

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-327-337

УДК 622.01

Решение задачи о распространении внутрипластового горения на основе эвристической гипотезы о температурном и концентрационном полях

К. В. Доброго¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В настоящее время увеличивается доля месторождений с вязкими и трудноизвлекаемыми нефтями. В связи с этим растет интерес к методам термохимического воздействия на нефтяные и угольные пласты. Примером является белорусско-российский проект «Виша-термогаз». Для управления термохимическими процессами внутри пласта необходимо использование моделей различного уровня – качественных аналитических, простых численных с «усредненными» параметрами, а также детальных многомерных расчетов. Ввиду специфических особенностей внутрипластовых процессов развитие новых упрощенных методов их анализа является актуальной задачей как с научной, так и практической точки зрения. В работе излагается решение задачи о распространении квазистационарной волны тепловыделения в пласте на основе эвристических гипотез. В основе решения лежит предположение о связи профилей температуры T и концентрации недостающего компонента y : $\exp(-E/T) = \exp(-E/T_{\max})(1 - y)$. Другой гипотезой является предположение о том, что максимальный градиент профиля концентрации недостающего компонента реализуется при некотором фиксированном значении его концентрации. Математически это соответствует уравнению $y''(y = y^*) = 0$. Выводятся простые формулы для определения концентрационного температурного профиля, а также скорости распространения температурного фронта для двух случаев – недостатка окислителя и недостатка горючего компонента. Указаны основные функциональные зависимости скорости фронта от параметров задачи. Сравнение полученного данным способом профиля с профилем, рассчитанным численно, показывает адекватность самого метода и принятых гипотез. Данный метод может применяться для оперативной оценки и параметрического исследования профилей и скорости движения фронта. Он также может быть использован для сходных задач химической технологии и теплотехники.

Ключевые слова: фильтрационное горение, внутрипластовое горение, однотемпературное приближение, эвристический метод

Для цитирования: Доброго, К. В. Решение задачи о распространении внутрипластового горения на основе эвристической гипотезы о температурном и концентрационном полях / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 4. С. 327–337

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Solution of the Problem of Oil-Pool In-Situ Combustion Front Propagation on the Basis of Heuristic Hypothesis Regarding Temperature and Concentration Profiles

K. V. Dobrego¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. At present the number of oil deposits with viscous and stranded oil is steadily growing. Due to the mentioned circumstance there is growing interest in methods of thermochemical treatment of an oil and coal-beds. This interest is reflected, e.g., in the “Visha-Thermogaz” Belarusian-Russian joint project. In order to provide control over the in-situ thermochemical processes it is necessary to use models of different levels, i.e. qualitative analysis, simplified numerical simulation with “averaged” parameters, as well as detailed 2D and 3D modeling. Due to variety of specific parameters and conditions of in-situ processes, design of new simplified methods of analysis is a topical objective both for research and practical activity. Therefore, a new method of solution of the problem of in-situ combustion front propagation based on heuristic hypothesis is discussed in the present article. The designed method is based on heuristic assumption of functional relationship between the profiles of temperature T and deficit component concentration y : $\exp(-E/T) = \exp(-E/T_{\max})(1 - y)$. Another hypothesis is the assumption that the maximum gradient of the concentration profile of the missing component is implemented with a fixed value of concentration that is expressed as $y''(y = y^*) = 0$. Simple algebraic and differential equations for determination of the temperature and concentration profiles as well as for the front propagation velocity are derived for two cases i.e. the lack of oxidizer and the fuel component fault. Principal functional dependencies of the front velocity are revealed. Comparison of the profiles obtained with the use of the described method with the one obtained numerically proves the adequacy of the method itself and the hypotheses adopted. The method can be used for rapid assessment and parametric studies of the profiles and the speed of the front. It can also be used for analysis of similar problems of chemical and heat engineering.

Keywords: filtration combustion, in-situ combustion, one-temperature approximation, heuristic method

For citation: Dobrego K. V. (2016) Solution of the Problem of Oil-Pool In-Situ Combustion Front Propagation on the Basis of Heuristic Hypothesis Regarding Temperature and Concentration Profiles. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 327–337 (in Russian)

Имея почти вековую историю, методы термохимического воздействия на нефтяные и угольные пласты (подземная газификация, внутрипластовое горение, термогазовый метод и т. п.) не являются массовыми технологиями добычи нефти и газа [1–4]. В первую очередь это связано с достаточным количеством «простых» для добычи месторождений, а также со значительными трудностями моделирования и управления внутрипластовыми термохимическими процессами [5–7]. В настоящее время наблюдается тенденция сокращения «простых» для добычи месторождений. Например, в Краснодарском крае России доля трудноизвлекаемых запасов в 2011 г. оценивалась в 13 %. Одновременно повышаются возможности вычислительного моделирования сложных гетерогенных систем. Обе эти тенденции ведут к возрастанию интереса и актуальности методов термохимического воздействия на пласт для повышения нефтеотдачи.

