

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНУТРИПЛАСТОВОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ЗАКАЧКЕ ВОЗДУХА В ПЛАСТ

© Э. Р. Якупова<sup>1,2\*</sup>, Е. В. Сельгинова<sup>1,2</sup>, Д. Ф. Марьин<sup>1,2</sup>, А. А. Мусин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем,  
Башкирский государственный университет  
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

<sup>2</sup>Центр Сколтех по добыче углеводородов, Сколковский институт науки и технологий  
Россия, 143025 дер. Сколково, ул. Новая, д.100.

Тел.: +7 (347) 229 97 25.

\*Email: elmira.r.yakupova@gmail.com

Приведены результаты численного исследования задачи внутрипластового горения с применением комплексного подхода, который заключается в добавлении в математическую модель дополнительных соотношений для предварительного анализа термохимических параметров нефти согласно ее составу. Для численной реализации решения задачи о распространении очага горения используется метод контрольных объемов. Температура, насыщенности, концентрации компонентов рассчитываются по явной схеме, давление – по неявной. В статье приведены численные результаты моделирования процесса внутрипластового горения для разных параметров окисляемости нефти. Показана динамика развития процесса самовоспламенения нефти в зависимости от свойств нефти.

**Ключевые слова:** внутрипластовое горение, фильтрация, физико-химические превращения, математическое моделирование.

### Введение

Существуют различные способы повышения показателя нефтеотдачи пласта с трудноизвлекаемой нефтью: воздействие теплом, заводнение с использованием поверхностно-активных веществ, микробиологический метод, гидравлический разрыв пласта и др. [1].

В настоящей работе рассматривается метод внутрипластового горения, который является одним из тепловых способов увеличения нефтеотдачи пласта. Использование данного метода позволяет довести коэффициент извлечения нефти до 80% [2]. Существенным преимуществом метода является то, что тепло, необходимое для прогрева пласта, генерируется внутри пористой среды на фронте горения за счет сгорания самых тяжелых, практически неизвлекаемых фракций нефти [3]. Внутрипластовое горение представляет собой сложный процесс неизотермической многофазной многокомпонентной фильтрации флюидов с физико-химическими превращениями требующий применения комплексных подходов к исследованиям с привлечением методов из областей знаний физики, химии и математики.

Данная работа посвящена численному исследованию задачи внутрипластового горения с применением комплексного подхода, который заключается в добавлении в математическую модель дополнительных соотношений для предварительного анализа термохимических параметров нефти согласно ее составу.

### Постановка задачи

Рассмотрим одномерную задачу о распространении очага внутрипластового горения в условиях неизотермической трехфазной фильтрации с фазовыми переходами и химическими реакциями в недеформируемой пористой среде (рис. 1).

Однодавленческая однопотемпературная математическая модель процесса, базирующаяся на модели Готфрида [4], включает в себя уравнения массового баланса фаз (1) и компонентов (2), уравнение баланса энергии (3)–(4) и основывается на следующих допущениях: жидкие фазы несжимаемы; газовая фаза сжимаема и описывается уравнением состояния совер-

шенного газа; газ состоит из водяного пара, кислорода и инертного газа; газовые компоненты в нефти и воде не растворяются; процесс протекает в адиабатических условиях, т. е. теплообмен с окружающей средой не учитывается.

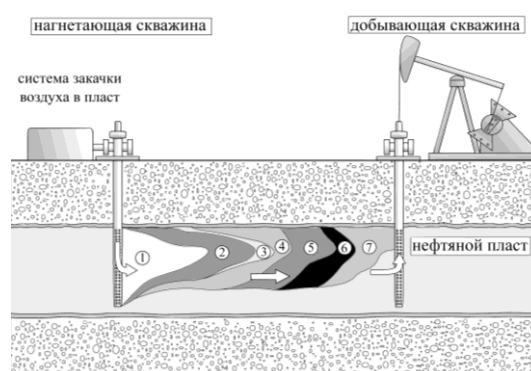


Рис. 1. Схема распространения очага внутрипластового горения при закачке воздуха: 1 – закачиваемый воздух, 2 – воздух и пар, 3 – зона горения, 4 – зона парообразования, 5 – зона конденсации и горячей воды, 6 – нефтяной вал, 7 – инертный газ.

