

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60>

УДК 622.276.654

## Одномерное моделирование фронта внутрипластового горения нефти с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент

И. А. Козначеев<sup>1)</sup>, К. В. Доброго<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Численно решена одномерная осесимметричная задача об иницировании волны горения в нефтенасыщенном пласте. Рассматривались две горючие компоненты – подвижная (нефть) и неподвижная (кероген, нефтяной абсорбат). Проанализировано влияние наличия двух горючих компонент на время иницирования 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. Расчеты показывают наличие двух «всплесков» скорости фронта: первый соответствует времени иницирования горения, второй – моменту, когда фронт выгорания твердой компоненты обгоняет фронт вытеснения жидкой горючей компоненты. Отмечено, что скорости распространения фронта, по крайней мере после прохождений «всплесков» и выхода на квазистационарный режим, близки для случаев с различной массовой долей жидкой компоненты. Характерное время формирования очага экзотермической реакции может увеличиться с 50 до 200 сут при повышении массовой доли жидкой компоненты с 30 до 80 % при принятых термодинамических условиях в пласте. Таким образом, при реализации термогазового метода в высокопроизводительных пластах повышается вероятность трудности иницирования очага. Поэтому изучение закономерностей внутрипластового горения для таких случаев представляет особый интерес. Например, задача иницирования очага может быть решена за счет повышения концентрации кислорода в дутье или использования нестационарной (периодической) подачи дутья. Установлено, что учет более реакционноспособной подвижной компоненты приводит к уширению фронта. Это может положительно сказаться на его термогидродинамической устойчивости. Результаты исследований могут быть использованы при разработке проектов нефтедобычи, конструировании специализированных печей для сжигания многокомпонентных топливных смесей в неподвижном слое, при термохимических исследованиях многокомпонентных топлив.

**Ключевые слова:** горение, фильтрация, внутрипластовое горение, нефтедобыча, численное моделирование

**Для цитирования:** Козначеев, И. А. Одномерное моделирование фронта внутрипластового горения нефти с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент / И. А. Козначеев, К. В. Доброго // *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>

---

### 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

---

## One-Dimensional Simulation of the In-Situ Oil Combustion with Consideration to Fluid and Solid Combustible Components

I. A. Koznacheev<sup>1)</sup>, K. V. Dobrego<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The one-dimensional axisymmetric problem of initiation of a combustion wave in an oil-saturated reservoir is solved numerically. Two combustible components, viz. liquid (oil) and solid (kerogen, oil sorbate) were considered. The influence of the abovementioned components on time of the hot site ignition and combustion front speed was simulated and analyzed. It was demonstrated that growth of the mass fraction of liquid component (the total heat content being preserved) results in retard of formation of the hot site near the well and in reduction of the maximum temperature of the combustion wave, disregarding of the higher reactivity of liquid combustible. Simulation revealed existence of the two “peaks” of thermal front velocity. The first one corresponds by time to ignition of combustion site. The second one corresponds to a moment when the solid component combustion front overrides the oil displacement front. Calculations shown, that thermal wave propagation velocity, at least after passing the “peaks” and transition to quasi-steady regime, does not considerably depend on mass fraction of the fluid component in the system. A typical term of the exothermic reaction site formation may increase from 50 to 200 days in case of growth of the liquid component content from 30 to 80 mass % at the considered thermal conditions in the oil reservoir. Thus, the implementation of the thermo-gas method in high-productive layers increases the likelihood of difficulty of initiation of a fire. Therefore, the study of the regularities of intra-combustion in such cases is of a particular interest. For instance, the task of combustion site ignition may be resolved by increase of oxygen content in blowing-gas or by means of non-steady (periodical) blowing. It is found that taking into consideration of highly reactive liquid component results in widening (diffusion) of the thermal front, which may play positive role in its spatial thermo-hydrodynamic stabilization. The results of simulation may be utilized for development of technical projects of oil recovery via in-situ combustion, for designing of furnaces utilizing multicomponent fixed layer fuels and for thermochemical investigation of multicomponent fuels.

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

**For citation:** Koznacheev I. A., Dobrego K. V. (2019) One-Dimensional Simulation of the In-Situ Oil Combustion with Consideration to Fluid and Solid Combustible Components. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (1), 47–60. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60> (in Russian)

### Введение

Методы внутрислоевого горения были впервые применены в Советском Союзе для повышения нефтеотдачи пластов 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. В настоящее время разделяют понятия «термогазовый метод повышения нефтеотдачи пласта» [2] (термин 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 послед-

ним – распространение высокотемпературной ( $T = (450-500)$  °C) волны в нефтесодержащем пласте. Однако по сути теплофизических задач, возникающих при реализации указанных методов, они идентичны.

