

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-445-458>

УДК 622.276.654

Взаимная динамика фронтов тепловыделения и вытеснения при внутрислоевом горении нефти. Одномерное моделирование

И. А. Козначеев¹⁾, К. В. Доброго²⁾

¹⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Численно решена одномерная осесимметричная и плоская задача о распространении фронтов горения и вытеснения нефти в нефтенасыщенном пласте. Рассматривались две горючие компоненты – подвижная (нефть) и неподвижная (кероген, нефтяной абсорбат). Проанализировано влияние расхода дутья, вязкости жидкой компоненты, концентрации кислорода в дутье и величины тепловых потерь (толщина нефтесодержащего пласта) на динамику фронтов тепловыделения и вытеснения нефти. В цилиндрической системе с течением времени уменьшается поток окислителя и происходит смещение максимума температуры от фронта горения твердой компоненты к фронту вытеснения («прыжок» фронта горения). Время наступления «прыжка» в зависимости от параметров может варьироваться от нескольких десятков до нескольких сотен суток, а расстояние, на которое осуществляется «прыжок», может достигать порядка 10 м. После «прыжка» скорость горения и температура продолжают падать и через промежуток времени, соизмеримый с временем, прошедшим до «прыжка», химическая реакция практически прекращается. При этом переход горения на жидкую фазу после «прыжка» заметно не сказывается на скорости фронта ее вытеснения. Время наступления «прыжка», а также скорость взаимного удаления фронтов горения (максимальной температуры) и вытеснения нефти приблизительно линейно зависят от расхода дутья и нелинейно – от вязкости нефти. При малой вязкости фронт вытеснения быстро отдалится от фронта горения, момент «прыжка» фронта задерживается, расстояние между фронтами на момент «прыжка» достигает значений в 10 м и более. Концентрация кислорода в дутье существенно влияет на взаимное движение фронтов горения и вытеснения, поскольку динамика фронта вытеснения от нее не зависит, а скорость фронта горения пропорциональна концентрации кислорода. Повышение содержания кислорода в дутье сразу после «прыжка» позволяет локализовать область максимального тепловыделения (горения) вблизи фронта вытеснения нефти. Данная манипуляция может быть использована для управления устойчивостью фронта вытеснения, однако для ее практической реализации необходимо иметь информацию о концентрационных и температурных полях внутри пласта, которую можно почерпнуть лишь из косвенных измерений и моделирования. Результаты исследований могут быть применены при разработке проектов нефтедобычи с использованием внутрислоевого горения.

Ключевые слова: горение, фильтрация, внутрислоевое горение, нефтедобыча, численное моделирование

Для цитирования: Козначеев, И. А. Взаимная динамика фронтов тепловыделения и вытеснения при внутрислоевом горении нефти. Одномерное моделирование / И. А. Козначеев, К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 5. С. 445–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-445-458>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Mutual Dynamics of Heat Dissipation and Oil Displacement Fronts during In-Situ Oil Combustion. One-Dimensional Simulation

I. A. Koznacheev¹⁾, K. V. Dobrego²⁾

¹⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. One-dimensional axis-symmetrical and plane-symmetrical problem of propagation of the combustion and displacement fronts in oil-containing layer in situ has been considered numerically. Two combustible components, viz. liquid (oil) and solid (kerogen, oil sorbate), were considered. The influence of the blast rate, liquid component viscosity, oxygen concentration in blasted air and heat losses (the width of the oil-containing layer) on the dynamics of the heat dissipation and displacement fronts is investigated. In the cylindrical system the oxidizer flow to the combustion front is reducing over time; and the shift-down of the maximum temperature from the solid combustion front to the oil displacement front takes place (the combustion front “jump”). The time of the “jump” may vary from tenths to hundreds of days and the distance of the shift, – up to 10 or more meters, depending on the parameters of the system. After the “jump”, the combustion rate and maximum temperature continue to deteriorate and after the period of time close to the time lapse before the “jump” the chemical reaction ceases. Herewith the transition of combustion to the liquid phase after the “jump” doesn’t influence notably on oils displacement front speed. The time of the “jump”, as well as the velocity of the mutual combustion (maximum temperature) front and displacement front removal nearly linearly depends on incoming gas blast rate and non-linearly – on oil viscosity. When viscosity is low, the displacement front rapidly runs away from the combustion front, time of the “jump” retards and the distance between the fronts at the instance of the “jump” may reach 10 m or more. The oxygen concentration in the gas being blasted influences significantly on the mutual dynamics of the combustion and displacement fronts since combustion front velocity is proportional to oxygen concentration and displacement front velocity is independent on it. Oxygen enrichment of the gas being blasted just after the “jump” may help localize the area of heat release (combustion) near the oil displacement front. The mentioned manipulation may be utilized for sustainability control of the displacement front. However for its practical implementation it is necessary to have information on concentration and temperature fields inside the layer, which may be obtained from indirect data and via modeling. The results of investigation may be utilized for development of technical projects of oil recovery via in-situ combustion.

