

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.24

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-3-146-155

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ ПРИ «БЕСКОНЕЧНОМ» НАГРЕВЕ С ОТТОКОМ ТЕПЛОТЫ

Якимов Н.Д.¹, Шагеев А.Ф.², Дмитриев А.В.¹, Мутугуллина И.А.¹

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²КФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий / Научный центр мирового
уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты (головной
центр) / НИЛ методов увеличения нефтеотдачи, г. Казань, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru

<https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, shageevalbert@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-1950-5002>, vedgaeva@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В данной статье предлагается математическая модель для расчета температурного поля в кольцевом пористом слое внутрискважинного реактора при непрерывном разогреве призабойной зоны, содержащей высоковязкую нефть (ВВН) и природный битум (ПБ). Процесс нагрева считается бесконечным. *ЦЕЛЬ.* Для решения данной задачи необходимо использовать предложенную математическую модель. Получить профиль температуры в пористом слое при постоянном нагреве с оттоком теплоты. *МЕТОДЫ.* Уравнения математической модели построены на основе законов сохранения энергии и массы, для их исследования и оценки применяются аналитические методы теории дифференциальных уравнений, методы теории подобия и размерностей, а также численные методы решения краевых задач. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В ходе исследования были обнаружены зависимости расстояния, на котором достигается заданная температура в реакторе, прямо пропорционально массовому расходу, линейной плотности теплового потока и теплоемкости смеси. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Математическая модель показывает, как изменяется температура в кольцевом пористом слое внутри реактора при бесконечном нагреве и оттоке тепла.

Ключевые слова: пористый слой; температурное поле; бесконечный нагрев; высоковязкая нефть; внутрискважинный реактор

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 075-15-2022-299 в рамках программы развития Научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Для цитирования: Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Мутугуллина И.А. Температурное поле в цилиндрическом пористом слое при «бесконечном» нагреве с оттоком теплоты // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 146-155. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-146-155.

TEMPERATURE FIELD IN A CYLINDRICAL POROUS LAYER UNDER «INFINITE» HEATING WITH HEAT OUTFLOW

Yakimov N.D.¹, Shageev A.F.², Dmitriev A.V.¹, Mutugullina I.A.¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Development and Exploitation of deposits of hard-to-recover hydrocarbons of KFU,
Institute of Geology and Oil and Gas Technologies / World-class Scientific Center for

Rational Development of liquid Hydrocarbon reserves of the planet (head center) /

NIL methods of increasing oil recovery, Kazan, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru

<https://orcid.org/0009-0002-2852-9021>, shageevalbert@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-1950-5002>, vedgaeva@gmail.com

Abstract: RELEVANCE. This article proposes a mathematical model for calculating the temperature field in the annular porous layer of an downhole reactor during continuous heating of a bottomhole zone containing high-viscosity oil (VVN) and natural bitumen (PB). The heating process is considered endless. purpose. OBJECT. To solve this problem, it is necessary to use the proposed mathematical model. To obtain a temperature profile in a porous layer under constant heating with heat outflow. METHODS. The equations of the mathematical model are based on the laws of conservation of energy and mass, analytical methods of the theory of differential equations, methods of the theory of similarity and dimensions, as well as numerical methods for solving boundary value problems are used for their study and evaluation. RESULTS. During the study, the dependences of the distance at which the set temperature in the reactor is reached were found to be directly proportional to the mass flow rate, the linear density of the heat flux and the heat capacity of the mixture. CONCLUSION. The mathematical model shows how the temperature in the annular porous layer inside the reactor changes with endless heating and heat outflow.

Keywords: porous layer; temperature field; endless heating; high viscosity oil; downhole reactor

For citation: Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Mutugullina I.A. Temperature field in a cylindrical porous layer during “endless” heating with heat outflow. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 146-155. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-146-155.

Введение и Литературный обзор (Introduction)

В данной статье цель исследования заключается в нахождении решения профиля температуры поля в кольцевом пористом слое внутрискважинного реактора при непрерывном разогреве призабойной зоны, содержащей высоковязкую нефть (ВВН) и природный битум (ПБ).

