Ольга Александровна КУЗИНА[1]
Игорь Романович ПОТОЧНЯК[2]
Людмила Александровна ПУЛЬДАС[3]

УДК 532.546

ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПЕТРОФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА СОВМЕСТНО С ВОДОНЕФТЯНЫМИ ФЛЮИДАМИ*

[1] кандидат физико-математических наук, старший преподаватель
кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
o.a.kuzina@utmn.ru

[2] лаборант, лаборатория цифровых исследований
в нефтегазовой отрасли, научно-образовательный центр
развития научных компетенций,
Тюменский индустриальный университет;
ассистент кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
i.r.potochnyak@utmn.ru; ORCID: 0000-0002-4263-711X

[3] кандидат технических наук,
доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,
Тюменский индустриальный университет
puldasla@tyuiu.ru

* Статья подготовлена в рамках технологического проекта «Цифровой керн», реализуемого в Западно-Сибирском межрегиональном научно-образовательном центре мирового уровня.

Цитирование: Кузина О. А. Особенности модернизации петрофизического исследовательского комплекса для осуществления возможности фильтрации газа совместно с водонефтяными флюидами / О. А. Кузина, И. Р. Поточняк, Л. А. Пульдас // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 1 (29). С. 75-87.
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-75-87

© ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет

Аннотация

Выполнена серия работ по модернизации отечественного автоматизированного программно-измерительного комплекса ПИК-ОФП/ЭП-3, предназначенного для нахождения функций относительных фазовых проницаемостей при двухфазной фильтрации «нефть — вода», с целью оснащения его дополнительно способностью фильтрации газа совместно с двумя флюидами.

Создание программно-измерительного комплекса, позволяющего исследовать трехфазную фильтрацию, является актуальной задачей комплексного анализа месторождения. Выпускаемые промышленностью комплексы с возможностью трехфазной фильтрации имеют высокую стоимость. В связи с этим имеется необходимость в создании конструктивно простого и малозатратного способа осуществления фильтрации газа, чему и посвящена данная работа.

С целью осуществления фильтрации газа в программно-измерительном комплексе в участок, предназначенный для создания пластового давления, вмонтирована промежуточная емкость из нержавеющей стали. Таким образом, часть газа с баллона идет на регулятор противодавления, тем самым формируя пластовое давление, и часть отводится в промежуточную емкость. Для регулировки расхода газа вмонтирован регулятор давления. В данном варианте подвод газа осуществляется непосредственно на торец кернодержателя параллельно с водонефтяной магистралью, таким образом флюиды и газ непосредственно смешиваются в теле кернодержателя.

Проведены методические опыты по фильтрации газожидкостной смеси с последующим определением объемного расхода газа с применением уравнения состояния реального газа. Проведен анализ возможности применения данной модернизации установки для дальнейшего изучения трехфазной или двухфазной фильтрации.

Ключевые слова

Трехфазная фильтрация, газожидкостная фильтрация, петрофизика, проницаемость, газ, модернизация, пластовые условия.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-75-87

Введение

При разработке нефтегазовых месторождений в продуктивных пластах может иметь место совместная фильтрация трех фаз в различных соотношениях. Детальное экспериментальное исследование процессов, происходящих при трехфазной фильтрации, имеет большое значение на всех этапах разработки месторождения. Высокую ценность имеют результаты исследования фильтрационных процессов, происходящих в пластовой трехфазной системе, которые с применением методов физического моделирования в дальнейшем используются для решения многих индустриальных задач, имеющих большую практическую значимость, в частности, при прогнозировании продуктивности пласта, расчете конечной нефтеотдачи, а также для расчета и планирования технологических операций,

при гидродинамическом моделировании способов дальнейшей разработки нефтегазовых месторождений [9].

В настоящее время активно ведутся исследования в области трехфазной фильтрации, много работ посвящено изучению математических моделей и вычислительным алгоритмам для решения задач многомерной трехфазной фильтрации в пористой среде [5, 8, 10].

