

ISSN: 2411-7978
e-ISSN: 2500-3526

ВЕСТНИК

ТЮМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

НЕФТЬ, ГАЗ, ЭНЕРГЕТИКА

2016. Том 2. № 2

Журнал основан в 1998 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-60410 выдано 29 декабря 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

А. Б. Шабаров, д. т. н., проф.

Заместители главного редактора:

А. А. Губайдуллин, д. ф.-м. н., проф.; *А. А. Захаров*, д. т. н., проф.;
В. Н. Кутрунов, д. ф.-м. н., проф.; *А. А. Кислицын*, д. ф.-м. н., проф.

Контактная информация:

Объединенная редакция
научных журналов «Вестник ТюмГУ»
625003 г. Тюмень ул. Республики, 9, каб. 100
vestnik-energy-r@utmn.ru
☎ (3452) 59-74-32

Подписка на печатную версию журнала:
Каталог Российской прессы (индекс 31915)

Журнал выходит 4 раза в год

Прим статей:

vestnik-energy-r@utmn.ru

Информация для авторов:

<http://vestnik.utmn.ru>

Электронный вариант журнала
находится в открытом доступе:

<http://www.e-library.ru>

<http://vestnik.utmn.ru>

Учредить:

ФГ АОУ ВО «Тюменский
государственный университет»

Contact information:

The united editorial staff of scientific journals
“Tyumen State University Herald”
of. 100, 9 Respubliki St.,
Tyumen, 625003, Russia
vestnik-energy-r@utmn.ru
☎ (3452) 59-74-32

Subscription to the printed edition of the journal:
No 31915 in the Russian Post catalogue

The journal is released 4 times a year

To send your articles or for any requests contact:

vestnik-energy-r@utmn.ru

<http://vestnik.utmn.ru>

E-version of the journal can be accessed at:

<http://www.e-library.ru>

<http://vestnik.utmn.ru>

© Вестник Тюменского государственного университета
Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2016
(Вестник Тюменского государственного университета, 1998-2014)
<http://vak.ed.gov.ru/87>



ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
1930

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Баутин Сергей Петрович	доктор физико-математических наук, член NYAS и РНКТМ, профессор кафедры высшей и прикладной математики УрГУПС (Екатеринбург)
Бровка Георгий Леонидович	доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории упругости МГУ (Москва)
Вакулин Александр Анатольевич	доктор технических наук, профессор кафедры механики многофазных систем ТюмГУ
Гумеров Нанть Асгатович	доктор физико-математических наук, директор ЦМНДДС БашГУ, научный руководитель Лаборатории ММиИС, профессор UMIACS (США)
Гуров Валерий Игнатьевич	доктор технических наук, профессор, начальник сектора ЦИАМ (Москва)
Гуз Александр Константинович	доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического анализа, декан факультета компьютерных наук и заведующий кафедрой кибернетики ОмГУ (Омск)
Добронец Борис Станиславович	доктор физико-математических наук, профессор кафедры систем искусственного интеллекта СФУ (Красноярск)
Коспюченко Сергей Владимирович	доктор технических наук, старший эксперт ООО «ТНЦ»
Леждин Сергей Иванович	доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИТ СО РАН (Новосибирск)
Луна-Елизаррарас Мария Елена	доктор, профессор кафедры физики и математики Национального политехнического университета (Мехика)
Массель Людмила Васильевна	доктор технических наук, профессор, член-корреспондент МАИ, заведующий кафедрой автоматизированных систем ИРНИТУ, заведующий лабораторией информационных технологий в энергетике ИСЭМ СО РАН (Иркутск)
Новиков Евгений Александрович	доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВМиМГ СО РАН, заведующий кафедрой математического обеспечения дискретных устройств и систем СФУ (Красноярск)
Степанов Олег Андреевич	доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики ТИУ

Стрекалов Александр Владимирович	доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений ТИУ
Татосов Алексей Викторович	доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой математического моделирования ТюмГУ
Удовиченко Сергей Юрьевич	доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанотехнологий, руководитель НОЦ Нанотехнологии ТюмГУ
Шapiro Майкл В.	доктор, профессор кафедры физики и математики Национального политехнического университета (Мексика)
Шорников Юрий Владимирович	доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления НГТУ (Новосибирск)
Ягов Виктор Владимирович	доктор технических наук, профессор кафедры инженерной теплофизики МЭИ (Москва)
Игошкин Дмитрий Евгеньевич	кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ТФ ИТПФ СО РАН, доцент кафедры механики многофазных систем и кафедры математического моделирования ТюмГУ — ответственный секретарь