Keywords: combustion, filtration, in-situ combustion, oil production, numerical simulation

For citation: Koznacheev I. A., Dobrego K. V. (2019) Mutual Dynamics of Heat Dissipation and Oil Displacement Fronts during In-Situ Oil Combustion. One-Dimensional Simulation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (5) 445–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-445-458> (in Russian)

Введение

Управляемое внутрислоевое горение как метод повышения нефтеотдачи пластов впервые применено в Советском Союзе на Нефтяно-Ширванском месторождении под руководством А. Б. Шейнмана и К. К. Дуброва в 1934 г. [1]. Суть метода состоит в нагнетании кислородосодержащих газов в пласт, иницировании и поддержании экзотермических окислительных процессов внутри пласта, прогреве пласта и вытеснении нефти нагнетаемым газом и продуктами реакций. Разделяют термогазовый метод (ТГМ) повышения нефтеотдачи пласта [2] (введен ВНИИНефть в 1971 г.) и метод внутрислоевого горения. Под первым, как правило, понимается более комплексный, с точки зрения воздействия на пласт, относительно

низкотемпературный процесс, а под последним – распространение высокотемпературной ($T = (450–500)^\circ\text{C}$) волны в нефтесодержащем пласте. Однако по сути теплофизических процессов методы идентичны.

Несмотря на достаточный опыт [3–5], эффективное применение ТГМ – своего рода искусство в силу уникальности структурных, геометрических, гидродинамических и химических характеристик каждого месторождения и поля скважин. Поэтому чрезвычайно важным является накопление практических данных о проведении этих процессов, а также анализ качественных и количественных моделей распространения температурных и концентрационных фронтов и их взаимодействия.

Фактически для применения ТГМ необходимо решать задачи инициирования очага экзотермических реакций и поддержания оптимальной температуры, стабильности и целостности температурных и концентрационных фронтов в пласте.

Из практики известно, что при достаточно высокой внутрипластовой температуре (свыше 60°C) и коксуетости нефти очаг тепловыделения стабильно образуется вблизи забойной зоны скважины. При более низких внутрипластовых температурах встает вопрос о времени саморазогрева пласта, принципиальной возможности инициирования очага, а также о последующей динамике температурного фронта. Такие вопросы должны решаться путем численного моделирования с экспериментальной проверкой основных элементов модели.

В [6] приведена численная схема расчета внутрипластового горения и исследовано медленное распространение экзотермической гетерогенной реакции в пористой среде при фиксированном потоке водовоздушной смеси через продукты окисления. В [7] предложена численная модель процесса внутрипластового горения в линейной пористой среде. Расчеты, проведенные в [7], показали, что на основные характеристики внутрипластового горения в прискважинной зоне (скорость распространения фронта внутрипластового горения, температура зоны реакции, продолжительность периода зажигания) сильно влияют как естественные условия, так и технологические параметры.

В [8] рассматривается задача об инициировании волны горения в нефтенасыщенном пласте. Проанализировано влияние наличия двух горючих компонент (жидкой и твердой) на время инициирования горения и динамику фронта. Показано, что при сохранении полного теплосодержания системы увеличение доли подвижной компоненты приводит к замедлению образования очага и снижению максимальной температуры в пласте, несмотря на более высокую реакционную способность жидкой компоненты. Скорости распространения фронта, по крайней мере после выхода на квазистационарный режим, близки для случаев с различной массовой долей жидкой компоненты.

В настоящей статье численно исследуются закономерности распространения температурного фронта и фронта вытеснения нефти. Изучается их взаимное движение, поскольку предполагается, что их взаимные расположение и взаимодействие могут оказывать влияние на устойчивость двумерной структуры фронта горения в целом. В частности, исследуется их

взаимная динамика при различных концентрациях кислорода в дутье, разных значениях вязкости нефти, коэффициентах тепловых потерь (зависящих от толщины пласта). Перечисленные параметры могут считаться важнейшими управляющими параметрами, поскольку они имеют существенное влияние на скорости фронтов горения и вытеснения.

С целью анализа устойчивости фронта горения рассчитаны также корреляции между температурой фронта и дистанцией (пространственным разнесением) между фронтами горения и вытеснения.

Физическая постановка задачи

Рассматриваются горизонтальный нефтеносный пласт постоянной толщины, ограниченный сверху и снизу материнской породой, и цилиндрическая скважина, в которую подается воздушное или обогащенное кислородом дутье (рис. 1). Дутье фильтруется равномерно в горизонтальной плоскости. В системе изучаются две горючие компоненты: жидкая – нефть, твердая – кероген, нефтяной сорбат и/или ококсированная нефть. Жидкая компонента увлекается движением газовой смеси, а твердый покоится вместе с вмещающей породой. Окисление горючих компонент приводит к тепловыделению. Если теплота не успевает рассеиваться в окружающие пласты, наблюдается саморазогрев. Предел роста температуры определяется теплопотерями и параметрами системы. После инициирования волны горения она распространяется в направлении свежего горючего.

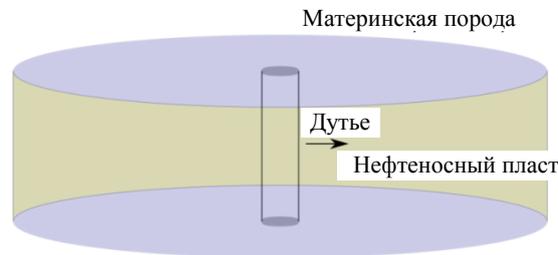


Рис. 1. Схема рассматриваемой системы

Fig. 1. The diagram of the system under consideration

Ставится задача исследования влияния скорости дутья, содержания кислорода в нем, а также вязкости нефти на динамику фронтов и, прежде всего, на расположение фронтов горения и вытеснения нефти и дистанцию между ними.

Задача решается как для одномерной осесимметричной, так и для плоской геометрии системы, которая может рассматриваться как некоторая промежуточная асимптотика распространения фронтов от подающей к добывающей скважине.

Параметрическое исследование проводится путем варьирования расхода дутья, концентрации кислорода, вязкости нефти и теплопотерь относительно «стандартного» случая, т. е. случая с характерным (стандартным) значением этих параметров.