Для моделирования подобных процессов необходимо использование трехфазных диаграмм относительных проницаемостей. Самыми эффективными из существующих моделей течения двухкомпонентной смеси являются расчетно-экспериментальные методы [1, 4, 6], которые более корректно описывают процесс двухфазной фильтрации. Экспериментальное получение трехфазных диаграмм является намного более сложным и длительным процессом, чем измерение двухфазных относительных проницаемостей. Импортное оборудование для исследования трехфазного потока является очень дорогостоящим, и существуют явные проблемы, связанные с вопросом закупки. В связи с этим для решения данных вопросов возможно усовершенствование существующей установки и разработка эффективного метода расчета трехфазного потока.

За основу разработки взят автоматизированный программно-измерительный комплекс ПИК-ОФП/ЭП-3 [3], предназначенный для моделирования двухфазного потока через образцы керна в условиях повышенных давления и температуры. Образцы керна могут быть исследованы при поровом давлении до 350 атм и всестороннем давлении до 600 атм. Комплекс позволяет в пластовых условиях выполнять на образце электрорезистивные измерения насыщенности с одновременным измерением перепада давлений. Гидравлическая система комплекса позволяет создавать поток одновременно двух фаз через образцы керна. Расход и давление могут контролироваться и управляться компьютером. Комплекс позволяет определять двухфазные относительные проницаемости керна для компонент потока «жидкость — жидкость», остаточную нефтенасыщенность (коэффициент вытеснения), а также проводить исследовательские эксперименты по повышению нефтеотдачи пласта, испытанию керна на вторичное заводнение, испытаниям жидкостей для обработки скважин.

Основные особенности модернизации установки

Была проведена серия работ по модернизации установки ПИК-ОФП/ЭП-3, предназначенной для построения кривых относительных фазовых проницаемостей, с целью оснащения ее способностью фильтрации газа совместно с другими флюидами через образец горной породы с последующим определением проницаемостей стационарным методом.

В базовом виде установка ПИК-ОФП/ЭП-3, упрощенная схема которой представлена на рис. 1, оснащена плунжерными насосами в количестве двух штук (для нефти и воды), объемный расход которых определяется путем выставления необходимого значения на управляющем компьютере. Горное давление устанавливается при помощи ручного гидравлического насоса закачкой в пространство между

манжетой кернодержателя и его корпусом. Пластовые значения температуры обеспечиваются за счет нагревательных пластин, охватывающих корпус кернодержателя, которые поддерживают заданную на компьютере температуру, для контроля которой вблизи манжеты установлена термопара, транслирующая ее в каждый момент времени в течение всего эксперимента. Рабочее давление (давление жидкости) обеспечивается регулятором противодавления, установленным на выходной трубомагистрали, принцип работы которого заключается в подводе газа необходимого давления на мембрану, которая, в свою очередь, блокирует фильтрацию жидкости через регулятор противодавления до тех пор, пока давление жидкости во всем тракте не выровняется с выставленным пластовым давлением.

Осуществляя фильтрацию жидкости через керн, дожидаются наступления стационарного режима: когда перепад давления на образце, измеряемый дифференциальным манометром, выйдет на плато.

С целью осуществления фильтрации газа в установке ПИК-ОФП/ЭП-3 в участок, который предназначен для создания пластового давления (гидравлические трубки, идущие от баллона с газом к регулятору противодавления), была вмонтирована промежуточная емкость из нержавеющей стали с полостью объемом 0,98 литров (рис. 2). Таким образом, часть газа с баллона идет на регулятор противодавления, тем самым формируя пластовое давление, а часть газа отводится в промежуточную емкость. Перед началом эксперимента этим трактам перекрывают сообщение между собой путем закрытия игольчатого крана. Лишнее давление в регуляторе противодавления затем сбрасывается согласно руководству по эксплуатации установки до необходимых значений.