$$\phi \frac{\partial \rho_i S_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_i \frac{K k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - J_i \quad (1)$$

$$\phi \frac{\partial \rho_3 C_{3k} S_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_3 C_{3k} \frac{K k_3}{\mu_3} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + J_{3k} \quad (2)$$

$$C_* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_* \frac{\partial T}{\partial x} \right) - V_* \frac{\partial T}{\partial x} + J_1(Q_1 - \eta_{31} Q_2) - J_2 Q_2 \quad (3)$$

$$V_* = - \sum_{i=1}^3 \left( \rho_i c_i \frac{K k_i (S_i)}{\mu_i} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} S_i(x, 0) &= S_i^0; & C_{ik}(x, 0) &= C_{ik}^0; \\ p(x, 0) &= p^0; & T(x, 0) &= T^0. \end{aligned} \quad (5)$$

Граничные условия:

$$S_i(0, t) = S_i^{in}; \quad C_{ik}(0, t) = C_{ik}^{in};$$

$$G_3^{in} = -\frac{\rho_3 K k_3 A}{\mu_3} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0, t}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, t} = 0; \quad p(L, t) = P^{out}; \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L, t} = 0$$

Здесь  $i=1, 2, 3$  – индекс, определяющий нефть, воду, газ, соответственно;  $k=1, 2, 3$  – водяной пар, кислород, инертный газ;  $\rho_i, S_i, C_{3k}$  – плотность, насыщенность, концентрация;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $k_i, K$  – относительная и абсолютная проницаемости;  $\mu_i$  – вязкость  $i$ -ой фазы;  $L$  – длина рассматриваемой области;  $\phi$  – пористость;  $\eta_{31}$  – стехиометрический (массовый) коэффициент по пару;  $Q_1$  – удельная теплота реакции горения;  $Q_2$  – удельная теплота испарения воды;  $\lambda^*$  – теплопроводность насыщенной пористой среды;  $C^*$  – объемная теплоемкость насыщенной пористой среды;  $V^*$  – эффективная мощность конвективного теплового потока;  $c_i$  – удельная теплоемкость  $i$ -ой фазы;  $J_i$  – скорость изменения массы фазы в единице объема среды;  $J_{3k}$  – скорость изменения массы газовых компонентов в единице объема среды;  $G_3^{in}$  – массовый расход воздуха;  $A$  – площадь поперечного сечения (в одномерном случае равна единице).

Фазовые проницаемости определяются следующим образом [5]:

$$k_1 = \left( \frac{S_1 - S_{1r}^*}{1 - S_{1r}^*} \right)^{2.8} (3.4 - 2.4S_1),$$

$$\text{при } S_1 > S_{1r}^*,$$

$$k_1 = 0, \quad \text{при } S_1 \leq S_{1r}^*;$$

$$k_2 = \left( \frac{S_2 - S_{2r}^*}{1 - S_{2r}^*} \right)^{3.5}, \quad \text{при } S_2 > S_{2r}^*,$$

$$k_2 = 0, \quad \text{при } S_2 \leq S_{2r}^*;$$

$$k_3 = \left( \frac{S_3 - S_{3r}^*}{1 - S_{3r}^*} \right)^{3.5} (4 - 3S_3), \quad \text{при } S_3 > S_{3r}^*,$$

$$k_3 = 0, \quad \text{при } S_3 \leq S_{3r}^*.$$

Здесь  $S_{1r}^*, S_{2r}^*, S_{3r}^*$  – остаточные нефте-, водо-, газонасыщенности.