Математическая постановка задачи

Математическая модель тепло- и массообмена в пласте аналогична модели [8] и представляет собой систему уравнений неразрывности газовой компоненты, сохранения окислителя (кислорода), сохранения подвижной горючей компоненты, сохранения неподвижной горючей компоненты и уравнение баланса энергии:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla(\rho_g u_g) = s_{g,1} R_1 + s_{g,2} R_2; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_g a)}{\partial t} + \nabla(\rho_g u_g a) = \nabla(D \nabla(\rho_g a)) - s_{a,1} R_1 - s_{a,2} R_2; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \nabla(\rho_l u_l) = \nabla(D_{\text{dis}} \nabla \rho_l) - s_l R_2; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_b b)}{\partial t} = -s_b R_1; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \nabla(\rho_l c_l u_l T) + \nabla(\rho_g c_g u_g T) = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_1 R_1 + Q_2 R_2 - \beta(T - T_0). \quad (5)$$

Если учитывать изменение плотности газовой смеси за счет образования газа при фазовых переходах и химических реакциях, то плотность газовой смеси в этой системе неизвестна, и общее число неизвестных (ρ_g , u_g , a , ρ_l , b , T) превышает количество уравнений. В качестве дополнительного используется нестационарное уравнение фильтрации Дарси

$$\rho_g \frac{\partial u_g}{\partial t} + \rho_g (u_g \cdot \nabla) u_g = -\nabla p - \frac{\mu_g}{k_0} u_g. \quad (6)$$

При использовании (6) в системе уравнений появляется дополнительный параметр состояния – давление. Уравнение состояния позволит связать этот параметр с другими неизвестными (ρ_g , a , T). При температурах и давлениях, которые обычно имеют место в нефтеносных пластах, газы, составляющие воздух, за исключением водяного пара, находятся в сверхкритическом состоянии, поэтому необходимо применять уравнения состояния реального газа. В качестве такового использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a_V \rho^2}{M^2} \right) \left(\frac{M}{\rho} - b_V \right) = RT. \quad (7)$$

Скорость фильтрации жидкой горючей компоненты находится из уравнения

$$\mu_g u_g = \mu_l u_l, \tag{8}$$

поэтому ее можно не рассматривать как отдельную неизвестную величину.

Выражения для скоростей реакции запишем в аррениусовской форме:

$$R_1 = W_1 a b \exp(-E_1 / RT); \tag{9}$$

$$R_2 = W_2 a \rho_l \exp(-E_2 / RT). \tag{10}$$

Значения кинетических параметров взяты из [9].

В качестве граничных условий на входе в пласт задавались: массовый расход дутья и содержание кислорода, нулевой градиент концентрации кислорода, условие третьего рода для температуры:

$$G_m|_{r=r_0} = G_{m,0}; \quad a|_{r=r_0} = a_0;$$

$$\frac{\partial a}{\partial r}|_{r=r_0} = 0; \quad h(T_0 - T)|_{r=r_0} = \lambda \nabla T|_{r=r_0}.$$

На выходе из пласта задавались граничные условия: давление, содержание жидкой компоненты, нулевой градиент содержания жидкой компоненты, нулевой градиент температуры. В качестве начальных условий брали постоянные поля температуры, содержания жидкой и твердой горючих компонент в пласте; скорость фильтрации, соответствующую стационарному решению уравнения неразрывности; поле концентрации окислителя, соответствующее стационарному решению уравнения (2) в изотермической постановке; поле давления, соответствующее стационарному решению (6).

Стандартные значения параметров системы, используемые для расчета, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Стандартные значения параметров расчета
The standard values of the calculation parameters

| Параметр | Значение | Параметр | Значение | Параметр | Значение |
|-------------|--|--------------|---------------------------------------|----------|--|
| G | 0,005 м ² /с – цилиндр; 0,0005 м ² /с – плоскость | μ_g | $2,2 \cdot 10^{-5}$ Па·с | Q_1 | 40 МДж/кг |
| ρ_g | 1 кг/м ³ | μ_l | $2 \cdot 10^{-3}$ Па·с | Q_2 | 20 МДж/кг |
| $s_{a,1}$ | 3,3 | ρ_b | 1000 кг/м ³ | β | 0,8 Вт/(м ³ ·К) |
| $s_{a,2}$ | 3,3 | b_0 | 0,02 | T_0 | 350 К |
| a_0 | 0,21 | s_b | 1 | W_1 | 10 ⁷ кг/(м ³ ·с) |
| ρ_{l0} | 400 кг/м ³ | ρ_c | $2 \cdot 10^6$ Дж/(м ³ ·К) | W_2 | 180 с ⁻¹ |
| D | $9 \cdot 10^{-4}$ м ² /с | $\rho_l c_l$ | $1 \cdot 10^6$ Дж/(м ³ ·К) | E_1 | 73,5 кДж/моль |
| D_{dis} | $0,1 d_0 u_g$ | $\rho_g c_g$ | 1200 Дж/(м ³ ·К) | E_2 | 50,4 кДж/моль |
| s_l | 1 | λ | 4 Вт/(м·К) | d_0 | 0,003 м |

Результаты расчета

Выполнены расчеты концентрационных и температурных фронтов для цилиндрической и плоской геометрии системы. Фронт горения твердой фазы определялся по максимальному градиенту содержания твердой компоненты, температурный фронт – по максимуму температуры в системе, положение фронта вытеснения – по максимальному градиенту содержания нефти.