Для этого предлагается использовать математическую модель. Уравнения математической модели построены на основе законов сохранения энергии и массы, для их исследования и оценки применяются аналитические методы теории дифференциальных уравнений, методы теории подобия и размерностей, а также численные методы решения краевых задач.

Научная значимость исследования заключается в получении распределения температур в проточной области внутрискважинного реактора при условии оттока теплоты от цилиндрической стенки. Зависимости получены в безразмерном виде.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на основе полученных зависимостей можно рассчитать геометрические размеры внутрискважинного реактора в зависимости от характеристик и размеров нагревателя, а также от условий отвода теплоты от его стенок.

Проблема повышения эффективности добычи нефти является одной из наиболее весомых и дискутируемых в нефтедобывающих странах мира на протяжении многих десятков лет. Важность этой проблемы для России была неоднократно подтверждена исследованиями, прогнозами и решениями государственных органов. Однако, несмотря на это, достигнутые результаты пока не соответствуют важности этой темы для нефтяной отрасли. [1].

Нефтяные компании по всему миру уделяют повышенное внимание разработке новых и совершенствованию существующих методов добычи высоковязкой нефти. На сегодняшний день не существует альтернативы для разработки нефтегазовых месторождений с высоковязкой нефтью. Работа [2] посвящена изучению методов повышения нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью. Авторы анализируют преимущества и недостатки используемых технологий и дают им оценку.

Использование новых энергосберегающих и экологически чистых технологий позволит повысить уровень добычи нефти в России. Для определения эффективности

методов поддержания пластовой температуры на небольших залежах высоковязкой нефти, авторы используют математическое моделирование. [3]. Для повышения эффективности поддержания пластовой температуры и экономии тепловой энергии рекомендуется теплоизолировать все элементы системы поддержания пластового давления и пластовой температуры. [3].

Одним из основных термических методов, используемых в настоящее время специалистами отрасли, является впрыск горячего агента. В статье [4] представлены результаты термического воздействия для условий формирования СЗ Красноярского месторождения.

По мнению авторов, если снижение дебита скважины вызвано локальным повышением вязкости нефти и (или) незначительными отложениями смолисто-парафиновых нефтяных отложений на стенках скважины или на поверхностях горных пород, термообработка призабойной зоны скважины будет достаточно эффективной для повышения производительности из колодца [5].

Для нахождения температурного поля целесообразно использовать аналитические и численные методы исследования.

Температурное поле в скважине было построено на основе «в среднем точного» решения [6]. Это решение позволяет изучать проблемы подземной термодинамики, тепло- и массообмена. Предложенный модифицированный асимптотический метод гарантирует, что решение осредненной задачи для остаточного члена обращается в нуль.

В работе [7] рассматривается задача нестационарного теплообмена при отборе флюида из слоисто-неоднородного ортотропного пористого пласта. Пласт состоит из трех слоев, разделенных плоскими границами. Формулируется постановка задачи, и исследуются свойства решения. Задача нестационарного теплообмена в слоисто-неоднородном ортотропном пористом пласте описывается уравнениями теплопроводности в каждом слое, а также уравнением конвективной теплопроводности с источниками, которые обусловлены нестационарными полями давления в режиме упругого течения.

Аналитическое моделирование методом Пуанкаре ламинарной термогравитационной конвекции в вертикальном пористом цилиндре радиуса R и высоты H (R много меньше H) со слабосжимаемой жидкостью рассмотрено авторами [8]. Результатом исследований являются асимптотические представления полей температуры, скорости и концентрации в пористом слое в критериальном виде.

В статье [9] представлены результаты лабораторных и численных экспериментов по исследованию теплоотдачи в оболочковом пористом сетчатом материале. Расхождение между экспериментальными данными и расчетной зависимостью для внутренней теплоотдачи по объемной теплоотдаче при малых числах Рейнольдса объясняется влиянием теплопроводности охлаждающего газа на температурное поле.

Для расчета коэффициентов теплопроводности и температурных полей в структурированных системах предлагается новый численный метод в работе [10]. Он позволяет описывать процессы теплопроводности при деформации и преобразовании структуры системы. Расчеты производились для системы, состоящей из песка, воды и воздуха и для органоминеральной системы.

