УДК 551.50; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-3.12
https://orcid.org/0009-0004-0724-3504
https://orcid.org/0000-0003-2412-3200
https://orcid.org/0009-0007-9050-9554

ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ

А.М. КУСПАНОВА,
PhD,
kungurova.almagul@mail.ru

Г.Б. ЖУМАГАЛИЕВА,
PhD,
bolatqyzy6116@gmail.com

А.Е. ҚАЙЫРЖАНОВА,
магистрант,
aiarukaiyrzhanova@mail.ru

ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКИЙ АГРАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЖАНГИР ХАНА
Республика Казахстан, 090009, г. Уральск, ул. Жангир хана, 51

В данной статье представлена валидация метода определения капиллярного давления, смачиваемости и относительной проницаемости керна методом центрифугирования. Основной целью исследования являлась оценка точности, повторяемости и устойчивости метода при различных температурах и физических свойствах образцов. Эксперименты проводились на двух образцах керна с различной пористостью и проницаемостью, насыщенных водным раствором соли (250 г/л KCl). Для каждого образца выполнялись повторные измерения при комнатной температуре 22°C и повышенной температуре 70° C. Система цифровой фиксации с камерой и стробоскопом была откалибрована с использованием дистиллированной воды известного объема, а калибровочные данные подтверждали стабильность измерений во времени.

Результаты экспериментов показали высокую точность метода: повторные тесты одного и того же образца при одинаковых условиях совпадали в среднем с точностью 97-98%. Также установлено, что значения капиллярного давления зависят от температуры проведения испытаний. Полученные данные подтверждают пригодность метода центрифугирования для лабораторных петрофизических исследований и его соответствие установленному стандарту. Метод может быть рекомендован для надежного и воспроизводимого определения ключевых характеристик керна и может быть использован в качестве основы для разработки унифицированной методики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *капиллярное давление, метод центрифугирования, смачиваемость, относительная проницаемость, керн, повторяемость метода, калибровка оборудования.*

КАПИЛЛЯРЛЫҚ ҚЫСЫМДЫ ОРТАДАН ТЕПКІШТЕУ ӘДІСІНІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫМЕН ҚАЙТАЛАНУШЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ

А.М. КУСПАНОВА, PhD, *kungurova.almagul@mail.ru*
Г.Б. ЖУМАГАЛИЕВА, PhD, *bolatqyzy6116@gmail.com*
А.Е. ҚАЙЫРЖАНОВА, магистрант, *aiarukaiyrzhanova@mail.ru*

ЖӘҢГІР ХАН АТЫНДАҒЫ БАТЫС ҚАЗАҚСТАН АГРАРЛЫҚ-ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Қазақстан Республикасы, 090009, Орал қ., Жәңгір хан к., 51

Бұл мақалада центрифугалау әдісімен керннің капиллярлық қысымын, сулануын және салыстырмалы өткізгіштігін анықтау әдісінің валидациясы ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты үлгілердің әртүрлі температуралары мен физикалық қасиеттері кезінде әдістің дәлдігін, қайталанушылығын және орнықтылығын бағалау болып табылады. Эксперименттер тұздың су ерітіндісімен қаныққан (250 г/л KCl) әртүрлі кеуектілігі мен өткізгіштігі бар екі керн үлгісінде жүргізілді. Әрбір үлгі үшін бөлме температурасында 22 °C және жоғары температурада 70 °C қайта өлшеулер жүргізілді. Камера мен стробоскоппен цифрлық бекіту жүйесі белгілі көлемдегі тазартылған суды пайдалана отырып калибрленген, ал калибрлеу деректері уақыт бойынша өлшеулердің тұрақтылығын растаған.