Особенностями цилиндрической системы являются падение скорости фильтрации (массового расхода) дутья с расстоянием от оси симметрии и соответствующее уменьшение скоростей фронтов вытеснения, горения и максимальной температуры. Поскольку с удалением фронта от скважины скорость дутья может стать сколь угодно малой, при достаточно длительных расчетах всегда возникает момент, когда горение твердой компоненты прекращается из-за тепловых потерь. При этом высокотемпературный фронт смещается вперед к фронту вытеснения нефти, где инициирует горение более реакционноспособной жидкой компоненты (рис. 2). Условно назовем такой процесс «прыжком» фронта горения. На рис. 2 и последующих рисунках этому процессу соответствует характерная зигзагообразная кривая, соединяющая фронт горения твердой фазы и фронт вытеснения нефти. В случае плоской системы «прыжок» фронта не происходит из-за постоянства условий распространения фронтов.

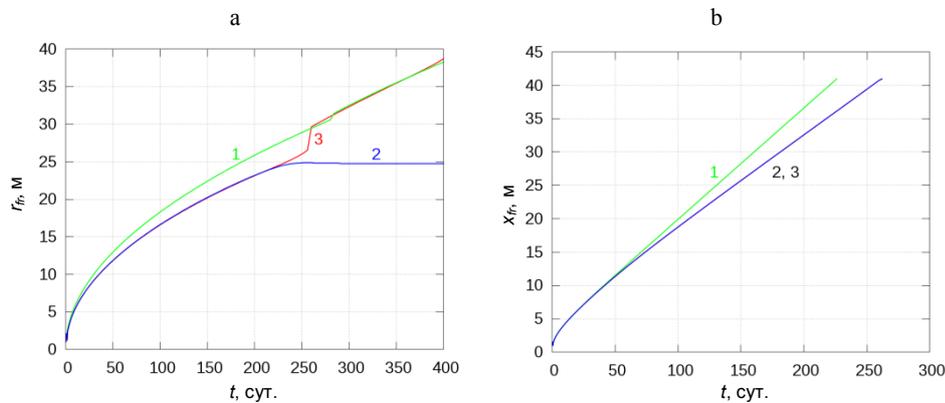


Рис. 2. Динамика фронтов в цилиндрическом (а) и плоском (б) случаях при стандартных значениях параметров: 1 – фронт вытеснения нефти; 2 – фронт горения твердой (неподвижной) компоненты; 3 – максимальная температура

Fig. 2. Front dynamics in cylindrical (a) and planar (b) cases when the values of parameters are standard: 1 – oil displacement front; 2 – burning front of the solid (stationary) components; 3 – maximum temperature

Для системы плоской геометрии взаимное движение фронтов носит очевидный характер: фронт вытеснения опережает фронт горения, при этом скорость разделения фронтов зависит от вязкости нефти, содержания кислорода и в меньшей степени – от скорости дутья. Для плоской геометрии во всех расчетных случаях положение температурного фронта в преде-

лах погрешности совпадает с положением фронта горения неподвижной компоненты.

На рис. 2 представлена динамика фронтов в цилиндрической и плоской системах в стандартном случае. В цилиндрической системе при стандартных значениях параметров «прыжок» фронта горения происходит в момент времени $t \sim 250$ сут. После «прыжка» скорость горения и температура продолжают падать и через промежуток времени, соизмеримый с временем, прошедшим до «прыжка», химическая реакция практически прекращается.

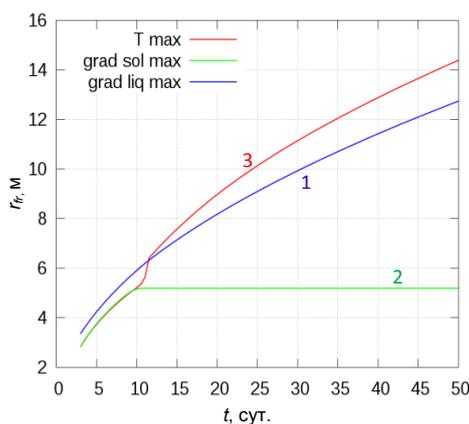


Рис. 3. Динамика фронтов вытеснения нефти (1), горения твердой (неподвижной) компоненты (2) и максимальной температуры (3) при высоких тепловых потерях: $\beta = 8 \text{ Вт/м}^3\text{К}$; $L = 1 \text{ м}$

Fig. 3. The dynamics of the fronts of displacement of oil (1), combustion of a solid (stationary) component (2) and maximum temperature (3) when the heat losses are high: $\beta = 8 \text{ W/m}^3\text{K}$; $L = 1 \text{ m}$

фронта сразу после «прыжка», например за счет увеличения расхода дутья или концентрации кислорода, возможна стабилизация фронта тепловыделения вблизи фронта вытеснения, а при определенных условиях – и обратное смещение фронта горения. Указанное обстоятельство позволяет предложить методику сведения фронтов горения и вытеснения нефти с целью поддержания устойчивости концентрационных фронтов. Действительно, при снижении концентрации кислорода возможен прыжок фронта горения к фронту вытеснения, а при последующем его повышении возможна стабилизация горения на новом рубеже. Очевидно, для технической реализации такой манипуляции в условиях реальной нефтедобычи необходимо иметь информацию о положении, температурах фронтов, которая может быть почерпнута лишь из косвенных данных или результатов моделирования.