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- | | |
|---------------------------------|---|
| Вараксин Алексей Юрьевич | доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделением ОИВТ РАН, заведующий кафедрой МГУ, член-корреспондент РАН (Москва) |
| Губайдуллин Амир Анварович | доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики многофазных систем ТюмГУ, директор ТФ ИТПМ СО РАН |
| Губайдуллин Дамир Анварович | доктор физико-математических наук, профессор, директор ИММ КазНЦ РАН, член-корреспондент РАН (Казань) |
| Захаров Александр Анатольевич | доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности ТюмГУ |
| Зыонг Нгок Хай | доктор физико-математических наук, профессор, вице-президент ВАНТ (Вьетнам) |
| Ивашко Александр Григорьевич | доктор технических наук, профессор, директор ИМКН ТюмГУ, проректор по информационным технологиям ТюмГУ |
| Кислицын Анатолий Александрович | доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики многофазных систем, заведующий кафедрой микро- и нанотехнологий ТюмГУ |
| Кутрунов Владимир Николаевич | доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой алгебры и математической логики ТюмГУ |
| Нигматулин Роберт Искандерович | доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой газовой и волновой динамики МГУ, академик РАН (Москва) |
| Фомин Василий Михайлович | доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель ИТПМ СО РАН, заместитель председателя СО РАН, академик РАН (Новосибирск) |
| Шайдуров Владимир Владимирович | доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН (Красноярск) |

TYUMEN STATE UNIVERSITY

HERALD

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING.
OIL, GAS, ENERGY
2016. Vol. 2. No 2

The journal was founded in 1988

The certificate of registration PI No FS77-60410 issued on December 29th by RF Press Committee

EDITOR-IN-CHIEF:

A. B. Shabarov, Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editors-in-Chief:

A. A. Gubaidullin, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.; *A. A. Zakharov*, Dr. Sci. (Tech.), Prof.;
V. N. Kutrunov, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.; *A. A. Kisilitsyn*, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.

EDITORIAL BOARD

S. P. Baurin, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (Yekaterinburg)
G. L. Brovko, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (Moscow)
S. V. Kostyuchenko, Dr. Sci. (Tech.)
A. A. Vaktulin, Dr. Sci. (Tech.), Prof.
N. A. Gumerov, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (USA)
V. I. Gurov, Dr. Sci. (Tech.), Prof. (Moscow)
A. K. Guts, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (Omsk)
B. S. Dobronets, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (Krasnoyarsk)
S. I. Lezhnin, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (Novosibirsk)
L. V. Massel, Dr. Sci. (Tech.), Prof. (Irkutsk)
E. A. Novikov, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (Krasnoyarsk)
Maria Elena Luna-Elizarrarás, Dr. Prof., Instituto Politécnico Nacional (Mexico)
O. A. Stepanov, Dr. Sci. (Tech.), Prof.
A. V. Strelkalov, Dr. Sci. (Tech.), Prof.
A. V. Tatosov, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.
S. Yu. Udovichenko, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.
M. V. Shapiro, Dr., Prof., Instituto Politécnico Nacional (Mexico)
Ilu. V. Schornikov, Dr. Sci. (Tech.), Prof. (Novosibirsk)
V. V. Yagov, Dr. Sci. (Tech.), Prof. (Moscow)
D. Ye. Igoshin, Cand. Sci. (Phys-Math) — executive Secretary

EDITORIAL COUNCIL

A. Yu. Varaksin, Dr. Sci. (Phys-Math), RAS corr. member (Moscow)
A. A. Gubaidullin, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.
D. A. Gubaidullin, Dr. Sci. (Phys-Math), RAS corr. member (Kazan)
A. A. Zakharov, Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Duong Ngoc Hai, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof. (Vietnam)
A. G. Ivashko, Dr. Sci. (Tech.), Prof.
A. A. Kisilitsyn, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.
V. N. Kutrunov, Dr. Sci. (Phys-Math), Prof.
R. I. Nigmatulin, Dr. Sci. (Phys-Math), RAS academician (Moscow)
V. M. Fomin, Dr. Sci. (Phys-Math), RAS academician (Novosibirsk)
V. V. Shaidurov, Dr. Sci. (Phys-Math), RAS corr. member (Krasnoyarsk)