Анализ работ в данной области показывает, что для управления термохимическими процессами внутри пласта необходимо использование моделей различного уровня – качественных аналитических, простых численных с «усредненными» параметрами, а также детальных многомерных расчетов [8, 9]. Таким образом, развитие новых упрощенных методов анализа, чему, собственно, и посвящена данная статья, является актуальным как с научной, так и практической точки зрения.

Задача о фильтрационном горении (ФГ) нефти внутри пласта близка к известным в литературе задачам о фильтрационном горении газов и фильтрационном горении бедных угольных слоев [10–13]. При этом имеются и существенные различия в физической постановке данной задачи. Газовое дутье осуществляется под давлением, достигающим нескольких сотен атмосфер, в связи с чем плотность дутья приближается к плотности нефти, а скорость фильтрации мала. Вытеснение нефти происходит одновременно с диффузией дутья в нефти, интенсивной вследствие высоких температуры и давления (возможно сверхкритическое состояние дутья) и дисперсионного механизма перешивания. Температура химического реагирования существенно ниже температуры горения при обычных условиях. Отсутствует взрывной характер зажигания (малый параметр теории Франк-Каменецкого относительно велик). Задача существенно однотемпературная, поскольку температуры газовой, жидкой и твердой подсистем практически не различаются. Имеет место специфический химизм системы, в частности объемные реакции между растворенным кислородом и нефтью. В системе могут присутствовать две топливные (горючие) подсистемы – подвижная нефть и неподвижная относительно пористой матрицы нефтяная пленка (углеводородный сорбат, кероген). Процесс горения не повышает существенно плотность продуктов, как в случае атмосферного горения. Продукты сгорания при высоком давлении могут быть в виде растворенных газов или флюидов, а не в газообразном состоянии.

Известно, что анализ задач о ФГ газов может быть проведен в двухтемпературном приближении при относительно большом числе упрощающих предположений. Это предположения о моментальном протекании реакции, малой скорости тепловой волны по сравнению со скоростью фильтрации, пренебрежении диффузией недостающего реагента и др. Исходя из перечисленных выше особенностей задачи о горении в нефтяном пласте, можно считать, что для данной задачи адекватным является однотемпературное приближение, в то время как приближение мгновенной реакции и малого коэффициента диффузии подвижного компонента – неприменимо. Вследствие этого невозможно воспользоваться аналитическими решениями и результатами, известными для задач ФГ газов.

Распространенным подходом для решения задачи ФГ газов, формулируемым через уравнения теплопроводности газа, каркаса и уравнение диффузии для недостающего топливного компонента, являются нахождение решения слева и справа от узкой зоны химического реагирования и последующее определение свободных параметров с помощью условий сшивки

[7, 11, 14]. Для решения системы уравнений необходимо понизить порядок характеристического уравнения, по крайней мере, до третьего. Вследствие этого ограничения, в частности, приходится пренебрегать диффузией топливного компонента и предполагать бесконечно быстрое протекание реакции. Однако в случае рассматриваемой задачи такие упрощения неправомерны, и поэтому требуется применение нестандартных, эвристических методов ее решения. Такие методы были использованы при решении задачи об иницировании очага в нефтенасыщенном пласте [14] и скорости волны ФГ газов [7, 14]. Суть подхода заключается в применении гипотезы тождества, связывающей температуру в волне ФГ с концентрацией топливного компонента, для понижения порядка и уменьшения числа неизвестных при интегрировании соответствующих дифференциальных уравнений. Данный метод дал неплохой результат для определения температуры и профиля стационарной волны ФГ газа.

В настоящей статье исследуется возможность использования подобного эвристического метода для решения задачи внутрислоевого горения нефти. Выведены простые формулы для определения концентрационного температурного профиля, а также скорости распространения температурного фронта. Рассмотрены два случая – недостаток окислителя и недостаток жидкого горючего компонента.

