

**Альметьевский государственный технологический  
университет «Высшая школа нефти»**

**Кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых  
месторождений»**

**Almetyevsk State Technological University «Higher School of Oil»,  
Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields**

**Методы исследования распределения пор по размерам в образцах керна  
Methods for studying pore-size distribution in core samples**

**Шагалиев Руслан Салаватович, Shagaliev Ruslan Salavatovich <sup>a</sup>**

аспирант кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»,  
инженер Института «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина <sup>a</sup>

Альметьевск, Россия

УДК 622.276. Шифр научной специальности ВАК: 2.8.4. «Разработка и эксплуатация  
нефтяных и газовых месторождений»

E-mail: [shagaliev.ruslan@yandex.ru](mailto:shagaliev.ruslan@yandex.ru) <sup>a</sup>

**Аннотация:** Исследование порового пространства коллекторов является критически важным этапом для оценки фильтрационно-емкостных свойств и прогнозирования продуктивности нефтяных пластов. В данной работе проводится анализ современных методов определения распределения пор по размерам, включая ртутную порометрию, ядерно-магнитный резонанс, рентгеновскую томографию, адсорбцию газа, электронную микроскопию, а также методы полупроницаемой мембраны и центрифугирования. Для каждого метода рассмотрены физические принципы, рабочие диапазоны, преимущества и ограничения. В результате сравнительного анализа была составлена таблица сравнения ключевых достоинств и недостатков каждого из методов.

**Ключевые слова:** порометрия, фильтрационно-емкостные свойства, методы исследования керна, нефтегазовые коллекторы, керна, структура пор, распределение пор по размерам, нефтедобыча, коллектор, пласт.

**Abstract:** Pore-size characterization in reservoirs is a critical step in assessing reservoir properties and predicting the productivity of oil reservoirs. This paper analyzes modern methods for determining pore size distribution, including mercury porosimetry, nuclear magnetic resonance, X-ray tomography, gas adsorption, scanning electron microscopy, as well as semipermeable membrane and centrifugation methods. The physical principles, operating ranges, advantages, and limitations of each method are discussed. A comparative analysis resulted in a table comparing the key advantages and disadvantages of each method.

**Keywords:** porosimetry, filtration and capacity properties, core analysis methods, oil and gas reservoirs, core, pore structure, pore size distribution, oil production, reservoir, formation.

## **Введение (Introduction)**

Детальная характеристика порового пространства горных пород представляет собой одну из ключевых задач в области разработки месторождений. От ее решения зависит достоверность оценки фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов, которая является основой для построения геологических и гидродинамических моделей залежей и месторождений. В наше время существуют различные методы изучения пор – от классических капиллярных до современных: закачка ртути, ядерный магнитный резонанс (ЯМР), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгеновская компьютерная томография и др. [1].

Изучение порового пространства и как следствие ФЕС позволяет определять, какие каналы пор задействованы в фильтрации, в каких порах находятся углеводороды, и каким образом улучшить процессы их извлечения, в том числе выработку остаточной нефти. Данные о распределении пор по размерам могут быть использованы при проектировании и анализе эффективности различных геолого-технических мероприятий, например, гидроразрыве пласта или заводнении [2, 3].

Целью анализа методов определения распределения пор по размерам является обобщение опыта в данной области исследований.

Достижению поставленной цели способствовало последовательное решение следующих задач:

- 1) Определить принцип действия каждого метода.
- 2) Определить размеры пор, которые исследует каждый из методов.
- 3) Выявить преимущества и недостатки методов.
- 4) Составить матрицу оценки методов распределения пор по размерам.

## **Материалы и методы исследования (Materials and Methods)**

В работе был использован теоретико-аналитический подход. Его содержание составили систематизация и обобщение различных научных материалов. База источников была сформирована из публикаций российских и зарубежных авторов за период 2006 – 2023 гг., включая статьи в рецензируемых журналах, материалы конференций и диссертационное исследование [1-16].

Методика исследования включала следующие этапы:

- 1) Поиск и отбор источников.
- 2) Анализ утверждений авторов работ.
- 3) Сравнительный анализ выявленных признаков.
- 4) Сбор и составление выводов.

Далее приведены материалы исследования.

