

## Получение кривых капиллярного давления в системе вода–газ с использованием методов центрифугирования и ЯМР в атмосферных условиях

Артем Геннадьевич Потапов<sup>✉</sup>, Максим Ильварович Загидуллин

Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия  
Контакт для переписки: [agpotapov@tnnc.rosneft.ru](mailto:agpotapov@tnnc.rosneft.ru)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** В настоящее время в лабораторной практике для определения капиллярных характеристик используют три основных способа: с помощью центрифуги, полупроницаемой мембраны и вдавливанием ртути, а также путем комплексирования центрифугирования с другими методами. В статье кратко рассмотрены принципы определения кривых капиллярного давления различными способами и указаны их отличия, достоинства и недостатки.

При определении кривых капиллярного давления методом центрифугирования и последующем пересчете на входной торец образца основным источником ошибки является процесс интерпретации. Форма кривой капиллярного давления также зависит от метода расчета насыщенности на входном торце образца. В связи с чем требуется надежный и быстрый способ контроля полученных кривых капиллярного давления. Комплексирование метода ЯМР и центрифугирования позволяет измерять профиль насыщенности образца после центрифугирования и пересчитывать его в водонасыщенность при соответствующем капиллярном давлении.

В статье подробно рассмотрен способ получения кривых капиллярного давления с помощью центрифугирования и метода ЯМР, приведена подробная последовательность операций для проведения измерений. Определено минимальное допустимое время перераспределения воды в образце, за которое не произойдет искажения профиля водонасыщенности в образцах керна.

В статье приводится сравнение кривых капиллярного давления, полученных с помощью измерений водонасыщенности методом ЯМР, с кривыми капиллярного давления на входном торце образца, рассчитанными по 10 различным формулам.

Комплексирование метода ЯМР и центрифуги позволило выбрать 2 наиболее достоверных уравнения для расчета кривых капиллярного давления на входном торце образца керна — уравнение Раджана и второе уравнение Форбса. Максимальное отклонение составило 11,6% и 12,2% соответственно. Экспериментально определено максимальное время, за которое необходимо провести ЯМР измерение, чтобы профиль насыщенности образца изменился незначительно. Оно составило 40 минут.

**Ключевые слова:** кривые капиллярного давления, метод центрифугирования, метод ЯМР, лабораторные исследования керна, водонасыщенность, уравнение Хаслера–Брунера

**Цитирование:** Потапов А. Г., Загидуллин М. И. 2025. Получение кривых капиллярного давления в системе вода–газ с использованием методов центрифугирования и ЯМР в атмосферных условиях // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 11. № 2 (42). С. 6–24. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-2-6-24>

Поступила 01.11.2024; одобрена 06.06.2025; принята 09.06.2025

## Obtaining capillary pressure curves in the water–gas system using centrifugation and NMR techniques under atmospheric conditions

Artem G. Potapov✉, Maxim I. Zagidullin

Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

Corresponding author: [agpotapov@tnnc.rosneft.ru](mailto:agpotapov@tnnc.rosneft.ru)✉

**Abstract.** At present, in laboratory practice, three main methods are used to determine capillary characteristics: by centrifuge, semipermeable membrane and mercury indentation, as well as ways to combine the centrifugation method with other methods. This article examines the principles of determination of capillary pressure curves by different methods and briefly discusses their differences, advantages, and disadvantages.

When determining capillary pressure curve by centrifugation and subsequent conversion to the inlet end of the sample, the main source of error is the interpretation process. The shape of the capillary pressure curve also depends on the method of calculating the saturation at the inlet end of the sample. Therefore, a reliable and

fast method of controlling the obtained capillary pressure curves is required. By combining NMR and centrifugation, the saturation profile of the sample after centrifugation can be measured and converted to water saturation at the corresponding capillary pressure.

The article thoroughly describes the method of obtaining capillary pressure curve by centrifugation and NMR method, the detailed sequence of operations for measurements is given. The minimum permissible time of water redistribution in the sample, during which no distortion of water saturation profile in core samples will occur, is determined.

The paper compares the capillary pressure curves obtained by direct water saturation measurements with the capillary pressure curves at the inlet end of the sample calculated by 10 different formulas.

The combination of NMR and centrifuge methods allowed us to select 2 most reliable equations for calculating the capillary pressure curves at the inlet face of the core sample — Rajan equation and the second Forbes equation. The maximum deviation was 11.6% and 12.2%, respectively. The maximum time for which the NMR measurement should be carried out so that the saturation profile of the sample would change insignificantly was determined experimentally. It amounted to 40 minutes.

**Keywords:** capillary pressure curves, centrifugation method, NMR method, laboratory core studies, water saturation, Hasler–Bruner equation

**Citation:** Potapov, A. G., & Zagidullin, M. I. (2025). Obtaining capillary pressure curves in the water–gas system using centrifugation and NMR techniques under atmospheric conditions. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 11(2), 6–24. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2025-11-2-6-24>

Received Nov. 1, 2024; Reviewed Jun. 6, 2025; Accepted Jun. 9, 2025

## Введение

Известно, что капиллярные силы влияют на формирование нефтегазовых залежей, а также на их разработку. Распределение флюидов в пласте-коллекторе по вертикали происходит при стремлении капиллярных и гравитационных сил к равновесному состоянию. Таким же образом формируется поверхность водонефтяного контакта в различных частях залежи. Капиллярные силы активно участвуют при разработке месторождений формируя капиллярные барьеры, перетоки флюидов и влияют на продвижение фронта наводнения и конечную нефтеотдачу пласта. Кривые капиллярного давления (ККД) необходимо учитывать в геологических и гидродинамических моделях и при планировании различных геолого-технологических и промысловых задач. Для повышения достоверности гидродинамического моделирования необходимо в модель закладывать ККД, которые точно описывают распределение флюидов в породе [Борисов, 2013; Ратников, 2016].

В настоящее время в лабораторной практике одним из основных и наиболее быстрых способов получения капиллярных характеристик является центрифугирование образцов кернa.

В России один из способов определения ККД методом центрифугирования описан в ОСТ 39-204-86<sup>1</sup>. При таком способе изучения водонасыщенность породы непосредственно не устанавливают, ее рассчитывают по измерениям выделившейся жидкости из образца на определенной скорости вращения центрифуги. Капиллярное давление, согласно ОСТу, рассчитывают по формуле:

$$P_c = 1,09 \cdot 10^{-9} \Delta \rho n^2 \left( \frac{9rl + 4l^2}{36} \right), \quad (1)$$

где  $P_c$  — капиллярное давление, МПа;  $\Delta \rho$  — разность плотностей флюидов, г/см<sup>3</sup>;  $n$  — частота вращения ротора, об/мин;  $l$  — длина образца, см;  $r$  — радиус вращения образца, см.