Эксперименттердің нәтижелері әдістің жоғары дәлдігін көрсетті: бір үлгідегі қайталама тесттер бірдей жағдайларда орташа 97-98% дәлдікпен сәйкес келді. Сондай-ақ капиллярлық қысымның мәні сынақ жүргізу температурасына байланысты екені анықталған. Алынған деректер зертханалық петрофизикалық зерттеулер үшін центрифугалау әдісінің жарамдылығын және оның белгіленген стандартқа сәйкестігін растайды. Әдіс керннің негізгі сипаттамаларын сенімді және жаңғыртылатын анықтау үшін ұсынылуы мүмкін және біріздендірілген әдістемені әзірлеу үшін негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *капиллярлық қысым, ортадан тепкіш әдісі, суланғыштық, салыстырмалы өткізгіштік, керн, әдістің қайталанғыштығы, жабдықты калибрлеу.*

EVALUATION OF THE REPEATABILITY AND STABILITY OF CAPILLARY PRESSURE TEST USING THE CENTRIFUGATION METHOD

A.M. KUSPANOVA, PhD, *kungurova.almagul@mail.ru*
G.B. ZHUMAGALIYEVA, PhD, *bolatqyzy6116@gmail.com*
A.E. KAIYRZHANOVA, master's student, *aiarukaiyrzhanova@mail.ru*

WEST KAZAKHSTAN AGRARIAN AND TECHNICAL UNIVERSITY
NAMED AFTER ZHANGIR KHAN
Republic of Kazakhstan, 090009, Uralsk, Zhangir Khan str., 51

This study presents the validation of a method for determining capillary pressure, wettability, and relative permeability of core samples using the centrifugation technique. The main objective of the research was to assess the accuracy, repeatability, and robustness of the method under different temperatures and physical properties of the samples. Experiments were conducted on two core samples with different porosity and permeability, saturated with an aqueous salt solution (250 g/L KCl). For each sample, repeated measurements were performed at room temperature (22 °C) and elevated temperature (70 °C). The digital data acquisition system, consisting of a camera and stroboscopic device, was calibrated using distilled water of known volume, and the calibration data confirmed the stability of measurements over time.

The experimental results demonstrated the high accuracy of the method: repeated tests of the same sample under identical conditions matched on average with an accuracy of 97-98%. It was also established that capillary pressure values depend on the testing temperature. The obtained data confirm the suitability of the centrifugation method for laboratory petrophysical studies and its compliance with the established standard. The method can be recommended for reliable and reproducible determination of key core properties and can serve as a basis for the development of a unified laboratory methodology.

KEYWORDS: *capillary pressure, centrifuge method, wettability, relative permeability, core, method repeatability, equipment calibration.*

Введение. Понимание капиллярного давления является фундаментальной задачей при изучении поведения двухфазных систем в пористых средах, так как оно определяет распределение насыщенности флюидов и оказывает существенное влияние на относительную проницаемость, остаточную водонасыщенность и процессы вытеснения в керне горных пород, что является ключевым компонентом гидродинамического моделирования нефтегазовых коллекторов [1].

Среди лабораторных методов измерения капиллярного давления наиболее распространёнными являются методы полупроницаемой мембраны (капилляриметрия) и центрифугирования. Первый основан на создании статического перепада давления и измерении вытеснения смачивающего флюида через мембрану [2]. Метод центрифугирования, в свою очередь, обеспечивает динамическое изменение центробежной силы, что позволяет получать зависимости насыщенности от приложенного давления для различных скоростей вращения ротора [3].

Метод центрифугирования получил широкое распространение благодаря работам Hassler и Brunner, которые показали возможность быстрого получения кривых капиллярного давления по сравнению с равновесными методами [4]. Дальнейшее развитие метода было связано с совершенствованием математических моделей интерпретации данных и учетом неравномерного распределения насыщенности вдоль образца [5, 6].

Интерпретация данных центрифугирования требует перехода от измеряемых значений среднего насыщения к локальным значениям насыщенности на входном торце образца и дальнейшего расчёта кривых капиллярного давления, что связано с наличием неоднородности насыщенности и граничных эффектов в образце [7]. В литературе описано множество подходов к этому преобразованию, включая аналитические и численные методы, направленные на повышение точности построения капиллярных кривых [1, 3].

Развитие методик интерпретации сопровождалось появлением модификаций классических подходов, таких как изменение процедуры приведения центрифужных данных (например, модификация метода Форбса), что позволяет улучшить точность и устойчивость результатов анализа [8].

В последние годы внимание исследователей привлекают работы по цифровому моделированию капиллярных явлений с использованием 3D-томографий и сети пор, что способствует глубокому пониманию распределения насыщенности и влияния гетерогенности порового пространства на кривые капиллярного давления, а также позволяет сравнивать результаты моделирования с экспериментальными данными, полученными методом центрифугирования и другими подходами [9].