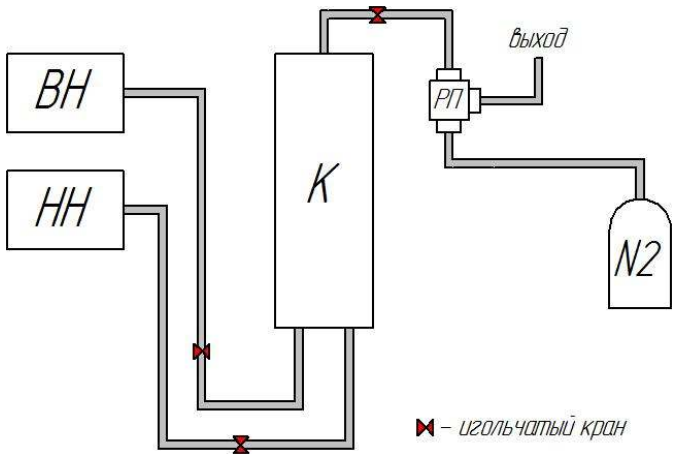

Рис. 1. Принципиальная схема работы установки ПИК-ОФП/ЭП-3:
ВН — водяной насос; НН — нефтяной насос; К — кернодержатель;
РП — регулятор противодавления;
N2 — баллон с азотом

Fig. 1. Schematic diagram of the installation PIK-OFP/EP-3:
ВН — water pump; НН — oil pump;
К — core holder; РП — back pressure regulator; N2 — nitrogen cylinder

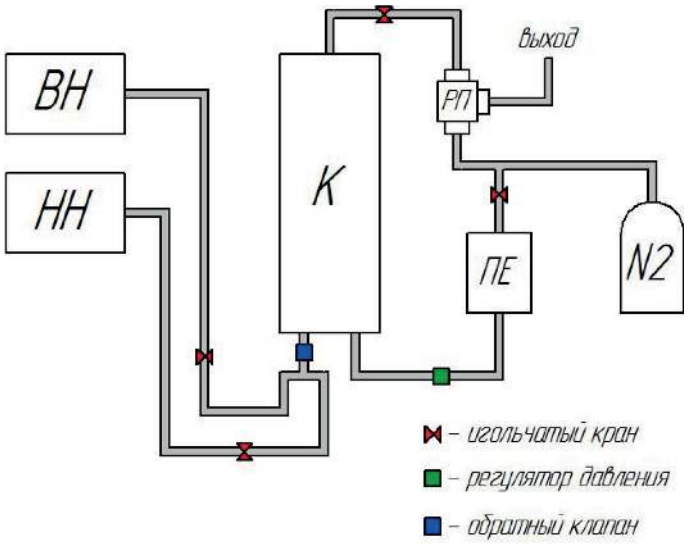

Рис. 2. Принципиальная схема модернизированной установки ПИК-ОФП/ЭП-3: ВН — водяной насос; НН — нефтяной насос; К — кернодержатель; ПЕ — промежуточная емкость; РП — регулятор противодавления; N2 — баллон с азотом

Fig. 2. Schematic diagram of the modernized plant PIK-OFP/EP-3: BH — water pump; HH — oil pump; K — core holder; ПЕ — intermediate tank; РП — back pressure regulator; N2 — nitrogen cylinder

Для регулировки расхода газа в магистраль между промежуточной емкостью и кернодержателем был вмонтирован регулятор давления. Также, во избежание перетока газа в жидкостную линию и дальнейшего растворения, в нее был установлен обратный клапан.

В представленном варианте исполнения подвод газа осуществлялся непосредственно на торец кернодержателя параллельно с водонефтяной магистралью; таким образом, флюиды и газ смешивались непосредственно в теле кернодержателя.