Постановка задачи и решение

Система уравнений задачи о фильтрационном горении состоит из уравнений баланса энергии для твердой фазы и флюида, уравнения баланса массы для недостающего компонента и уравнения неразрывности флюида:

$$(cp)_f \frac{\partial T}{\partial t} + (cp)_f u_f \frac{\partial T}{\partial x} = \Lambda_f \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + QW(y, T); \quad (1)$$

$$(cp)_s \frac{\partial T}{\partial t} = \Lambda_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} + u_f \frac{\partial y}{\partial x} = D \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - W(y, T); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u_f) = 0. \quad (4)$$

Здесь T – температура; y – концентрация окислителя; Λ_f – эффективный коэффициент теплопроводности двухкомпонентной среды нефть – газ, учитывающий дисперсию; Λ_s – то же пористой среды; u_f – скорость движения флюида в области контакта и смешения газа и нефти; y – концентрация окислителя в трехфазной системе; Q – тепловой эффект реакции окисления нефти; W – скорость реакции окисления нефти, теплоемкости твердой

фазы $(c\rho)_s$ и флюида $(c\rho)_f$, относятся к единице объема системы. Скорость реакции в режиме недостатка окислителя представляется функцией Аррениуса: $W(y, T) = zy \exp(-E/T)$. Здесь размерность энергии активации приведена к градусам делением на универсальную газовую постоянную.

Сложение двух первых уравнений приводит к выражению

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + (c\rho)_f u_f \frac{\partial T}{\partial x} = \Lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + QW(y, T). \quad (5)$$

Здесь и далее используем обозначения: $(c\rho)_f + (c\rho)_s = c\rho$; $\Lambda_f + \Lambda_s = \Lambda$.

Предположим, что во фронте волны окисления с достаточно высокой точностью выполняется равенство

$$\exp(-E/T) = \exp(-E/T_{\max})(1 - y). \quad (6)$$

Обоснованием данной гипотезы является ее адекватность стационарной задаче о фильтрационном горении [16]. Из (6) следуют тождества:

$$T = \frac{E}{E/T_{\max} - \ln(1 - y)}; \quad \frac{dT}{dy} = -\frac{T^2}{(1 - y)E}; \quad \frac{d^2T}{dy^2} = -\frac{T^2}{(1 - y)^2 E} \left(1 - \frac{2T}{E}\right). \quad (7)$$

Ввиду «некорректного» поведения равенств (6) и (7) при $y = 1$, область определения y должна быть сужена $y \in [y^*, 0]$, где $y^* < 1$; $E/T_0 = E/T_{\max} - \ln(1 - y^*)$; T_0 – начальная температура пласта.

Исключая из (3) и (5) скорость химической реакции, получим уравнение

$$\frac{c\rho}{Q} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{(c\rho)_f u_f}{Q} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + u_f \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\Lambda}{Q} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}. \quad (8)$$

В равномерно движущейся со скоростью волны горения u_w системе координат справедливо преобразование $\partial/\partial t = -u_w \partial/\partial x$, и уравнение (8) можно записать в виде

$$AT' + By' = CT'' + Dy'', \quad (9)$$

где введены обозначения: $A = \frac{u_f (c\rho)_f - u_w c\rho}{Q}$; $B = u_f - u_w$; $C = \Lambda/Q$.

Штрихом в (9) обозначена производная по координате $\partial T/\partial x = T'$. Интегрирование от $-\infty$ до x с учетом граничных условий $T(-\infty) = T_0$; $y(-\infty) = y^*$ позволяет избавиться от второй производной

$$A(T - T_0) - B(y^* - y) = CT' + Dy'. \quad (10)$$

Учитывая, что $T' = \frac{dT}{dx} = \frac{dT}{dy} \frac{dy}{dx}$ и используя равенства (7), перепишем (10) в виде

$$A(T - T_0) - B(y^* - y) = \left[D - \frac{CT^2}{E(1-y)} \right] y'. \quad (11)$$

Отсюда следует решение для концентрации окислителя

$$x = - \int_{y(x)}^{1-\delta} \left[\frac{D - \frac{CT^2}{E(1-y)}}{A(T - T_0) - B(y^* - y)} \right] dy, \quad (12)$$

где $T = \frac{E}{E/T_{\max} - \ln(1-y)}$ и установлено граничное условие $y(0) = 1 - \delta$, обеспечивающее корректность интегрирования на нижнем пределе.