Помимо математического моделирования, интеграция методов визуализации, таких как магнитно-резонансная томография, с экспериментами на центрифуге предоставляет возможность измерять распределение насыщенности вдоль образца непосредственно и таким образом уточнять капиллярные кривые в сочетании с традиционными вычислительными методами [10].

Современные исследования показывают, что воспроизводимость результатов лабораторных измерений существенно зависит от качества подготовки керна, свойств используемых флюидов, соблюдения экспериментальных процедур и контроля условий проведения испытаний [11, 12]. В связи с этим валидация методик измерений рассматривается как необходимый этап обеспечения достоверности и качества петрофизических исследований [13].

Ключевыми практическими аспектами центрифужных экспериментов являются вопросы качества лабораторных измерений, такие как определение порога начала вытеснения, влияние артефактов насыщенности и устойчивость к условиям эксперимента, включая физические свойства образцов и флюидов [14]. Повышение качества экспериментальных данных требует методической валидации техники центрифугирования и сопоставления её результатов с результатами других методик измерения капиллярного давления [14, 15].

В отечественной литературе отмечается отсутствие единых методических стандартов для интерпретации результатов центрифугирования и необходимость систематизации подходов для повышения воспроизводимости и сопоставимости результатов различных лабораторий. Сопоставление кривых капиллярного давления, полученных методом центрифугирования, с кривыми из капилляриметрии на тех же образцах позволяет выявить постоянные систематические расхождения и оптимизировать методы обработки данных.

Таким образом, валидация метода центрифугирования как средства получения точных и воспроизводимых кривых капиллярного давления остаётся актуальной задачей лабораторной петрофизики и требует анализа точности, устойчивости и чувствительности метода к изменению экспериментальных параметров, что является предметом настоящего исследования.

Материалы и методы исследования

Метод центрифугирования, применённый для измерения капиллярного давления керна, основан на определении зависимости капиллярного давления от степени насыщенности при различных скоростях вращения ротора, в соответствии с методикой ASTM D6836-16 (Method E) [16], при которой изменение центробежной силы создаёт серию уровней давления, а объём вытесненной жидкости регистрируется для построения кривой «давление — насыщенность».

Для валидации метода использовались два образца керна с различной пористостью (17,12% и 25,13%) и проницаемостью (99,07 и 140,22 мД). Перед проведением центрифужных испытаний образцы керна высушивались до постоянной массы. Насыщение образцов осуществлялось путём вакуумирования с последующим нагнетанием раствора под давлением. Герметичная ёмкость с образцами вакуумировалась в течение 4 часов для удаления воздуха из пор. Водный раствор хлорида калия (KCl, 250 г/л) предварительно дегазировался методом вакуумирования для удаления рас-

творённых газов и затем вводился в ёмкость до полного покрытия образцов. После этого проводилось донасыщение под давлением 50–200 бар в течение 12–48 часов для обеспечения полной водонасыщенности и заполнения порового пространства. Полнота насыщения контролировалась гравиметрически по приросту массы с учётом пористости образцов и плотности раствора.

После насыщения образцы подвергались центрифугированию при скоростях от 0 до 4400 об./мин для построения кривых капиллярного давления. Использовалась петрофизическая центрифуга Hettich Zentrifugen D-78532 с системой цифрового сбора данных и стробоскопом; калибровка проводилась дистиллированной водой известного объёма и повторялась в течение двух месяцев для подтверждения стабильности оборудования. Метод тестировался для оценки повторяемости и устойчивости при двух температурах 22° С и 70° С.

Результаты и обсуждение

В течение двух месяцев было проведено 10 калибровок системы цифрового сбора данных центрифуги с использованием стандартных объёмов воды (7-19 мл). Полученные значения количества пикселей для каждого объёма оставались практически неизменными на протяжении всего периода, колебания не превышали 1-2 %. Полученные данные свидетельствовали о высокой стабильности и воспроизводимости работы оборудования, обеспечивая точность цифровой фиксации объёма жидкости для последующих измерений капиллярного давления.