Несмотря на длительную историю применения термогазового метода (ТГМ) и значительный опыт, отраженный в [3–5] и других источниках, его эффективное использование является своего рода искусством в силу уникальности структурных, геометрических, гидродинамических и химических характеристик каждого месторождения и поля скважин. Фактически для применения ТГМ необходимо решать задачи инициирования очага экзотермических реакций и поддержания оптимальной температуры, стабильности и целостности температурных и химических фронтов в пласте.

Из практики известно, что при достаточно высокой внутрипластовой температуре (свыше 60 °C) и коксуемости 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. Указанные вопросы должны решаться путем детального численного моделирования с экспериментальной проверкой основных элементов модели. Однако предвзято детальные численные исследования должно решение модельных задач.

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

В [8–11] проанализированы близкие по характеру задачи, однако это не позволяет сделать вывод о возможности управления и оптимизации инициирования очага горения внутри пласта.

В [12] задача об инициировании температурного очага в нефтесодержащем пласте в условиях вынужденной фильтрации кислородосодержащего газа рассмотрена комбинированным аналитическим и численным методами. При анализе задачи пренебрегали диффузией, выгоранием конденсированной компоненты, считали, что профиль концентрации устанавливается быстрее температурного профиля, также принимали другие допущения. Определено влияние выгорания окислителя и конвективного уноса теплоты на время самовозгорания очага. Динамика возгорания очага и его эволюция моделировались численно. В модели не учитывалось вытеснение (увлечение) жидкой топливной компоненты. Получены выражения для времени самовоспламенения очага от начальной температуры, массовой доли кислорода в дутье, тепловых потерь в пласте.

Поскольку в условиях реального пласта вытесняемая нефть является горючей компонентой наряду с керогеном и неподвижной пленкой сорбата, представляется интересным выяснить влияние наличия двух топливных компонент – вытесняемой и неподвижной – на параметры воспламенения и динамику очага.

В статье сформулирована и численно решена одномерная осесимметричная задача об иницировании и динамике фронта горения в нефтесодержащем пласте с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент. Проанализировано влияние подвижной компоненты на время иницирования очага и динамику фронта.

### Физическая постановка задачи

Рассматриваются осесимметричная система, представляющая собой 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. Нефть, находящаяся в пласте, окисляется, что приводит к тепловыделению. Если эта теплота не успевает рассеиваться в окружающие пласты, наблюдается саморазогрев. Предел роста температуры определяется теплотерями и параметрами системы. После достижения этого предела в пласте возникает распространяющаяся волна экзотермического окисления, движущаяся в направлении свежего горючего. В системе рассматриваются две независимые горючие компоненты: жидкая (нефть) и твердая (кероген, нефтяной сорбат и/или ооксованная нефть). Жидкая компонента увлекается движением газовой смеси, а твердая покоится вместе с вмещающей породой.

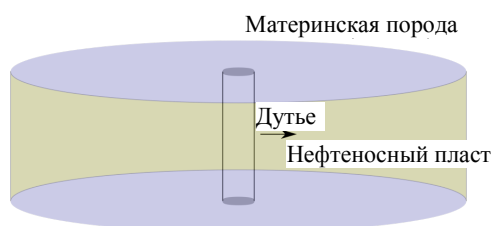


Рис. 1. Схема системы

Fig. 1. Diagram of the system

### Математическая постановка задачи

Математическая модель тепло- и массообмена в пласте 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 ( $\rho_g$ ,  $u_g$ ,  $a$ ,  $\rho_l$ ,  $b$ ,  $T$ ) превышает число уравнений. В качестве дополнительного можно использовать нестационарное уравнение фильтрации Дарси

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

При использовании (6) в системе уравнений появляется дополнительный параметр состояния – давление. Уравнение состояния позволит связать этот параметр с другими неизвестными ( $\rho_g$ ,  $a$ ,  $T$ ). При температурах и давлениях, которые обычно имеют место в нефтеносных пластах, газы, составляющие воздух, за исключением водяного пара, находятся в сверхкритическом состоянии, поэтому необходимо использовать уравнения состояния реального газа. На данном этапе ограничимся уравнением Ван-дер-Ваальса

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

Скорость фильтрации жидкой горючей компоненты находится из уравнения

$$\mu_g u_g = \mu_l u_l, \quad (8)$$

поэтому ее можно не рассматривать как отдельную неизвестную величину.

Выражения для скоростей реакции запишем в аррениусовской форме:

$$R_1 = W_1 a b \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right); \quad (9)$$

$$R_2 = W_2 a \rho_l \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right). \quad (10)$$

Значения кинетических параметров были взяты из [14].

