

УДК 622.236; 622.276.6

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ
ПРИ ОБРАБОТКЕ СКВАЖИН РАСТВОРАМИ БИНАРНЫХ
СМЕСЕЙ**

**NUMERICAL MODELING OF THERMAL EFFECTS IN WELL
PROCESSING BY SOLVENT BINARY MIXTURES**

Варавва А. И., Вершинин В. Е.

**Тюменский государственный университет,
г. Тюмень, Российская Федерация**

A. I. Varavva, V. E. Vershinin

Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

e-mail: v.e.vershinin@utmn.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы эффективности метода повышения продуктивности скважин при их обработке водными растворами бинарных смесей. После закачки раствора в пласт инициируется экзотермическая реакция взаимодействия между компонентами бинарной смеси, сопровождающаяся выделением газов. Воздействие на призабойную зону нефтяных скважин разогретых продуктов химической реакции является комбинированным и сводится к трем явлениям: разогреву породы и находящейся в ней нефти; очистке призабойной зоны от парафинов, смол и кольматирующих отложений; расширению системы естественных трещин и появлению искусственных трещин. В результате обработки возле скважины формируются две области: повышенной проводимости и повышенной температуры, где снижается вязкость нефти. Размеры областей могут не совпадать. Каждая область вносит свой вклад в увеличение продуктивности скважины. В

работе методами математического и численного моделирования исследуются процессы теплового воздействия продуктов химической реакции на пласт и оценивается прирост дебита скважины за счет снижения вязкости нефти. Предложена математическая модель процесса реагирования компонентов бинарной смеси, их фильтрации и влияния на пластовую систему. Численное решение задачи осуществлено на базе открытой интегрируемой платформы OpenFOAM. Приведены результаты численного моделирования процесса реагирования бинарной смеси и последующей добычи нефти из прогретого пласта. Получены оценки роста температуры и размеров области прогрева при протекании экзотермической химической реакции в поровом пространстве, а также ожидаемого прироста добычи нефти и продолжительности эффекта. Исследованы случаи различных концентраций активных веществ. Показана высокая экономическая эффективность метода по тепловым эффектам прироста добычи.

Abstract. The article discusses the effectiveness of the method to increase the productivity of wells when they are treated with aqueous solutions of binary mixtures. After injection of the solution into the formation, an exothermic reaction of interaction between the components of the binary mixture accompanied by the evolution of gases is initiated. The impact on the bottomhole zone of oil wells of heated chemical reaction products is combined and reduces to three phenomena: the warming of the rock and the oil in it; cleaning of the bottomhole zone from paraffins, resins and colmatizing sediments; expansion of natural cracks and the appearance of artificial cracks. As a result of the treatment near the well, two regions are formed: with increased conductivity and high temperature (where the viscosity of the oil decreases). The sizes of the areas may not coincide. Each region contributes to an increase in the productivity of the well. In the work by methods of mathematical and numerical modeling, the processes of thermal effect of chemical reaction products to the formation are investigated and the increase in the flow rate of the well is estimated due to the decrease in the viscosity of oil. A mathematical

model of the reacting process for a binary mixture in a porous media, its filtrations and influence on a reservoir system is proposed. The numerical solution of the problem was carried out on the basis of the OpenFOAM open integrated platform. The results of numerical modeling of the reaction process of a binary mixture and the subsequent extraction of oil from a heated reservoir are presented. Estimates of the temperature increase and the size of the heating region during the exothermic chemical reaction in the pore space, as well as the expected increase in oil production and the duration of the effect were obtained. The cases of different concentration of active substances are investigated. The high economic efficiency of the method for increment well production is shown

Ключевые слова: термогазохимическое воздействие, бинарные смеси, методы интенсификации добычи нефти, численное моделирование, OpenFOAM.

Key words: thermo-chemical gas impact, binary mixes, methods of oil production intensification, numerical computation, OpenFOAM.