Скорости изменения масс фазовых составляющих в единице объема среды определяются из выражений:

$$J_{31} = \eta_{31} J_1 + J_2, \quad J_{32} = -\eta_{32} J_1, \quad J_{33} = -\eta_{33} J_1,$$

$$J_1 = \phi A_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) M_1 \left(\frac{\rho_1}{M_1}\right)^n S_1^n (p_{32})^m,$$

$$J_2 = a(p_s(T) - p_{31}),$$

$$J_3 = -(J_1 + J_2).$$

Здесь  $\eta_{32}$  – стехиометрический (массовый) коэффициент по кислороду;  $\eta_{33}$  – стехиометрический (массовый) коэффициент по углекислому газу;  $A_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_A$  – энергия активации реакции окисления;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M_1$  – молярная масса нефти;  $p_{31}, p_{32}$  – парциальные давления водяного пара и кислорода, соответственно;  $n$

– порядок реакции по топливу;  $m$  – порядок реакции по окислителю;  $p_s(T)$  – давление насыщенных паров воды, которое зависит от температуры;  $a$  – эмпирический коэффициент.

В систему уравнений математической модели входят такие параметры как стехиометрические коэффициенты, теплотворная способность топлива (теплота горения), численные значения которых зависят от состава топлива и условий протекания реакции. Для их вычисления воспользуемся выражениями приведенными в работе [6]. В общем случае химическая формула для горения углеводородного остатка в процессе внутрислового горения имеет вид:

$$C_n H_{F_{H/C}} + \left( \frac{2 + \beta}{2(1 + \beta)} + \frac{F_{H/C}}{4} \right) O_2 =$$

$$= \frac{1}{1 + \beta} CO_2 + \frac{\beta}{1 + \beta} CO + \frac{F_{H/C}}{2} H_2O, \quad (7)$$

где  $F_{H/C}$  – отношение числа атомов водорода (H) к числу атомов углерода (C) в углеводородном остатке,  $\beta$  – отношение окиси углерода (CO) к углекислому газу (CO<sub>2</sub>) в продуктах сгорания.

В данной работе рассматривается случай полного горения, при котором коэффициент  $\beta$  равен нулю. Следовательно, стехиометрические коэффициенты по кислороду и водяному пару будут выглядеть следующим образом:

$$\eta_{31} = \frac{9F_{H/C}}{(12 + F_{H/C})}, \quad (8)$$

$$\eta_{32} = \left( 1 + \frac{F_{H/C}}{4} \right) \frac{32}{(12 + F_{H/C})}. \quad (9)$$

С помощью стехиометрических коэффициентов уравнения горения (7) рассчитывается высшая теплотворная способность топлива:

$$Q_1 = 4186.8 \left( \frac{265.7 + 197.85\beta}{(1 + \beta)(12 + F_{H/C})} + \frac{31.175F_{H/C} - 171.7}{12 + F_{H/C}} \right) \quad (10)$$

Таким образом, зная отношение числа атомов водорода H к числу атомов углерода C в углеводородном остатке из формул (8)–(10) могут быть рассчитаны значения параметров  $\eta_{31}, \eta_{32}$  и  $Q_1$ .

### Результаты численных расчетов

Система уравнений (1)–(4) с граничными и начальными условиями (5)–(6) решается численно с дискретизацией уравнений методом контрольного объема [7]. При интегрировании по времени системы уравнений трехфазной фильтрации используется IMPES-метод [8].

На основе выбранного численного метода решения рассчитывается формирование полей давления, температуры, насыщенностей (нефти, воды и газа), концентраций компонентов (кислород, водяной пар и инертный газ). Временной шаг выбирается в зависимости от шага по пространству, исходя из условия Куранга-Фридрихса-Леви. В расчетах используются следующие параметры: шаг дискретизации по пространству  $\Delta x=0.01$  м,  $\phi=0.19$ ,  $G_3^{in}=0.9323$  кг/с,  $K=0.2 \times 10^{-12}$  м<sup>2</sup>,  $S_{1r}^*=0.03$ ,  $T^0=350$  К,  $p^0=21$  МПа,  $P^{out}=21$  МПа,  $L=40$  м,  $\rho_1=970$  кг/м<sup>3</sup>. Отношение числа атомов водорода H к числу атомов углерода C в углеводородном

остатке  $F_{HC}=1.66$  [9]. Расчеты проводились при различных параметрах окисляемости нефти с целью изучения возможности самовоспламенения нефти в пластовых условиях. Подобные исследования необходимы для успешного применения технологии закачки воздуха в пласт, которая в первую очередь определяется характеристиками химической реакции окисления компонентов нефтей.

