study of the processes of development of super-viscous oil deposits using thermal methods of influence under conditions of gas influence based on thermohydrodynamic modeling* [Cand. Sci. (Tech.) dissertation, TatNIPIneft]. [In Russian]
- Chekhnin, E., Parshin, A., Pisarenko, D., Popov, Yu., Romushkevich, R., Safonov, S., & Spasennyh, M. (2012). Thermophysical properties of reservoir rocks. *Neftgazovoe obozrenie*, 24(3), 1–22. [In Russian]
- Shchekoldin, K. A. (2016). *Justification of technological regimes of thermal gas impact on deposits of the Bazhenov formation* [Cand. Sci. (Tech.) dissertation, Gubkin University]. [In Russian]
- Bailey, H. R., & Larkin, B. K. (1959). Heat conduction in underground combustion. *Transactions of the AIME*, 216, 123–129.
- Bailey, H. R., & Larkin, B. K. (1960). Conduction-convection in underground combustion. *Transactions of the AIME*, 219(1), 320–331. <https://doi.org/10.2118/1482-G>
- Chu, Ch. (1963). Two-dimensional analysis of a radial heat wave. *Journal of Petroleum Technology*, 15(10), 1137–1144. <https://doi.org/10.2118/560-PA>
- Ramey, H. J. (1959). Transient heat conduction during radial movement of a cylindrical heat source — Applications to the thermal recovery process. *Transactions of the AIME*, 216(1), 115–122. <https://doi.org/10.2118/1133-G>
- Thomas, G. W. (1963). A study of forward combustion in a radial system bounded by permeable media. *Journal of Petroleum Technology*, 15(10), 1145–1149. <https://doi.org/10.2118/681-PA>

Информация об авторах

Альберт Альбертович Вольф, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
volfaa@tyuiu.ru

Сергей Иванович Грачев, доктор технических наук, заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
grachevsi@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6056-5527>

Жеко Митков Колев, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
kolevzm@tyuiu.ru

Семён Фёдорович Мулявин, доктор технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
muljavinsf@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4768-8511>

Ирина Георгиевна Стешенко, инженер кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
steshenkoig@tyuiu.ru

Ольга Александровна Баженова, лаборант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
bazhenovaoa@tyuiu.ru

Information about the authors

Albert A. Wolf, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
volfaa@tyuiu.ru

Sergey I. Grachev, Dr. Sci. (Tech.), Head of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
grachevsi@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6056-5527>

Zheka M. Kolev, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
kolevzm@tyuiu.ru

Semyon F. Mulyavin, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
muljavinsf@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4768-8511>

Irina G. Steshenko, Engineer, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
steshenkoig@tyuiu.ru

Olga A. Bazhenova, Laboratory Assistant, Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
bazhenovaoa@tyuiu.ru