В последнее время в связи с истощением запасов легкой нефти все большее внимание уделяется развитию методов разработки месторождений высоковязких нефтей и битумов. В настоящий момент разработка большинства данных запасов углеводородов является нерентабельной или низко рентабельной. Для повышения рентабельности разработки таких месторождений необходимо применение и совершенствование технологий добычи высоковязких нефтей. Одним из перспективных является метод термогазохимического воздействия на пласт раствором бинарных смесей. В результате химической реакции, протекающей в поровом пространстве вблизи скважины, выделяются газ и тепло. После обработки прискважинной зоны бинарными смесями вследствие нагревания снижается вязкость нефти, устраняется кольматация, вымываются загрязнения и парафины. В результате силового

воздействия на пласт газообразных продуктов реакции увеличивается естественная трещиноватость карбонатных коллекторов [1-4].

В работах [1-4] предлагается обрабатывать призабойную зону пласта химически активной бинарной смесью, основным компонентом которой является водный раствор двух солей – нитрита натрия ($NaNO_2$) и нитрата аммония (NH_4NO_3). В пласте между компонентами бинарной смеси инициируется экзотермическая реакция



Скорость химической реакции (1) можно регулировать добавлением в закачиваемую смесь инициаторов и ингибиторов реакции [1] и тем самым добиваться оптимального режима реагирования.

В данной работе предложена математическая модель процесса термобарического воздействия продуктов реакции на пластовую систему. На ее основе производится численное исследование степени прогрева призабойной зоны и последующей добычи нефти. Для различных пластовых условий оцениваются радиус и величина прогрева, допустимый объем закачки бинарной смеси, ожидаемый прирост дебита скважин после обработки, связанный со снижением вязкости нефти при нагревании.

Основные уравнения

В данной работе за основу взята математическая модель закачки в нефтяной пласт энерговывделяющей бинарной смеси [5]. При этом используются следующие допущения: пористость скелета m постоянная, локальная температура T всех фаз и твердой породы одинакова между собой. Локальное давление p во всех фазах одинаково.

В процессе закачки и последующего реагирования можно выделить четыре фазы, существенно различающиеся по свойствам. Твердый скелет породы, участвующий только в тепловом обмене, обозначим как нулевую фазу. В тепломассопереносе участвуют три подвижные фазы. Первая фаза

представляет собой многокомпонентный водный раствор исходных реагентов и продуктов реакции. Исходные вещества и часть продуктов реакции в воде диссоциируют на ионы. Считаем, что водный раствор содержит 5 компонент: 0 - чистая вода (H_2O), 1 - NH_4^+ , 2 - NO_3^- , 3 - Na^+ , 4 - NO_2^- . Вторая фаза – подвижная нефть, третья фаза – выделяющийся в ходе химической реакции (1) газ (азот). Характеристики фаз и компонент в дальнейшем индексируются в соответствии с указанной нумерацией.

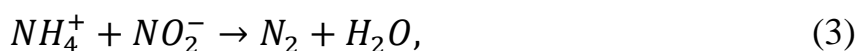
Уравнения сохранения массы фаз и компонентов, уравнения движения в форме закона Дарси и уравнения сохранения энергии имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (ms_1 C_{1k} \rho_1) + \nabla \cdot (C_{1k} \rho_1 \mathbf{u}_1) &= J_{1k}, \\ \frac{\partial}{\partial t} (ms_2 \rho_2) + \nabla \cdot (\rho_2 \mathbf{u}_2) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (ms_3 \rho_3) + \nabla \cdot (\rho_3 \mathbf{u}_3) &= J_3, \\ \mathbf{u}_i &= -\frac{kk_i}{\mu_i} \nabla p, \quad i=1,2,3 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[(1-m)c_0 \rho_0 T + \sum_{i=1}^3 ms_i \rho_i c_i T - ms_3 p \right] + \nabla \cdot \sum_{i=1}^3 \rho_i c_i T \mathbf{u}_i + \\ + \nabla \cdot \sum_{i=1}^2 p \mathbf{u}_i &= \kappa \nabla^2 T + J_3 L_3 \\ \sum_{i=1}^3 s_i &= 1, \quad \sum_{k=0}^4 C_{1k} = 1. \end{aligned} \tag{2}$$

где s_i - доля порового пространства, занятая i -фазой; C_{1k} - массовая концентрация k -го компонента в водном растворе; \vec{u}_i - скорость фильтрации i -й фазы; ρ_i, μ_i - плотность и вязкость i -й фазы; J_{ik} - скорость образования (расходования) массы вещества в единице объема среды в результате химической реакции; k - абсолютная проницаемость; k_i - фазовая проницаемость; m - пористость; p - давление; T - температура;

c_i – коэффициент удельной теплоемкости i -й фазы ; L_3 – теплота реакции, отнесенная к единице массы выделившегося в ходе реакции газа; коэффициент теплопроводности среды κ близок к соответствующему значению для твердого скелета $\kappa = \kappa_0$.