Данные о водонасыщенности рассчитывают по изменению массы образца или по количеству вышедшей из образца воды, если на центрифуге было стробоскопическое устройство. В любом случае капиллярное давление рассчитывают на середину образца, а насыщенность соответствует средней насыщенности образца [МакФи и др., 2018].

В зарубежной практике используют высокоскоростные центрифуги с горизонтальным расположением ротора и автоматической фиксации выхода воды из образца в приемную пробирку с помощью фотокамеры и стробоскопических устройств. Подход к расчету ККД также отличается. По количеству вытесненной воды рассчитывают среднюю водонасыщенность в образце на каждом режиме центрифугирования. Затем с помощью приближенного решения уравнения Хаслера–Брунера (2) рассчитывают насыщенность на входном торце образца [Forbes, 1994; Rajan, 1986]. Данное уравнение не имеет прямого аналитического решения, поэтому существует множество методов его решения с применением различных допущений. Например, формула (3) является решением уравнения (2) с допущением, что отсутствует градиент центробежной силы и что  $R = r_1/r_2 = 1$  [Rajan, 1986]. Соотнеся рассчитанную насыщенность на входном торце образца (3) с капиллярным давлением также на входном торце образца (4), получают кривую капиллярного давления [Forbes, 1994]. При таком подходе получают более высокие капиллярные давления при одинаковых скоростях вращения ротора по сравнению с методикой, описанной в ОСТ.

$$\bar{S} = \frac{r_1 + r_2}{2\sqrt{P_{c1}}} \int_0^{P_{c1}} \frac{S(P_c)}{\sqrt{r_2^2 P_{c1} - (r_2^2 - r_1^2) P_c}} dP_c, \quad (2)$$

$$S_1 = \bar{S} + P_{c1} \cdot \frac{d\bar{S}}{dP_{c1}}, \quad (3)$$

<sup>1</sup> ОСТ 39-204-86. Нефть. Метод лабораторного определения остаточной водонасыщенности коллекторов нефти и газа по зависимости насыщения от капиллярного давления. М.: Типография ХОЗУ Миннефтепрома, 1986. 26 с.

где  $\bar{S}$  — средняя насыщенность образца;  $S_1$  — насыщенность на входном торце;  $P_{c1}$  — капиллярное давление на входном торце;  $r_2$  — расстояние от центра вращения до выходного торца образца (откуда выходит жидкость), см;  $r_1$  — расстояние до входного торца образца, см

$$P_c = \frac{1}{2} \Delta \rho \omega^2 (r_2^2 - r_1^2), \quad (4)$$

где  $\Delta \rho$  — разность между плотностями фаз;  $\omega$  — скорость вращения.

К преимуществам метода центрифугирования относится:

- Скорость измерения ККД по сравнению с методом полупроницаемой мембраны.
- Данный метод позволяет получать более высокие капиллярные давления по сравнению с методом полупроницаемой мембраны, что позволяет измерять образцы с низкой проницаемостью.
- Метод подходит для большинства типов горных пород.
- Возможность выполнения измерений в термобарических условиях.

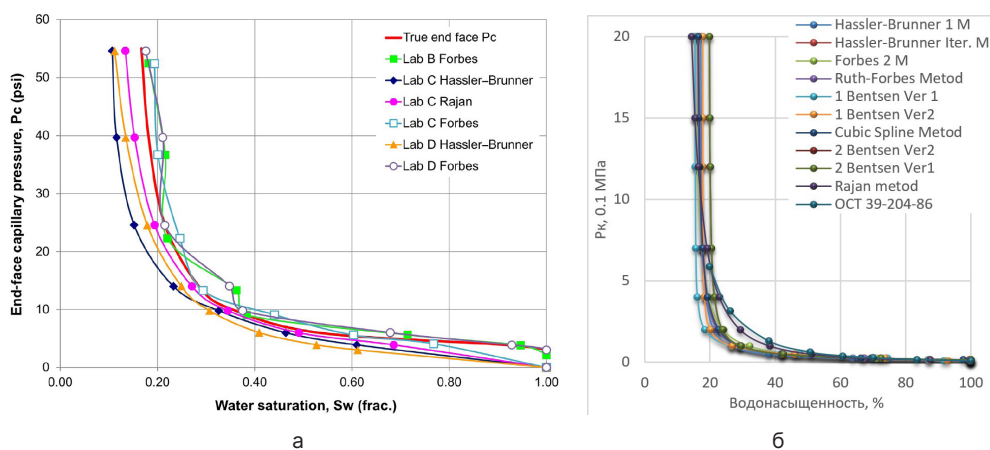
К недостаткам данного метода относится:

- Дороговизна оборудования.
- Высокие центробежные силы могут приводить к образованию трещин в образце или к его разрушению.
- Основной источник неточности в определении ККД при вытеснении в центрифуге связан не с экспериментальными ошибками, а с процессом интерпретации [МакФи и др., 2018].
- Форма ККД зависит от метода расчета насыщенности на входном торце образца (рис. 1).

На рис. 1а показаны результаты проверки трех лабораторий, которым были предоставлены данные о выходе воды из образца и геометрии центрифуги, выведенные из придуманной ККД. Кроме того, были предоставлены некоторые стандартные экспериментальные измерения. Истинная ККД показана на рисунке красным цветом. Лаборатории обработали данные с использованием своих стандартных решений. Результаты (рис. 1а) подтверждают вероятную погрешность, получаемую просто в результате использования различных методологий и протоколов обработки [МакФ и др., 2018].

На рис. 1б показаны результаты расчета ККД с помощью различных формул, выполненные на одном и том же образце в центре исследований ядра Тюменского нефтяного научного центра. В некоторых случаях разница в водонасыщенности при одном капиллярном давлении может достигать до 20–30% в абсолютных величинах.

Для корректного выбора расчетного уравнения необходимо сопоставлять результаты расчета с результатами ККД, полученными прямыми или косвенными измерениями, позволяющими однозначно определить водонасыщенность.