Ртутная порометрия. Метод закачки ртути – стандартный для получения распределения пор по размерам. Принцип его заключается в постепенном нагнетании ртути с регистрацией зависимости давления от насыщенности образца ртутью, полученные данные пересчитывается в гистограмму распределения пор по радиусам [4]. Ртуть практически инертна по отношению к образцу и способна проникать в поры, которые недоступны для воды ввиду сил поверхностного натяжения [5]. Данный метод обеспечивает высокую скорость анализа, широкий диапазон измеряемых размеров (от 0,0015 мкм до 300 мкм) [6]. Он относится к разрушающим методам, что означает, что

после исследования образец керна будет невозможно использовать для других исследований.

Принципиальная схема установки для закачки ртути представлена на рисунке 1 [7]. В начале измеряется вес образца и помещается в держатель, после взвешивается собранный узел и помещается в сосуд высокого давления, и образец вакуумируется, пока давление не станет ниже 13,33 Па, после чего производится закачка ртути под определенным давлением жидкостью из емкости [8].

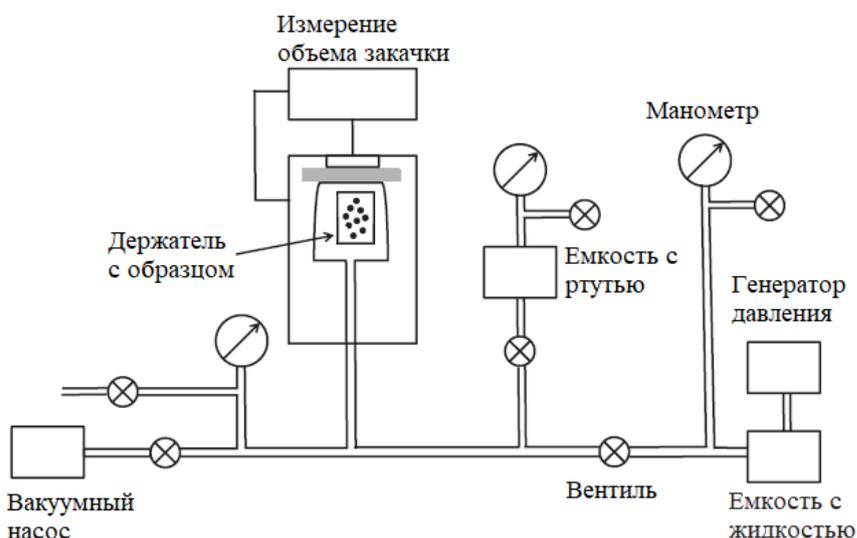


Рисунок 1 – Схематическое изображение установки для закачки ртути

Обработка получаемых данных основывается на теории метода, которая в свою очередь опирается на уравнение Уошберна, описывающее давление, необходимое для проникновения несмачивающей жидкости в поры образца.

Метод закачки ртути имеет высокую скорость анализа, позволяет исследовать широкий диапазон измеряемых размеров пор, однако является разрушающим, небезопасным и требует тщательной подготовки образцов керна.

Ядерно-магнитный резонанс. Размеры пор с помощью ЯМР оцениваются косвенно через время релаксации (затухания сигнала)  $T_1$  и  $T_2$  протонов водорода, содержащихся во флюидах.

ЯМР отличается высокой скоростью анализа, относится к неразрушающим, позволяет анализировать пористость, распределение пор и насыщенность флюидами, однако его результаты могут искажаться из-за высокой минерализации пластовой воды и наличия парамагнитных примесей (железо, марганец) [9]. Также для точной калибровки данного метода требуются данные других методов (например, ртутной порометрии).

Компьютерная томография. Метод позволяет визуализировать трехмерную структуру пор с высоким разрешением, он работает на основе просвечивания образца рентгеновскими лучами, которые по-разному поглощаются материалами разной плотности.

Данный метод относится к неразрушающим, однако он ограничен в разрешающей способности [10], с его помощью изучаются поры на макро- ( $> 1$  мм), мезо- (0,2-1 мм), микро- (1-100 мкм) и наноуровнях ( $< 1$  мкм). При этом разрешение метода зависит от

размера образца: для полноразмерного керна (100 мм) разрешение составляет около 0,4 мм, а для микро- и нанотомографии на малых образцах ( $\leq 10$  мм) достигает 0,05 мкм [11]. Также преимуществом микротомографии является возможность анализа образцов горной породы, которые слишком малы для обычных экспериментов [12].