Для расчета массообмена между фазами и компонентами необходимо учитывать кинетику химической реакции (1). Поскольку в растворе фактически идет реакция между нитрит-ионом и аммоний-ионом:



то можно допустить, что химическая реакция (1) – реакция второго порядка. Тогда интенсивность реакции, отнесенная к единице объема бинарной смеси,

$$j = k[C_{11}][C_{14}], \quad (4)$$

где $[C_{1k}] = C_{1k}\rho_1/M_{1k}$ – мольная концентрация k -го компонента в растворе.

Стехиометрические коэффициенты реакции определяют скорость образования продуктов реакции:

$$\begin{aligned} j_{11} &= j_{14} = -j, \\ j_{12} &= j_{13} = 0, \\ j_{10} &= 2j, \\ j_3 &= j. \end{aligned} \quad (5)$$

Скорость образования массы компонентов в ходе реакции:

$$\begin{aligned} J_{1k} &= j_{1k}M_{1k} s_1 m, \\ J_3 &= j_3M_3 s_1 m. \end{aligned} \quad (6)$$

Теплота реакции Q , приходящаяся на 1 моль исходных реагентов, связана с L_3 соотношением:

$$Q_r = L_3M_3. \quad (7)$$

Анализ экспериментальных данных, приведенных в работе [6], позволил оценить константы реакции в законе Аррениуса $k_0 = 5.9 \cdot 10^9 \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$; $E = 77 \text{ кДж}$.

Порода и водный раствор приняты несжимаемыми. Нефтяная фаза представляет собой слабосжимаемую среду.

Выделяющийся в ходе реакции азот подчиняется уравнению

$$\rho_3 = \frac{pM_3}{ZRT}, \quad (8)$$

где Z – коэффициент сверхсжимаемости. Зависимость вязкости нефти от температуры в расчетах задавалась по зависимости Льюиса и Скуайера [8]:

$$\mu_2^{-0.2661} = \mu_{20}^{-0.2661} + \frac{T-T_0}{233}, \quad (9)$$

где μ_{20} – вязкость нефти при температуре T_0 . Вязкость газа и вязкость водного раствора приближенно принимались постоянными:

Относительные фазовые проницаемости задавались в виде, приведенном в работе [7],

$$k_1 = s_1^2, k_3 = s_3^2, k_2 = \frac{s_1(1-s_1)^2 + s_3(1-s_3)^2}{s_1 + s_3}. \quad (10)$$

Описание расчетов

Описанная выше система уравнений решалась численно с использованием открытой интегрируемой платформы для численного моделирования OpenFOAM. Для оценки эффективности обработки призабойной зоны пласта бинарной смесью была проведена серия расчетов.

Во-первых, проводились расчеты, в которых рассматривалась закачка бинарной смеси в нефтяной пласт через вертикальную скважину. В проведенных расчетах варьировались следующие параметры: скорость закачки (0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4 т/сут) и концентрация бинарной смеси (50 %, 60 %, 70 %). Используемые константы приведены в таблице 1. Рассматривался однородный пласт с проницаемостью 100 мД и вязкостью

нефти 100 сП. Все численные значения закачки и последующей добычи приведены в пересчете на 1 м продуктивного пласта.