**Рис. 1.** а — Расчеты ККД в разных лабораториях на основе синтетических данных о выходе воды из образца [МакФи и др., 2018]; б — расчеты ККД на одном и том же образце разными методами выполненные в ТННЦ

**Fig. 1.** а — Calculations of capillary pressure curve in different laboratories based on synthetic data on water yield from the sample [McPhee et al., 2018]; б — calculations of the capillary pressure curve on the same sample by different methods performed in Tyumen Petroleum Research Center

Метод пористой мембраны считается прямым методом определения ККД и самым точным, но занимает много времени, поскольку каждая точка капиллярного давления требует значительного времени для установления равновесного состояния, которое может занять недели или месяцы. Метод достаточно прост в реализации. Насыщенные моделью пластовой воды образцы устанавливаются на насыщенную тем же раствором полупроницаемую мембрану. Между образцами и мембраной укладывают слой фильтровальной бумаги, для улучшения капиллярного контакта. В камере создают избыточное давление газом, которое регулируют высокоточным газовым редуктором и датчиком давления. После наступления равновесного состояния, когда из образцов перестает выходить вода, образцы достают из камеры и взвешивают. Процесс создания избыточного давления в камере и взвешивания повторяют несколько раз, каждый раз увеличивая давление. По разнице масс полностью насыщенного образца и частично насыщенного рассчитывают насыщенность. Таким образом значения насыщенности и давления для ККД получают однозначно, без использования приближенных решений.

К преимуществам данного метода относятся:

- Равномерное распределение насыщенности вдоль оси образца.
- Отсутствие поправок и сложных расчетов.
- Подходит для глинистых, и слабоконсолидированных образцов.
- Неразрушающий метод.

К недостаткам данного метода относится:

- Большая длительность измерения ККД — до нескольких месяцев.
- Возможная потеря капиллярного контакта.
- Возможное подсыхание образцов.

Методы измерения водонасыщенности при определении ККД могут включать комплексирование центрифугирования с другими методами:

- Метод центрифугирования с визуализацией ядерного трассера (NTIC) [Ferno, 2009].
- Метод ЯМР, центрифугирование и резистивиметрия (измерение удельного электрического сопротивления); [Faurissoux et al., 2017].
- Метод ЯМР и центрифугирование:
  - ✓ один режим центрифугирования [Chen, Balcom, 2006];
  - ✓ несколько режимов центрифугирования [Baldwin, Yamanashi, 1991].

Метод центрифугирования с визуализацией ядерного трассера основан на центрифугировании образцов керн в барических условиях. При центрифугировании в образцах керн создают распределение водонасыщенности, которое измеряют непосредственно во время центрифугирования путем обнаружения германиевым (Ge) детектором излучаемой гамма-энергии изотопа  $^{22}\text{NaCl}$ , добавляемого в водную фазу. Ge-детекторы представляют собой полупроводниковые диоды, чувствительные к ионизирующему излучению, в частности к рентгеновскому и гамма-излучению. Коллиматор фокусирует измерения на тонком поперечном срезе активной зоны. Объем поперечного среза составляет 6 мм, что позволяет получить десять точек профиля водонасыщенности на образце керн длиной 60 мм. Коллимированный германиевый детектор устанавливают на автоматизированной системе позиционирования и во время центрифугирования располагают прямо над крышкой центрифуги. Схема измерения водонасыщенности образцов керн с помощью германиевого детектора показана на рис. 2 [Sukka, 2004].

Интенсивность излучения прямо пропорциональна насыщенности флюида. Водонасыщенность в любом сечении образца керн может быть рассчитана по формуле:

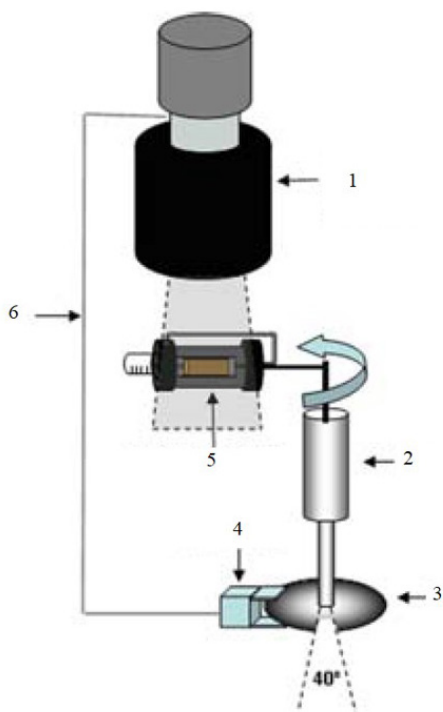
$$S_{wi} = \frac{a_i}{a_{i100}} 100\%, \quad (5)$$

где  $a_i$  — интенсивность (распад в секунду) в сечении  $i$  во время центрифугирования;  $a_{i100}$  — интенсивность полностью водонасыщенного образца в  $i$ -м сечении.

Преимущество данного метода определения ККД перед другими заключается в следующем:

- Сокращение режимов центрифугирования и увеличение скорости исследований.
- Точное и однозначное определение водонасыщенности во время центрифугирования.





**Рис. 2.** Схема измерения водонасыщенности образцов керна с помощью германиевого детектора: 1 — коллимированный германиевый детектор; 2 — вал центрифуги; 3 — стробирующий диск; 4 — фотодиод; 5 — вращающийся образец горной породы в кернодержателе; 6 — сигнал включения/выключения детектора от фотодиода

**Fig. 2.** Scheme for measuring water saturation of core samples using a germanium detector: 1 — collimated germanium detector; 2 — centrifuge shaft; 3 — strobing disc; 4 — photodiode; 5 — rotating rock sample in the core holder; 6 — on/off signal of the detector from the photodiode

Помимо очевидных преимуществ есть определенные недостатки, а именно:

- Уникальное и дорогостоящее оборудование, которое, вероятно, существует в единственном экземпляре.