© Tyumen State University Herald.
Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2016
(Tyumen State University Herald, 1998-2014)
<http://mak.ed.gov.ru/87>



TYUMEN STATE UNIVERSITY

В НОМЕРЕ:

ТЕПЛОФИЗИКА И
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
ТЕПЛОТЕХНИКА

Тюльков А. Т., Гильмиев Д. Р.
Моделирование процессов
фильтрации при разработке
подгазовых зон методом
экранирования газовой шапки
посредством закачки полимерного
раствора10

Столповский М. В., Щеглова Е. П.
О нагреве пористой среды
при образовании
газовых гидратов23

Чекардовский М. Н.,
Михайлов П. Ю., Шалагин И. Ю.
Параметры теплообмена
в наружных стеновых конструкциях
каркасно-щитового типа36

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ,
ГАЗА И ПЛАЗМЫ

Шабаров А. Б., Шаталов А. В.
Потери давления при течении
водонефтяной смеси
в поровых каналах50

Родионов С. П.,
Боталов А. Ю.,
Легостаев Д. Ю.
Моделирование процесса
двухфазной фильтрации
с учетом воздействия
периодической нагрузки73

Тарасов В. В.
Расчет времени
истечения идеального газа
из резервуара постоянного
объема в среду с постоянным
давлением при адиабатическом
процессе84

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ
И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ.
ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Литневский А. Л.

Аппроксимация
зависимости скорости деления
возбужденных ядер от времени
гладкой функцией96

Губайдуллин А. А., Игошин Д. Е.,
Хромова Н. А.

Обобщение подхода Козени
к определению проницаемости
модельных пористых сред
из твердых шаровых сегментов105

Самсонов К. Ю., Шевелев А. П.

Методика определения
технических параметров
ограничения водопритока121

CONTENTS

THERMAL PHYSICS
AND THERMOLOGY

- Andrey T. Tyul'kov,
Denis R. Gilmiev
Modeling of Filtration
in the Development
of Under-Gas Area Using the Method
of Screening Gas Cap by Injecting
the Polymer Solution 10
- Maxim V. Stolpovskii,
Ekaterina P. Scheglova
On Heating the Porous Media
Under Gas Hydrates Formation 23
- Mikhail N. Chekardovskiy,
Pavel Yu. Mikhailov,
Igor Yu. Shalagin
Parameters of Heat Transfer
in the Exterior Wall Structures
of Frame-Panel Type 36

FLUID, PLAZMA,
AND GAS MECHANICS

- Aleksandr B. Shabarov,
Aleksandr V. Shatalov
Pressure Drops in Water-Oil
Mixture Flow in Porous Channels 50
- Sergey P. Rodionov,
Andrei Yu. Botalov,
Dmitry Yu. Legostaev
Simulation of Two-Phase Filtration
Considering the Effect
of the Periodic Load 73
- Vadim V. Tarasov
Calculation of the Ideal Gas
Outflow Time from the Reservoir
of Constant Volume
into the Environment with a Constant
Pressure at an Adiabatic Process 84

**MATHEMATICAL MODELING,
NUMERICAL METHODS
AND SOFTWARE SYSTEMS.
INFORMATION TECHNOLOGIES**

Andrey L. Litnevsky

The Approximation
of the Time Dependence
of Excited Nuclei Fission Rate
on the Smooth Function 96

Amir A. Gubaidullin,
Dmitriy Ye. Igoshin,
Nadezhda A. Khromova

The Generalization
of the Kozeny Approach
to Determining the Permeability
of the Model Porous Media
Made of Solid Spherical Segments 105

Kirill Yu. Samsonov,
Aleksandr P. Shevelev

Method For Determining
the Technical Parameters
of Water Restrictions 121

Кирилл Юрьевич САМСОНОВ¹
Александр Павлович ШЕВЕЛЕВ²

УДК 532

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОДОПРИТОКА

¹ студент 1 курса магистратуры,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
sams-kirill@yandex.ru

² кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры моделирования
физических процессов и систем,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
alexandershevelov@mail.ru

Аннотация

В представленной работе рассматривается построение математической модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет адсорбции растворенного вещества в воде.