Таблица 1. Константы, используемые в расчетах

Пластовое давление, бар		100
Пластовая температура, К		300
Пористость, д.ед.		0,2
Теплопроводность породы, Вт/м/К		1,8
Показатели степени модели Кори-Брукса		2
Вязкость, сП	<i>бинарная смесь</i>	1
	<i>газ</i>	0,01
Плотность (пл.у.), кг/м³	<i>нефть</i>	850
	<i>бинарная смесь (концентрации 0,5 / 0,6 / 0,7)</i>	1290 / 1370 / 1450
	<i>газ</i>	1,149
Теплоемкость, кДж/кг	<i>нефть</i>	2000
	<i>бинарная смесь</i>	3000
	<i>газ</i>	1300
	<i>порода</i>	1000

Темп закачки бинарной смеси в пласт в расчете принимался постоянным. Температура закачиваемого флюида равнялась 30 °С, что отвечает условиям химической стабильности раствора. Наличие в бинарной смеси инициатора позволяет запускать реакцию при попадании раствора непосредственно в поровое пространство. При этом момент начала реагирования может быть сдвинут на несколько часов, что позволяет безопасно закачать большее количество раствора. В данной работе принималось, что раствор начинает реагировать сразу при попадании в пласт. Этот случай является предельным и соответствует высокой концентрации инициатора. Химическая реакция бинарной смеси повышает температуру и давление в прискважинной зоне уже в процессе закачки. При достижении пороговой температуры будет наблюдаться взрывной рост скорости химической реакции (1) и температуры вблизи скважины [6]. В этом случае возможны скачок давления и заброс горячих

продуктов реакции в ствол скважины, что может быть небезопасно. Поэтому, в соответствии с технологическим регламентом, этап закачки в этот момент должен быть завершен. В проведенных расчетах закачка проводилась до достижения температуры пласта 100 °С, а затем прекращалась. Объем закачки в таком случае ограничивался только этим фактором. Давление на забое в процессе закачки ограничивалось значением 300 атм, что дает ограничение по темпам закачки 4 т/сут на 1 м.

Для оценки прироста добычи нефти в результате нагрева пласта были проведены дополнительные расчеты. Условия работы скважины, забойное и пластовое деление до и после обработки предполагались постоянными.

Результаты расчетов

Время достижения температуры 100 °С в ходе закачки бинарной смеси в пласт практически не зависит от приемистости скважины, так как соблюдается баланс между охлаждением пласта вследствие закачки холодной жидкости и нагревом пласта вследствие химической реакции между компонентами закачиваемого раствора (рисунок 1). Как было отмечено выше, при достижении температуры 100 °С закачка прекращается. Для бинарной смеси низкой концентрации можно проводить более длительную закачку за счет более медленного нагрева породы и содержащейся в ней нефти. Для закачки требуемых объемов высококонцентрированных растворов потребуется увеличить темп закачки. Для рассматриваемых пластовых условий предельно допустимое время закачки составило порядка 10 ч для бинарной смеси концентрации 70 % и 25 ч для бинарной смеси концентрации 50 %. После остановки закачки температура пласта и содержащейся в нем нефти продолжает повышаться до тех пор, пока все закачанные химически активные компоненты не прореагируют. В рассматриваемом случае температура стабилизируется примерно через 60 ч после обработки.

Прирост добычи нефти в результате нагрева пласта зависит от концентрации бинарной смеси и объема закачки. В рассматриваемом случае при обработке бинарной смеси концентрации 50 % дополнительная добыча нефти в пересчете на 1 т закачанных реагентов составила 34 м^3 , для бинарной смеси концентрации 70 % – 38 м^3 (рисунок 2). Для более концентрированных бинарных смесей сильнее прогревается зона вблизи скважины. При этом закачка при равных скоростях продлится меньше времени и обрабатываемый объем пласта будет меньше. При фиксированном темпе закачки бинарной смеси 4 т/сут на 1 м пласта, при концентрации раствора 50 % радиус прогрева составляет 9 м и максимальная температура равна 390 К, для случая концентрации 70 % радиус прогрева – 5 м и максимальная температура – 420 К (рисунок 3). Профиль прогрева оптимален для снижения фильтрационного сопротивления в окрестности скважины. В первые сутки после обработки дебит нефти составляет $4 \text{ м}^3/\text{сут}$ в первом случае и $5 \text{ м}^3/\text{сут}$ во втором (рисунок 4). Дополнительная добыча нефти с 1 м пласта за первый год работы скважины составляет 150 м^3 при обработке раствором концентрации 50 % и 75 м^3 при обработке раствором концентрации 70 %. Таким образом, в случае наличия ограничений на скорость закачки для повышения эффективности нагрева пласта предпочтительнее использовать менее концентрированные бинарные смеси.