Методические исследования параметров при фильтрации газожидкостной смеси на модернизированной установке ПИК-ОФП/ЭП-3

Для экспериментов был взят низкопроницаемоый образец керна карбонатного происхождения (проницаемостью меньше 1 мД). Подготовка образца сводилась к следующим этапам:

1) экстракция керна;

2) насыщение моделью пластовой воды минерализации NaCl 30 г/л;

3) создание остаточной водонасыщенности методом центрифугирования;

4) прокачка пяти поровых объемов нефти через образец;

5) нефтевытеснение моделью пластовой воды не менее пяти поровых объемов.

Для испытания в кернодержатель помещался предварительно подготовленный образец при температуре 25 °С и горном давлении 200 атм. Для для оценки степени возможности определения проницаемости была осуществлена трехфазная фильтрация через образец горной породы. Сначала через керн с одинаковым расходом (0,03 мл/мин) происходила фильтрация нефти и воды до достижения стационарного процесса, после чего уже с помощью регулятора давления задавался расход газа. Как видно из рис. 3, после подачи газа (участок 2), перепад давления на образце вырос в несколько раз, колеблясь при этом в довольно широком диапазоне.

Следующим этапом была проведена двухфазная фильтрация газа и воды с последующим измерением расхода по газу (рис. 4).

Объемные расходы по воде Q_w и нефти Q_o определяются регулированием скорости плунжерного насоса, подающего флюид, а объемный расход газа вычисляется по формуле:

$$Q_g = G \cdot \frac{1}{\rho_{g\,\text{ср}}}, \tag{1}$$

где G — массовый расход газа; $\rho_{g\,\text{ср}}$ — средняя плотность газа на режиме.

Массовый расход определяется как отношение массы вышедшего из промежуточной емкости газа ко времени, за которое произошло истечение газа:

$$G = \frac{m_{g_1} - m_{g_2}}{t_1 - t_2}, \tag{2}$$

где m_{g1}, m_{g2} — массы газа в соответствующие моменты t_1 и t_2.

Масса газа в свою очередь находится как:

$$m_{g_i} = \rho_{g_i} \cdot V, \tag{3}$$

где $V = 0{,}98 \cdot 10^{-3}$ м^3 — объем промежуточной емкости.

Средняя плотность газа определяется по формуле:

$$\rho_{g\,\text{ср}} = \frac{2\rho_{g1} \cdot \rho_{g2}}{\rho_{g1} + \rho_{g2}}, \tag{4}$$

где ρ_{g1}, ρ_{g2} — плотности газа в моменты времени t_1 и t_2, определяемые из уравнения состояния реального газа [2, 7]:

$$\frac{P}{\rho_g} = Z_g(P,T) \cdot \frac{R}{M} \cdot T, \tag{5}$$

где P — давление в системе; $Z_g(P, T)$ — коэффициент сжимаемости газа; R — универсальная газовая постоянная; $M = 0{,}028$ кг/моль — молярная масса азота; $T = 293$ К — температура системы.

Затем производится расчет фазовых проницаемостей по закону Дарси:

$$k_i^* = \frac{Q_i \cdot \mu_i \cdot l}{F \cdot \Delta P}, \tag{6}$$

где k_i^* — фазовая проницаемость, мД; Q_i — расход i-й фазы, м^3/с; μ_i — динамическая вязкость i-й фазы, Па·с; l — расстояние между датчиками дифференциального

манометра, м; F — площадь сечения образца керна, м^2; ΔP — перепад давления на образце, Па.

Относительные фазовые проницаемости затем рассчитывают по формуле:

$$k_i = \frac{k_i^*}{k}, \tag{7}$$

где k_i — относительная фазовая проницаемость; k — абсолютная проницаемость, мД.