Цель исследования заключается в рассмотрении изменения поведения пористости пласта и водонасыщенности. Для достижения данной цели работа строилась в три этапа. Первый этап заключался в решении уравнения Баклея–Левретта методом контрольного объема. Также в это уравнение была добавлена модель, учитывающая одновременно коагуляцию (оседание частиц) и суффозию (вымывание частиц) пористого скелета. Вторым этапом являлось написание программного кода для данной численной модели. Заключительным этапом исследования являлось проведение расчета, и на основе

Цитирование: Самсонов К. Ю. Методика определения технических параметров ограничения водопритока / К. Ю. Самсонов, А. П. Шевелев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 2. С. 121–130.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

полученных результатов были построены тестовые графики. Такая модель актуальна для прогнозирования темпов добычи трудно извлекаемых запасов нефти в пластах с ярко выраженной неоднородностью и может быть применима не только в нефтегазовой сфере деятельности — в частности, определение срока службы бытовых фильтров также является задачей фильтрации с учетом изменения пористого скелета фильтрующего элемента и позволяет более точно прогнозировать срок его службы.

Методическую основу данной статьи составили труды отечественных (К. С. Басниев, А. М. Власов, И. Н. Кочин, В. М. Максимов, Н. Е. Леонтьев, В. П. Захаров, Т. А. Исмагилов, А. Г. Телин, М. А. Силин) и зарубежных ученых (Ю-Шу Ву, Карстен Пруесс, З. К. Чен, Тормод Э. Йохансен, Лесли Э. Джеймс, Лю Сяолун).

Ключевые слова

Водоприток, уравнение Баклея–Левретта, метод контрольного объема, кольматация, суффозия.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

В связи с проектированием и анализом нефтяных и газовых месторождений приходится исследовать совместное течение в пористой среде нескольких жидкостей, таких как вода, нефть и газ, которые представляют собой не смешивающиеся обособленные фазы. В Западной Сибири чаще всего встречаются многослойные неоднородные пласты. В процессе их эксплуатации происходит обводнение высокопродуктивного пласта, которое приводит к циркуляции нагнетаемой воды. Тем самым в других пластах-коллекторах нефть остается не извлеченной или добывается, но медленно. Решением данной проблемы является ограничение притока вод, т. е. выведение обводненного коллектора из разработки.

Применяемые технологии ограничения водопритока подразделяются на селективные и неселективные. Неселективными называются методы, использующие материалы, которые независимо от насыщенности среды нефтью, водой и газом образуют экран, не разрушающийся со временем в пластовых условиях [3]. Основная их цель — точное выделение обводненного интервала и исключение проницаемости продуктивной нефтенасыщенной части пласта. В основном для этих целей используют цементы, пеноцементы, полимерцементы и технические устройства типа разбуриваемых пакеров и перекрывающих устройств.

Селективные методы — это методы, использующие материалы, которые закачивают во всю перфорированную часть пласта, при этом образующийся осадок увеличивает фильтрационное сопротивление только в водонасыщенной части пласта, не затрагивая нефтяную ее часть [3]. Селективное воздействие реагентов основывается на различии физико-химических свойств пластовых жидкостей, а также и в особенности от геологического строения продуктивного пласта.

Целью данной работы являлось создание математической модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет абсорбции растворенного вещества в воде. Стоит отметить, что изучением влияния порогового характера процессов вымывания или отложения частиц при движении реагента в пористой среде на структуру фронтов пористости занимался Н. Е. Леонтьев.

Для построения математической модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды решалась плоская задача фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости в неоднородном пласте. Жидкости предполагались несмешивающимися (взаимно нерастворимыми), отсутствовали фазовые переходы, температура и скорость потока постоянные. Концентрация частиц была достаточно мала, так что скорость частиц совпадала со скоростью жидкости, а также не учитывались гравитационные и капиллярные силы. В процессе вытеснения образуется зона совместного течения водяной и нефтяной фаз. Введем следующие обозначения: m — пористость, д. е.; $k_w(S)$, $k_o(S)$ — относительные фазовые проницаемости по воде и нефти соответственно, д. е.; S — водонасыщенность, д. е.; w — скорость потока, м/с; $f(S)$ — функция Баклея-Лeverетта, д. е.; t — время, с; Δt — изменение по времени, с; x — координата, м; Δx — ширина половинного контрольного объема, м; γ_1 , γ_2 — коэффициент суффозии и кольтмации соответственно, д. е.; $\text{grad } P$ — депрессия, Па/м; c — концентрация, д. е.; c_0 — некоторая постоянная, при которой происходит задержка частиц на скелете, д. е.; G — некоторое значение градиента давления, при котором начинается суффозия, Па/м; η_w , η_o — динамическая вязкость воды и нефти соответственно, Па*с; w_w , w_o — скорость водяной и нефтяной фазы соответственно, м/с; $k(m)$ — проницаемость пористого скелета, м².