Удельная эффективность обработки скважины бинарной смесью на 1 т закачанных реагентов практически не изменяется при увеличении объемов закачки (рисунок 2), т.е. дополнительная добыча нефти практически линейно растет с увеличением объемов закачиваемой бинарной смеси. При этом она максимальна для более концентрированных растворов. Наибольший эффект от обработки скважины будет достигаться при закачке максимально возможных объемов бинарной смеси с высокой концентрацией. Наличие ограничений по времени закачки означает, что при использовании высококонцентрированных растворов для достижения высокой эффективности требуется вести закачку на высоких скоростях.

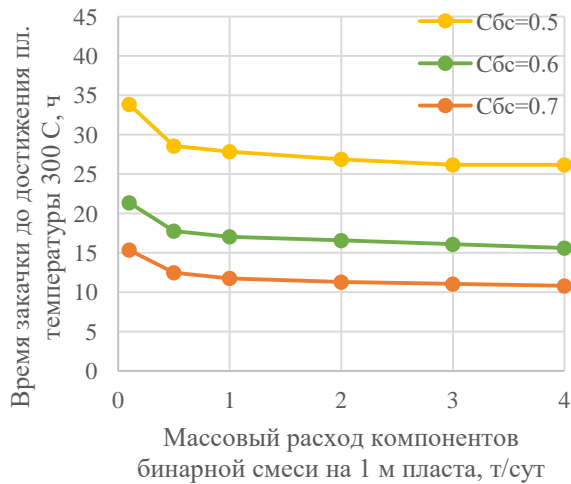


Рисунок 1. Время достижения температуры 100 °С в ходе закачки бинарной смеси

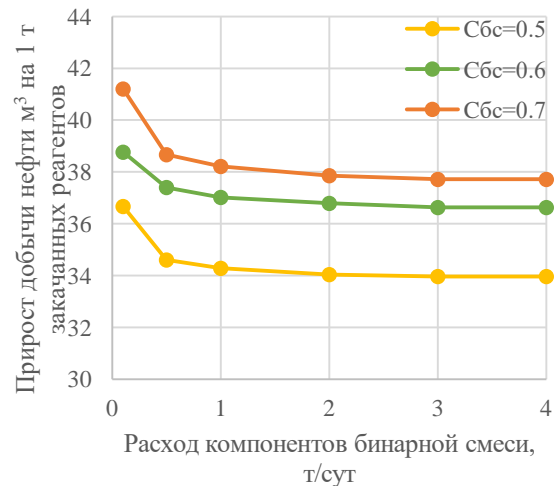


Рисунок 2. Удельная эффективность обработки бинарной смесью

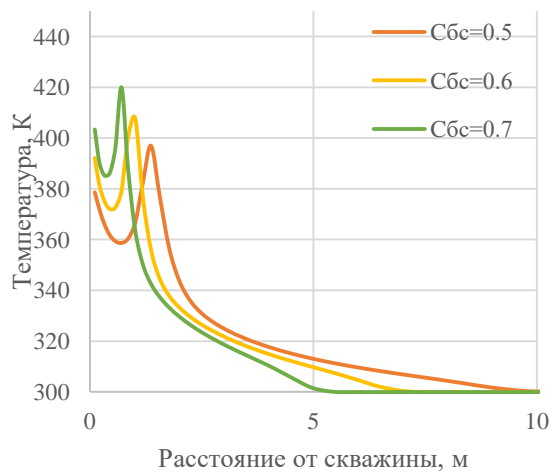


Рисунок 3. Распределение температуры в пласте после окончания химической реакции. Расход компонентов бинарной смеси 4 т/сут на 1 м пласта