Данные *таблицы 1* демонстрируют закономерное изменение параметров насыщенности и капиллярного давления при увеличении скорости вращения центрифуги. При низких скоростях (0-400 об./мин) средняя и торцевая насыщенность сохраняются на уровне 1,000, что свидетельствует об отсутствии вытеснения жидкости из порового пространства керна и преобладании капиллярных сил удержания флюида.

Таблица 1 – **Показатели капиллярного давления методом центрифугирования в зависимости от скорости вращения (образец №1, температура 22° С)**

Скорость (об./мин)	Продукция (мл)	Средняя насыщенность (д. ед.)	Давление (кПа)	Торцевая насыщенность (д. ед.)
Первый тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	12,4	1,000
596	0,23	0,977	36	0,960
888	3,02	0,700	79	0,502
1324	4,98	0,506	176	0,370
1974	6,15	0,391	390	0,314
2946	6,84	0,322	869	0,280
4400	7,31	0,276	1937	0,251
Повторный тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	12,4	1,000
596	0,37	0,964	36	0,938
888	3,02	0,700	79	0,511
1324	4,98	0,506	176	0,370
1974	6,11	0,394	390	0,320
2946	6,78	0,328	869	0,288
4400	7,21	0,286	1937	0,263

С увеличением скорости вращения до 596-1324 об./мин наблюдается постепенное снижение средней насыщенности с 0,977 до 0,506 и одновременный рост капиллярного давления с 36 до 176 кПа. Это указывает на начало активного вытеснения жидкости из пор под воздействием возрастающих центробежных сил.

При высоких скоростях вращения (1974-4400 об./мин) снижение насыщенности становится более выраженным: средняя насыщенность уменьшается до 0,276, а торцевая – до 0,251, при этом капиллярное давление достигает 1937 кПа. Данная тенденция отражает переход системы в режим интенсивного вытеснения жидкости, при котором капиллярные силы уступают центробежным.

Сравнение первого и повторного тестов показывает их высокую сходимость: расхождения значений средней и торцевой насыщенности не превышают 1-2 %, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов и стабильности метода центрифугирования.

Результаты, представленные в *таблице 2*, показывают аналогичную закономерность изменения капиллярного давления и насыщенности для образца № 2. При низких скоростях вращения (0-400 об./мин) насыщенность керна остается максимальной, что подтверждает полное удержание жидкости в поровом пространстве.

Таблица 2 – **Показатели капиллярного давления методом центрифугирования в зависимости от скорости вращения (образец №2, температура 22° С)**

Скорость (об./мин)	Продукция (мл)	Средняя насыщенность (д. ед.)	Давление (кПа)	Торцевая насыщенность (д. ед.)
Первый тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	12,1	1,000
596	0,23	0,984	35	0,972
888	3,79	0,740	78	0,563
1324	6,81	0,532	173	0,385
1974	8,94	0,386	384	0,286
2946	10,40	0,285	854	0,220
4400	11,43	0,214	1905	0,172
Повторный тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	12,1	1,000
596	0,40	0,973	35	0,953
888	3,82	0,737	78	0,568
1324	6,91	0,525	173	0,375
1974	9,07	0,376	384	0,275
2946	10,56	0,274	854	0,207
4400	11,63	0,201	1905	0,156

В диапазоне скоростей 596-1324 об./мин средняя насыщенность снижается с 0,984 до 0,532, а капиллярное давление возрастает с 35 до 173 кПа. При максимальных скоростях вращения (1974-4400 об./мин) средняя насыщенность уменьшается до 0,214, а давление достигает 1905 кПа, что свидетельствует об интенсивном вытеснении жидкости.

По сравнению с образцом № 1, образец № 2 характеризуется более быстрым снижением насыщенности при сопоставимых значениях давления. Это может быть связано с различиями в петрофизических свойствах керна, прежде всего с более

высокой пористостью и проницаемостью образца № 2. Таким образом, полученные результаты подтверждают зависимость параметров капиллярного давления от структурно-поровых характеристик породы.

Сравнение первого и повторного тестов также демонстрирует высокую воспроизводимость результатов, что подтверждает надежность метода.