Кислород, содержащийся в закачиваемом в пласт воздухе, вступает в реакцию окисления с пластовой нефтью, температура пласта повышается, что приводит к изменению его термодинамического состояния. На рис. 2 приведены кривые распределения нефте-, водо- и газонасыщенности в пласте в момент времени 40 суток после начала закачки воздуха в пласт. Видно, что при данных параметрах математической модели происходит полное выгорание нефти за фронтом горения (сплошная линия на рис. 2) и эта область полностью занята газовой фазой (штрихпунктирная линия на рис. 2), что подчеркивает образование характерных для процесса внутрипластового горения зон 1 и 2 на рис. 1. Вода в области повышенной температуры переходит в паровую фазу (сплошная линия на рис. 3) и конденсируется перед фронтом горения, образуя зону повышенной водонасыщенности (пунктирная линия на рис. 2). Данные процессы связаны с формированием в пласте зон 3, 4 и 5, приведенных на рис. 1. Образование нефтяного вала (зона 6 на рис. 1) впереди фронта вытеснения на рис. 2 не наблюдается, т.к. в настоящую математическую модель не заложена зависимость вязкости нефти от температуры. Процесс горения протекает с полным потреблением кислорода в зоне реакции (пунктирная линия на рис. 3), поэтому в газовой фазе перед фронтом горения содержатся только водяной пар и инертный газ. На расстоянии 15 м от точки нагнетания воздуха весь водяной пар конденсируется (сплошная линия на рис. 3), далее начинается зона фильтрации инертного газа, соответствующая зоне 7 на рис. 1. Распределение давления в пласте в моменты времени 10, 20 и 40 суток приведены на рис. 4. По качественному поведению кривых можно проследить динамику формирования и эволюции зон характерных для процесса внутрипластового горения. В частности, в полностью газонасыщенной области наблюдается выполаживание кривых, а области до и после фронта вытеснения характеризуются линейным распределением давления.

На рис. 5 представлена динамика температуры в зоне горения для нефтей с различными параметрами окисляемости. Видно, что температура в зоне горения со временем увеличивается. Ввиду отсутствия потерь тепла в кровлю и подошву пласта температура стремится к своему адиабатическому максимуму, который, главным образом, определяется количеством выгоревшей нефти и ее теплотворной способностью. Кривые 1, 2 и 3 на рис. 5 после 20 суток непрерывной закачки воздуха в пласт практически сливаются. При этом можно утверждать, что в условиях рассматриваемой задачи для нефтей с энергией активации ниже 102 кДж/моль процесс внутрипластового горения будет протекать практически в одинаковых условиях. Дальнейшее, хоть и незначительное (менее чем на 2%) увеличение энергии активации нефти ведет к существенным изменениям в динамике температуры на фронте горения, что главным образом является следствием кинетики Аррениуса (кривые 4, 5 и 6 на рис. 5). Уже при энергии активации выше 108 кДж/моль процесс самовоспламенения нефти в рассматриваемых условиях за промежуток времени 40 суток не происходит. В

этом случае возникает необходимость иницирования процесса внутрипластового горения путем подвода теплоты при помощи забойного электронагревателя, окислительных реакций или газовой горелки.

### Заключение

В работе приведены результаты численного решения одномерной задачи о распространении очага внутрипластового горения в условиях неизоотермической трехфазной фильтрации с фазовыми переходами

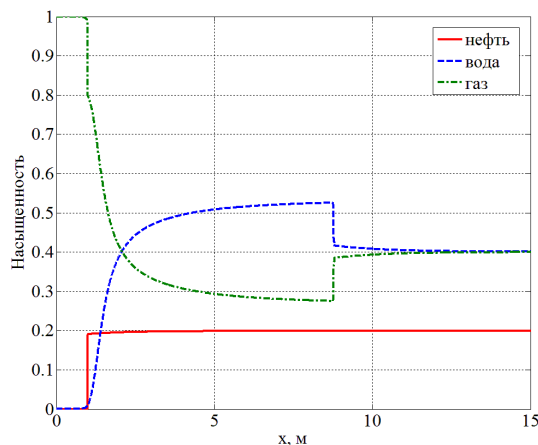


Рис. 2. Распределение нефте-, водо- и газонасыщенности в пласте в момент времени 40 суток.