В работе [11] был проведен теоретический анализ конвективной неустойчивости, обусловленной выталкивающими силами при нестационарных температурных полях в кольцевой пористой среде, ограниченной коаксиальными вертикальными. Закон Дарси и приближение Буссинеска используются для объяснения характеристик движения жидкости, а теория линейной устойчивости используется для прогнозирования начала движения, обусловленного плавучестью. Уравнения устойчивости преобразуются в систему обыкновенных дифференциальных уравнений, используя метод спектрального разложения, и решаются аналитически и численно. Критическое число Дарси-Рэлея определяется как функция отношения радиусов. Критическое время начала движения становится меньше с увеличением числа Дарси-Рэлея и соответствует асимптотическому соотношению, полученному в бесконечном горизонтальном пористом слое.

Исследование течения свободной конвекции и теплопередачи неньютоновской жидкости с псевдопластичным поведением в цилиндрической вертикальной полости, частично заполненной слоем пористой среды рассматривается в работе [12]. Результаты, полученные в ходе численного решения уравнений методом конечных элементов, хорошо согласуются с литературными данными. При увеличении пористого слоя с 0,6 до 0,8 среднее число Нуссельта увеличилось с 0,15 до 0,25. Увеличение неньютоновских эффектов увеличивает скорость теплопередачи.

В статье [13] представлено аналитическое исследование двойной диффузионной естественной конвекции в цилиндрических пористых кольцах и прямоугольные пористые корпуса, которые обрабатываются унифицированным образом с использованием параметра кривизны, насыщаются бинарной жидкостью в предположении локальной тепловой неравновесности. Результаты модели получены при бесконечном значении отношения пористости и теплопроводности, как частный случай настоящей модели. Из проведенного исследования следует, что неглубокое пористое кольцевое пространство и высокий прямоугольный корпус лучше всего подходят для проектирования систем отвода и аккумулирования тепла соответственно.

В работе [14] исследовано основное стационарное выталкивающее течение в вертикальном кольцевом пористом канале, вызванное разницей температур на границе. Линейная динамика возмущенного потока формулируется как задача на собственные значения, решаемая численно. Показано, что система становится все более нестабильной по мере увеличения соотношения сторон, при этом критическое число Рэлея падает до нуля, когда соотношение сторон стремится к бесконечности.

Термогидравлическая аналитическая модель капиллярной цилиндрической тепловой трубы в стационарном режиме предложена в [15]. Представленная модель представляет собой обобщение аналитических моделей стандартной тепловой трубы в качестве инструмента проектирования или оптимизации.

Численное исследование достоверности модели локального теплового равновесия для свободной конвекции над горизонтальным цилиндром, помещенным в бесконечно уплотненный слой сферических частиц, насыщенных ньютоновской жидкостью, рассматривалось в работе [16].

В статье [17] представлено численное исследование естественной конвекции в пористом слое Недарси, окруженном двумя горизонтальными поверхностями, имеющими синусоидальные температурные профили с разницей в фазе и волновом числе.

Конвективный теплообмен от цилиндров, погруженных в пористую среду, важен для многих инженерных приложений. В работе [18] численно исследуется поле течения и теплообмен вокруг цилиндра, погруженного в слой однородной пористой среды. Для моделирования явлений переноса внутри пористого слоя используются усредненные по объему уравнения, а в прозрачной области применяются законы сохранения массы, импульса, энергии. Проведено комплексное параметрическое исследование и изучено влияние нескольких параметров, таких как толщина и проницаемость пористого слоя, а также числа Дарси и Рейнольдса, на поле течения и характеристики теплопередачи. Наконец, проводится процесс оптимизации, чтобы определить оптимальную толщину и пористость пористого слоя, что приводит к минимальной теплопередаче от цилиндра. Численные результаты показывают, что при наличии пористого слоя вокруг цилиндра длина следа увеличивается с уменьшением числа Дарси, а критический радиус изоляции увеличивается.