Уравнения (11) и (12) могут быть легко решены любым математическим солвером. Решение для $y(x)$ автоматически определяет также и $T(x)$ согласно (7). Очевидно, что решение будет зависеть от скорости распространения фронта u_w , играющего роль параметра в (11), (12).

Для определения u_w примем гипотезу о том, что максимальный градиент профиля концентрации недостающего компонента реализуется при некотором фиксированном значении его концентрации, например $y = 0,5$, что математически соответствует уравнению

$$y''(y = 0,5) = 0. \quad (13)$$

Учитывая два последних тождества (7), а также и равенства

$$T' = \frac{dT}{dx} = \frac{dT}{dy} \frac{dy}{dx} \text{ и } T'' = \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{d^2T}{dy^2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 + \frac{dT}{dy} \frac{d^2y}{dx^2},$$

перепишем уравнение (9) в виде

$$\left(B - \frac{AT^2}{(1-y)E} \right) y' = - \frac{CT^2}{(1-y)^2 E} \left[1 - \frac{2T}{E} \right] y'^2 - \left[\frac{CT^2}{(1-y)E} - D \right] y''. \quad (14)$$

С учетом гипотезы (13) из (14) следует

$$y' = - \left(B - \frac{2AT^{*2}}{E} \right) \frac{E}{4CT^{*2}} \sqrt{\left[1 - \frac{2T}{E} \right]}, \quad (15)$$

где $T^* = E/(E/T_{\max} - \ln 0,5)$.

Приравнивая значения производной (15) и (11), получаем

$$2A(T^* - T_0) - B = \left(\frac{2AT^{*2}}{E} - B \right) \left(\frac{ED}{2CT^{*2}} - 1 \right) \left[1 - \frac{2T}{E} \right]. \quad (16)$$

Уравнение (16) может быть однозначно алгебраически разрешено относительно u_w в достаточно громоздком виде. Для упрощения конечного выражения можем принять: $u_f(c\rho)_f \ll u_w c\rho$; $T \ll E$. Тогда

$$u_w \cong u_f \frac{2 - \frac{ED}{2CT^{*2}}}{2 - \frac{ED}{2CT^{*2}} + \frac{2c\rho(T^* - T_0)}{Q}}. \quad (17)$$

Случай недостатка горючего компонента

В рассмотренной выше постановке задачи, когда окислитель является недостающим компонентом, выраженный фронт реакции образуется при условии резкой температурной активации реакции, а квазистационарное распространение фронта возможно в узком диапазоне параметров системы.

В случае отсутствия выраженной активации реакции (низкая энергия активации E) более адекватна постановка задачи с недостатком горючего компонента. Переформулируем задачу, заменив неизвестный параметр u на параметр b – безразмерную концентрацию нефти в пласте. Уравнение (3) запишется в виде

$$\frac{\partial b}{\partial t} + u_f \frac{\partial b}{\partial x} = D_{oil} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - W(b, T). \quad (18)$$

Эвристические тождества (6), (7) примут вид:

$$T = \frac{E}{E/T_{\max} - \ln b}; \quad \frac{dT}{db} = -\frac{T^2}{bE}; \quad \frac{d^2T}{db^2} = -\frac{T^2}{b^2E} \left(1 - \frac{2T}{E} \right), \quad (19)$$

где $b \in [\delta, 1]$; δ – малая величина, соответствующая начальной температуре пласта $E/T_0 = E/T_{\max} - \ln \delta$.

Пользуясь тождествами (19), по аналогии с выкладками (8)–(17) получим выражения для профиля концентрации горючего компонента (22) и скорости распространения фронта тепловыделения (25):

$$A(T - T_0) + B(b - \delta) = CT' + Db' = \left[\frac{CT^2}{Eb} + D \right] b'; \quad (20)$$

$$x = \int_{\delta}^{b(x)} \left[\frac{D + \frac{CT^2}{Eb}}{A(T - T_0) + B(b - \delta)} \right] db; \quad (21)$$

$$\left(\frac{AT^2}{bE} + B \right) b' = -\frac{CT^2}{b^2E} \left(1 - \frac{2T}{E} \right) b'^2 + \left[\frac{CT^2}{bE} + D \right] b''. \quad (22)$$

С учетом гипотезы $b''(b = 0,5) = 0$

$$b' = - \left(\frac{2AT^{*2}}{E} + B \right) \frac{E}{4CT^{*2}} / \left(1 - \frac{2T^*}{E} \right). \quad (23)$$