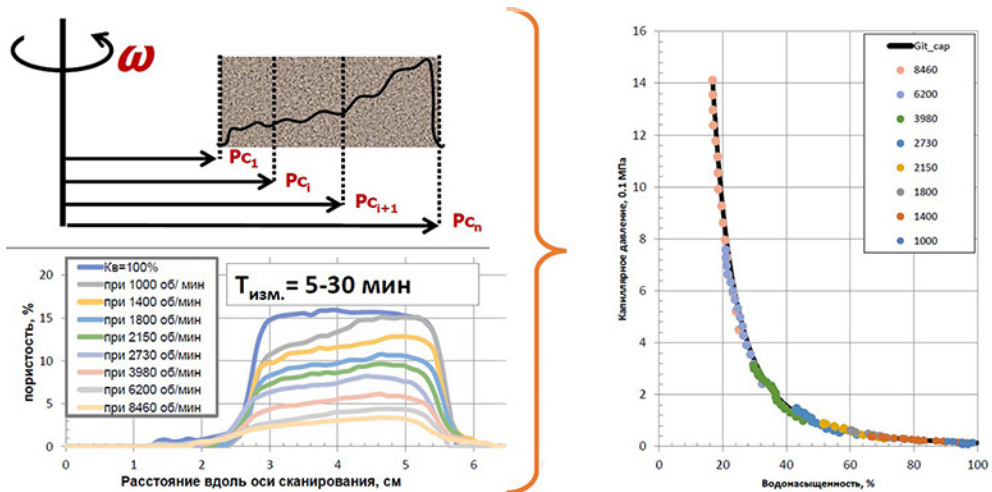
Метод комплексования ЯМР и центрифугирования, так же как и предыдущий способ исключает неопределенности, связанные с установлением насыщенности образцов, путем ее измерения вдоль оси вращения при центрифугировании. Данная технология разработана в 2000-х годах компанией Green Imaging Technologies, Inc. (GIT) и названа GIT-CAP [Green et al., 2008].

Добавление метода резистивиметрии (измерения удельного электрического сопротивления) позволяет получить не только ККД, но и дополнительно коэффициент цементации ( $m$ ) и экспоненту насыщенности ( $n$ ), используемые в законе Арчи [Faurissoux et al., 2017].



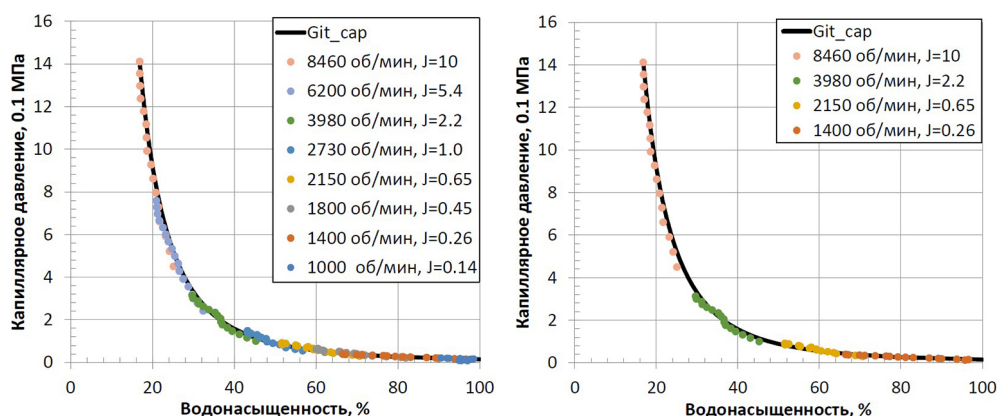
Во время центрифугирования, в зависимости от скорости вращения и расстояния от центра вращения, в образце создается градиент капиллярного давления и при установлении равновесия — градиент насыщенностей. При этом на входном торце максимальное капиллярное давление и минимальная насыщенность, на выходном торце, наоборот — минимальное капиллярное давление и максимальная насыщенность (рис. 3). Используя (4), рассчитывают распределение капиллярных давлений в образце в зависимости от расстояния от оси вращения.

С помощью ЯМР-спектрометра измеряют профиль насыщенности вдоль образца, где каждому капиллярному давлению будет соответствовать измеренное значение водонасыщенности. Таким образом, на одной скорости вращения образца получают не одну точку на ККД, а целый ряд точек. Объединяя информацию о распределении капиллярного давления и водонасыщенности на разных режимах вращения образца, получают ККД, которая содержит в 8–16 раз больше точек, чем при стандартном методе центрифугирования. При этом все точки являются непосредственно результатом измерения, а не расчета (рис. 3). Получая большое количество точек на ККД, можно сократить количество скоростей как минимум вдвое, например пропуская режимы через один (рис. 4) [Green et al., 2008]. При использовании образцов увеличенной длины, например 70–90 мм, в образце будет создаваться больший диапазон капиллярных давлений и, соответственно, водонасыщенностей, поэтому можно будет использовать для получения полной ККД всего от 1 до 3 режимов [Green et al., 2008; Chen, Balcom, 2006; Baldwin, Yamanashi, 1991].



**Рис. 3.** Пример ККД, полученной в лаборатории ТНЦ на образце X\_4 при комплексировании методов ЯМР и центрифугирования

**Fig. 3.** An example of a capillary pressure curve obtained in the laboratory of Tyumen Petroleum Research Center on sample X\_4 by combining NMR and centrifugation methods



**Рис. 4.** Пример ККД при сокращении количества режимов центрифугирования в 2 раза. Результаты получены в лаборатории ТННЦ

**Fig. 4.** An example of obtaining the capillary pressure curve while reducing the number of centrifugation modes by 2 times. The results from the laboratory of Tyumen Petroleum Research Center

Для разных пород, в зависимости от пористости и проницаемости, необходимо использовать разные скорости вращения центрифуги. Для того чтобы подобрать корректно эти скорости, используют  $J$ -функцию Леверетта, находя ее значения по формуле (6). Согласно проведенным нами исследованиям, для наших условий (параметры центрифуги, свойства образцов) достаточно 4 режима центрифугирования при оптимальных значениях  $J$ -функции равных 0,26; 0,65; 2,2; 10. При полученных значениях  $J$ -функции с помощью метода ЯМР и центрифуги получают значения капиллярного давления и насыщенности, которые полностью описывают ККД.

$$Pc = 1/2 \Delta \rho \omega^2 (r_2^2 - r_1^2) \geq J \cdot \sigma \cdot \cos \theta \sqrt{K_p / K_{пр}} \quad (6)$$

К преимуществам метода комплексирования методов ЯМР и центрифугирования относится:

- Позволяет ускорить процесс получения ККД методом центрифугирования, так как позволяет исключить несколько режимов, оставив всего от 1 до 4 скорости вращения вместо стандартных 7–9.
- Позволяет получить большее количество срезов образца по сравнению с методом центрифугирования с визуализацией ядерного трассера. При использовании метода ЯМР шаг сканирования образца составляет 1,12 мм, а при использовании ядерного трассера 6 мм.
- Подходит для большинства типов горных пород.
- Получение более точной ККД, так как водонасыщенность непосредственно измеряется, а не рассчитывается.

- Более доступное оборудование, по сравнению с методом центрифугирования с визуализацией ядерного трассера.