На цилиндрической поверхности скважины (вход в пласт) задавались граничные условия: массовый расход дутья и содержание кислорода; нулевой градиент концентрации кислорода; условие третьего рода для температуры:

$$G_m|_{r=r_0} = G_{m,0};$$

$$a|_{r=r_0} = a_0 P;$$

$$\frac{\partial a}{\partial r}|_{r=r_0} = 0;$$

$$h(T_0 - T)|_{r=r_0} = \lambda \nabla T|_{r=r_0}.$$

На внешней поверхности расчетного домена (выход из пласта) задавали граничные условия: давление; содержание жидкой компоненты; нулевой градиент содержания жидкой компоненты; нулевой градиент температуры. В качестве начальных условий задавались постоянные поля температуры, содержания жидкой и твердой горючих компонент в пласте; скорость фильтрации, соответствующая 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 <sup>2</sup> /с	$\mu_g$	$2,2 \cdot 10^{-5}$ Па·с	$Q_1$	40 МДж/кг
$\rho_g$	1 кг/м <sup>3</sup>	$\mu_l$	$2 \cdot 10^{-3}$ Па·с	$Q_2$	20 МДж/кг
$s_{a,1}$	3,3	$\rho_b$	1000 кг/м <sup>3</sup>	$\beta$	0,8 Вт/(м <sup>3</sup> ·К)
$s_{a,2}$	3,3	$b_0$	0,02	$T_0$	350 К
$a_0$	0,21	$s_b$	1	$W_1$	10 <sup>7</sup> кг/(м <sup>3</sup> ·с)
$\rho_{l0}$	400 кг/м <sup>3</sup>	$\rho c$	$2 \cdot 10^6$ Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	$W_2$	180 с <sup>-1</sup>
$D$	$9 \cdot 10^{-4}$ м <sup>2</sup> /с	$\rho_l c_l$	$1 \cdot 10^6$ Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	$E_1$	73,5 кДж/моль
$D_{dis}$	0,1 d <sub>0u</sub> g	$\rho_g c_g$	1200 Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	$E_2$	50,4 кДж/моль
$s_l$	1	$\lambda$	4 Вт/(м·К)	$d_0$	0,003 м

### Результаты расчетов

Динамика профилей концентрации окислителя, твердой и жидкой топливных компонент, дающих представление как о характере инициирования очага, так и о его динамике, показана на рис. 2–4.

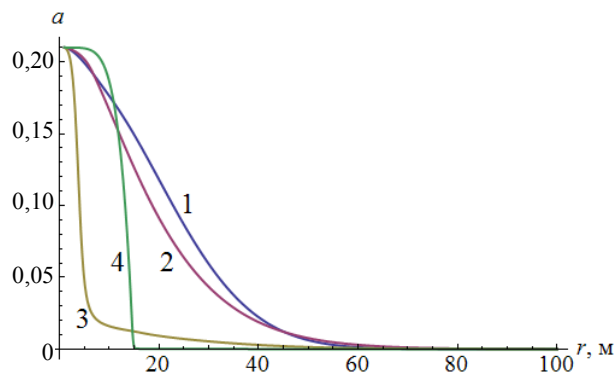


Рис. 2. Зависимость концентрации окислителя от координаты для времени:  
1 –  $t = 2,4$  ч; 2 – 4 сут; 3 – 29 сут; 4 – 98 сут

Fig. 2. The dependence of the oxidant concentration on the time coordinates:  
1 –  $t = 2.4$  hours; 2 – 4 days; 3 – 29 days; 4 – 98 days

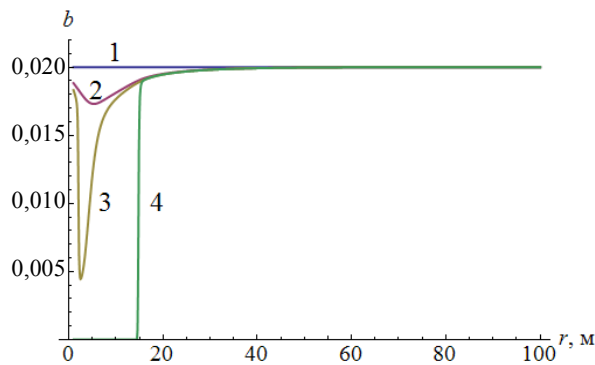


Рис. 3. Зависимость содержания твердой топливной компоненты от координаты  
для времени: 1 –  $t = 2,4$  ч; 2 – 24 сут; 3 – 32 сут; 4 – 98 сут