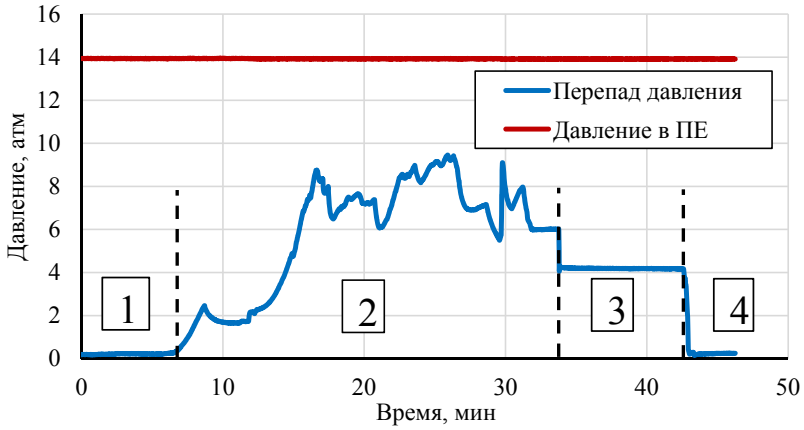

Рис. 3. График зависимости перепада давления от времени, разбитый на участки: 1 — фильтрация нефти и воды; 2 — фильтрация нефти, газа и воды; 3 — остановка фильтрации; 4 — фильтрация нефти и воды

Fig. 3. Graph of the dependence of the pressure drop on time, divided into sections: 1 — oil and water filtration; 2 — filtration of oil, gas and water; 3 — filtration stop; 4 — filtration of oil and water

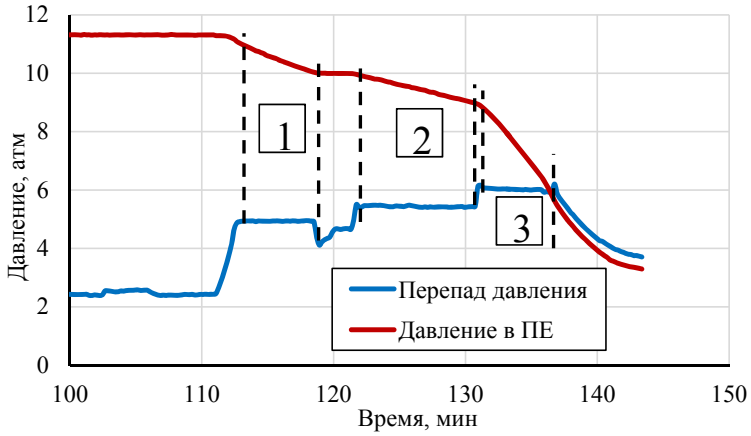

Рис. 4. Зависимость давления от времени (вода + газ)

Fig. 4. Pressure versus time (water + gas)

Таблица 1

Данные эксперимента

Table 1

Experiment data

№ режима	P_1, МПа	P_2, МПа	t_1, с	t_2, с	$Q_г$, мл/мин	$Q_в$, мл/мин
1	1,108	1,018	7 122	7 411	18,08	0,25
2	0,980	0,909	7 760	8 144	11,62	0,35
3	0,873	0,681	8 253	8 469	69,08	0,15

Фильтрация воды и газа проведена на трех ярко выраженных режимах (выделено цифрами на рис. 4). Для каждого режима с помощью уравнения состояния был рассчитан расход газа (данные представлены в таблице 1).

Как видно из таблицы 1, выставленный с помощью регулятора давления расход газа оказался много выше расхода воды. Следующим этапом фильтрация газа и воды была оставлена на более длительное время с очень низким расходом газа. Зависимость изменения давления газа в промежуточной емкости и перепада давления на образце от времени приведена на рис. 5.

В результате объемный расход газа оказался почти равным расходу жидкости (0,15), что свидетельствует о том, что с помощью регулятора давления можно производить фильтрацию флюида с газом, соблюдая при этом скоростные условия их течения в пласте. Также можно заметить, что расход газа в течение всего эксперимента был постоянен, что доказывает рис. 6, иллюстрирующий зависимость скорости падения давления от времени: абсолютное значение отклонения темпа падения давления на режиме не превышало 0,026 атм/с.