Коэффициент тепловых потерь, принятый для стандартного случая, соответствует толщине нефтеносного пласта L около 3 м. При толщине пласта $L = 1 \text{ м}$ коэффициент тепловых потерь β в уравнении энергии (5) примет

Таким образом, «прыжок» замедляет угасание горения, но не предотвращает его. Иногда (при высоких тепловых потерях или специфической температурной зависимости кинетики горения) инициирование горения нефти на фронте вытеснения может не произойти. В этом случае температурный фронт продолжает двигаться вперед, быстро охлаждаясь (рис. 3). Можно отметить следующие детали процесса:

1) инициирование горения жидкой фазы практически не сказывается на скорости фронта вытеснения;

2) расстояние, на которое осуществляется «прыжок» фронта горения, может достигать 10 м.

При увеличении температуры

значение $8 \text{ Вт/м}^3/\text{К}$. При этом время горения до «прыжка» сократится более чем в 10 раз, а фронт горения, ассоциированный с максимумом температуры в системе, уже не фиксируется на фронте вытеснения нефти, как в случае массивного пласта, а относительно быстро сносится вниз по направлению дутья и гаснет (рис. 3).

Результаты параметрического исследования влияния расхода, вязкости нефти и содержания кислорода в дутье для случая цилиндрической геометрии системы представлены на рис. 4–6.

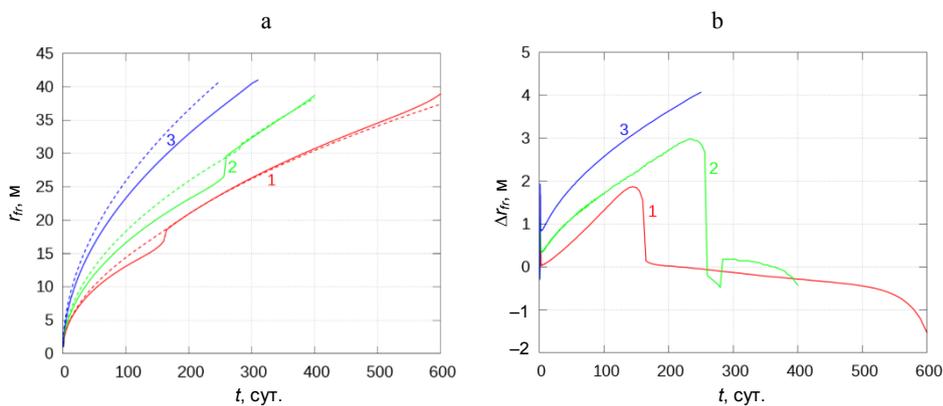


Рис. 4. Динамика фронтов (а) и расстояние между фронтами (б) при различных расходах дутья в случае цилиндрической геометрии: сплошная линия – температурный фронт; штриховая – фронт вытеснения; 1 – $G = 0,003 \text{ кг/м}^2/\text{с}$; 2 – $0,005$; 3 – $0,010 \text{ кг/м}^2/\text{с}$

Fig. 4. The dynamics of the fronts (a) and the distance between the fronts (b) at different blasting rates in the case of cylindrical geometry: solid line – temperature front; dashed line – displacement front; 1 – $G = 0.003 \text{ kg/m}^2/\text{s}$; 2 – 0.005 ; 3 – $0.010 \text{ kg/m}^2/\text{s}$

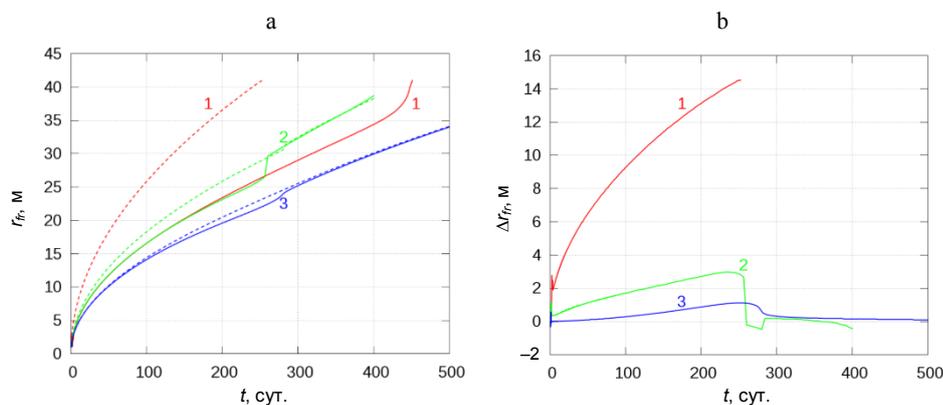


Рис. 5. Динамика фронтов (а) и расстояние между фронтами (б) при различных начальных вязкостях нефти в случае цилиндрической геометрии: сплошная линия – температурный фронт; штриховая – фронт вытеснения; 1 – $\mu = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 2 – $0,002$; 3 – $0,004 \text{ Па}\cdot\text{с}$

Fig. 5. Dynamics of fronts (a) and distance between fronts (b) at different initial oil viscosities in the case of cylindrical geometry: solid line – temperature front; dashed line – displacement front; 1 – $\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; 2 – 0.002 ; 3 – $0.004 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

С одной стороны, данные, приведенные на рис. 4 показывают, что время «прыжка» фронта приблизительно линейно зависит от расхода дутья. С другой, чем больше скорость дутья, тем быстрее растет расстояние между фронтами горения (максимальной температуры) и вытеснения нефти.