Fig. 3. The dependence of the content of solid fuel components on the time coordinates:  
1 –  $t = 2.4$  hours; 2 – 24 days; 3 – 32 days; 4 – 98 days

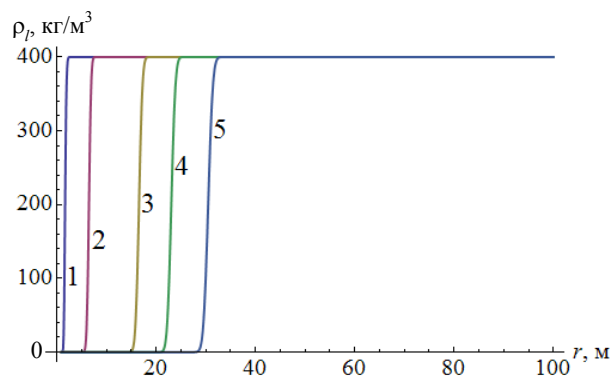


Рис. 4. Зависимость содержания жидкой топливной компоненты от координаты  
для времени: 1 –  $t = 2,4$  ч; 2 – 4 сут; 3 – 29 сут; 4 – 56 сут; 5 – 98 сут

Fig. 4. The dependence of the content of liquid fuel components on the time coordinates:  
1 –  $t = 2.4$  hours; 2 – 4 days; 3 – 29 days; 4 – 56 days; 5 – 98 days

Эволюция температурного профиля показана на рис. 5. Здесь представлены профили температур, реализуемые при наличии лишь неподвижной топливной компоненты (пунктирные линии) и в случае наличия подвижной и неподвижной компонент (сплошные линии). Как видно из графиков, на начальной стадии процесса сказывается дополнительное тепловыделение за счет окисления подвижной топливной компоненты. Однако такое сопоставление является не вполне корректным, поскольку в двух рассматриваемых случаях не равны теплосодержания горючих компонент на единицу объема пласта в начальный момент времени. Исследование влияния наличия подвижной компоненты при постоянном общем теплосодержании описано ниже.

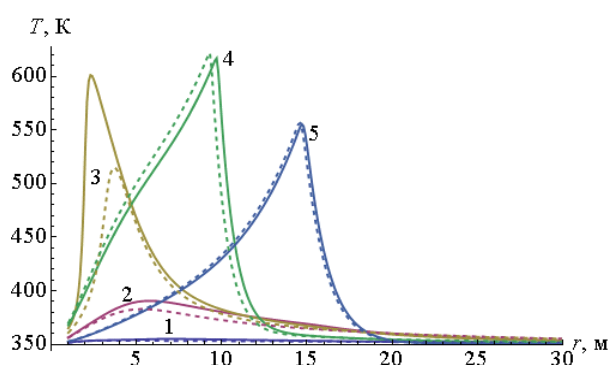


Рис. 5. Зависимость температуры от координаты для времени: 1 –  $t = 4$  сут; 2 – 24; 3 – 32; 4 – 56; 5 – 98 сут; сплошная линия – система с подвижной и неподвижной топливными компонентами; штриховая – то же с одной неподвижной компонентой ( $\rho_{10} = 0$ )

Fig. 5. The temperature dependence on the time coordinates: 1 –  $t = 4$  days; 2 – 24; 3 – 32; 4 – 56; 5 – 98 days; solid line – system with mobile and stationary fuel components; dashed line – system with one fixed component ( $\rho_{10} = 0$ )

Зависимость скорости газа в пласте от радиальной координаты и времени представлена на рис. 6.

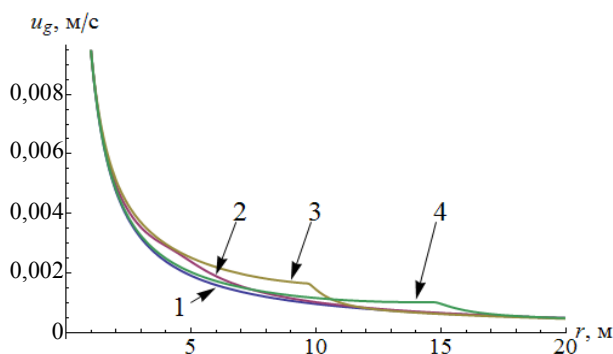


Рис. 6. Зависимость скорости газа от координаты для времени: 1 –  $t = 4$  сут; 2 – 29; 3 – 56; 4 – 98 сут

Fig. 6. The dependence of the gas velocity on the time coordinates: 1 –  $t = 4$  days; 2 – 29; 3 – 56; 4 – 98 days



Из приведенных графиков видно, что процесс формирования фронта вблизи нагнетательной скважины занимает около 30 сут, после чего начинается его распространение.