Материалы и методы (Materials and methods)

Ранее авторами были получены зависимости расстояния Δx , мм, при котором достигается заданная температура воздуха в реакторе при различных значениях массового расхода G , кг/с, линейной плотности теплового потока q_l , Вт/м, и теплоемкости смеси c_f Дж/(кг·°C) (1) и (2) [19]. Изначально в исследовании были приняты следующие значения: массового расхода $G = 0,00139$ кг/с, линейной плотности теплового потока $q_l = 1250$ Вт/м, и теплоемкости смеси $c_f = 736,2$ Дж/(кг·°C):

$$t(x, r) = t_0 + \frac{K}{4} \left[(r^2 - r_0^2) - 2 \frac{q_{l0} \cdot r_b^2 - q_{lb} \cdot r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{w} x \right], \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{G \cdot c_f}{q_l} (t_n - t_0). \quad (2)$$

В данной постановке нагрев внутренней поверхности происходит по всей внутренней границе скважины, на бесконечной длине. Соответственно, температура, в том числе на самой этой границе, растёт равномерно по всей длине и приращение температуры, как показано в (1), пропорционально длине участка. На практике нагрев может происходить лишь на конечном участке, и более реальной была бы, например, постановка, где нагрев (подача тепла с линейной плотностью теплового потока q_l) происходит лишь при $x > 0$. При этом температура около точки $x = 0$ будет меняться уже неравномерно. Следует

ожидать, что и в таком решении с ростом x характер распределения температур будет выравниваться и приближаться к рассмотренному в (1), и будет близок к нему уже на расстоянии нескольких толщин слоя $r_b - r_0$, по аналогии с принципом Сен-Венана в сопроамате и теории упругости, но как бы с некоторым небольшим сдвигом, как бы для немного другого значения t_0 . Поэтому формула (2) является верной и для такой постановки, но лишь при достаточно больших длинах участка.

В варианте постановки с теплоизолированной внешней границей имеется один существенный безразмерный параметр $\frac{r_b}{r_0}$. На первый взгляд кажется, что в рассматриваемой здесь постановке с оттоком теплоты через внешнюю границу должен добавиться ещё параметр, связанный с интенсивностью этого оттока, например, $\frac{q_{lb}}{q_{l0}}$. На самом деле это не совсем так, что нетрудно понять после следующего несложного рассуждения.

Пусть имеется решение для теплоизолированной внешней границы радиуса \bar{r}_b (3):

$$t(x, r) = t_0 + \frac{K}{4} \left[(r^2 - r_0^2) - 2 \frac{q_{l0} \cdot r_b^2 - q_{lb} \cdot r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{w} x \right], \quad (3)$$

Если рассмотреть концентрическую цилиндрическую поверхность некоторого радиуса r_b , внутри области $r_0 < r_b < \bar{r}_b$, то на ней будет $\frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r_b} < 0$ переток теплоты через эту поверхность. То есть её можно считать границей области $r_0 \leq r \leq r_b$, в которой эта же функция $t(x, r)$ даёт решение задачи с оттоком теплоты. Значит, одна и та же функция $t(x, r)$ даёт решения задач с разными значениями оттока $+q_{lb}$ теплоты через внешнюю границу $0 \leq q_{lb} < q_{l0}$, в зависимости от выбора радиуса r_b внешней границы. Остальные исходные данные в постановках, конечно, одинаковы, включая W , но не G .

Остаётся убедиться, что это соответствует построенным формулам решения, для чего найти конкретное выражение связи между \bar{r}_b , r_b и q_{lb} .

Следовательно, будем сначала рассматривать температурное поле в области с теплоизолированной внешней границей радиуса \bar{r}_b , которое согласно (3) после подстановки $q_{lb} = 0$, будет иметь вид:

$$t(x, r) = t_0 + \frac{K}{4} \left[(r^2 - r_0^2) - 2 \bar{r}_b^2 \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{w} x \right], \quad 0 \leq r \leq \bar{r}_b \quad (4)$$

$$K = \frac{q_{l0}}{\pi \lambda^* (\bar{r}_b^2 - r_0^2)}.$$

На цилиндрической поверхности какого-то меньшего радиуса r_b будет иметь место

ненулевая производная $\frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_b} = \frac{K}{2} (r_b - \frac{\bar{r}_b^2}{r_b})$, или после подстановки K получаем

$$2\pi r_b \lambda^* \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_b} = \frac{q_{l0}}{\bar{r}_b^2 - r_0^2} (r_b^2 - \bar{r}_b^2).$$