Те же величины, но в зависимости от вязкости нефти, представлены на рис. 5. Здесь в отличие от рис. 4 зависимость времени «прыжка» и расстояния между фронтами – нелинейная функция вязкости. При малой вязкости нефти фронт вытеснения быстро отдалится от фронта горения, момент «прыжка» фронта задерживается, расстояние между фронтами на момент «прыжка» достигает значений в 10 м и более, поэтому горение при достижении фронта вытеснения не возобновляется.

Вариация концентрации кислорода в дутье также существенно влияет на взаимное движение фронтов горения и вытеснения (рис. 6). В данном случае динамика фронта вытеснения остается примерно одинаковой, а скорость фронта горения прямо пропорциональна концентрации кислорода, поскольку обусловлена полным выгоранием горючей компоненты.

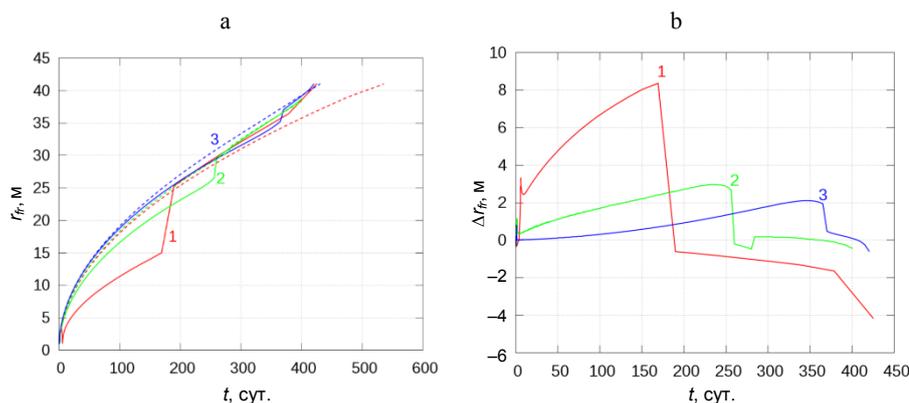


Рис. 6. Динамика фронтов вытеснения и максимума температур (а) и расстояние между фронтами (б): сплошная линия – температурные фронты; штриховая – фронты вытеснения (цилиндрическая геометрия, концентрация кислорода в дутье); 1 – $a = 0,10$; 2 – $0,21$; 3 – $0,30$

Fig. 6. The dynamics of the fronts of displacement and maximum temperatures (a) and the distance between the fronts (b): solid line – temperature fronts; dashed line – displacement fronts (cylindrical geometry, oxygen concentration in the blast); 1 – $a = 0.10$; 2 – 0.21 ; 3 – 0.30

Следует отметить, что при низкой концентрации кислорода фронт горения движется с наименьшей скоростью, что противоречит случаю фильтрационного горения газов. Это связано с тем, что скорость движения фронта в данном случае определяется выгоранием горючей компоненты, а не тепловым потоком в область преднагрева фронта, как при фильтрационном горении газов [10]. На рис. 6 видно, что в случае малой концентрации кислорода фронт горения практически не «привязывается» к фронту вытеснения, а продолжает сдвигаться по направлению фильтрации дутья, что свидетельствует о быстром затухании химического тепловыделения.

Динамика максимальной температуры в системе при варьировании расхода и концентрации кислорода в дутье, а также вязкости нефти показана на рис. 7–9. На рис. 7 представлены данные для цилиндрической и плоской геометрии. Различия между цилиндрической и плоской геометрией носят, прежде всего, количественный характер. На графиках для цилиндрической геометрии моментам «прыжка» соответствуют точки излома температурных кривых при достижении температуры 400 К.

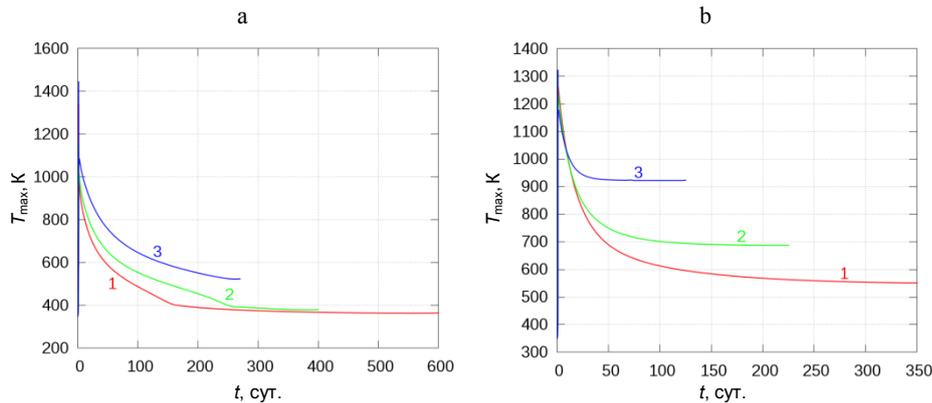


Рис. 7. Изменение максимальной температуры в пласте в осесимметричной (а) и плоской (б) системах при различных расходах дутья для геометрии: цилиндрической: 1 – $G = 0,003 \text{ кг/м}^2/\text{с}$; 2 – $0,005$; 3 – $0,01 \text{ кг/м}^2/\text{с}$; плоской: 1 – $G = 0,0003 \text{ кг/м}^2/\text{с}$; 2 – $0,0005$; 3 – $0,001 \text{ кг/м}^2/\text{с}$

Fig. 7. Alteration in the maximum temperature in the reservoir in axisymmetric (a) and planar (b) systems at different blasting rates for geometry: cylindrical geometry: 1 – $G = 0.003 \text{ kg/m}^2/\text{s}$; 2 – 0.005 ; 3 – $0.01 \text{ kg/m}^2/\text{s}$; planar geometry: 1 – $G = 0.0003 \text{ kg/m}^2/\text{s}$; 2 – 0.0005 ; 3 – $0.001 \text{ kg/m}^2/\text{s}$