Координаты фронта в данный момент времени определялись двумя способами. Согласно первому, положение фронта принималось соответствующим положению точки, в которой градиент концентрации максимален (точка перегиба профиля). Согласно второму, фронт соответствовал точке, в которой достигается максимум температуры среды. Зависимости координаты фронта, рассчитанной по обоим способам, от времени показаны на рис. 7. Убывание координаты фронта на начальном участке связано с процессом его формирования вблизи нагнетательной скважины. Затем, примерно после 30 сут, начинается его распространение с убывающей скоростью. Зависимость скорости фронта, рассчитанной по второму способу, от времени для системы, не включающей и включающей подвижную компоненту, приведена на рис. 8.

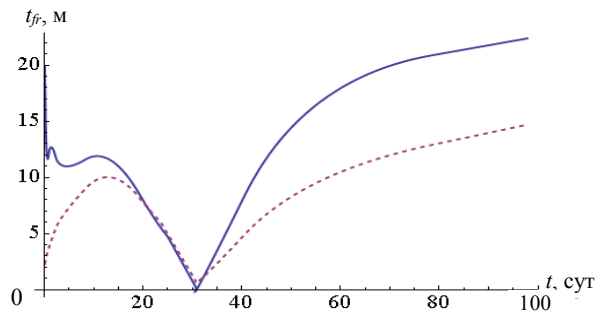


Рис. 7. Зависимость координаты фронта от времени: — положение фронта, рассчитанного по профилю концентрации окислителя; - - - - то же по профилю температуры

Fig. 7. The dependence of the coordinate of the front on the time: — position of the front calculated according to the profile of the oxidant concentration; - - - - same calculated according the temperature profile

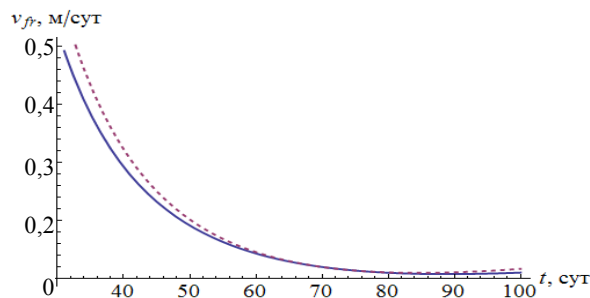


Рис. 8. Зависимость скорости фронта (по температуре) от времени: — система с подвижной и неподвижной топливными компонентами; - - - - то же с одной неподвижной компонентой ( $\rho_{i0} = 0$ )

Fig. 8. The dependence of the front speed (by the temperature) on time: — system with liquid and solid fuel components; - - - - system with one fixed component ( $\rho_{i0} = 0$ )

Большие значения скорости фронта для варианта с одной неподвижной топливной компонентой по сравнению со случаем с двумя компонентами при одинаковых значениях  $t$  вызваны смещением кривой по времени

за счет запаздывания воспламенения при одной неподвижной компоненте. Если построить графики зависимостей скорости фронта от координаты фронта для двух случаев, то они практически совпадут.

Убывание скорости фронта по мере распространения связано с цилиндрической симметрией задачи, что приводит к тому, что скорость поступления окислителя и плотность тепловыделения на единицу площади фронта уменьшаются обратно пропорционально радиусу фронта. Вследствие тепловых потерь пласта существует предельно возможная плотность тепловыделения, а следовательно, предельный радиус фронта.

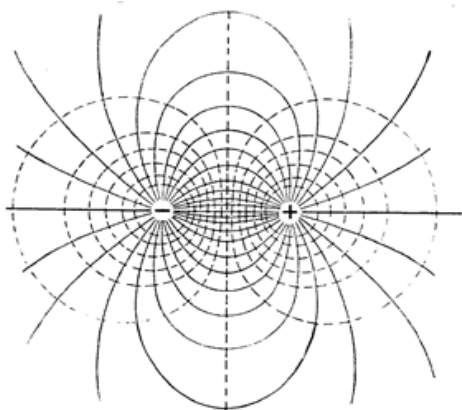


Рис. 9. Поле диполя

Fig. 9. Dipole field

Однако цилиндрическая симметрия задачи со временем нарушается, плотность потока фильтрации окислителя стабилизируется в направлении добывающей скважины и может даже нарастать. Элементарная задача о силовых линиях тока (силовых линиях диполя) (рис. 9) показывает, что максимальное разряжение плотности потока вдоль линии, соединяющей полюса, соответствует радиусу  $R^* \approx L/\pi$  осесимметричной задачи, где  $L$  – расстояние между полюсами. Таким образом,

можно оценить необходимый расход дутья, способный обеспечить непрерывное во времени распространение фронта.