Учитывая, что линейная плотность q_{lb} теплового потока через эту поверхность радиуса r_b равна $q_{lb} = -2\pi r_b \lambda^* \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_b}$, получили искомую связь \bar{r}_b , r_b и q_{lb}

$$q_{lb} = q_{l0} \frac{\bar{r}_b^2 - r_b^2}{\bar{r}_b^2 - r_0^2}. \quad (5)$$

Теперь для записи решения задачи с заданной линейной плотностью q_{lb} оттока теплоты через внешнюю границу радиуса r_b можно использовать температурное поле (4), хотя оно было получено, казалось бы, для другой постановки, если туда подставить параметр \bar{r}_b , найденный из (5), (и, конечно, считать $0 \leq r \leq r_b$).

Разумеется, такую подстановку надо выполнить заранее. Для этого преобразуем (5):

$$1 - \frac{q_{lb}}{q_{l0}} = 1 - \frac{\bar{r}_b^2 - r_b^2}{\bar{r}_b^2 - r_0^2}, \text{ или } \frac{q_{l0} - q_{lb}}{q_{l0}} = \frac{r_b^2 - r_0^2}{\bar{r}_b^2 - r_0^2}, \text{ то есть}$$

$$\frac{q_{l0}}{\bar{r}_b^2 - r_0^2} = \frac{q_{l0} - q_{lb}}{r_b^2 - r_0^2}. \quad (6)$$

Выражение (6) можно подставить в K в (4), исключая \bar{r}_b . Остаётся заменить \bar{r}_b^2 перед \ln в квадратных скобках. Выразим \bar{r}_b^2 , например, из (6)

$$\bar{r}_b^2 = r_0^2 + q_{l0} \frac{r_b^2 - r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}}, \text{ или}$$

$$\bar{r}_b^2 = \frac{q_{l0} r_b^2 - q_{lb} r_0^2}{q_{l0} - q_{lb}}. \quad (7)$$

Убеждаемся, что эти подстановки, действительно, переводят (4) в (3) (с учётом изменения области $0 \leq r \leq r_b$).

После ввода безразмерных переменных

$$Z = \left(\frac{r}{r_0} \right)^2, \quad X = \frac{4a^* x}{wr_0 r_0}, \quad T = \frac{(t - t_0) \cdot \lambda^*}{q_{l0}},$$

$$B = \frac{q_{l0} \cdot r_b^2 - q_{lb} \cdot r_0^2}{(q_{l0} - q_{lb}) \cdot r_0^2} \quad (8)$$

в уравнение (3) получаем

$$\frac{(t(x, r) - t_0) \cdot \lambda^*}{q_{l0}} = \frac{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})}{4\pi q_{l0} \cdot (r_b^2 - r_0^2)} \left(\frac{r^2}{r_0^2} - 1 - 2 \frac{q_{l0} r_b^2 - q_{lb} r_0^2}{(q_{l0} - q_{lb}) \cdot r_0^2} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{4a^*}{wr_0^2} x \right)$$

с учётом

$$\frac{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})}{(r_b^2 - r_0^2) \cdot q_{l0}} = \frac{1}{\frac{r_b^2 \cdot q_{l0} - r_0^2 \cdot q_{l0} + r_0^2 \cdot q_{lb} - r_0^2 \cdot q_{lb}}{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})}} = \frac{1}{\frac{r_b^2 \cdot q_{l0} - r_0^2 \cdot q_{lb}}{r_0^2 \cdot (q_{l0} - q_{lb})} - 1}$$

переходит в

$$T(X, Z) = \frac{1}{4\pi(B-1)}(X + Z - 1 - B \ln Z), \quad 1 \leq Z \leq Z_b, \quad (9)$$

где $Z_b = \left(\frac{r_b}{r_0}\right)^2$.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Видно, что хотя в исходной постановке было 8 определяющих параметров $r_0, r_b, q_{10}, q_{1b}, \omega, \lambda^*, \rho_f, c_f$, в выражение (9) для безразмерной функции $T(X, Z)$, описывающей решение, входит лишь один безразмерный параметр B (критерий подобия). Но имеется и второй Z_b , который, однако, лишь ограничивает область определения этой функции. А критерий B здесь характеризует размер соответствующей данной функции области с теплоизолированной внешней границей, то есть с максимальным радиусом \bar{r}_b ,

поскольку согласно (7) $B = \left(\frac{\bar{r}_b}{r_0}\right)^2$.