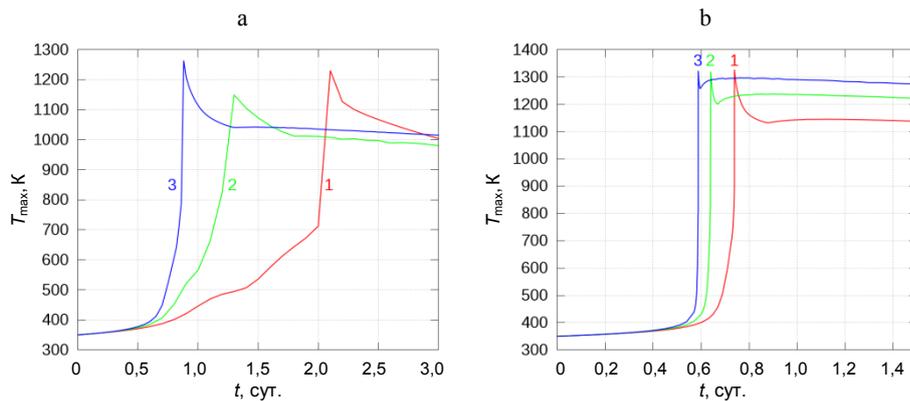


Рис. 8. Изменение максимальной температуры в пласте в осесимметричной (а) и плоской (б) системах при различных начальных вязкостях нефти (начальная фаза процесса: 1 – $\mu = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 2 – $0,002$; 3 – $0,004 \text{ Па}\cdot\text{с}$)

Fig. 8. Alteration in the maximum temperature in the reservoir in axisymmetric (a) and planar (b) systems at different initial viscosities of oil (the initial phase of the process: 1 – $\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; 2 – 0.002 ; 3 – $0.004 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)

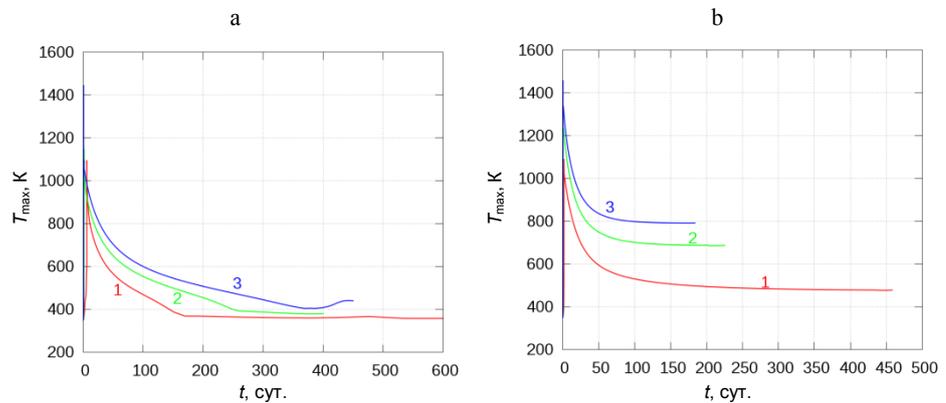


Рис. 9. Изменение максимальной температуры в пласте в осесимметричной (а) и плоской (б) системах при различных начальных концентрациях кислорода: 1 – $a = 0,10$; 2 – $0,21$; 3 – $0,30$

Fig. 9. Alteration in the maximum temperature in the formation of axisymmetric (a) and planar (b) systems at different initial oxygen concentrations: 1 – $a = 0.10$; 2 – 0.21 ; 3 – 0.30

ВЫВОДЫ

1. Проведены расчеты динамики фронтов горения твердой (неподвижной) внутрипластовой горючей компоненты, температурного фронта, фронта вытеснения и горения нефти в зависимости от расхода дутья, концентрации кислорода в нем, вязкости нефти и теплотерьер в пласте. Показано, что при адекватных реальным системам значениях параметров расчета как при цилиндрической, так и при плоской симметрии системы фронт вытеснения нефти опережает фронт горения неподвижной компоненты. Скорость опережения сильно зависит от параметров системы, прежде всего от вязкости нефти и содержания кислорода в дутье.

2. В случае цилиндрической симметрии эволюция горения всегда приводит к «прыжку» фронта горения к фронту вытеснения нефти и последующему медленному угасанию процесса химического тепловыделения. Поэтому при анализе реальных систем принципиальными являются расстояние между подающей и добывающей скважинами и время до выхода эволюции фронтов горения и вытеснения на промежуточную «плоскую» асимптотику и соответствующей смены характера зависимости скорости фронта от его координаты.

3. Моделирование показывает, что, с одной стороны, время «прыжка» фронта приблизительно линейно зависит от расхода дутья. С другой стороны, чем больше скорость дутья, тем быстрее растет расстояние между фронтами горения (максимальной температуры) и вытеснения нефти (рис. 4). Зависимость времени «прыжка» и расстояния между фронтами – нелинейная функция вязкости нефти (рис. 5). При малой вязкости фронт вытеснения быстро отдаляется от фронта горения, момент «прыжка» фронта за-

держивается, расстояние между фронтами на момент «прыжка» достигает значений в 10 м и более, поэтому горение при достижении фронта вытеснения не возобновляется.