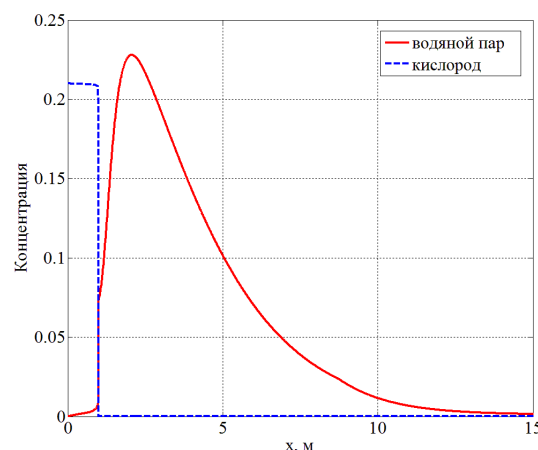


Рис. 3. Распределение концентрации пара и кислорода в пласте в момент времени 40 суток.

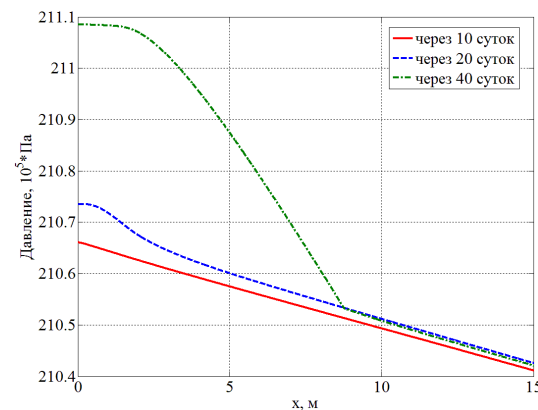


Рис. 4. Распределение давления в пласте в различные моменты времени.

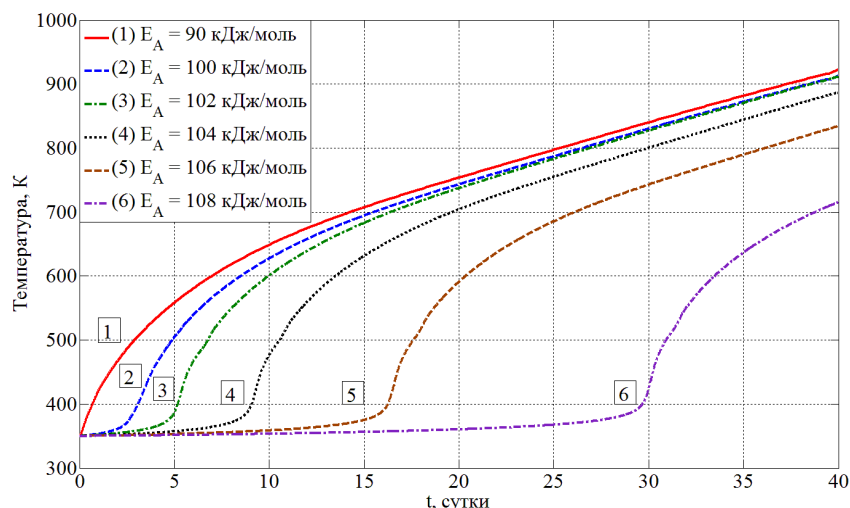


Рис. 5. Динамика температуры в зоне горения для нефтей с разными параметрами окисляемости.