К недостаткам данного метода относятся:

- Необходимость останавливать процесс центрифугирования для проведения ядерно-магнитных и резистивиметрических измерений.

Технология комплексирования методов ЯМР и центрифугирования впервые опробована нами в периметре компании ПАО «НК «Роснефть»» в лаборатории Тюменского нефтяного научного центра. Цель данных исследований — выбор наиболее достоверной модели расчета кривых капиллярного давления на входном торце образца.

## Проведение испытаний

Для проведения сравнительных испытаний построения ККД классическим методом центрифугирования и комплексированием метода центрифугирования и ЯМР была отобрана коллекция из 6 образцов стандартного размера 30х30 мм. Образцы представлены песчаниками.

Отобранные образцы были обессолены путем выдержки в дистиллированной воде. Контроль наличия/отсутствия солей проводился испытанием воды на содержание хлорид-ионов с помощью 0,1 М раствора нитрата серебра после выдержки образцов в воде в течение 12 часов. Образцы были высушены в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре  $(105 \pm 2)$  °С. После высушивания образцы помещали в эксикатор над прокаленным силикагелем, охлаждали до комнатной температуры. Провели измерения коэффициента открытой пористости и коэффициента проницаемости (абсолютной газопроницаемости) по гелию в атмосферных условиях. Основные свойства образцов указаны в табл. 1.

Образцы насыщали моделью пластовой воды с минерализацией 38 г/л и определяли коэффициент пористости методом жидкостенасыщения по ГОСТ 26450.1-85 и проводили измерение ККД классическим центрифугированием.

Расчет значений водонасыщенности на входном торце образца производили в программе PoreLab с использованием следующих формул:

- Hassler–Brunner First Method;
- Hassler–Brunner Iterative Method;
- Forbes Second Method;
- Ruth–Forbes Method;
- First Bentsen Model 1 — Version 1;
- First Bentsen Model 1 — Version 2;
- Cubic Spline Method;
- Second Bentsen Model 1 — Version 2;

- Second Bentsen Model 1 — Version 1;
- Rajan Method.

**Табл. 1.** Литологическое описание и фильтрационно-емкостные свойства исследуемых образцов

**Table 1.** Lithological description and filtration-capacity properties of the studied samples

№ п/п	Номер образца	Глубина по ГИС, м	Литологическое описание	Кп по гелию, %	Кпр по гелию, мД
1	X_1	2787,9	Песчаник мелкозернистый, с единичными намывами слюдисто-алевритового материала	12,9	2,8
2	X_2	2787,6	Песчаник мелкозернистый, с единичными намывами растительного детрита	13,9	5,9
3	X_3	3527,3	Песчаник мелкозернистый, с мелким УРД, с редкими намывами УГСМ	14,4	17,4
4	X_4	2777,1	Песчаник крупно-среднезернистый, слабо нефтенасыщенный	16,5	30,7
5	X_5	2777,5	Песчаник средне-крупнозернистый, слабо нефтенасыщенный	17,5	83,8
6	X_6	2784,5	Песчаник крупно-среднезернистый	18,7	204,6

После получения ККД классическим центрифугированием образцы прошли повторную пробоподготовку. Программа измерения ККД при дренировании в системе газ–вода с помощью комплексирования метода ЯМР и центрифугирования выглядит следующим образом:

1. Насыщение образцов моделью пластовой воды с минерализацией 38 г/л.
2. ЯМР измерение на полностью водонасыщенном образце (при  $K_v = 100\%$ ) ( $T_2$ , пористость, профиль насыщенности).
3. Расчет скоростей центрифугирования с помощью функции Леверетта по (6) для  $J = 0,26; 0,65; 2,2; 10$ .
4. Центрифугирование образцов до стабилизации выхода воды.
5. ЯМР измерение при частичной насыщенности ( $T_2$ , профиль насыщенности).
6. Повторение пп. 4–6. Необходимое количество раз.
7. Построение ККД.

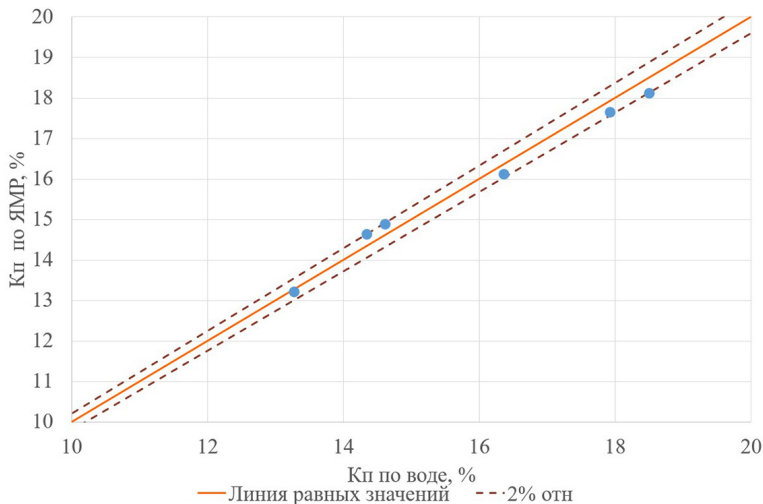
Этап центрифугирования проводили с помощью высокоскоростной ультрацентрифуги ACES-300 с горизонтально расположенным ротором. ЯМР измерения проводили на ЯМР спектрометре GeoSpec DRX-HF с рабочей частотой 2,333 МГц.

При ЯМР измерениях использовали следующие настройки:

1. Для измерения времени поперечной релаксации  $T_2$  использовалась последовательность импульсов Карр–Пурселл–Мейбум–Гилла (CPMG) [Coates et al., 1999]:
  - 1) время между эхо-сигналами  $T_E$  равнялось 0,180 мс;
  - 2) период запуска  $TW$  определялся по предварительному измерению времени поперечной релаксации  $T_2$  как  $7,5 \times T_{2\text{ макс}}$  (максимальное время поперечной релаксации  $T_2$ );
  - 3) количество накоплений  $NT$  использовалось таким, чтобы соотношение сигнал–шум SNR достигало 100.
2. Для измерения профиля насыщенности образца использовалась последовательность одноточечной визуализации спин-эхо (SE-SPI) [Beyea et al., 2000; Bernd, Matthias, 2013]:
  - 1) количество точек сканирования образца составляло 64.
  - 2) время фазового кодирования магнитного поля составляла 0,15 мс
  - 3) время между эхо-сигналами  $T_E$  равнялось 1 мс.