4. Вариация концентрации кислорода в дутье также существенно влияет на взаимное движение фронтов горения и вытеснения (рис. 6). В данном случае динамика фронта вытеснения остается примерно одинаковой, а скорость фронта горения прямо пропорциональна концентрации кислорода, поскольку обусловлена полным выгоранием горючей компоненты.

5. Обращает на себя внимание тот факт, что повышение содержания кислорода в дутье позволяет удерживать фронт горения вблизи фронта вытеснения и образовывать в связи с этим единую тепловую структуру, распространяющуюся в нефтеносном пласте. Это дает ключ к управлению устойчивостью фронта вытеснения наряду с таким очевидным параметром управления, как расход дутья. Для реализации этой процедуры необходима информация о положении и температуре фронтов, времени «прыжка» фронта, которая в условиях реальной нефтедобычи может быть почерпнута лишь из косвенных данных мониторинга процесса или модельных представлений.

6. В статье не рассмотрена зависимость взаимной динамики фронтов от относительной массовой доли твердой неподвижной и подвижной горючих компонент. Это обусловлено недостатком экспериментальных данных о фазовом составе системы нефтеносного пласта и соответственно оснований для моделирования. В дальнейшем при переходе к более реалистичному имитационному моделированию процессов термогазовых методов эти данные должны быть учтены. Кроме того, следующим шагом в моделировании таких систем нужно считать переход к двумерному домену, а также симуляцию управления движением фронта вытеснения в зависимости от косвенных признаков нарушения целостности фронта вытеснения (скачок давления на входе или концентрации газообразных продуктов в добывающей скважине).

Работа выполнена в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии», подпрограмма «1.2. Эффективные теплофизические процессы и технологии», задание 2.32.

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. Боксерман, А. А. Термогазовый метод увеличения нефтеотдачи / А. А. Боксерман // Георесурсы. 2007. Т. 22, № 3. С. 18–20.
3. Чарный, И. А. Подземная гидрогазодинамика / И. А. Чарный. М.: Гостоптехиздат, 1963. 397 с.
4. Рубинштейн, Л. И. Температурные поля в нефтяных пластах / Л. И. Рубинштейн. М.: Недра, 1972. 276 с.

5. Муслимов, Р. Х. Опыт применения тепловых методов разработки на нефтяных месторождениях Татарстана / Р. Х. Муслимов, К. М. Мусин, М. М. Мусин. Казань: Новое знание, 2000. 226 с.
6. Алдушин, А. П. К анализу режимов внутрислоевого горения / А. П. Алдушин, Б. С. Сеплярский // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255, № 3. С. 616–620.
7. Богданов, И. И. Численное исследование начального этапа и развитых режимов внутрислоевого горения / И. И. Богданов, Л. А. Чудов. М.: Изд. отдел ИПМ, 1983. 74 с. (Препринт / Институт проблем механики; 227).
8. Козначеев, И. А. Одномерное моделирование фронта внутрислоевого горения нефти с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент / И. А. Козначеев, К. В. Добрего // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 47–60. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60>.
9. Akkutlu, I. Y. The Dynamics of In-Situ Combustion Fronts in Porous Media / I. Y. Akkutlu, Y. C. Yortsos // Combustion Flame. 2003. Vol. 134, No 3. P. 229–247.
10. Добрего, К. В. Фильтрационное горение газов / К. В. Добрего, С. А. Жданок. Минск: Ин-т тепло- и массообмена НАН Беларуси, 2002. 204 с.

Поступила 13.05.2019 Подписана в печать 30.07.2019 Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Sheinman A. B., Dubrovai K. K. (1934) *Underground Gasification of Oil Reservoirs and the Thermal Method of Oil Production*. Moscow, United Scientific and Technical Publishing House. 95 (in Russian).
2. Bokserman A. A. (2007) Thermo-Gas Method of Enhanced Oil Recovery. *Georesources*, 22 (3), 18–20 (in Russian).
3. Charnyi I. A. (1963) *Underground Hydro- and Gas Dynamics*. Moscow, Gostoptekhizdat Publ. 397 (in Russian).
4. Rubinshtein L. I. (1972) *Temperature Fields in Oil Reservoirs*. Moscow, Nedra Publ. 276 (in Russian).
5. Muslimov R. Kh., Musin K. M., Musin M. M. (2000) *Experience of Application of Thermal Methods of Development in Oil Fields of Tatarstan*. Kazan, Novee Znanie Publ. 226 (in Russian).
6. Aldushin A. P., Seplyarskii B. S. (1980) Towards the Analysis of Intra-Layer Combustion Modes. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 255 (3), 616–620 (in Russian).
7. Bogdanov I. I., Chudov L. A. (1983) *Numerical Study of the Initial Stage and Mature Modes of Intra-Layer Combustion*. Moscow, IPM Publishing Department. 74 (in Russian).
8. Koznacheev I. A., Dobrego K. V. (2019) A One-Dimensional Simulation of the In-Situ Oil Combustion with Consideration to Fluid and Solid Combustible Components. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 47–60 (in Russian) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60>.
9. Akkutlu I. Y., Yortsos Y. C. (2003) The Dynamics of In-Situ Combustion Fronts in Porous Media. *Combustion Flame*, 134 (3), 229–247. [https://doi.org/10.1016/s0010-2180\(03\)00095-6](https://doi.org/10.1016/s0010-2180(03)00095-6).
10. Dobrego K. V., Zhdanok S. A. (2002) *Filtration Combustion of Gases*. Minsk, Heat and Mass Transfer Institute Publ. 204 (in Russian).

Received: 13 May 2019

Accepted: 30 July 2019

Published online: 30 September 2019