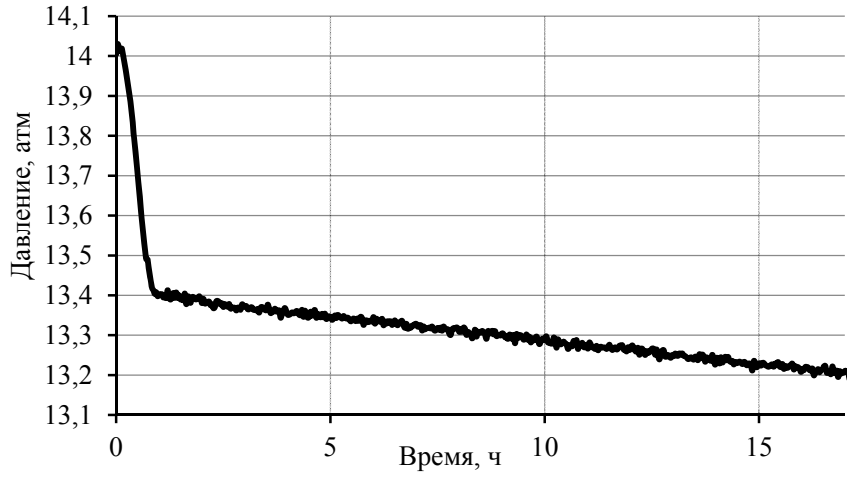

Рис. 5. Зависимость давления в промежуточной емкости от времени при фильтрации газожидкостной смеси

Fig. 5. The dependence of the pressure in the intermediate tank on time during the filtration of the gas-liquid mixture

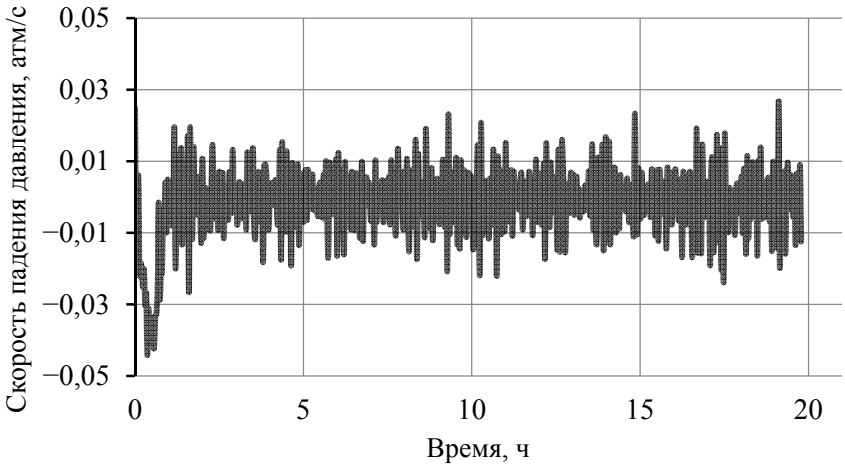

Рис. 6. Зависимость скорости падения давления в промежуточной емкости от времени

Fig. 6. The dependence of the rate of pressure drop in the intermediate tank on time

Заключение

1. Создана установка для исследования трехфазной фильтрации на основе модернизации действующей установки двухфазной фильтрации. Установка позволяет дополнительно осуществлять фильтрацию газа как в качестве единственной движущейся среды в образце, так и совместно с другими пластовыми флюидами.
2. Для регулирования расхода по газу и измерения термобарических параметров газовой фазы используется дополнительная промежуточная емкость. Для повышения точности задания расхода газа необходимо установить соответствующий регулятор давления.
3. На модернизированной установке проведены методические эксперименты по фильтрации газожидкостной смеси, которые установили возможность определения скорости газовой фазы и линейность закона снижения давления в промежуточной емкости с течением времени.
4. Модернизированная установка позволяет проводить исследования трехфазных смесей в диапазоне горных давлений до 60 МПа и температур до 375 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтунин А. Е. Расчетный метод получения ОФП на основе решения обобщенных уравнений Бернулли для системы поровых каналов / А. Е. Алтунин, С. В. Соколов, С. В. Степанов, Н. А. Черемисин, А. Б. Шабаров // Нефтепромысловое дело. 2013. № 8. С. 40-46.