На рисунках 1, 2 и 3 представлен примерный вид решения с различными переменными B .

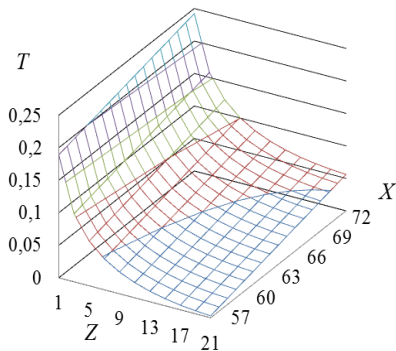


Рис. 1. Зависимость температуры T от безразмерного параметра X при критерии $B=25$ [составлено автором]

Fig. 1. Dependence of temperature T on the dimensionless parameter X with criterion $B=25$ [compiled by the author]

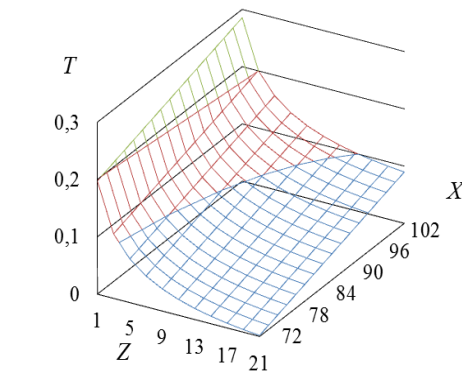


Рис. 2. Зависимость температуры T от безразмерного параметра X при критерии $B=30$ [составлено автором]

Fig. 2. Dependence of temperature T on the dimensionless parameter X with criterion $B=30$ [compiled by the author]

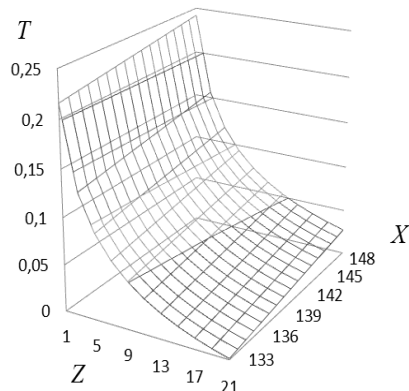


Рис. 3. Зависимость температуры T от безразмерного параметра X при критерии $B=50$ [составлено автором]

Fig. 3. Dependence of temperature T on the dimensionless parameter X with criterion $B=50$ [compiled by the author]

Заключение (Conclusion)

Исследования посвящены созданию математической модели расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве во внутрискважинном реакторе непрерывного разогрева призабойной зоны пласта, содержащий высоковязкую нефть и природный битум (ВВН и ПБ).

При 8 исходных параметрах $r_0, r_b, q_{l0}, q_{lb}, w, \lambda^*, \rho_f, c_f$ в первоначальной постановке после перехода к безразмерной форме решения в нём фигурирует один параметр B и ещё один Z_b задаёт область определения функции, описывающей решение.

При проведении расчетов температурное поле будет таким же, как для теплоизолированной внешней поверхности, только «обрезанным».

Математическая модель учитывает теплообмен между стенкой внутрискважинного реактора и окружающей средой. В статье представлено аналитическое решение дифференциального уравнения. Следовательно, полученную зависимость можно использовать для расчета геометрических размеров внутрискважинного реактора.