Описание фильтрации малоконцентрированных суспензий в рамках механики сплошных сред основано на использовании системы (1), состоящей из уравнений баланса массы частиц суспензий и несущей жидкости, закона Дарси и уравнения, задающего кинетику отложения или срыва частиц [5: 73].

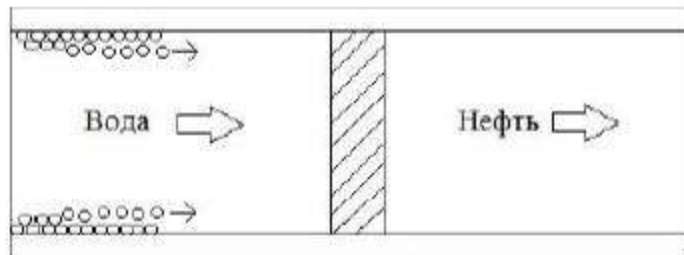


Рис. 1. Схема «поршневого» [2] вытеснения нефти водой с учетом кольтмационных и суффозийных процессов

Fig. 1. The scheme of the «pumping» oil displacement by water based on colmatation and suffusion processes

$$\begin{cases} \frac{\partial(mc)}{\partial t} + \text{div}(cw) = \frac{\partial(m)}{\partial t}, \\ \frac{\partial(1-c)m}{\partial t} + \text{div}((1-c)w) = 0, \\ w = -\frac{k(m)}{\mu} \text{grad}P, \\ \frac{\partial(m)}{\partial t} = f(m, c, |\text{grad}P|). \end{cases} \quad (1)$$

Стоит отметить, что уравнения, описывающие оседание частиц на скелет, чаще всего принимают в виде релаксационной модели [5: 73]. Таким образом, скорость оседания частиц на скелет, с одной стороны, возрастает, а с другой — убывает по мере приближения пористости к предельному значению.

Для одновременного учета колыматационных и суффозионных процессов Леонтьевым была предложена модель вида [5]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\gamma_1(m_0 - m)|\text{grad}P| - \gamma_2 cm, \quad \gamma_1, \gamma_2, m_0 = \text{const}. \quad (2)$$

где m_0 — пористость чистого скелета.

Первое слагаемое уравнения (2) в правой части отвечает росту интенсивности суффозии с увеличением локального градиента.

Модель, учитывающая пороговый характер колыматационных процессов, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(m)}{\partial t} = \begin{cases} -\gamma(m - m_{\text{кр}})(c - c_*) & \text{при } c \geq c_*, \\ 0 & \text{при } c < c_*. \end{cases} \quad (3)$$

Модель, учитывающая пороговый характер суффозионных процессов имеет вид

$$\frac{\partial(m)}{\partial t} = \begin{cases} \gamma_1(m_0 - m)(|\text{grad}P| - G) - \gamma_2 cm & \text{при } |\text{grad}P| > G, \\ -\gamma_2 cm & \text{при } |\text{grad}P| \leq G. \end{cases} \quad (4)$$

Задача двухфазной фильтрации без учета капиллярных сил основана на решении уравнения Баклея–Левретта. Для получения дискретного аналога модели расчета динамики фильтрационно-емкостных свойств пласта за счет колыматации и суффозии при «поршневом» вытеснении нефти водой использовался метод контрольного объема и численный метод интегрирования систем дифференциальных уравнений в частных производных.

Полагая $w = w_o + w_w = \text{const}$, а также используя закон фильтрации для каждой фазы, можно получить функцию распределения потоков фаз или функцию Баклея–Левретта [6: 125].

Данная функция характеризует долю каждой фазы в общем потоке и определяет полноту вытеснения и характер распределения насыщенности по пласту:

$$f(S) = \frac{\eta_o k_w(S)}{\eta_o k_w(S) + k_o(S)}, \quad \eta_o = \frac{\eta_w}{\eta_o}. \quad (5)$$

Одномерное дифференциальное уравнение в частных производных Баклея–Леверетта и его начальные и граничные условия имеют вид

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + w \frac{\partial f(S)}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$\text{Н.У.: } t = 0, S(x, 0) = \varphi(x), \quad x > 0,$$

$$\text{Г.У.: } x = 0, S(0, t) = \psi(t), \quad t > 0.$$

Первое условие означает, что в начальный момент времени в пласте имеется некоторое известное распределение насыщенности вытесняющей фазы (воды), описываемое по закону $\varphi(x)$. Второе условие означает, что в момент времени $t > 0$ в пласт закачивается вытесняющая жидкость, насыщенность которой меняется по закону $\psi(t)$ [2: 233].