Данные *таблицы 3* отражают влияние повышенной температуры на параметры капиллярного давления и насыщенности образца № 1. При низких скоростях вращения (0-400 об./мин) средняя и торцевая насыщенность сохраняются на уровне 1,000, что свидетельствует о полном заполнении порового пространства жидкостью.

Таблица 3 – **Показатели капиллярного давления методом центрифугирования в зависимости от скорости вращения (образец №1, температура 70° С)**

Скорость (об./мин)	Продукция (мл)	Средняя насыщенность (д. ед.)	Давление (кПа)	Торцевая насыщенность (д. ед.)
Первый тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	12,1	1,000
596	0,40	0,960	35	0,932
888	3,09	0,694	77	0,502
1324	5,18	0,486	172	0,341
1974	6,45	0,361	382	0,278
2946	7,24	0,282	851	0,233
4400	7,74	0,233	1897	0,206
Повторный тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	12,1	1,000
596	0,33	0,967	35	0,943
888	2,99	0,704	77	0,514
1324	5,18	0,486	172	0,334
1974	6,45	0,361	382	0,278
2946	7,31	0,276	851	0,222
4400	7,84	0,223	1897	0,194

В диапазоне скоростей 596-1324 об./мин наблюдается снижение средней насыщенности с 0,960 до 0,486 и рост капиллярного давления с 35 до 172 кПа. При высоких скоростях вращения (1974-4400 об./мин) средняя насыщенность уменьшается до 0,233, а давление достигает 1897 кПа, что указывает на интенсивное вытеснение жидкости из порового пространства.

Сравнение первого и повторного тестов показывает их высокую сходимость, что подтверждает стабильность метода при повышенной температуре.

Сопоставление результатов при температурах 22 °С и 70 °С выявляет тенденцию к несколько более низким значениям насыщенности при повышенной температуре при сопоставимых уровнях давления. Это может быть связано с изменением вязкости флюида, межфазного натяжения и характера взаимодействия флюида с поверхностью породы, что подтверждает чувствительность метода к температурным условиям.

Данные *таблицы 4* характеризуют изменение капиллярного давления и насыщенности образца № 2 при температуре 70 °С. Как и в предыдущих экспериментах, при низких скоростях вращения (0-400 об./мин) насыщенность сохраняется на максимальном уровне, что свидетельствует о полном заполнении пор жидкостью.

Таблица 4 – **Показатели капиллярного давления методом центрифугирования в зависимости от скорости вращения (образец №2, температура 70° С)**

Скорость (об./мин)	Продукция (мл)	Средняя насыщенность (д. ед.)	Давление (кПа)	Торцевая насыщенность (д. ед.)
Первый тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	11,9	1,000
596	0,40	0,973	34	0,953
888	3,89	0,733	76	0,560
1324	7,18	0,507	169	0,347
1974	9,47	0,349	376	0,241
2946	11,06	0,239	836	0,168
4400	12,16	0,164	1865	0,119
Повторный тест				
0	0,00	1,000	0,0	1,000
400	0,00	1,000	11,9	1,000
596	0,37	0,975	34	0,957
888	3,82	0,737	76	0,566
1324	7,08	0,513	169	0,355
1974	9,40	0,354	376	0,244
2946	11,00	0,244	836	0,173
4400	12,06	0,171	1865	0,127

При увеличении скорости вращения до 596-1324 об./мин средняя насыщенность уменьшается с 0,973 до 0,507, а капиллярное давление возрастает с 34 до 169 кПа. При максимальных скоростях вращения (1974-4400 об./мин) средняя насыщенность снижается до 0,164, а давление достигает 1865 кПа, что отражает интенсивное вытеснение жидкости из порового пространства.

Сравнение результатов первого и повторного тестов показывает их высокую воспроизводимость, что подтверждает надежность метода при повышенной температуре.

По сравнению с образцом № 1 при аналогичной температуре, образец № 2 демонстрирует более выраженное снижение насыщенности при сопоставимых значениях давления. Это подтверждает влияние петрофизических характеристик породы на параметры капиллярного давления и процесс вытеснения флюида.

На *рисунке 1* приведено процентное расхождение между повторными измерениями образцов керна.