Для сопоставления результатов расчетов при различных энергокладах от подвижной и неподвижной компонент топлива были введены две дополнительные характеристики, зависящие от параметров расчета:

– полное удельное энергосодержание в начальный момент времени

$$Q_{tot} = Q_1 \rho_b b_0 + Q_2 \rho_{l0};$$

– доля начального энергосодержания, приходящаяся на подвижную компоненту:

$$\phi_l = \frac{Q_2 \rho_{l0}}{Q_{tot}}.$$

Была проведена серия параметрических исследований по влиянию  $Q_{tot}$ ,  $\phi_l$ , коэффициента теплоотдачи к материнской породе  $\beta$  на время воспламенения  $t_{ign}$  и максимальную температуру в пласте  $T_{max}$  за все время расчета (конец расчета в вычислительных экспериментах соответствовал 600 сут физического времени). Время воспламенения определялось по максимальной скорости роста максимальной температуры в пласте с течением времени. Результаты варьирования показаны на рис. 10–12.

Полное удельное энергосодержание  $Q_{tot}$  варьировалось за счет пропорционального изменения параметров  $Q_1$  и  $Q_2$  без изменения  $b_0$  и  $\rho_{l0}$ .

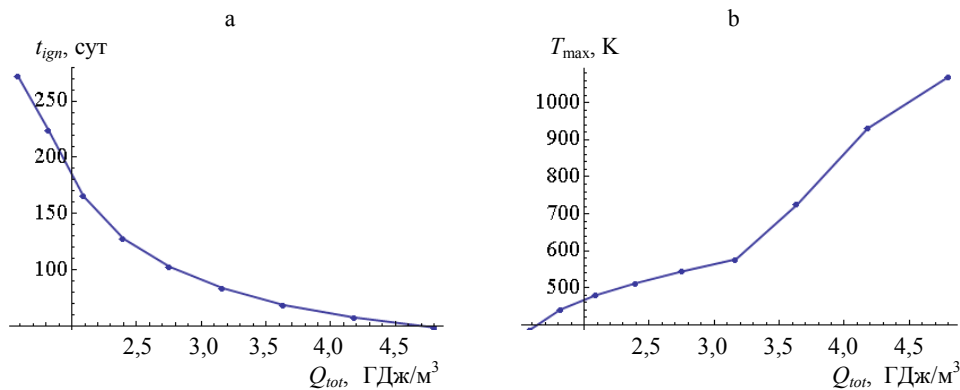


Рис. 10. Зависимость времени воспламенения (а) и максимальной температуры в пласте (б) от полного удельного энергосодержания

Fig. 10. The dependence of time to ignition (a) and the maximum temperature in the reservoir (b) on the full energy content per unit

Доля энергосодержания  $\phi_l$ , приходящаяся на подвижную компоненту, варьировалась изменением параметров  $b_0$  и  $\rho_{l0}$  без изменения  $Q_1$  и  $Q_2$  и полного удельного энергосодержания  $Q_{tot}$ .

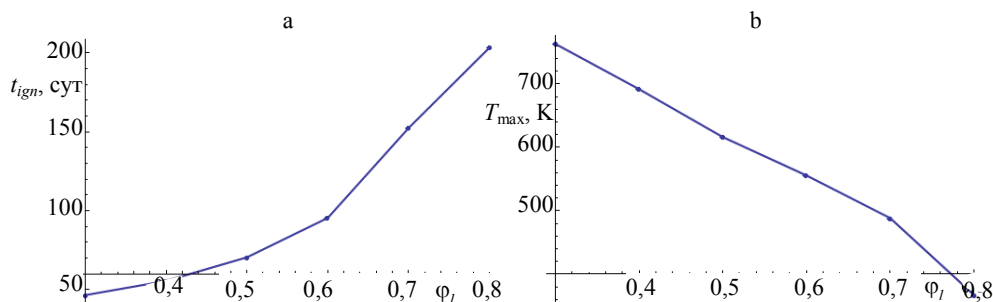


Рис. 11. Зависимость времени воспламенения (а) и максимальной температуры в пласте (б) от доли энергосодержания, приходящейся на подвижную компоненту

Fig. 11. The dependence of time to ignition (a) and the maximum temperature in the reservoir (b) on the share of the energy content attributable to the liquid component

Из результатов расчета следует, что при фиксированном начальном общем теплосодержании системы наличие высокоподвижной горючей фракции снижает вероятность и скорость образования высокотемпературного очага, так же как и максимальную температуру в пласте. Физически это связано, прежде всего, с эвакуацией горючей подвижной компоненты из области горения неподвижной и со снижением плотности энерговыделения. При этом очевидно, что большему количеству подвижной компоненты соответствует более высокая доля извлеченной нефти. Поэтому можно ожидать, что пласты, в которых инициирование очага затруднено, являются более перспективными с точки зрения объема и полноты извлечения сырья.