## Результаты и обсуждение

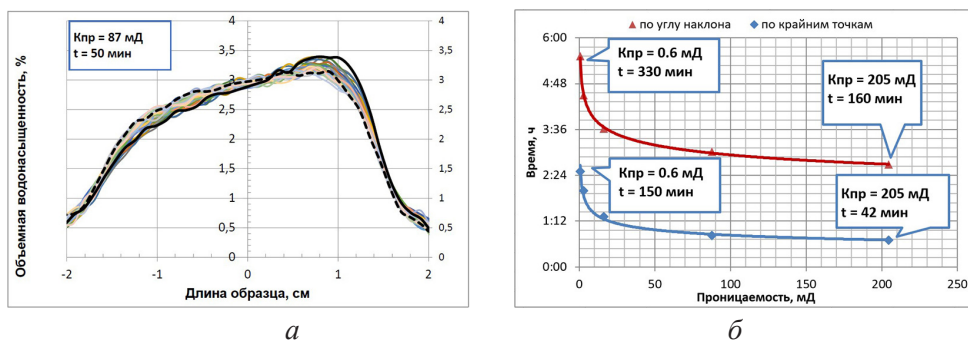
Расхождение между пористостью, определенной методом жидкостенасыщения и методом ЯМР при 100% водонасыщенности, не превышает 2% отн. (рис. 5), что подтверждает высокую точность выполненных измерений методом ЯМР и обосновывает возможность использования этих данных для последующего определения водонасыщенности.



**Рис. 5.** Сопоставление пористости определенной методом жидкостенасыщения и методом ЯМР при 100% водонасыщенности

**Fig. 5** Comparison of porosity determined by the liquid saturation method and the NMR method at 100% water saturation

Поскольку для определения водонасыщенности методом ЯМР необходимо останавливать центрифугу и во время измерения одного образца остальные «ждут» своей очереди, в образцах проявляется эффект пропитки и изменяется профиль насыщенности, что, в свою очередь, искажает распределение водонасыщенности, определенную методом ЯМР. Прежде чем приступать к измерениям профиля насыщенности методом ЯМР для построения ККД, необходимо оценить время, за которое изменяется профиль насыщенности не более чем на 3% отн. Для этого провели дополнительный эксперимент на отобранных образцах. Чтобы замедлить процесс перераспределения флюида в образце для данного и последующих опытов, ЯМР измерения на образце проводили таким образом, чтобы выходной торец всегда был внизу измерительной ячейки ЯМР-спектрометра. Изменение профиля насыщенности определяли двумя способами по углу наклона всего профиля и по крайним точкам. Результаты измерения представлены на рис. 6. На рис. 6а представлены профили насыщенности образца вдоль его оси после создания остаточной водонасыщенности ( $K_{во}$ ). Черной сплошной линией показан профиль насыщенности сразу после создания  $K_{во}$ , пунктирной через 12 часов после создания  $K_{во}$ . Цветными линиями показаны профили в промежуточные моменты времени. В правой части графика выходной торец образца, здесь водонасыщенность со временем уменьшается, а слева на графике входной торец, на нем водонасыщенность, наоборот, увеличивается. Время стабильности профиля насыщенности в образце зависит от проницаемости, самое короткое время было получено для образца с проницаемостью 205 мД и составило 40 минут, самое большое время для образца с проницаемостью 0,6 мД 150 минут.

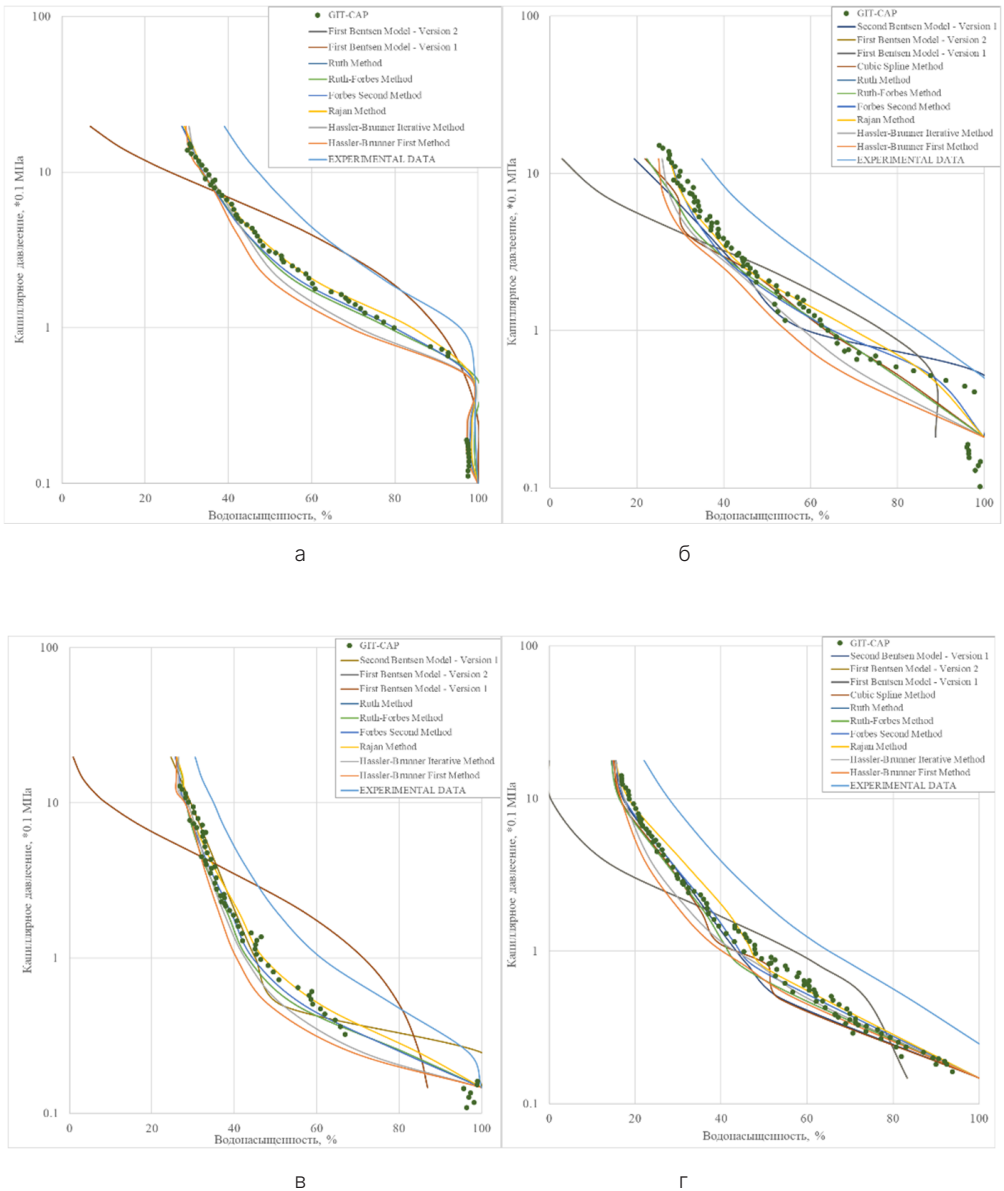


**Рис. 6.** а — Пример изменения профиля насыщенности для образца с проницаемостью 87 мД; б — график изменения времени стабильности профиля насыщенности в образце от проницаемости по углу наклона (красная кривая) и по крайним точкам (синяя кривая)