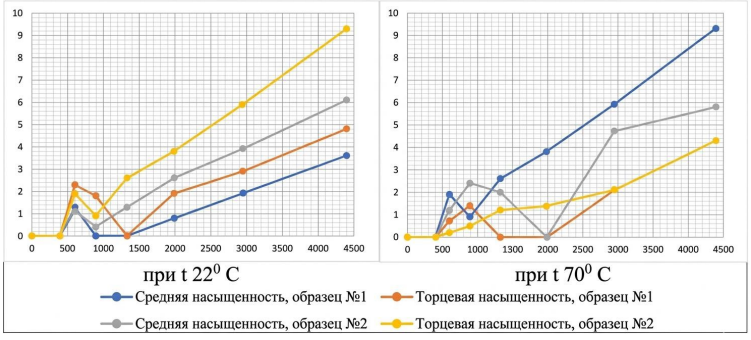

Рисунок 1 – **Расхождение между повторными измерениями образцов керна, %**

Анализ процентного расхождения между повторными измерениями двух образцов керна показывает, что повторяемость метода центрифугирования в целом высокая, но зависит от скорости вращения центрифуги. При низких скоростях (0-400 об./мин) расхождения отсутствуют, средняя и торцевая насыщенность полностью совпадают, что свидетельствует о стабильном удержании жидкости в поровом пространстве. При средних скоростях (596–1324 об./мин) расхождения обычно остаются минимальными – 1-3 %, однако в отдельных точках наблюдаются более значительные отличия, достигающие 9 %, что связано с динамическими эффектами вытеснения жидкости и чувствительностью метода к градиентам насыщенности вдоль образца. На высоких скоростях (1974-4400 об./мин) при интенсивном вытеснении жидкости расхождения увеличиваются, но даже в этих условиях большинство измерений демонстрируют расхождение не более 3-5 %. Сравнение данных при 22 °C и 70 °C показывает, что повышение температуры не приводит к систематическому увеличению расхождения, а метод сохраняет высокую воспроизводимость в широком диапазоне условий. Эти результаты подтверждают надёжность методики центрифугирования и её способность давать воспроизводимые данные о капиллярном давлении и распределении насыщенности в керне.

Заключение и выводы

Предложенный метод отличается от традиционных аналогов рядом преимуществ. Использование центрифугирования в сочетании с цифровой системой сбора данных и калибровкой обеспечивает высокую точность и воспроизводимость измерений. Метод позволяет быстро получать данные о капиллярном давлении и насыщенности, включая распределение торцевой и средней насыщенности одновременно, что делает его более информативным по сравнению с классическими методами. Кроме того, метод устойчив к изменениям температуры, что расширяет его практическую применимость для исследований керна и моделирования пластовых условий. Высокая воспроизводимость измерений (расхождения не превышают в среднем 2-3 %) подтверждает устойчивость методики и возможность её применения для моделирования пластовых условий и уточнения петрофизических параметров коллекторов.

В ходе испытаний было установлено, что полный цикл получения одной кривой капиллярного давления занимает на 30–40 % меньше времени по сравнению с традиционными мембранными методами. Цифровая регистрация параметров в режиме реального времени позволяет фиксировать динамику перераспределения флюидов в образце на каждом этапе эксперимента и исключает ошибки, связанные с ручной обработкой данных.

Полученные результаты демонстрируют стабильность измерений в широком диапазоне капиллярных давлений, характерных для продуктивных пластов различного литологического состава. Одновременное определение средней и торцевой насыщенности обеспечивает более детальное описание неоднородности фильтрационно-емкостных свойств керна и повышает достоверность интерпретации экспериментальных данных. Дополнительным преимуществом является возможность использования полученных зависимостей для адаптации гидродинамических моде-

лей и уточнения функций относительных фазовых проницаемостей. Практические испытания показали, что метод обеспечивает надежное воспроизведение результатов как для высокопроницаемых, так и для низкопроницаемых образцов, что подтверждает его универсальность при исследовании коллекторов различного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1 Kamari E., Beyrami H., Montazeri M. Capillary pressure profile estimation using numerical method and centrifuge test data // Geoenergy Science and Engineering. -2024. -Vol. 241. -P. 213121:1–213121:9. DOI: 10.2139/ssrn.4757806.