Была рассчитана динамика температурного фронта для различных начальных массовых долей жидкой компоненты в системе. Соответствующие данные о координатах фронта и его скорости приведены на рис. 12, 13.

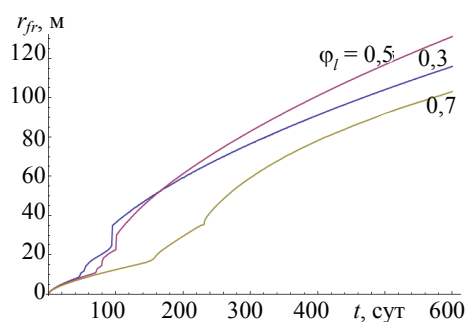


Рис. 12. Зависимость координаты фронта от времени для массовой доли жидкой компоненты  $\varphi_l$

Fig. 12. The dependence of the coordinate of the front on time for mass fraction of liquid components  $\varphi_l$

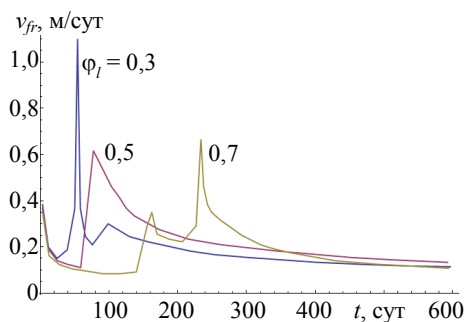


Рис. 13. Зависимость скорости фронта от времени для массовой доли жидкой компоненты  $\varphi_l$

Fig. 13. The dependence of the front speed of the front on time for mass fraction of liquid components  $\varphi_l$

Температурный фронт, связанный с горением твердой компоненты, пространственно разнесен с фронтом вытеснения нефти. Расчеты показывают наличие двух «всплесков» скорости фронта: первый соответствует времени инициирования горения, второй – моменту, когда фронт выгорания твердой компоненты обгоняет фронт вытеснения жидкости. При этом доля окислителя, расходуемая на горение нефти, растет, область тепловыделения расширяется, а максимальная температура падает (рис. 14). Для малых  $\varphi_l$  это происходит сразу после инициирования горения и поэтому не выявлено на рис. 13. Для  $\varphi_l = 0,7$  оба всплеска отчетливо видны.

Согласно расчетам скорости распространения фронта после прохождения «всплесков» для всех трех рассмотренных случаев близки. Это говорит о том, что тепловыделение в области горения в большей степени определяется количеством доступного окислителя, чем реакционной способностью отдельных компонент. Эффект может объясняться и более сложным сочетанием кинетических и гидродинамических факторов.

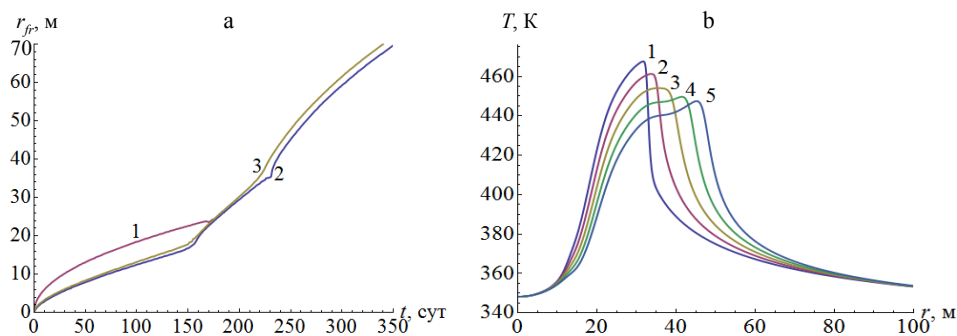


Рис. 14. Зависимость: а – положения фронтов вытеснения (1), максимальной температуры (2), горения твердого компонента (3); б – профиля температуры в пласте от времени; 1 –  $t = 210$  сут; 2 – 220; 3 – 230; 4 – 240; 5 – 250 сут;  $\varphi_l = 0,7$

Fig. 14. Dependence: а – of coordinates of displacement (1), maximum temperature (2), solid component combustion (3); б – maximum reservoir temperature profile on time; 1 –  $t = 210$  days; 2 – 220; 3 – 230; 4 – 240; 5 – 250 days;  $\varphi_l = 0,7$

## ВЫВОДЫ

1. Проведено моделирование инициирования температурного фронта в нефтесодержащем пласте в системе с осевой симметрией. Показано, что включение в модель процесса вытеснения жидкой компоненты снижает интенсивность тепловыделения, увеличивает время инициирования очага. Это связано с тем, что часть горючей компоненты эвакуируется из области горения и вытесняемая топливная компонента получает малое количество окислителя, по сути лишь остатки кислорода, не прореагировавшего с неподвижной топливной компонентой.