2. Андрющенко А. И. Основы технической термодинамики реальных процессов / А. И. Андрющенко // М.: Высшая школа. 1967. 268 с.
3. Инструкция по эксплуатации автоматизированного программно-измерительного комплекса для петрофизического исследования кернов ПИК-ОФП/ЭП-3. Новосибирск: Геологика, 2009. 43 с.
4. Кузина О. А. Расчетно-экспериментальный метод определения параметров фильтрации смеси «нефть — водный раствор поверхностно-активных веществ» / О. А. Кузина, А. Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 1 (21). С. 41-64. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-41-64
5. Курбонов Н. М. Математическое моделирование задач многомерной трехфазной фильтрации / Н. М. Курбонов, К. А. Ибрагимова // Теоретическая и прикладная наука. 2019. № 12 (80). С. 435-440. DOI: 10.15863/TAS.2019.12.80.83
6. Максимов В. М. Обобщенный закон многофазной фильтрации и новые эффекты поверхностных явлений при двухфазных течениях в пористой среде // В. М. Максимов // Георесурсы. 2019. Том 21. № 1. С. 86-91. DOI: 10.18599/grs.2019.1.86-91
7. Матвеев А. Н. Молекулярная физика: учеб. пос. / А. Н. Матвеев. СПб.: Лань, 2010. 368 с.
8. Питюк Ю. А. Численное моделирование фильтрации водогазовой смеси в пористых средах / Ю. А. Питюк, А. А. Мусин, Л. А. Ковалева, Р. Р. Фахреева // Вестник Башкирского университета. 2019. Том 24. № 2. С. 295-300.
9. Рассохин С. Г. Экспериментальное исследование процессов трехфазной фильтрации в термобарических условиях аптских отложений / С. Г. Рассохин, В. М. Троицкий, А. В. Мизин, В. П. Ваньков // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2010. № 1 (4). С. 167-178.
10. Шабаров А. Б. Методы определения функций относительной фазовой проницаемости в задачах многофазной фильтрации / А. Б. Шабаров, А. В. Шаталов, П. В. Марков, Н. В. Шаталова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 1. С. 79-109. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109

Olga A. KUZINA[1]
Igor R. POTOCHNYAK[2]
Lyudmila A. PULDAS[3]

UDC 532.546

FEATURES OF THE MODERNIZATION OF THE PETROPHYSICAL RESEARCH COMPLEX FOR THE IMPLEMENTATION OF THE POSSIBILITY OF GAS FILTRATION TOGETHER WITH WATER-OIL FLUIDS*

[1] Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer,
Department of Applied and Technical Physics,
Institute of Physics and Technology,
University of Tyumen
o.a.kuzina@utmn.ru

[2] Laboratory Assistant, Laboratory of Digital Research
in the Oil and Gas Industry, Scientific and Educational Center
for the Development of Scientific Competencies,
Industrial University of Tyumen;
Assistant Professor, Department of Applied and Technical Physics,
Institute of Physics and Technology,
University of Tyumen
i.r.potochnyak@utmn.ru; ORCID: 0000-0002-4263-711X

[3] Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Heat Gas Supply and Ventilation Department,
Industrial University of Tyumen
puldasla@tyuiu.ru

* The article was prepared under the engineering project titled “Digital Core” being implemented at a world-level transregional West-Siberian Research and Educational Center.