2 Ратников И.Б., Шульга Р.С., Романов Е.А. Интерпретация данных капиллярных исследований // Горные науки и технологии. – 2016. – № 4. – С. 24-39. [Ratnikov I.B.. Shulga R.S.. Romanov E.A. Interpretatsiya dannykh kapillyarnykh issledovaniy // Gornyye nauki i tekhnologii. – 2016. – № 4. – S. 24-39.]

3 Moghaddam R.N. A rapid and accurate method for calculation of capillary pressure from centrifuge data // Journal of Petroleum Science and Engineering. -2015. -Vol. 135. -P. 577-582.

4 Hassler G.L., Brunner E. Measurement of capillary pressures in small core samples // Petroleum Transactions, AIME. – 1945. – Vol. 160. – P. 114–123.

5 Chen Zh.A., Ruth D.W. Centrifuge capillary pressure data reduction with a modified Forbes method // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1993. – Vol. 9(4). – P. 303–312. DOI: 10.1016/0920-4105(93)90061-I.

6 Liu Y., Zhang J., Wang H., et al. An integral method for calculation of capillary pressure based on centrifuge data of tight sandstone // Petroleum Science. – 2022. – Vol. 19(1). – P. 91–99. DOI: 10.1016/j.petsci.2021.10.013.

7 Skuse B., Ramey H.J., Firoozabadi A. Computation and interpretation of capillary pressure from a centrifuge (includes associated papers 24962 and 25291) // SPE Formation Evaluation. -1992. -Vol. 7. - P. 17-24. DOI:10.2118/18297-PA.

8 Chen Zh.A., Ruth D.W. Centrifuge capillary pressure data reduction with a modified Forbes method // Journal of Petroleum Science and Engineering. -1993. -Vol. 9(4). -P. 303-312. DOI: 10.1016/0920-4105(93)90061-I.

9 Shikhov I., Arns C.H. Evaluation of Capillary Pressure Methods via Digital Rock Simulations // Transport in Porous Media. -2015. -Vol. 107. -P. 623–640. DOI: 10.1007/s11242-015-0459-z.

10 Chen Q., Balcom B.J. Measurement of rock-core capillary pressure curves using a single-speed centrifuge and one-dimensional magnetic-resonance imaging // The Journal of Chemical Physics. -2005. -Vol. 122(21):214720. DOI: 10.1063/1.1924547.

11 Anderson W.G. Wettability Literature Survey—Part 1: Rock/Oil/Brine Interactions and the Effects of Core Handling on Wettability // Journal of Petroleum Technology. – 1986. – Vol. 38(10). – P. 1125–1144. DOI: 10.2118/13932-PA.

12 Fleury M., Forbes P., Reed J., McPhee C. Best Practice in Coring and Core Analysis // Developments in Petroleum Science. – 2015. – Vol. 64. – P. 1–15. DOI: 10.1016/B978-0-444-63533-4.00001-9.

13 Ma S.M., Amabeoku M. Core Analysis with Emphasis on Carbonate Rocks—Quality Assurance and Control for Accuracy and Representativeness // Interpretation. – 2014. – Vol. 3(1). – P. SA91–SA104. DOI: 10.1190/INT-2014-0072.1.

14 Борисов А.Г. Качество лабораторных испытаний: использование результатов центрифугирования для изучения капиллярных характеристик и остаточной водонасыщенности // Вестник АГГИ. -2025. -№ 1. – С. 108–128. ISSN 3034-6703. [Borisov A.G. Kachestvo laboratornykh ispytaniy: ispolzovaniye rezultatov tsentrifugirovaniya dlya izucheniya kapillyarnykh kharakteristik i ostatochnoy vodonasyshchennosti // Vestnik AGGI. -2025. -№ 1. – S. 108–128. ISSN 3034-6703.]

15 Андреева Р.Ю. Сопоставление значений капиллярного давления, полученных методами центрифугирования и капилляриметрии// Научный журнал. КазНИГИ. -2016. – С. 9-12. [Andreyeva R.Yu. Sopostavleniye znacheniy kapillyarnogo davleniya. poluchennykh metodami tsentrifugirovaniya i kapillyarimetrii// Nauchnyy zhurnal. KazNIGI. -2016. – C. 9-12.]

16 ASTM D6836-16. Standard Test Method for Determination of the Soil Water Characteristics Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.