Для нахождения дискретного аналога уравнения Баклея–Леверетта в [6] использовался интегральный закон сохранения массы, согласно которому данное уравнение имеет вид

$$S_i^{n+1} = S_i^n - \frac{w \Delta t}{m \Delta x} (f_{i+1/2}^n - f_{i-1/2}^n). \quad (7)$$

Для нахождения $f_{i+1/2}^n, f_{i-1/2}^n$ использовалась схема «против потока», согласно которой водонасыщенность S постоянна внутри каждого элемента и имеет значение, соответствующее конкретному узлу, лежащему внутри данного элемента, и функция Баклея–Леверетта $f(S)$ принимает значение, которое имеет жидкость выше по течению со стороны элемента [6: 130]:

$$\begin{cases} f_{i-1/2} = f_{i-1} \\ f_{i+1/2} = f_i \end{cases} \quad w > 0, \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_{i-1/2} = f_i \\ f_{i+1/2} = f_{i+1} \end{cases} \quad w < 0.$$

Дискретный аналог уравнения, описывающий кинетику оседания и срыва частиц, имеет вид

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*) + \gamma_1(m_0 - m_i^n)(|\text{grad } P| - G) - \gamma_2 c_i^n m_i^n) \Delta t, |\text{grad } P| > G \text{ и } c \geq c_*, \quad (9)$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2 c_i^n m_i^n - \gamma_1(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*)) \Delta t, |\text{grad } P| \leq G \text{ и } c \geq c_*,$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - \gamma_2 c_i^n m_i^n \Delta t, |\text{grad } P| \leq G \text{ и } c \leq c_*.$$

Учитывая (8), (9) и $w > 0$, а также линейную зависимость концентрации от водонасыщенности, был получен дискретный аналог модели процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет абсорбции растворенного вещества в воде, который имеет следующий вид:

$$S_i^{n+1} = S_i^n - \frac{w\Delta t}{m_i^n \Delta x} (f_i^n - f_{i-1}^n),$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*) + \gamma_1(m_0 - m_i^n)(|\text{grad } P| - G) - \gamma_2 c_i^n m_i^n) \Delta t, \quad (10)$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - (\gamma_2 c_i^n m_i^n - \gamma_1(m_i^n - m_{cr})(c_i^n - c_*)) \Delta t,$$

$$m_i^{n+1} = m_i^n - \gamma_2 c_i^n m_i^n \Delta t,$$

$$c_i^{n+1} = S_i^{n+1} c_i^n.$$

По результатам расчета данной модели были получены следующие зависимости.

На Рис. 2. представлена зависимость изменения водонасыщенности (в долях единиц) от координаты (в метрах). На нем видно, что с течением времени профиль вытеснения продвигается вдоль пласта. Скорость продвижения фронта составляет 2,4 м/сут. Также видно, что с ростом времени форма профиля размывается и стремится к линейно монотонной зависимости. Эволюцию фронта вытеснения можно объяснить, как с физической, так и с математической точек зрения. Первая объясняется различием в подвижностях нагнетаемой воды и нефти. Вторая точка зрения объясняется численной диффузией, т. е. с ростом числа математических операций даже при соблюдении условия устойчивости численного решения.

На Рис. 3. приведена зависимость пористости (в долях единиц) от времени (в сутках). Из графика видно, что с течением времени за счет адсорбции происходит оседание твердых частиц на скелет (кольматация), что закономерно изменяет пористость и как следствие проницаемость пористой среды. С ростом