Приравнивая производные из (21) и (23), получаем

$$(2A(T^* - T_0) + B) \left(1 - \frac{2T^*}{E} \right) = - \left[\frac{DE}{2CT^{*2}} + 1 \right] \left[\frac{2AT^{*2}}{E} + B \right]. \quad (24)$$

Принимая $u_f(c\rho)_f \ll u_w c\rho$; $T \ll E$ и учитывая соответственно определения A и B , получим

$$u_w \cong u_f \frac{2 + \frac{ED}{2CT^{*2}}}{2 + \frac{ED}{2CT^{*2}} + \frac{2c\rho(T^* - T_0)}{Q}}. \quad (25)$$

Приняв стандартные значения задачи (табл. 1), получим скорость распространения фронта $u_w = 0,025$ мм/с.

Таблица 1

Характерные значения параметров задачи
Typical values of the parameters of the problem

Параметр	Размерность	Значение	Параметр	Размерность	Значение
$(c\rho)_f$	Дж/(К·м ³)	100	T_0	К	335
$(c\rho)_s$	Дж/(К·м ³)	3000	T_{\max}	К	800
u_f	м/с	10^3	E	К	8840
Λ_f	Вт/(м·К)	0,12	D	м ² /с	10^{-7}
Λ_s	Вт/(м·К)	0,8	Q	Дж/м ³	10^4

Воспользовавшись (12), рассчитаем профиль безразмерной концентрации окислителя (рис. 1). Из рис. 1 видно, что профиль концентрации в целом адекватен задаче внутрислового горения.

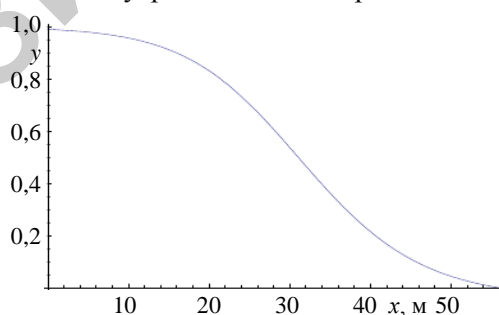


Рис. 1. Профиль безразмерной концентрации окислителя при стандартных значениях параметров задачи

Fig. 1. The profile of the dimensionless concentration of oxidant at standard values of parameters of the problem

Уравнения для скорости волны (17) и (25) позволяют получить информацию о закономерностях задачи. Так, из формул следует, что скорость волны внутрислового горения прямо пропорциональна скорости филь-

трации дутья. Расчет показывает, что скорость волны слабо зависит от теплопроводности пласта. Зависимость скорости фронта от коэффициента диффузии близка к линейной (рис. 2).

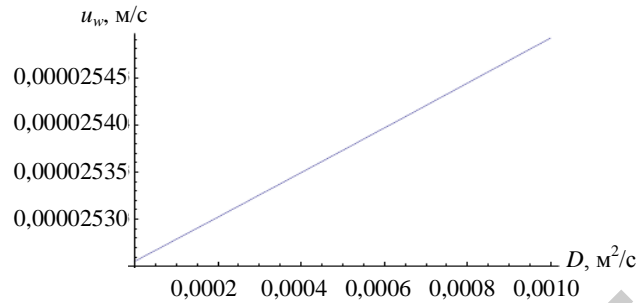


Рис. 2. Зависимость скорости фронта внутрипластового горения от коэффициента диффузии согласно (17); стандартные значения параметров

Fig. 2. The dependence of the front velocity of in-situ combustion on the diffusion coefficient according to (17); standard parameter values

Скорость волны существенно зависит от максимальной температуры (рис. 3).

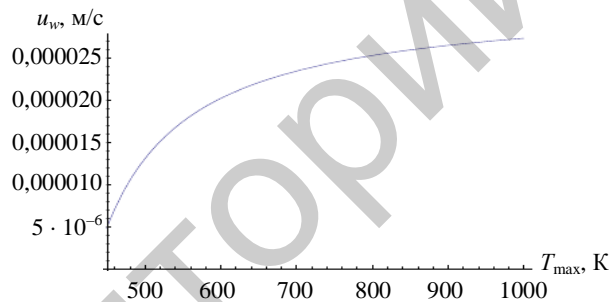


Рис. 3. Зависимость скорости фронта внутрипластового горения от максимальной температуры фронта согласно (17); стандартные значения параметров

Fig. 3. The dependence of the front velocity of in-situ combustion on the maximum temperature of the front according to (17); standard parameter values

Расчет показывает, что скорость волны немонотонно и незначительно зависит от значения энергии активации реакции (рис. 4).