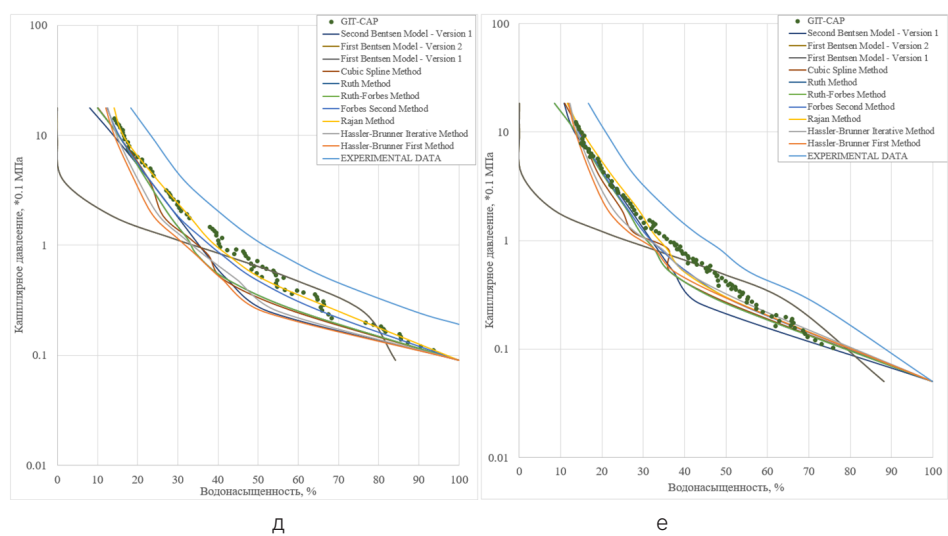
**Fig. 6.** а — Example of saturation profile variation for a sample with permeability of 87 мД; б — graph showing changes in the stability of the saturation profile in the sample based on permeability by angle of inclination (red curve) and by extreme points (blue curve)

Таким образом, время измерения профиля насыщенности образцов для построения ККД не должно превышать 40 минут для всех 6 образцов. Начинать измерения методом ЯМР следует с наиболее проницаемых образцов, и заканчивать менее проницаемыми.

Ниже на рисунках представлены ККД, рассчитанные на входных торцах образцов с использованием различных уравнений, а также ККД, определенная с помощью комплексирования методов центрифугирования и ЯМР (GIT-CAP) (рис. 7). Для наглядного сравнения ККД графики представлены в полулогарифмическом масштабе.







**Рис. 7.** Сопоставление ККД на входном торце образца, рассчитанных по различным формулам, и ККД, полученных комплексным методом на основе ЯМР и центрифуги (GIT-CAP). Графики упорядочены по мере возрастания проницаемости в соответствии с табл. 1

**Fig. 7.** Comparison of capillary pressure curves at the inlet end of the sample calculated by different formulas and capillary pressure curves obtained by a complex method of NMR and centrifuge (GIT-CAP). The plots are ordered by increasing permeability according to Table 1

**Табл. 2.** Отклонение ККД на входном торце образца, рассчитанных по различным формулам, и ККД, полученных комплексным методом на основе ЯМР и центрифуги

**Table 2.** Deviation of capillary pressure curves at the inlet end of the sample calculated using different formulas and the ones obtained using a complex method of NMR and centrifuge

Формула	Отклонение, %		
	мин.	среднее	макс.
Hassler–Brunner First Method	16,8	21,3	27,4
Hassler–Brunner Iterative Method	12,3	16,4	23,1
Rajan Method	5,6	9,0	11,6
Forbes Second Method	5,0	8,4	12,2
Ruth–Forbes Method	7,2	15,7	22,4
Ruth Method	7,2	15,7	22,4
Cubic Spline Method	14,6	29,7	68,2
First Bentsen Model — Version 1	30,1	81,4	100,0
First Bentsen Model — Version 2	30,4	86,8	100,0
Second Bentsen Model — Version 1	13,7	48,7	100,0

В табл. 2 представлено минимальное, среднее и максимальное отклонение кривых капиллярного давления на входном торце образца, рассчитанных по различным формулам, и ККД, полученных комплексным методом на основе ЯМР и центрифуги. Наиболее точными оказались формулы расчета ККД по методу Раджана (Rajan Method) и второму методу Форбса (Forbes Second Method). Максимальное отклонение составило 11,6% и 12,2% соответственно. Наименее точными оказались различные модификации уравнения Бентсена (Bentsen Model). Максимальное отклонение составило 100%.

## Выводы

1. Впервые в периметре компании ПАО «НК «Роснефть»» опробован метод получения ККД с помощью комплексирования метода ЯМР и центрифугирования.
2. Время стабильности профиля насыщенности в образце зависит от проницаемости. Время измерения образцов методом ЯМР не должно превышать 40 минут для образцов с проницаемостью менее 205 мД.
3. Наиболее достоверными формулами расчета ККД на входном торце образца является уравнение Раджана (Rajan Method) и второе уравнение Форбса (Forbes Second Method).
4. Данный метод позволяет контролировать точность и достоверность выбранного метода расчета ККД по результатам центрифугирования.