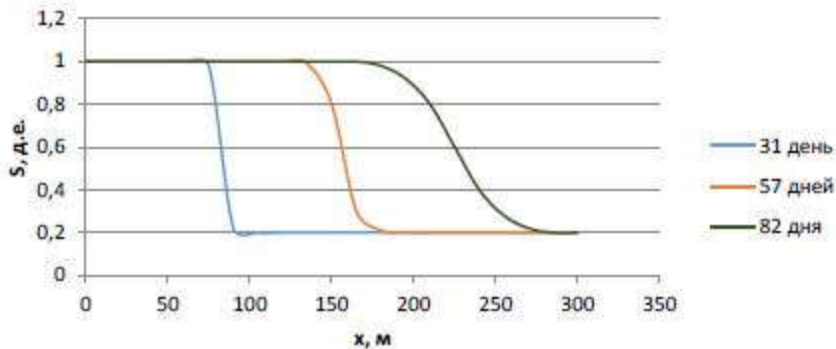


Рис. 2. Распределение водонасыщенности в различные моменты времени

Fig. 2. The distribution of water saturation at different times

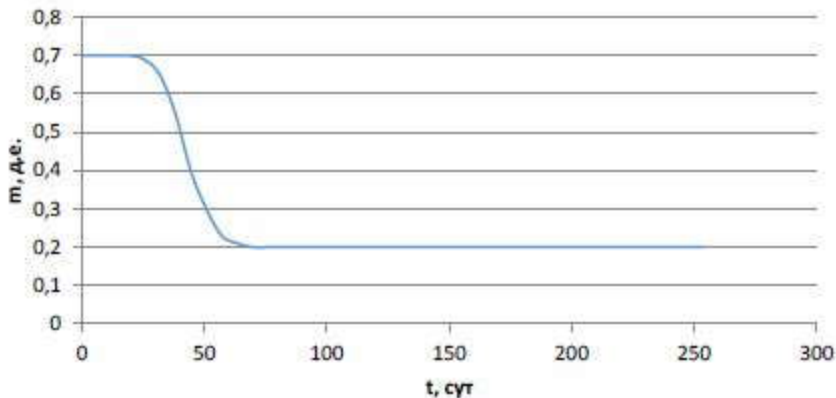


Рис. 3. Зависимость пористости от времени

Fig. 3. The dependence of porosity over time

времени и концентрации растворенного вещества с процессом коагуляции начинает конкурировать суффозия растворенного вещества, т. е. смыв осевших частиц потоком нагнетаемой воды.

С точки зрения теории в определенный момент времени оба конкурирующих процесса должны привести к выравниванию скорости абсорбции и скорости растворения абсорбции данного вещества, и кривая изменения пористости исследуемого образца должна выйти на стационарный участок при соблюдении условия неизменности градиента давления. Однако в силу ограниченности вычислительного времени данный участок кривой не моделировался.

Из Рис. 3 видно, что за интервал времени с 25 до 69 суток пористость образца изменилась с 0,7 до 0,2 д. е.

Таким образом, была построена математическая модель процесса вытеснения нефти водой с учетом изменения пористой среды за счет адсорбции растворенного вещества в воде. В ходе расчета были получены тестовые графики. Данная модель является инструментом для получения методики определения основных параметров ограничения притока вод за счет изменения порового скелета твердыми частицами суспензии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басниев К. С. Подземная гидравлика / К. С. Басниев, А. М. Власов, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1986. 303 с.
2. Басниев К. С. Подземная гидромеханика: Учебник для вузов / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Недра, 1993. 416 с.: ил.
3. Демакин С. А. Селективные методы изоляции водопритока в нефтяные скважины / С. А. Демакин, А. Г. Демакин. Саратов: Колледж, 2003. 164 с.: ил.

4. Захаров В. П. Нефтепромысловая химия. Регулирование фильтрационных потоков водонепроницаемыми технологиями при разработке нефтяных месторождений / В. П. Захаров, Т. А. Исмагилов, А. Г. Телин, М. А. Силин. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2010. 225 с.: ил.
5. Леонтьев Н. Е. О структуре фронта пористости при движении суспензии в пористой среде / Н. Е. Леонтьев // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2006. № 5.
6. Максимов М. М. Математическое моделирование процессов разработки нефтяных месторождений / М. М. Максимов, Л. П. Рыбickaя. М.: Недра, 1976. 264 с.
7. Deng L. Capillary Corrections to Buckley-Leverett Flow / L. Deng, M. J. King // SPE Conference Paper. 2015.
8. Johansen T. E. On the Buckley-Leverett Equation with Constant-Pressure Boundary Conditions / T. E. Johansen, L. A. James, L. Xiaolong // SPE Journal Paper. 2016.
9. Sethian J. A. Numerical Solution of the Buckley-Leverett Equations / J. A. Sethian, A. J. Chorin, Paul Concus // SPE Conference Paper. 1983.
10. Wu Y.-S. Buckley-Leverett Flow in Composite Porous Media / Y.-S. Wu, K. Pruess, Z. X. Chen // SPE Advanced Technology Series. 1993. Vol. 1. No 2.