и химическими реакциями. Расчеты проведены при различных параметрах окисляемости нефти. Показано, что при рассмотренных в работе условиях для нефти с энергией активации выше 108 кДж/моль для реализации внутрипластового горения необходимо его инициирование в призабойной зоне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов Ю. А., Храмов Р. А., Боксерман А. А., Грайфер В. И., Байбаков Н. К., Хавкин А. Я. Концепция программы преодоления падения нефтеотдачи / Под ред. А. А. Боксермана // Госдума РФ, 2006. С. 144.
2. Максимов В. М. О современном состоянии нефтедобычи, коэффициенты извлечения нефти и методах увеличения нефтеотдачи // Бурение и нефть. 2011. №02. С. 12–16
3. Богданов И. И. Численное моделирование возникновения и распространения очага внутрипластового горения: дис. ... канд. ф.-м. наук. Москва, 1983 г. С. 123.
4. Gottfried B. S. A mathematical model of thermal oil recovery in linear systems // Society of Petroleum Engineers Journal. 1965. Vol. 5. pp. 196–210.
5. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостехиздат, 1963. С. 396.
6. Burger J. G., Sahuquet B. C. Chemical aspects of in-situ combustion – heat of combustion and kinetics // Society of Petroleum Engineers Journal. Transactions, AIME. 1972. Vol. 253. 12(5). pp. 410–422.
7. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М., Энергоатомиздат, 1984. С. 152.
8. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. С. 416.
9. Hascakir B., Kovscek A. Analysis of In-Situ Combustion Performance in Heterogeneous Media // Society of Petroleum Engineers Heavy Oil Conference-Canada. 10–12 June 2014. Alberta, Canada.

Поступила в редакцию 17.04.2015 г.

## NUMERICAL SIMULATION OF IN-SITU COMBUSTION PROCESS DURING INJECTION OF AIR

© E. R. Yakupova<sup>1,2\*</sup>, E. V. Seltikova<sup>1,2</sup>, D. F. Marin<sup>1,2</sup>, A. A. Musin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Center for Micro- and Nanoscale Dynamics of Dispersed Systems,  
Bashkir State University  
32 Zaki Validi St., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

<sup>2</sup>*Center for Hydrocarbon Recovery, Skolkovo Institute of Science and Technology  
100 Novaya St., 143025 Skolkovo, Russia.*

*Phone: +7 (347) 229 97 25.*

*\*Email: elmira.r.yakupova@gmail.com*

The results of numerical studies of the in-situ combustion problem with an integrated approach are given. This approach involves addition of supplemental relations to a mathematical model for a preliminary analysis of thermochemical parameters of oil according to oil composition. Finite-volume method is used for a numerical solution of a combustion zone propagation problem. Temperature, saturation, concentration of components are calculated by an explicit scheme, pressure – by an implicit scheme. In this work, we presented results of numerical simulation of the in-situ combustion process for different parameters of oil oxidation. The dynamics of an oil self-ignition process depending on oil properties is shown.

**Keywords:** *in-situ combustion, filtration, physical and chemical changes, mathematical modeling.*

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at [bulletin\\_bsu@mail.ru](mailto:bulletin_bsu@mail.ru) if you need translation of the article.

### REFERENCES

1. Spiridonov Yu. A., Khrarov R. A., Bokserman A. A., Graifer V. I., Baibakov N. K., Khavkin A. Ya. Gosduma RF, 2006. Pp. 144.
2. Maksimov V. M. Burenie i nef't'. 2011. No. 02. Pp. 12–16
3. Bogdanov I. I. Chislennoe modelirovanie vozniknoveniya i rasprostraneniya ochaga vnutriplastovogo goreniya: dis. ... kand. f.-m. nauk. Moscow: 1983 g. Pp. 123.
4. Gottfried B. S. Society of Petroleum Engineers Journal. 1965. Vol. 5. pp. 196–210.
5. Charnyi I. A. Podzemnaya gidrogazodinamika [Underground liquid and gas dynamics]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1963. Pp. 396.
6. Burger J. G., Sahuquet B. C. Society of Petroleum Engineers Journal. Transactions, AIIME. 1972. Vol. 253. 12(5). pp. 410–422.
7. Patankar S. V. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics]: Per. s angl. M., Energoatomizdat, 1984, Pp. 152.
8. Aziz Kh., Settari E. Matematicheskoe modelirovanie plastovykh system [Mathematical modeling of reservoir systems]. Moskva–Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2004. Pp. 416.
9. Hascakir B., Kovscek A. Society of Petroleum Engineers Heavy Oil Conference–Canada. 10–12 June 2014. Alberta, Canada.

*Received 17.04.2015.*