Citation: Kuzina O. A., Potochnyak I. R., Puldas L. A. 2022. “Features of the modernization of the petrophysical research complex for the implementation of the possibility of gas filtration together with water-oil fluids”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 1 (29), pp. 75-87.
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-75-87

© University of Tyumen

Abstract

A series of works was carried out to modernize the domestic automated software-measuring complex, designed to find the function of relative phase permeabilities in two-phase oil-water filtration, in order to equip it with the additional ability to filter gas together with two fluids.

The creation of a software-measuring complex that allows to study three-phase filtration is an urgent task of a complex analysis of a field. Complexes produced by the industry with the possibility of three-phase filtration have a high cost. In this regard, there is a need to create a structurally simple and low-cost method for gas filtration, which is the subject of this work.

In order to carry out gas filtration in the software-measuring complex, an intermediate stainless steel tank is installed in the area intended for creating reservoir pressure. Thus, part of the gas from the cylinder goes to the back pressure regulator, thereby forming reservoir pressure, and part is diverted to an intermediate reservoir. A pressure regulator is installed to regulate the gas flow. In this variant, gas is supplied directly to the end of the core holder in parallel with the water line, so fluids and gas are directly mixed in the body of the core holder.

Methodical experiments on filtration of a gas-liquid mixture with subsequent determination of the volumetric flow rate of gas using the equation of state of a real gas were carried out. An analysis was made of the possibility of using this modernization of the installation for further study of three-phase or two-phase filtration.

Keywords

Three-phase filtration, gas-liquid filtration, petrophysics, permeability, gas, modernization, reservoir conditions.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-1-75-87

REFERENCES

1. Altunin A. E., Sokolov S. V., Stepanov S. V., Cheremisin N. A., Cheremisin A. B. 2013. “Calculation method for obtaining RPP based on solving generalized Bernoulli equations for a system of pore channels”. Oilfield business, no. 8, pp. 40-46. [In Russian]
2. Andryushchenko A. I. 1967. Fundamentals of technical thermodynamics of real processes. Moscow: Higher School. 268 p. [In Russian]
3. Geologika. 2009. Operating Instructions for the Automated Software-Measuring Complex for Petrophysical Examination of Cores PIK-OFP/EP-3. Novosibirsk, 43 p. [In Russian]
4. Kuzina O. A., Shabarov A. B. 2020. “Calculation and experimental method for determining the filtration parameters of the mixture ‘oil — aqueous solution of surfactants’”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no. 1 (21), pp. 41-64. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-41-64 [In Russian]
5. Kurbonov N. M., Ibragimova K. A. 2019. “Mathematical modeling of the problems of multidimensional three-phased filtration”. Theoretical and Applied Science, no. 12 (80), pp. 435-440. DOI: 10.15863/TAS.2019.12.80.83 [In Russian]

6. Maksimov V. M. 2019. “Generalized law of multiphase filtration and new effects of surface phenomena at two-phase flows in a porous medium”. Georesources, vol. 21, no. 1, pp. 86-91. DOI: 10.18599/grs.2019.1.86-91 [In Russian]
7. Matveev A. N. 2010. Molecular Physics: textbook . Saint-Petersburg: Lan. 368 p. [In Russian]
8. Pityuk Yu. A., Musin A. A., Kovaleva L. A., Fakhreeva R. R. 2019. “Numerical modeling of water-gas mixture filtration in porous media”. Bashkir University Herald, vol. 24, no. 2, pp. 295-300. [In Russian]
9. Rassokhin S. G., Troitsky V. M., Mizin A. V., Vankov V. P. 2010. “Experimental study of three-phase filtration processes in thermobaric conditions of the Aptian deposits”. Scientific and Technical Collection of “Vesti gazovoy nauki”, no. 1 (4). pp. 167-178. [In Russian]
10. Shabarov A. B., Shatalov A. V., Markov P. V., Shatalova N. V. 2018. “Relative Permeability Calculation Methods in Multiphase Filtration Problems”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 1, pp. 79-109. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-79-109 [In Russian]