2. Расчеты показывают, что при рассмотрении задачи об инициировании очага внутрипластового горения достаточно задать соответствующую процессу концентрацию неподвижной горючей компоненты в пласте, поскольку учет подвижной компоненты существенно не влияет на точность определения времени его инициирования. Начальную концентрацию неподвижной горючей компоненты следует связать с такими параметрами, как коксуемость нефти и первоначальное содержание керогена в материнской породе.

3. Учитывая возможность моделирования динамики концентрационных фронтов в трехфазной системе, представляется интересной разработка методов нестационарного (периодического) дутья, что позволило бы накапливать твердую горючую компоненту (образующуюся за счет пиролиза нефти) в заданной области для управления динамикой фронта горения или ускорения процесса поджига.

4. В дальнейших исследованиях планируется учесть процесс образования твердой горючей компоненты при низкотемпературном пиролизе нефти, а также провести расчет в геометрии с плоской симметрией, соответствующей процессу распространения температурного фронта на значительном расстоянии от скважин.

5. Существенный интерес, с точки зрения устойчивости процесса, могут представлять расчет и детальный анализ относительного движения концентрационных, температурных фронтов и фронта вытеснения нефти. Данный вопрос станет предметом будущих исследований.

## 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 внутрипластового 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. (Препринт / Институт проблем механики; № 227.)
  8. Новожилов, Б. В. Условия теплового взрыва при вынужденной конвекции реагирующей смеси / Б. В. Новожилов, Н. Г. Самойленко, Г. Б. Манелис // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 49–54.
  9. Пивушков, А. В. Режимы воспламенения гетерогенных систем / А. В. Пивушков, Н. И. Перегудов, Н. Г. Самойленко // Химическая физика. 2005. Т. 24, № 2. С. 82–87.
  10. Буркина, Р. С. Очаговое тепловое воспламенение реакционноспособного газа в инертной пористой среде / Р. С. Буркина // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 41–48.
  11. Буркина, Р. С. Критические условия теплового взрыва пористого слоя / Р. С. Буркина, В. Г. Прокофьев // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 3. С. 50–60.
  12. Козначеев, И. А. К вопросу об иницировании очага горения в нефтенасыщенном пласте / И. А. Козначеев, К. В. Доброго // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 6. С. 1301–1309.
  13. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. М.: Наука, 1980. 478 с.
  14. 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.
- Поступила 10.10.2018 Подписана в печать 14.12.2018 Опубликована онлайн 30.01.2019

## REFERENCES

1. Sheinman A. B., Dubrovai K. K. (1934) *Underground Gasification of Oil Reservoirs and the Thermal Method of Oil Production*. Moscow, United Scientific Publishing House. 95 (in Russian).
2. Bokserman A. A. (2007) Thermo-Gas Method of Enhanced Oil Recovery. *Georesursy = 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, Novoe 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*, 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 (Preprint No 227, Institute for Problems in Mechanics) (in Russian).
8. Novozhilov B. V., Samoilenko N. G., Manelis G. B. (2005) Conditions of the Thermal Explosion under Forced Convection of a Reacting Mixture. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, (41) 5, 528–532. <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0066-3>.
9. Pivushkov A. V., Peregudov N. I., Samoilenko N. G. (2005) Ignition Modes of Heterogeneous Systems. *Khimicheskaya Fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*, 24 (2), 82–87 (in Russian).
10. Burkina R. S. (2005) Hot-Spot Ignition of a Reactive Gas in an Inert Porous Medium. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, (41) 5, 521–527. <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0065-4>.
11. Burkina R. S., Prokof'ev V. G. Critical Conditions of Thermal Explosion of a Porous Layer. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, (44) 3, 291–299. <https://doi.org/10.1007/s10573-008-0037-6>.
12. Koznacheev I. A., Dobrego K. V. 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. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0964-2>.
13. Zel'dovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. (1980) *Mathematical Theory of Combustion and Explosion*. Moscow, Nauka Publ. 478 (in Russian).
14. 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).

Received: 10 October 2018 Accepted: 14 December 2018 Published online: 30 January 2019