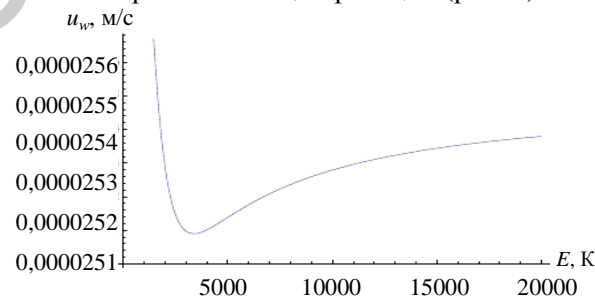


Рис. 4. Зависимость скорости фронта внутрипластового горения от значения энергии активации реакции согласно (17); стандартные значения параметров

Fig. 4. The dependence of the front velocity of in-situ combustion on the values of the activation energy of the reaction according to (17); standard parameter values

ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод анализа задачи фильтрационного горения в нефтесодержащем пласте, использующий эвристические гипотезы о характере тепловых и концентрационных полей. Данный подход обеспечивает оперативную оценку профилей и скорости движения фронта в тех случаях, когда стандартные методы анализа задач фильтрационного горения не могут быть применены.

2. Качественный анализ получаемых профилей и зависимостей показывает адекватность самого метода и принятых эвристических гипотез. Однако необходимы детальная верификация результатов на основе точных численных решений задачи и уточнение моделей. Помимо академического интереса, данный подход может найти применение при составлении алгоритмов управления процессом интенсификации нефтедобычи наряду с «медленным» детальным расчетом тепловых и температурных полей в пласте.

3. Дальнейшим развитием исследований могут стать уточнение рабочих формул на основе сравнения с численными расчетами задачи и определение зависимостей основных параметров распространения фронта от разнообразных характеристик системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейнман, А. Б. Подземная газификация нефтяных пластов и термический способ добычи нефти / А. Б. Шейнман, К. К. Дубровой. М.: ОНТИ, 1934. 95 с.
2. Рубинштейн, Л. И. Температурные поля в нефтяных пластах / Л. И. Рубинштейн. М.: Недра, 1972. 387 с.
3. Чарный, И. А. Подземная гидрогазодинамика / И. А. Чарный. М.: Гостоптехиздат, 1963. 397 с.
4. Боксерман, А. А. Термогазовый метод увеличения нефтеотдачи / А. А. Боксерман // Георесурсы. 2007. Т. 22, № 3. С. 18–20.
5. Нефтегазовая энциклопедия: в 3 т. / под ред. Ю. В. Вадецкого. М.: Московское отд-ние «Нефть и газ», 2004. Т. 3. 308 с.
6. Богданов, И. И. Численное исследование начального этапа и развитых режимов внутрислоевого горения / И. И. Богданов, Л. А. Чудов. М.: Изд-во Лтд. ИПМ, 1983. 74 с. (Препринт / ИПМ АН СССР; № 227).
7. Доброго, К. В. Физика фильтрационного горения газов / К. В. Доброго, С. А. Жданок. Минск: Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, 2002. 204 с.
8. Совершенствование виртуальной залежи / Д. О. Афилака [и др.] // Нефтегазовое обозрение. 2002. Т. 7, № 1. С. 58–79.
9. Моделирование коллектора при растущей сложности геологических условий / Д. А. Эдвардс [и др.] // Нефтегазовое обозрение. Зима 2011–2012. Т. 23, № 4. С. 4–21.
10. Babkin, V. S. Filtration Combustion of Gases. Present State of Affairs and Prospects / V. S. Babkin // Pure and Applied Chem. 1993. Vol. 65, No 2. P. 335–344.
11. Babkin, V. S. Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media / V. S. Babkin, A. A. Korzhavin, V. A. Bunev // Combustion and Flame. 1991. Vol. 87, No 2. P. 182–190.
12. Доброго, К. В. Режимы газификации бедных угольных слоев / К. В. Доброго, И. А. Козначеев // ИФЖ. 2006. Т. 79, № 2. С. 56–61.
13. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. М.: Наука, 1980. 478 с.
14. Bubnovich, V. I. Analytical Study of the Combustion Waves Propagation under Filtration of Methane-Air Mixture in a Packed Bed / V. I. Bubnovich, S. A. Zhdanok, K. V. Dobrego // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49, No 15–16. P. 2578–2586.