Kirill Yu. SAMSONOV¹
Aleksandr P. SHEVELEV²

METHOD FOR DETERMINING THE TECHNICAL PARAMETERS OF WATER RESTRICTIONS

¹ Post-Graduate Student,
Institute of Physics and Technology,
Tyumen State University
sams-kirill@yandex.ru

² Cand. Sci. (Phys-Math.),
Associate Professor, Department
of Physical Processes and Systems Modeling,
Institute of Physics and Technology,
Tyumen State University
alexandershevelev@mail.ru

Abstract

The paper considers the construction of a mathematical model of the oil displacement by water process taking into account the changes in the porous medium due to the adsorption of the solute in the water. The purpose of the study is to examine the changes in the behavior of reservoir porosity and water saturation. To achieve this objective, the work has been built in three stages. The first stage consists in solving the Buckley–Leverett equation by the control volume method. Also a new model has been added into this equation, which took into account simultaneously the mudding (particles settling) and suffusion (particles washout) of the porous skeleton.

The second stage is the coding for this numerical model. The final stage of the study includes calculations, the results of which allowed building test graphics. Such a model is relevant for predicting the rate of extraction of hard recoverable oil reserves in reservoirs with pronounced heterogeneity, and it can be applied not only in the oil and gas sector activities — in particular, the determination of the service life of household filters as a filtering task with changes of the porous skeleton of the filter element allows more accurate predicting of its service life.

Citation: Samsonov K. Yu., Shevelev A. Sh. 2016. “Method for Determining the Technical Parameters of Water Restrictions”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 2, pp. 121–130.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

The methodological basis for this article can be found in the papers by K. S. Basniev, M. A. Vlasova, I. N. Kochina, V. M. Maksimov, N. E. Leontiev, V. P. Zakharov, T. A. Ismagilov, A. G. Thelin, M. A. Silin, Yu-Shu Wu, Karsten Pruess, Z. X. Chen, Thormod E. Johansen, Lesley A. James, Liu Xiaolong.

Keywords

Water influx, Buckley-Leverett equation, control volume method, mudding, suffusion.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-121-130

REFERENCES

1. Basniev K. S., Kochina I. N., Maksimov V. M. 1993. Podzemnaya gidromekhanika: Uchebnik dlya vuzov [Underground Fluid Mechanics: University Textbook]. Moscow: Nedra.
2. Basniev K. S., Vlasov A. M., Kochina I. N., Maksimov V. M. 1986. Podzemnaya gidravlika [Underground Hydraulics]. Moscow: Nedra.
3. Demakhin S. A., Demakhin A. G. 2003. Selektivnye metody izolyatsii vodopritoka v neftyanye skvazhiny [Selective Water Shutoff Techniques in Oil Wells]. Saratov: Kolledzh.
4. Deng L., King M. J. 2015. "Capillary Corrections to Buckley-Leverett Flow". Paper Presented at the SPE Conference.
5. Johansen T. E., James L. A., Xiaolong L. 2016. "On the Buckley-Leverett Equation with Constant-Pressure Boundary Conditions". SPE Journal Paper.
6. Leontyev N. E. 2006. "O strukture fronta poristosti pri dvizhenii suspenzii v poristoy srede" [On the Structure of the Front Suspension When Driving Porosity in a Porous Medium]. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika, no 5.
7. Maksimov M. M., Rybitskaya L. P. 1976. Matematicheskoe modelirovanie protsessov razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Mathematical Modeling of Oil Field Development]. Moscow: Nedra.
8. Sethian J. A., Chorin A. J., Concus P. 1983. "Numerical Solution of the Buckley-Leverett Equations". Paper Presented at the SPE Conference.
9. Wu Y.-S., Pruess K., Chen Z. X. 1993. "Buckley-Leverett Flow in Composite Porous Media". SPE Advanced Technology Series, vol. 1, no 2.
10. Zakharov V. P., Ismagilov T. A., Telin A. G., Silin M. A. 2010. Neftepromyslovaya khimiya regulirovanie filtratsionnykh potokov vodoizoliruyushchimi tekhnologiyami pri razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy [Oilfield Chemistry Regulating Filtration Flows Water Shutoff Technology in the Development of Oil Fields]. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas.