

УДК 550.8; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-3.12>

<https://orcid.org/0000-0003-3426-1914>

<https://orcid.org/0000-0003-1354-7155>

<https://orcid.org/0000-0001-9445-1635>

<https://orcid.org/0009-0003-4237-1096>

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ИЗУЧЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ



Б.М. НУРАНБАЕВА,
кандидат химических наук,
доктор PhD, ассоц. профессор,
научный руководитель,
bulbulmold@mail.ru



Р.А. ТЮЛЕБАЕВА,
магистр технических наук,
начальник отдела
геофизики,
R.Tyulebayeva@king.kz



А.Ж. КЕНЕСАРЫ,
магистр технических наук,
заместитель директора
по геологии, разработке
и проектам НИОКР,
a.kenesary@king.kz



С.А. САМИГАТОВА,
бакалавр техники
и технологии,
инженер-геофизик,
s.samigatova@king.kz

АО "КАЗАХСКИЙ ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА"
Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Сейфуллина, 506/99

В настоящее время влияние тренда декарбонизации на нефтегазовую отрасль становится все более ощутимым. Одним из перспективных подходов к утилизации углекислого газа является технология его нагнетания в продуктивный пласт для повышения нефтеотдачи. Реализованные в мире проекты показали эффективность применения сжиженной двуокиси углерода в качестве растворителя для скважин, что приводит к увеличению дебита углеводородов благодаря различным механизмам. Доказано, что закачка CO₂ снижает межфазное натяжение на границе углеводород – вода, улучшает смачиваемость породы водой, переводя ее из пленочного состояния в капельное. Однако при реализации данного подхода стоит уделить внимание изучению пластовых параметров как насыщение и капиллярные силы.

В данной работе рассмотрен принцип капиллярометрии для расчета параметра водонасыщенности сложного типа коллектора с низко- фильтрационными свойствами. Исследование заключается в оценке эффективного подхода по изучению расчетной остаточной водонасыщенности при сложной геометрии порового пространства и возможного нарушения гидрофильности пор. Практический интерес данной работы заключается в повышении изученности свойств коллектора на поровом уровне для прогноза его физико-химических свойств при моделировании композиционной динамической модели для решения актуальных вопросов при разработке залежей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водонасыщенность, керн, капиллярное давление, центрифугирование, нагнетание ртути, смачиваемость, гидрофильность, гидрофобность, моделирование.

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯНЫҢ ӨЗЕКТІ МӘСЕЛЕЛЕРІН ШЕШУ ҮШІН СУДЫҢ ҚАНЫҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ ӘДІСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН БАҚАЛАУ

Б.М. НҰРАНБАЕВА, химия ғылымдарының кандидаты, PhD докторы, ассоц. профессор, ғылыми жетекші, bulbulmold@mail.ru

Р.А. ТЮЛЕБАЕВА, техника ғылымдарының магистрі, геофизика бөлімінің бастығы, R.Tyulebayeva@king.kz

А.Ж. КЕҢЕСАРЫ, техника ғылымдарының магистрі, Геология, FЗТҚЖ әзірлеу және жобалар жөніндегі директордың орынбасары, a.kenessary@king.kz

С.А. САМИҒАТОВА, техника және технология бакалавры, инженер-геофизик, s.samigatova@king.kz

АҚ "ҚАЗАҚ МҰНАЙ ЖӘНЕ ГАЗ ИНСТИТУТЫ"
Қазақстан Республикасы, 050000, Алматы қ., Сейфуллин к-сі, 506/99

Қазіргі уақытта декарбонизация трендінің мұнай-газ саласына әсері барған сайын айқын бола түсуде. Көмірқышқыл газын кәдеге жаратудың перспективалық тәсілдерінің бірі-мұнай өндіруді арттыру үшін оны өнімді қабатқа айдау технологиясы. Әлемде жүзеге асырылған жобалар сұйытылған көмірқышқыл газын ұңғымалар үшін еріткіш ретінде қолданудың тиімділігін көрсетті, бұл әртүрлі механизмдердің арқасында көмірсутектер дебитінің артуына әкеледі. CO₂ айдау көмірсутек-су шекарасындағы фазааралық кернеуді төмендететіні дәлелденді, тау жыныстарының сумен сулануын жақсартады, оны пленка күйінен тамшы күйіне ауыстырады. Алайда, бұл тәсілді жүзеге асырған кезде қанықтылық пен капиллярлық күштер ретінде қабаттық параметрлерді зерттеуге назар аударған жөн.

Бұл жұмыста төмен сүзу қасиеттері бар коллектордың күрделі түрінің су қанықтылық параметрін есептеу үшін капиллярметрия принципі қарастырылған. Зерттеу кеуек кеңістігінің күрделі геометриясындағы есептелген қалдық судың қанықтылығын және кеуектердің гидрофильділігінің ықтимал бұзылуын зерттеудің тиімді әдісін бағалаудан тұрады. Бұл жұмыстың практикалық қызығушылығы кен орындарын игерудегі өзекті мәселелерді шешу үшін композициялық динамикалық модельді модельдеу кезінде оның физика-химиялық қасиеттерін болжау үшін коллектордың қасиеттерін кеуекті деңгейде зерттеуді арттыру болып табылады.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: су қанықтылығы, өзек, капиллярлық қысым, центрифугалау, сынапты айдау, сулану, гидрофильділік, гидрофобтылық, модельдеу.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE METHOD OF STUDYING WATER SATURATION FOR SOLVING URGENT DECARBONIZATION PROBLEMS

B.M. NURANBAYEVA, Candidate of Chemical Sciences, PhD, Assoc. Professor, Scientific supervisor, bulbulmold@mail.ru

R.A. TYULEBAYEVA, Master of Technical Sciences, Head of the Geophysics Department, R.Tyulebayeva@king.kz

A.J. KENESSARY, Master of Technical Sciences, Deputy Director for Geology, Development and R&D Projects, a.kenessary@king.kz

S.A. SAMIGATOVA, Bachelor of Engineering and Technology, Geophysicist Engineer, s.samigatova@king.kz

KAZAKH INSTITUTE OF OIL AND GAS JSC
Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty, Seifullina Ave., 506/99

At present, the impact of the decarbonization trend on the oil and gas industry is becoming more and more tangible. One of the promising approaches to carbon dioxide utilization is the technology of its injection into the productive formation for enhanced oil recovery. The projects realized in the world have shown the efficiency of liquefied carbon dioxide application as a solvent for wells, which leads to increase of hydrocarbon flow rate due to various mechanisms. CO₂ injection has been proven to reduce the interfacial tension at the hydrocarbon-water interface and improve water wettability of the rock, converting it from a film state to a droplet state. However, when implementing this approach, it is worth paying attention to the study of formation parameters such as saturation and capillary forces.

In this paper, the capillarometry principle is considered to calculate the water saturation parameter of a complex reservoir type with low filtration properties. The study is to evaluate an effective approach to study the estimated residual water saturation under complex pore space geometry and possible pore hydrophilicity disturbance. The practical interest of this work is to increase the study of reservoir properties at the pore level for prediction of its physical and chemical properties in the modeling of composite dynamic model for solving topical issues in reservoir development.

KEYWORDS: water saturation, core, capillary pressure, centrifugation, mercury injection, wettability, hydrophilicity, hydrophobicity, modeling.

Введение. Как известно, при формировании нефтяных и газовых залежей в естественных резервуарах происходит процесс вытеснения воды, содержащейся в системе пустотного пространства пород нефтью или газом. Качество остаточной воды имеет важное значение при искусственном заводнении коллектора с целью увеличения нефтедобычи.

Технология закачки CO₂ заключается в том, что двуокись метана может подаваться в скважину в виде газа или в фазе сверхкритического флюида под высоким давлением. Для надёжного прогнозирования закачки углекислого газа применяется композиционное моделирование, учитывающее фазовые превращения, геохимические процессы, структуру порового пространства, неоднородность литологического строения, капиллярные силы и параметр остаточной водонасыщенности [1]. Моделирование нефтенасыщенности, как и моделирование любых других параметров, основано, прежде всего, на эмпирических данных. Установлено, что при наличии в нефти достаточного количества легких углеводородов и значений пластовых давлений и температуры, равных критическим значениям, образующихся в пористой среде смесей, наблюдается полное смешивание нефти с двуокисью углерода, что не только повышает эффективность извлечения остаточной нефти, но и приводит к увеличению времени захоронения углекислого газа.

На приемистость пластовой системы преобладающее влияние оказывают такие параметры как: капиллярное давление, гидрофильность, смачиваемость, размер пор, высота залежи над уровнем водонефтяного контакта [2, 3].

Распределение гидрофобных и гидрофильных коллекторов, их число и чередование зависят от природы породообразующих минералов, структуры порового пространства, физико-химических свойств насыщающих жидкостей. Гидрофильность и гидрофобность поверхности количественно оцениваются краевым углом смачивания. Изменение смачиваемости породы при вытеснении нефти сжиженным газом может благоприятно влиять на процесс повышения нефтеотдачи пластов.

В качестве геологической структуры для закачки газа в пластовую систему объект должен обладать достаточными фильтрационно-емкостными свойствами для достижения нужного уровня приёмистости. Определение насыщения пород является одним из ключевых параметров, при определении объема порового пространства коллектора, заполненного флюидом.

Оценка количества углеводородов, находящихся в пласте-коллекторе, по уравнению Арчи, основана на возможности по данным электрического каротажа оценить объем воды, заполняющей поровое пространство. При этом используются петрофизические зависимости в уравнениях: $R_p = a/K_p$ и $R_n = 1/K_{vp}$. Однако достаточно часто информация о зависимости коэффициента водонасыщенности может отсутствовать по ряду причин и далеко не всегда по данным ГИС можно построить приемлемую зависимость. В таких случаях для прогнозирования насыщения используют альтернативные подходы [4, 5].

Методом изучения капиллярных сил является исследование разности давлений между двумя несмешивающимися флюидами, находящимися в равновесии по обе стороны от искривленной поверхности раздела фаз. Кривизна поверхности возникает вследствие предпочтительного смачивания одной из этих фаз стенок капилляра. Основными метода-

ми измерения капиллярного давления являются методы центрифугирования и нагнетания ртути. С использованием этих данных возможно построить зависимости такие как: связь капиллярного давления с остаточной водонасыщенностью, зависимость функции Леверетта от водонасыщенности, распределение нормализованного порового объема по радиусу пор, что позволяет значительно упростить перенос данных о насыщении с выборки керна на геолого-гидродинамическую модель пласта. Повышение точности моделей нефтенасыщенности – один из важнейших факторов, обеспечивающих наиболее полное возможное извлечение нефти из продуктивных пластов [6-8].

Материалы и методы исследования. В качестве изучаемого участка выбрано месторождение, в тектоническом отношении приуроченного к западной приграничной части Южно-Торгайского осадочного бассейна и прилегающей части Нижне-Сырдарьинского свода. Особенностью данного месторождения является то, что оно имеет сложное строение вследствие процесса осадконакопления и тектонических движений. Все три скважины характеризуются разным литологическим строением. На *рисунке 1* наглядно представлены диаграммы распределения литологии.



Рисунок 1 – Диаграмма распределения литологии по скважинам

Породами-коллекторами являются полимиктовые гравелиты, песчаники и кварц, цемент песчано-карбонатный порово-контактового типа. Карбонатные породы представлены серыми, светло-серыми известняками и темно-серыми известковистыми доломитами.

Тип порового пространства – порово-трещинный.

Литологическая неоднородность разреза, сложное распределение пор по размерам, высокое содержание капиллярной воды приводит к широкому разбросу значений. Нарушение гидрофильности и частичная смачиваемость поверхности породы является существенной проблемой при оценке сложного типа коллектора.

Результаты и обсуждение. Исследования проведены на 56 образцах для метода центрифугирования и на 20 образцах для нагнетания ртути из скважин №№ 1, 2 и 3.

На основе лабораторных исследований были построены связи капиллярного давления с остаточной водонасыщенностью, полученные результаты представлены на *рисунке 2*.

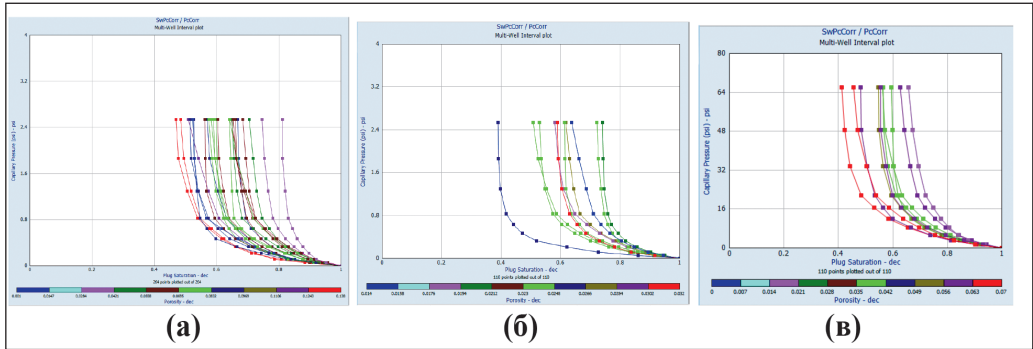


Рисунок 2 – Связь капиллярного давления с остаточной водонасыщенностью: (а) скважина №1; (б) скважина №2; (в) скважина №3

Согласно полученным графическим представлениям, зависимость капиллярного давления от водонасыщенности в большей степени характерна для гидрофобных систем с минимальным пороговым давлением.

Строение пустотного пространства.

На водонасыщенность помимо капиллярных сил большое влияние оказывает строение порового пространства породы и характер распределения пор. Известно, что чем более неоднородны размеры поровых каналов коллектора, тем больше остаточная нефтенасыщенность и тем меньше коэффициент вытеснения.

На *рисунке 3* представлена характеристика порового пространства по скважинам, анализ показал неоднородность распределения порового объема. Образцы характеризуются как капиллярные, диапазон изменений радиуса пор составляет 0.2–5 мкм.

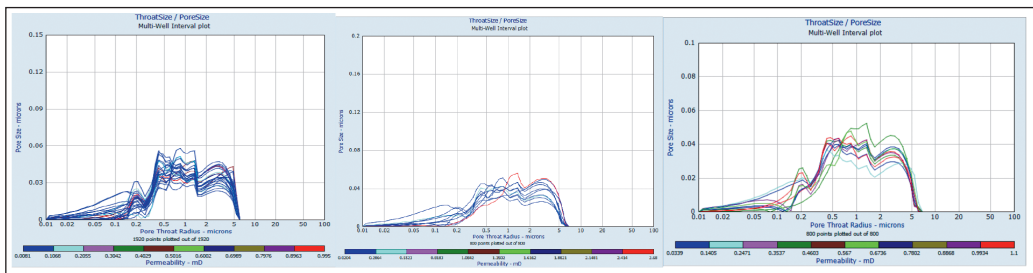


Рисунок 3 – Распределение нормализованного порового объема по радиусу пережимов: (а) скважина №1; (б) скважина №2; (в) скважина №3

Ж-функция Леверетта

Ж-функция, предложенная Леверетта, применяется для описания неоднородной породы – коллектора, которая отражает его характеристики за счет объединения пористости и проницаемости в одном удобном для корреляции параметре.

Построение зависимости Ж-функции от водонасыщенности показало, что функция Леверетта имеет разные значения для разных типов пород исследуемого пласта. Поскольку исследования керна проводили на образцах с разными фильтрационно-емкостными свойствами, применялись различные методы.

1) Функция Леверетта. Данный метод применим для грубообломочных и карбонатных пород.

$$J = 0.2166 * P_c / (\sigma * \cos\theta) * \sqrt{(K/\phi)}$$

Где:

J = функция капиллярного давления (P_c).

P_c = входное скорректированное капиллярное давление, psi

σ = Межфазное натяжение (система газ/вода или нефть/вода), дин/см.

θ = Угол контакта (система газ/вода или нефть/вода), град.

K = Проницаемость, мкм.

φ = Пористость, д.ед.

2) Функция Леверетта модификатор пористости. Этот метод использует показатель цементации m для включения коэффициента извилистости в уравнение, что может уменьшить разброс в скорректированных данных капиллярного давления. Это может быть использовано в тех случаях, когда диапазон проницаемости велик и литологически сложен крепкоцементированными породами.

$$J = 0,2166 * P_c / (\sigma * \cos\theta) * \sqrt{(K/\phi^m)}$$

где, m = показатель цементации.

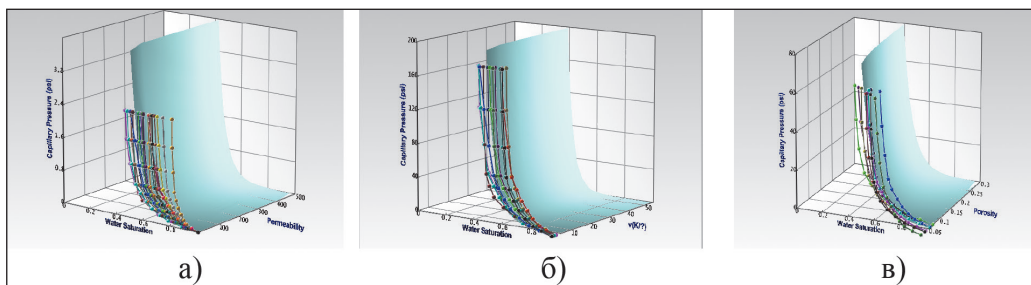


Рисунок 4 – Зависимости J-функции для скважин: (а) №1; (б) №2; (в) №3

При сравнении результатов водонасыщенности, полученных по уравнению Арчи, и с помощью J-функции при центрифугировании, выявлено расхождение кривых. Кривая насыщения методом центрифугирования характеризуется заниженными значениями, что связано с влиянием неравномерности распределения состава пород, принципом вытеснения остаточной водонасыщенности при центробежном ускорении и скоростью проникновения ртути в поры/трещины в соответствии с их размером и формой.

Техника нагнетания ртути основана на том факте, что несмачивающая жидкость, такая как ртуть, не проникнет в трещины пористого материала, если на нее не воздействует давление, достаточно большое, чтобы вызвать проникновение.

Объем ртути, заполняющей трещины, является функцией внешнего давления, что и дает информацию о распределении пор по размерам [9].

По результатам определений радиусы поровых каналов распределены преимущественно по форме единичного пика. Средняя величина радиуса поровых каналов коллекторов изменяется от 0,2–5 мк, максимальная величина радиуса пор в отдельных образцах достигает 5 мк.

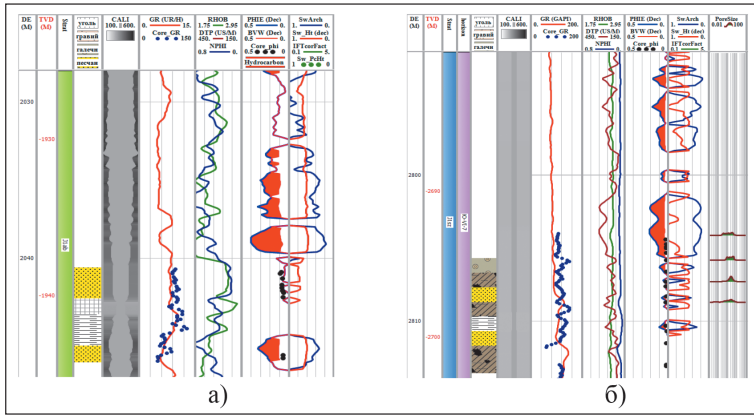


Рисунок 5 – Пример сходимости кривых водонасыщенности методом Арчи и при центрифугировании: (а) скважина №1; (б) скважина №3

Выявлена сходимость кривых насыщения, обусловленная принципом действия увеличения давления ртутью на коллектор, рисунок 6.

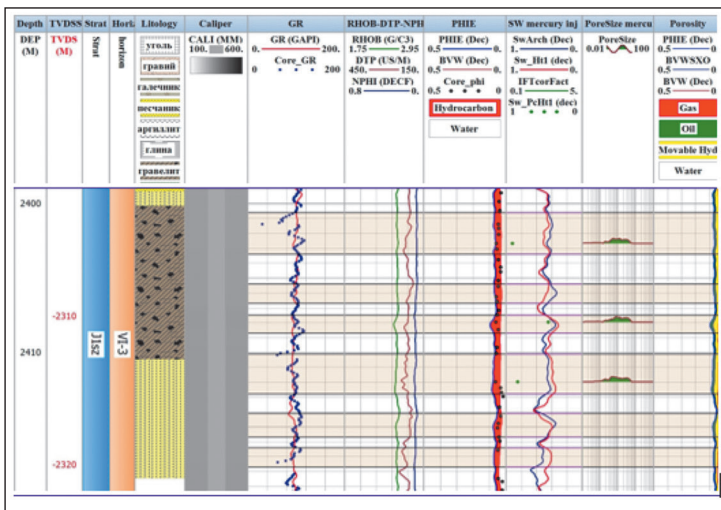


Рисунок 6 – Пример сходимости кривых водонасыщенности методом Арчи нагнетанием ртути. Скважина № 3

Для оценки достоверности определенных коэффициентов проведено сопоставление 3 методов расчета насыщения, представленных на рисунке 7.

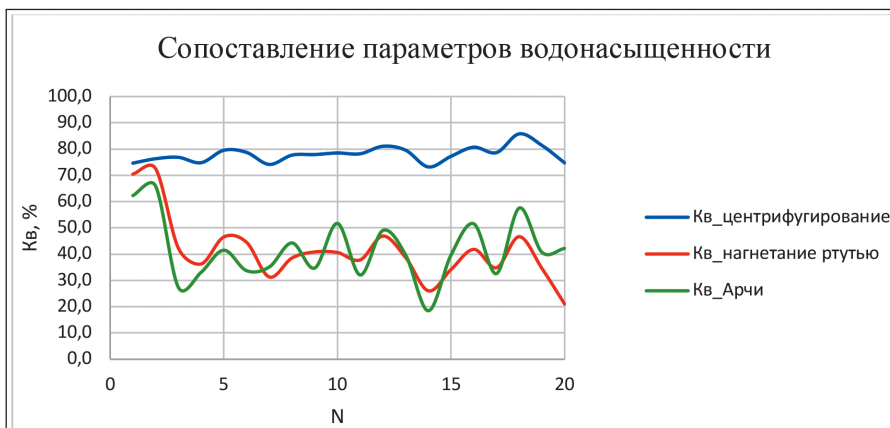



Рисунок 7 – График распределения рассчитанных кривых насыщенности

Заключение. В данной работе был рассмотрен один из ключевых параметров определения объема порового пространства коллектора – параметр насыщения. В качестве примера выбран разрез, характеризующийся сложным типом коллектора с низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

В связи с истощением запасов легкоизвлекаемой нефти все большие усилия направляются на создание технологий и способов разработки, позволяющих добывать углеводороды в осложненных условиях. Одним из таких методов является вытеснение нефти путем закачки углекислого газа (CO₂) в пласт. Для получения оптимального результата при разработке газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений при закачке углекислого газа в пласт, необходимо учитывать компонентный состав углеводородной системы, для чего применяется композиционное моделирование. [10, 11]

Одним из методов определения водонасыщенности является моделирование процесса формирования углеводородной залежи с помощью измерения капиллярного давления методом центрифугирования или нагнетания ртутью. Представленные результаты сопоставления водонасыщенности, рассчитанных уравнением Арчи и методами капиллярметрии позволяют проверить их соответствие друг другу и точность при оценке свойств пород-коллекторов. На основе сравнительного анализа, был определен наиболее подходящий вариант для изучения сложного типа коллектора с неоднородным распределением порового пространства и с низкой гидрофильностью.

Выводы. Как показали результаты интерпретации, метод капиллярного давления нагнетанием ртутью наиболее предпочтителен для исследования низкопроницаемых карбонатных пород и конгломератов с порово-трещинным типом коллектора, в связи с тем, что высокая чувствительность измерительных систем современных порометров предполагает собой высокую точность в измерении объема вдавленной в трещины твердых тел ртути при повышении давления.

На основе полученных результатов расчета водонасыщенности для сложного коллектора установлено, что эффективность оценки параметра насыщения достигается при комплексном изучении методов и их сравнительном анализе для изучения гидродинамических свойств на поровом уровне. 

Источник финансирования

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP14869955).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Белкина В. А., Антипин Я. О., Забоева А. А. Построение трехмерных моделей нефтенасыщенности. Основные проблемы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – № 9. – С. 223–237. [Belkina V. A., Antipin YA. O., Zaboeva A. A. Postroenie trekhmernih modelej neftenasyshchennosti. Osnovnyye problemy // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – 2021. – № 9. – S. 223–237.]
- 2 Грищенко М. А. Современные подходы к моделированию нефтенасыщенности сложнопостроенных залежей с целью создания гидродинамических моделей // Геология нефти и газа. – 2008. – № 5. – С. 75–80. [Grishchenko M. A. Sovremennyye podhody k modelirovaniyu neftenasyshchennosti slozhnopostroennykh zalezhej s cel'yu sozdaniya gidrodinamicheskikh modelej // Geologiya nefti i gaza. – 2008. – № 5. – S. 75–80.]
- 3 Ханин А. А. Породы – коллекторы нефти и газа и их изучение. – М.: Недра, 1976. – С. 295. [Hanin A. A. Porody – kollektory nefti i gaza i ih izuchenie. – M.: Nedra, 1976. – S. 295.]
- 4 Белозеров Б. В. Роль петрофизических исследований при оценке насыщения сложнопостроенных коллекторов. // Известия Томского политехнического университета – 2010. – № 1. – С. 110–116. [Belozеров B. V. Rol' petrofizicheskikh issledovanij pri ocenke nasyshcheniya slozhnopostroennykh kollektorov. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – 2010. – № 1. – S. 110–116.]
- 5 Мараев И. А. Комплексная интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Учебное пособие. - М.: 2013. – С. 95. [Maraev I.A. Kompleksnaya interpretaciya rezul'tatov geofizicheskikh issledovanij skvazhin. Uchebnoe posobie. - M.: 2013. – S. 95.]
- 6 Nghiem L.X., Li Y.K., Agarwal R.K. A Method for Modelling Incomplete Mixing in Compositional Simulation of Unstable Displacements // Reservoir Simulation Symposium. – 1989.
- 7 Slobod R. L., Chambers A., Prehn W. L. Use of centrifuge for determining connate water, residual oil and capillary curves of small core samples. Trans. Of AIME. 1951. V.192. P.127.
- 8 Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: «Грааль», 2002. – С. 575. [Brusilovskij A.I. Fazovye prevrashcheniya pri razrabotke mestorozhdenij nefti i gaza. M.: «Graal'», 2002. – S. 575.]
- 9 Андреева Р. Ю. Сопоставление значений капиллярного давления, полученных методами центрифугирования и капилляриметрии // Научный журнал. – 2016. [Andreeva R. YU. Sopostavlenie znachenij kapillyarnogo davleniya, poluchennykh metodami centrifugirovaniya i kapillyarimetrii // Nauchnyj zhurnal. – 2016.]
- 10 Булейко В.М. Закономерности фазовых превращений углеводородных смесей в нефтегазоносных пластах разрабатываемых месторождений // Автореф. дис. докт. техн. наук. М.: ВНИИГАЗ, 2007. [Bulejko V.M. Zakonomernosti fazovykh prevrashchenij uglevodorodnykh smesey v neftegazonosnykh plastah razrabatyvaemykh mestorozhdenij // Avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk. M.: VNIIGAZ, 2007.]
- 11 Дорохин В. Г. Методика использования углекислого газа в различных агрегатных состояниях на подземных хранилищах газа // Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. [Dorohin V. G. Metodika ispol'zovaniya uglekislogo gaza v razlichnykh agregatnykh sostoyaniyah na podzemnykh hranilishchah gaza // Avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. M.: Gazprom VNIIGAZ, 2017.]