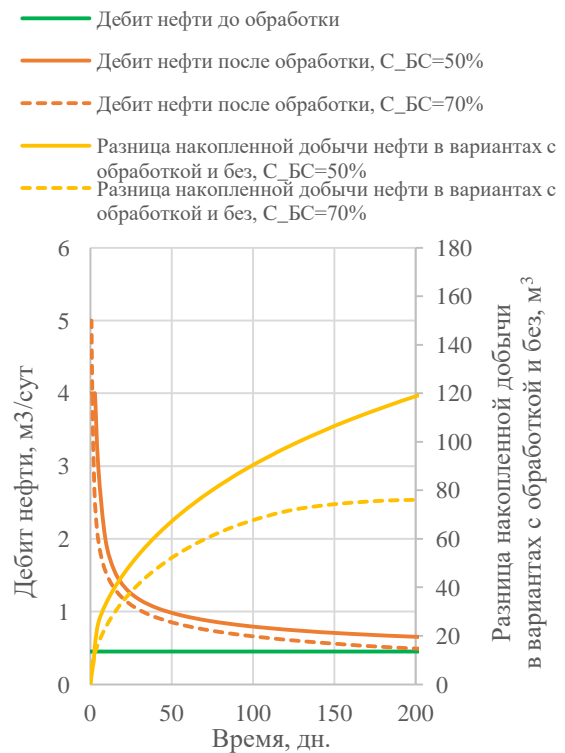


Рисунок 4. Расчётный эффект от обработки скважины бинарной смесью. Расход компонентов бинарной смеси 4 т/сут на 1 м пласта

Ввиду невысокой стоимости реагентов обработка окупит капитальные затраты, если ее удельная эффективность выше $6 \text{ м}^3/\text{т}$, что справедливо для всех рассматриваемых условий. Экономический эффект от обработки будет определяться не столько капитальными затратами на покупку химически активных реагентов, сколько операционными затратами, связанными с подготовительными мероприятиями и осуществлением закачки.

Эффективность метода можно существенно повысить, если отсрочить момент начала реакции. Это позволит повысить объем закачанных реагентов. В работе [4] приведены результаты экспериментов, в которых время задержки реакции составляет 180 мин.

Выводы

С помощью предложенной математической и численной модели процесса реагирования и фильтрации компонентов бинарной смеси проведено моделирование теплового воздействия продуктов реакции на пластовую систему. При использованных допущениях радиус зоны прогрева достигает 5 м, а профиль температурного поля в призабойной зоне после прогрева оптимален для повышения продуктивности скважины за счет снижения вязкости нефти. Удельная величина дополнительно добытой нефти составляет 38 м^3 на 1 т закачанного раствора бинарной смеси. Для стандартных закачек 40 т общий объем дополнительной добычи составит 1520 м^3 нефти. Длительность теплового эффекта порядка 200 сут. Полученные оценки теплового воздействия на пласт комбинированного метода обработки скважин раствором бинарной смеси позволяют сделать вывод о его высоком потенциале применения на месторождениях высоковязкой нефти.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации проекта по Постановлению

Правительства № 218 от 9 апреля 2010 г., по договору № 02. G 25.31.0180 АО «Сибнефтемаш» совместно с ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

Список используемых источников

1 Термогазохимический состав и способ применения для обработки призабойной и удаленной зоны продуктивного пласта / В. Б. Заволжский, В. А. Бурко, А. Р. Идиятуллин, Б. Н. Басюк, С. И. Валешный, В. А. Соснин, Т. А. Демина, В. П. Ильин, В. А. Кашаев, Ф. Л. Садриев: пат. 2525386с2 Рос. Федерация. № 2012150375/03; заявл. 26.11.12; опубл. 10.08.14. Бюл. № 22. 13 с.

2 Александров Е. Н., Кузнецов Н. М. Широкомасштабное нагревание нефтеносного пласта и оптимизация режима добычи жидких углеводородов // Каротажник. 2007. № 4. С. 113-127.

3 Александров Е. Н., Александров П. Е., Кузнецов Н. М., Лунин В. В., Леменовский Д. А., Рафиков Р. С., Чертенков М. В., Ширяев П. А., Петров А. Л., Лиджи-Горяев В. Ю. Высокотемпературный режим реакции бинарных смесей и стимулирование добычи на обводненных месторождениях // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 4. С. 312-320.

4 Вершинин В. Е., Вершинина М. В., Заволжский В. Б., Ганькин Ю. А., Идиятуллин Р. А., Соснин В. А., Зимин А. С., Лищук А. Н. Кинетика химических реакций при термогазохимическом воздействии на призабойную зону водными растворами бинарных смесей // Нефтяное хозяйство. 2016. № 12. С. 114-117.