15. Козначеев, И. А. К вопросу об инициировании очага горения в нефтенасыщенном пласте / И. А. Козначеев, К. В. Доброго // ИФЖ. 2013. Т. 86, № 6. С. 1301–1309.
16. Футько, С. И. Приближенное аналитическое решение задачи распространения фильтрационной волны горения в пористой среде / С. И. Футько, С. И. Шабуня, С. А. Жданок // ИФЖ. 1998. Т. 71, № 1. С. 41–45.

Поступила 22.02.2016 Подписана в печать 25.04.2016 Опубликовано онлайн 03.08.2016

REFERENCES

1. Sheinman A. B., Dubrovai K. K. (1934) *Underground Gasification of Oil Formations and the Thermal Method of Oil Production*. Moscow, Department of Scientific and Technical Information. 95 (in Russian).
2. Rubinshtein L. I. (1972) *Temperature Fields in Oil Strata*. Moscow: Nedra. 387 (in Russian)
3. Charniy I. A. (1963) *Underground Fluid Dynamics Gas Dynamics*. Moscow, Gostoptehizdat Publ. 397 (in Russian).
4. Bokserman A. A. (2007) Thermo-Gas Method of Enhancement of Oil Recovery. *Georesursy* [Georesources], 22 (3), 18–20 (in Russian).
5. Vadetskiy Yu.V. ed. (2004) *Oil and Gas Encyclopedia*. Vol. 3. Moscow, "Oil and Gas" Moscow Branch, 308 (in Russian).
6. Bogdanov I. I., Chudov L. A. (1983) *Numerical Study of the Initial Stage and Developed Modes of Combustion Inside a Seam*. Moscow: IPM Publ. Ltd. 74 (in Russian).
7. Dobrego K. V., Zhdanok S. A. (2002) *Physics of Filtration Combustion of Gases*. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus. 204 (in Russian).
8. Afilaka D. O., Bakhamaish Dzh., Bauen G., Bratved K., Kholms Dzh. A., Miller T., F'erstad P., Grainstaf Dzh., Dzhalali Iu., Lukas Ch., Khimenes Z., Lolomeri T., Mei E., Rendal E. (2002) Improving the Virtual Deposit. *Neftegazovoye Obozreniye* [Oil and Gas Review], 7 (1), 58–79 (in Russian).
9. Edwards D. A., Gunasekera D., Morris Dzh., Shou G., Shou K., Uolsh D., F'erstad P. A., Kikani Dzh., Franko Dzh., Khoang V., Ket'e L. (Winter 2011–2012) Reservoir Simulation under Geological Conditions of Growing Complexity. *Neftegazovoye Obozreniye* [Oil and Gas Review], 23 (4), 4–21 (in Russian).
10. Babkin V. S. (1993) Filtration Combustion of Gases. Present State of Affairs and Prospects. *Pure and Applied Chem.*, 65 (2), 335–344. DOI: 10.1351/pac199365020335.
11. Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A. (1991) Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media. *Combustion and Flame*, 87 (2), 182–190. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90168-B.
12. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2006) Regimes of Gasification of Lean Coal Layers. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 79 (2), 261–267. DOI: 10.1007/s10891-006-0095-0.
13. Zeldovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. (1980) *The Mathematical Theory of Combustion and Explosion*. Moscow, Nauka. 478 (in Russian).
14. Bubnovich V. I., Zhdanok S. A., Dobrego K. V. (2006) Analytical Study of the Combustion Waves Propagation under Filtration of Methane-Air Mixture in a Packed Bed. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (15–16), 2578–2586. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.019.
15. Koznacheev I. A., Dobrego K. V. (2013) A Contribution to the Problem of Initiation of a Combustion Source in an Oil-Saturated Bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (6), 1385–1394. DOI: 10.1007/s10891-013-0964-2.
16. Futko S. I., Shabunia S. I., Zhdanok S. A. (1998) Approximate Analytical Solution of the Problem of Propagation of Filtration Combustion Waves in Porous Media. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 71 (1), 41–45 (in Russian).

Received: 22.02.2016

Accepted: 25.04.2016

Published online: 03.08.2016