## Список источников

- Борисов А. Г. 2013. Моделирование капиллярных свойств коллекторов с целью решения промыслово-геологических задач и повышения энергоэффективности вытеснения нефти водой: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. ТюмГНГУ. 147 с.
- Киселев В. М., Назаров Д. В., Колесов В. А. 2014. Восстановление кривых капиллярного давления и параметра насыщения по коэффициенту остаточного водонасыщения на примере карбонатных отложений Восточной Сибири // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. № 11. С. 38–45.
- МакФи К., Рид Дж., Зубизаретта И. 2018. Лабораторные исследования керн: гид по лучшим практикам. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований. 912 с.
- Ратников И. Б., Шульга Р. С., Романов Е. А. 2016. Интерпретация данных капиллярных исследований // Горные науки и технологии. № 4. С. 24–37.
- Baldwin B. A., Yamanashi W. S. 1991. Capillary-Pressure determinations from NMR Images of centrifuged Core Plugs: Berea sandstone // The Log Analyst. No. 32 (5). Pp. 550–556.
- Bernd A. J., Matthias W. 2013. Spin echo magnetic resonance imaging // Journal of Magnetic Resonance Imaging. No. 37. Pp. 805–817.
- Beyea S. D., Balcom B. D., Mastikhin I., Bremner T. 2000. Imaging of heterogeneous materials with a turbo spin echo single-point imaging technique // Journal of Magnetic Resonance. No. 144 (2). Pp. 255–265.

- Chen Q., Balcom B. J. 2006. A single-shot method for capillary pressure curve measurement using centrifuge and quantitative magnetic resonance imaging // SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery (April, Tulsa, Oklahoma, USA). DOI: <https://doi.org/10.2118/100059-MS>
- Coates G. R., Xiao L. Z., Prammer M. G. 1999. NMR Logging Principles and Applications. Halliburton Energy Services. Houston: Gulf Publishing Company.
- Faurissoux P., Colombain A., et al. 2017. Ultra fast capillary pressure and resistivity index measurements (UFPCRI) combining centrifugation, NMR imaging, and resistivity profiling // International Symposium of the Society of Core Analysts (27 August – 1 September, Vienna, Austria).
- Ferno M. A., et al. 2009. Capillary pressures by fluid saturation profile measurements during centrifuge rotation // Transport in Porous Media. Vol. 80. Pp. 253–267.
- Forbes P. L. 1994. Simple and accurate methods for converting centrifuge data into drainage and imbibition capillary pressure curves // The Log Analyst. Vol. 35, no. 4. Pp. 31–53.
- Green D. P., Gardner J., Balcom B. J., McAloon M. J. 2008. Comparison study of capillary pressure curves obtained using traditional centrifuge and magnetic resonance imaging techniques // SPE Symposium on Improved Oil Recovery (April, Tulsa, Oklahoma, USA). DOI: <https://doi.org/10.2118/110518-MS>
- Rajan R. R. 1986. Theoretically correct analytical solution for calculating capillary pressure-saturation from centrifuge experiments // SPWLA Annual Logging Symposium (June 9–13, Houston, Texas, USA).
- Sukka P. O. 2004. Improving the nuclear tracer imaging centrifuge method for measuring in-situ capillary pressures and comparisons with other methods: Master thesis. Dept. of Physics and Technology, University of Bergen.

## References

- Borisov, A. G. (2013). Modeling of capillary properties of reservoirs in order to solve field-geological problems and increase the energy efficiency of oil displacement by water. [Cand. Sc. (Geology & Mineralogy) dissertation, TyumGNGU]. [In Russian]
- Kiselev, V. M., Nazarov, D. V., & Kolesov, V. A. (2014). Build-up of capillary pressure curves and saturation parameter using residual water saturation factor by the example of eastern Siberia carbonate deposits. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 11, 38–45. [In Russian]
- McPhee, C., Reed, J., & Zubizarreta, I. (2018). *Core analysis: A best practice guide*. Translated from Engl. Institut kompyuternykh issledovaniy. [In Russian]
- Ratnikov, I. B., Shulga, R. S., & Romanov, E. A. (2016). Interpretation of capillary pressure data. *Gornye nauki i tehnologii = Mining Science and Technology*, 4, 24–37. [In Russian]
- Baldwin, B. A., & Yamanashi, W. S. (1991). Capillary-Pressure determinations from NMR Images of centrifuged Core Plugs: Berea sandstone. *The Log Analyst*, 32(5), 550–556.
- Bernd, A. J., Matthias, W. (2013). Spin echo magnetic resonance imaging. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 37, 805–817.
- Beyea, S. D., Balcom, B. D., Mastikhin, I., & Bremner, T. (2000). Imaging of heterogeneous materials with a turbo spin echo single-point imaging technique. *Journal of Magnetic Resonance*, 144(2), 255–265.

- Chen, Q., & Balcom B. J. (2006, April). *A single-shot method for capillary pressure curve measurement using centrifuge and quantitative magnetic resonance imaging*. SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, USA. <https://doi.org/10.2118/100059-MS>
- Coates, G. R., Xiao, L. Z., & Prammer M. G. (1999). *NMR Logging Principles and Applications*, Halliburton Energy Services. Gulf Publishing Company.
- Faurissoux, P., Colombain, A., et al. (27 August – 1 September, 2017), *Ultra fast capillary pressure and resistivity index measurements (UFPCRI) combining centrifugation, NMR imaging, and resistivity profiling*. International Symposium of the Society of Core Analysts, Vienna, Austria.
- Ferno, M. A., et al. (2009). Capillary pressures by fluid saturation profile measurements during centrifuge rotation. *Transport in Porous Media*, 80, 253–267.
- Forbes, P. L. (1994). Simple and accurate methods for converting centrifuge data into drainage and imbibition capillary pressure curves. *The Log Analyst*, 35(4), 31–53.
- Green, D. P., Gardner, J., Balcom, B. J., McAloon, M. J. (April, 2008). *Comparison study of capillary pressure curves obtained using traditional centrifuge and magnetic resonance imaging techniques*. SPE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, USA. <https://doi.org/10.2118/110518-MS>
- Rajan, R. R. (June 9–13, 1986). *Theoretically correct analytical solution for calculating capillary pressure-saturation from centrifuge experiments*. SPWLA Annual Logging Symposium, Houston, Texas, USA.
- Sukka, P. O. (2004). *Improving the nuclear tracer imaging centrifuge method for measuring in-situ capillary pressures and comparisons with other methods* [Master thesis, Dept. of Physics and Technology, University of Bergen]

## Информация об авторах

Артём Геннадьевич Потапов, заведующий лабораторией, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия  
agpotapov@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3010-8070>

Максим Ильварович Загидуллин, главный специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия  
mizagidullin2@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7854-9320>

## Information about the authors

Artem G. Potapov, Head of the Laboratory, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia  
agpotapov@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3010-8070>

Maxim I. Zagidullin, Chief Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia  
mizagidullin2@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7854-9320>