Литература

1. Крянев Д., Жданов С. Методы увеличения нефтеотдачи: опыт и перспективы применения // Нефтегазовая вертикаль. 2011. Т. 5.
2. Кубрак А.В. Водорезов Д.Д. Тепловые методы добычи высоковязкой нефти // Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции «Актуальные вопросы современных научных исследований»; 2022 г., Нефтекамск, Республика Башкортостан, Российская Федерация.
3. Рахматуллин И.Р. Распределение гидродинамических и тепловых полей в пористой среде при закачивании перегретого и влажного пара // Интервал. Передовые нефтегазовые технологии. 2008. № 1 (120). С. 52-56.
4. Мингазов А.Н., Миннуллин А.Г., Хисамутдинов Н.И., Шарифгалеев А.Р. Перспективы развития технологий разработки трудноизвлекаемых запасов нефти // Нефтепромысловое дело. 2023. № 5 (653). С. 38-43.
5. Косарева Е.А., Великанова Ю.В. Тепловая обработка призабойной зоны скважины // Ашировские чтения. 2021. Т. 1. № 1 (13). С. 216-222.
6. Филиппов А. И. и др. Анализ температурного поля цилиндрического потока на основе «в среднем точного» решения // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. № 3. С. 84-93.
7. Ахметова О. В. Нестационарное температурное поле в слоисто-неоднородной ортотропной пористой среде // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 3. С. 10-23.
8. Мирнов С. В. и др. Экспериментальное определение потерь давления и температурных полей на рабочем участке с шаровой засыпкой // Современные проблемы теплофизики и энергетики. 2020. С. 189-191.
9. Поляков А. Ф. и др. Теплоотдача в оболочках из пористых сетчатых материалов // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 46-52.
10. Бровка Г. П., Сычевский В. А. Расчет температурных полей и теплопроводности в структурированных системах // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 4. С. 607-613.
11. Kim M. C. et al. Onset of buoyancy-driven convection in a liquid-saturated cylindrical porous layer supported by a gas layer // Physics of Fluids. 2008. Т. 20. № 5.
12. Ayoubi Ayoubloo K. et al. Pseudoplastic natural convection flow and heat transfer in a cylindrical vertical cavity partially filled with a porous layer // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2020. Т. 30. № 3. С. 1096-1114.
13. Lakshmi K. M., Laroze D., Siddheshwar P. G. Natural convection of a binary liquid in cylindrical porous annuli/rectangular porous enclosures with cross-diffusion effects under local thermal non-equilibrium state // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Т. 184. С. 122-294.
14. Barletta A., Celli M., Rees D. A. S. Buoyant flow and instability in a vertical cylindrical porous slab with permeable boundaries // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Т. 157. С. 119-956.
15. Blet N., Maillet D. Analytical steady-state model based on Fourier integral transforms for cylindrical heat pipes under axisymmetric conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Т. 183. С. 122-117.

16. Keshavarzian B., Sayehvand H. O. Validation of the local thermal equilibrium assumption for free convection boundary layer flow over a horizontal cylinder embedded in an infinite saturated porous medium // *Results in Physics*. 2023. Т. 44. С. 106-112.

17. Alomar O. R. et al. A thermal nonequilibrium model to natural convection inside non Darcy porous layer surrounded by horizontal heated plates with periodic boundary temperatures // *Heat Transfer*. 2021. Т. 50. №. 6. С. 6068-6098.

18. Rashidi S. et al. Fluid flow and forced convection heat transfer around a solid cylinder wrapped with a porous ring // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Т. 63. С. 91-100.

19. Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25, № 6. С. 54-66. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66.

Авторы публикации

Якимов Николай Дмитриевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «КГЭУ», e-mail: nyakimov@inbox.ru

Шагеев Альберт Фаридович - старший преподаватель кафедры «Разработка и эксплуатация месторождений трудноизвлекаемых углеводородов» КФУ, Институт геологии и нефтегазовых технологий / Научный центр мирового уровня Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты (головной центр) / с.н.с. НИЛ методов увеличения нефтеотдачи, e-mail: shageevalbert@rambler.ru.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «КГЭУ», e-mail: jeremiada@gmail.com.

Мутугуллина Ирина Александровна – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «КГЭУ», 8-927-244-95-04, e-mail: vedgaeva@gmail.com.

References

1. Kryanev D., Zhdanov S. Methods of increasing oil recovery: experience and prospects of application // *The oil and gas vertical*. 2011. Vol. 5. (In Russ).

2. Kubrak A.V. Vodorezov D.D. Thermal methods of extraction of high-viscosity oil // *Materials of the International (correspondence) scientific and practical Conference "Topical issues of modern scientific research"*; 2022, Neftekamsk, Republic of Bashkortostan, Russian Federation. (In Russ).