Метод адсорбции газа. Данный метод основан на измерении количества газа, адсорбирующегося на поверхности образца при контролируемых давлении и температуре. Для анализа размера пор используется азот из-за его инертности, доступности и экономичности. Данный метод является узконаправленным, в основном с его помощью изучаются микро- (менее 0,002 мкм), мезо- (0,002-0,05 мкм) и макропоры (более 0,05 мкм) [6]. К недостаткам можно отнести требование тщательной подготовки; наличие специального оборудования, способного поддерживать температуру кипения жидкого азота (-196 °С); а также то, что результаты обрабатываются с использованием математических моделей, которые могут приводить к погрешностям (например, метод Брунауэра-Эммета-Теллера) [13].

Микроскопия. Только сканирующий (растровый) электронный микроскоп не является инструментом для определения распределения пор по размерам в образцах керна, хотя и позволяет получить изображения поверхности образца и визуализировать поры, он имеет ограничения – анализ затрагивает лишь малые локальные участки образца, которые могут не быть репрезентативными для всей породы образца [14]. Для получения более полной и точной информации о порах СЭМ используют совместно с другими методами. Так, например, используется его модификация – СЭМ с широким ионным пучком (WIB-SEM). Данный метод позволяет визуально наблюдать морфологию и расположение пор, получать изображения с разрешением до нескольких нанометров, что точнее микротомографии, но не может достичь точности ртутной порометрии [15].

Другие методы. Методы полупроницаемой мембраны и центрифугирования основаны на определении капиллярного давления, которое пересчитывается в радиус пор по формуле Лапласа. Данные методы позволяют изучать связанность пор и распределение пор по размерам [9]. Главными преимуществами в отличие от ртутной порометрии являются неразрушающее воздействие на образцы и безопасность работ, однако их точность при этом ниже ввиду наличия погрешностей как косвенного метода и больших сил поверхностного натяжения [16].

### **Результаты и их обсуждение**

В результате сравнительного анализа рассмотренных источников для наглядного представления преимуществ и недостатков каждого из методов была составлена таблица 1 – сравнения методов изучения распределения пор по размерам. Стоимость эксперимента и / или оборудования в сравнении не учитывается.

Таблица 1- Сравнение методов распределения пор по размерам.

Метод	Диапазон размеров, мкм	Разрушает образец	Преимущества	Недостатки, ограничения
Закачка ртути	0,0015 - 950	Да	- Широкий диапазон измерений. - Скорость эксперимента. - Эталонный метод.	- Токсичность.
СЭМ (ВВ-SEM)	0,01 - 0,4	Да	- 3D-визуализация морфологии пор. - Высокое разрешение изображений.	- Локальный анализ. - Малая репрезентативность.
ЯМР	0,002 - 0,05	Нет	- Скорость эксперимента. - Простота эксперимента. - Изучение образца в динамических условиях.	- Чувствительность к минерализации воды и парамагнитным примесям. - Необходимость в подтверждении результатов другими методами.
Рентгеновская томография	от 0,05 и более	Нет	- 3D-визуализация структуры пор, трещин и т.д. - Изучение образца в динамических условиях.	- Ограниченное разрешение съемки. - Зависимость от размеров образца. - Рентгеновское облучение.
Адсорбция газа	0,00035 - 0,5	Нет	- Высокая точность для микро- и мезопор.	- Узконаправленность. - Использование математических моделей при интерпретации.
Полупроницаемая мембрана	От 0,1 и более	Нет	- Простота эксперимента. - Возможность изучения группы образцов или полноразмерного ядра.	- Длительность эксперимента. - Ограничение по свойствам мембраны.
Центрифугирование	От 0,06 и более	Нет	- Скорость эксперимента. - Возможность изучения группы образцов.	- Неравномерность насыщения образца. - Возможность повредить образец.

Как видно из таблицы 1, выбор метода исследования порового пространства является сложной задачей. Ключевыми критериями выступают требуемый диапазон размеров пор и допустимость разрушения образца. Методы, дающие наиболее полные количественные данные (ртутная порометрия), являются разрушающими, в то время как неразрушающие имеют ограничения или требуют косвенной интерпретации.

### **Заключение (Conclusions)**

Таким образом, в соответствии с поставленными задачами можно сформулировать следующие выводы:

1) Был выявлен принцип действия каждого метода. Они базируются на различных явлениях: капиллярном давлении (ртутная порометрия, методы мембраны и центрифугирования), взаимодействии ядерных спинов с магнитным полем (ЯМР), поглощении рентгеновского излучения (томография) и физической адсорбции молекул газа (адсорбция).