5 Татосов А. В., Варавва А. И. Модель подачи реагирующей бинарной смеси в пласт // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 4. С. 195-200.

6 Вершинин В., Федоров К., Ганькин Ю., Кириченко А. Способы управления процессом трещинообразования в результате горения взрывчатых веществ для интенсификации добычи // SPE-187691-RU.

7 Федоров К. М., Шарафутдинов Р. Ф. К теории неизотермической фильтрации с фазовыми переходами // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 5. С. 78-85.

8 Viswanth D. S., Ghosh T. K., Prasad D. H. L., Dutt N. V. K., Rani K. Y. Viscosity of Liquids. Theory, Estimation, Experiment, and Data. Dordrecht, The Netherlands: Springer. 2007. 667 p.

References

1 Termogazokhimicheskii sostav i sposob primeneniya dlya obrabotki prizaboinoi i udalenoii zony produktivnogo plasta / V. B. Zavolzhskii, V. A. Burko, A. R. Idiyatullin, B. N. Basyuk, S. I. Valeshnii, V. A. Sosnin, T. A. Demina, V. P. Il'in, V. A. Kashaev, F. L. Sadriev: pat. 2525386s2 Ros. Federatsiya. № 2012150375/03; zayavl. 26.11.12; opubl. 10.08.14. Byul. № 22. 13 s. [in Russian].

2 Aleksandrov E. N., Kuznetsov N. M. Shirokomasshtabnoe nagrevanie neftenosnogo plasta i optimizatsiya rezhima dobychi zhidkikh uglevodorodov // Karotazhnik. 2007. № 4. S. 113-127. [in Russian].

3 Aleksandrov E. N., Aleksandrov P. E., Kuznetsov N. M., Lunin V. V., Lemenovskii D. A., Rafikov R. S., Chertenkov M. V., Shiryaev P. A., Petrov A. L., Lidzhi-Goryaev V. Yu. Vysokotemperaturnyi rezhim reaktsii binarnykh smesei i stimulirovanie dobychi na obvodnennykh mestorozhdeniyakh // Neftekhimiya. 2013. T. 53. № 4. S. 312-320. [in Russian].

4 Vershinin V. E., Vershinina M. V., Zavolzhskii V. B., Gan'kin Yu. A., Idiyatullin R. A., Sosnin V. A., Zimin A. S., Lishchuk A. N. Kinetika khimicheskikh reaktsii pri termogazokhimicheskom vozdeistvii na prizaboinuyu zonu vodnymi rastvorami binarnykh smesei // Neftyanoie khozyaistvo. 2016. № 12. С. 114-117. [in Russian].

5 Tatosov A. V., Varavva A. I. Model' podachi reagiruyushchei binarnoi smesi v plast // Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya. 2017. № 4. S. 195-200. [in Russian].

6 Vershinin V., Fedorov K., Gan'kin Yu., Kirichenko A. Sposoby upravleniya protsessom treshchinoobrazovaniya v rezul'tate goreniya vzryvchatykh veshchestv dlya intensivatsii dobychi // SPE-187691-RU. [in Russian].

7 Fedorov K. M., Sharafutdinov R. F. K teorii neizotermicheskoi fil'tratsii s fazovymi perekhodami // Izv. AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza. 1989. № 5. S. 78-85. [in Russian].

8 Viswanth D. S., Ghosh T. K., Prasad D. H. L., Dutt N. V. K., Rani K. Y. Viscosity of Liquids. Theory, Estimation, Experiment, and Data. Dordrecht, The Netherlands: Springer. 2007. 667 p.

Сведения об авторах

About the authors

Варавва А. И., аспирант кафедры математического моделирования, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень, Российская Федерация

A. I. Varavva, Post-Graduate Student of Mathematical Modeling Department, FSAEI HE «Tyumen State University», Tyumen, Russian Federation

e-mail: artevar@yandex.ru

Вершинин В. Е., старший преподаватель кафедры моделирования физических процессов и систем, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень, Российская Федерация

V. E. Vershinin, Senior Lecturer of Modeling of Physical Processes and Systems Department, FSAEI HE «Tyumen State University», Tyumen, Russian Federation

e-mail: v.e.vershinin@utmn.ru