3. Rakhmatullin I.R. Distribution of hydrodynamic and thermal fields in a porous medium during injection of superheated and wet steam // *The interval. Advanced oil and gas technologies*. 2008. No. 1 (120). pp. 52-56. (In Russ).

4. Mingazov A.N., Minnullin A.G., Khisamutdinov N.I., Sharifgaleev A.R. Prospects for the development of technologies for the development of hard-to-recover oil reserves // *Oilfield business*. 2023. No. 5 (653). pp. 38-43. (In Russ).

5. Kosareva E.A., Velikanova Yu.V. Heat treatment of the bottom-hole zone of the well // *Ashirov readings*. 2021. Vol. 1. No. 1 (13). pp. 216-222. (In Russ).

6. Filippov A. I. et al. Analysis of the temperature field of a cylindrical flow based on an "average accurate" solution // *Applied mechanics and technical physics*. 2010. Vol. 51. No. 3. pp. 84-93. (In Russ).

7. Akhmetova O. V. Unsteady temperature field in a layered inhomogeneous orthotropic porous medium // *Bulletin of the Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, and energy*. 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 10-23. (In Russ).

8. Mirnov S. V. et al. Experimental determination of pressure losses and temperature fields in a working area with a ball filling // *Modern problems of thermophysics and energy*. 2020. pp. 189-191. (In Russ).

9. Polyakov A. F. et al. Heat transfer in shells made of porous mesh materials // *Thermal power engineering*. 2009. No. 3. pp. 46-52. (In Russ).

10. Brovka G. P., Sychevsky V. A. Calculation of temperature fields and thermal conductivity in structured systems // *Engineering and Physics Journal*. 1999. Vol. 72. No. 4. pp. 607-613. (In Russ).
11. Kim M. C. et al. Onset of buoyancy-driven convection in a liquid-saturated cylindrical porous layer supported by a gas layer // *Physics of Fluids*. 2008. T. 20. № 5.
12. Ayoubi Ayoubloo K. et al. Pseudoplastic natural convection flow and heat transfer in a cylindrical vertical cavity partially filled with a porous layer // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2020. T. 30. № 3. C. 1096-1114.
13. Lakshmi K. M., Laroze D., Siddheshwar P. G. Natural convection of a binary liquid in cylindrical porous annuli/rectangular porous enclosures with cross-diffusion effects under local thermal non-equilibrium state // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. T. 184. C. 122-294.
14. Barletta A., Celli M., Rees D. A. S. Buoyant flow and instability in a vertical cylindrical porous slab with permeable boundaries // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. T. 157. C. 119-956.
15. Blet N., Maillet D. Analytical steady-state model based on Fourier integral transforms for cylindrical heat pipes under axisymmetric conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. T. 183. C. 122-117.
16. Keshavarzian B., Sayehvand H. O. Validation of the local thermal equilibrium assumption for free convection boundary layer flow over a horizontal cylinder embedded in an infinite saturated porous medium // *Results in Physics*. 2023. T. 44. C. 106-112.
17. Alomar O. R. et al. A thermal nonequilibrium model to natural convection inside non Darcy porous layer surrounded by horizontal heated plates with periodic boundary temperatures // *Heat Transfer*. 2021. T. 50. № 6. C. 6068-6098.
18. Rashidi S. et al. Fluid flow and forced convection heat transfer around a solid cylinder wrapped with a porous ring // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. T. 63. C. 91-100.
19. Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R. Features of calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating // *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2023. 25 (6): 54-66. (In Russ). DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66.

Authors of the publication

Nikolay D. Yakimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: nyakimov@inbox.ru

Albert F. Shageev – "Development and Exploitation of deposits of hard-to-recover hydrocarbons" of KFU, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies / World-class Scientific Center for Rational Development of liquid Hydrocarbon reserves of the planet NIL methods of increasing oil recovery _e-mail: shageevalbert@rambler.ru.

Andrey V. Dmitriev– Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: ieremiada@gmail.com.

Irina A. Mutugullina - Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: vedgaeva@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **01.04.2024 г.**

Отредактировано **18.04.2024 г.**

Принято **30.05.2024 г.**