2) Каждый метод имеет свой рабочий диапазон исследования размеров пор. Наиболее широкий (от 0,0015 до 950 мкм) охватывает ртутная порометрия. Для изучения нано- и микропор наиболее точным является метод адсорбции газа, в то время как для визуализации и анализа структуры макропор и трещин предпочтительна рентгеновская томография.

3) Определено соотношение между объемом получаемых данных и сохранностью образца. Разрушающие методы предоставляют практически полные данные, но делают образец непригодным для дальнейшего использования. Неразрушающие методы сохраняют целостность керна, но могут уступать в объеме или точности данных, а также требовать косвенной интерпретации и калибровки.

4) Разработана матрица оценки методов распределения пор по размерам с учетом размеров, целостности образца, преимуществ и недостатков.

### **Список литературы (References):**

1. Neda Nourzadeh, Seyed Reza Shadizadeh, Abbas Manshad. Determination of pore size distribution profile along wellbore: using repeat formation tester // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2017. № 7. С. 621-626.
2. Оценка рисков проведения гидроразрыва пласта в скважинах для ряда значений зенитного угла ствола скважины на основе статистического анализа / И. Г. Фаттахов, А. В. Кочетков, Р. Р. Степанова, И. Ф. Галиуллина // Нефтепромысловое дело. 2022. № 2(638). С. 31-36. DOI 10.33285/0207-2351-2022-2(638)-31-36. EDN KMMDTF.
3. Анализ эффективности заводнения месторождений на поздней стадии разработки / И. Г. Фаттахов, А. С. Семанов, А. И. Семанова [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2023. № 8. С. 42-46. DOI 10.24887/0028-2448-2023-8-42-46. EDN CQIHXC.
4. Study of Pore Size Evaluation for Low Permeability Rock Core Sample / Mai Shimokawara, Yasuyuki Akita, Yasuyuki Mino, Satoru Takahashi // International Symposium of the Society of Core Analysts, Колорадо, США, 21-26 августа 2016. 6 с.
5. Назаров Д.В., Тепляшин Т.М. Анализ данных ртутной порометрии образцов керна из терригенного коллектора Восточной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр: материалы Междунар. науч. конф. 2017. С. 305-306.
6. On the use and abuse of N<sub>2</sub> physisorption for the characterization of the pore structure of shales / P. Bertier, K. Schweinar, H. Stanjek [и др.] // The Clay Minerals Society Workshop Lectures Series. 2016. Т. 21., Ч. 12. С. 151-161.
7. Aligizaki, K.K. Pore structure of cement based materials. Нью-Йорк, NY: Taylor & Francis, 2006.

8. Porosimetric features of calcium sulfoaluminate and Portland cement pastes: testing protocols and data analysis / Hong, S., de Bruyn, K., Bescher, E., Ramseyer, C., & Kang, T. H. K. // *Journal of Structural Integrity and Maintenance*. № 3 (1). С. 52–66. <https://doi.org/10.1080/24705314.2018.1426168>.
9. Методические особенности ртутной порометрии образцов кернa / А. Б. Казак, И. В. Якимчук, Д. А. Коробков [и др.] // *Нефть. Газ. Новации*. 2014. № 4. С. 44–86.
10. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях кернa нефтяных и газовых месторождений / С. В. Галкин, А. А. Ефимов, С. Н. Кривошеков, Я. В. Савицкий, С. С. Черепанов // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56, № 5. С. 995-1007.
11. Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании кернa нефтяных и газовых месторождений // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 15. С. 28-37.
12. Hu Dong, Mustafa Touati, Martin J. Blunt. Pore Network Modeling: Analysis of Pore Size Distribution of Arabian Core Samples // *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, Бахрейн, март 2007. 5 с.
13. Utpalendu Kuila, Manika Prasad. Application of nitrogen gas-adsorption technique for characterization of pore structure of mudrocks // *The Leading Edge*. 2013. С. 1478-1485.
14. Сауткин Р. С. Коллекторские свойства и продуктивность рифейских отложений Юрубчено-Тохомского месторождения // *Георесурсы*. 2015. Т. 2, № 4 (63). С. 25-34.
15. BIB-SEM characterization of pore space morphology and distribution in postmature to overmature samples from the Haynesville and Bossier Shales / J. Klaver, G. Desbois, R. Little, J. L. Urai // *Marine and Petroleum Geology*. 2015. Т. 59. С. 451-466.
16. Разницын А. В. Повышение эффективности изучения карбонатных пород нефтегазовых залежей методом ядерного магнитного резонанса : диссертация ... кандидата техн. наук : 25.00.12. Пермь, 2021. 129 с.