

Комплексирование данных ЯМР-релаксометрии и электрометрических исследований на примере пород-коллекторов месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции

Рогозин А.А., Игнатьева Т.С., Чурков А.В.
ООО «НК «Роснефть-НТЦ», Краснодар, Россия
aarogozin@ntc.rosneft.ru

Аннотация

Удельная поверхность пор и проницаемость ядра являются одними из важнейших параметров при изучении пород-коллекторов. При этом их определение стандартными методами, такими как капилляриметрия и прямые фильтрационные исследования, может сопровождаться разрушением образцов и занимать длительное время. В данной статье рассматривается информативность метода ЯМР-релаксометрии для изучения этих параметров, а также применимость комплексного анализа фильтрационно-емкостных свойств и характеристик порового пространства горных пород с привлечением данных электрометрии насыщенных образцов ядра. Как будет показано ниже, комплексирование данных различных методов позволяет определить для каждого литотипа такой параметр ЯМР, как поверхностная релаксивность. В статье проведен расчет и сравнительный анализ значений удельной поверхности пор, определенной разными методами; показана применимость некоторых эмпирических и полумпирических методик расчета проницаемости; определены константы релаксивности для различных литотипов пород-коллекторов месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

Материалы и методы

Лабораторные исследования методом ЯМР-релаксометрии, пермеаметрия, определение УЭС горных пород.

Ключевые слова

ядерно-магнитный резонанс, релаксивность, пористость, проницаемость, времена релаксации, удельная поверхность пор, извилистость пор, электрические свойства

Для цитирования

Рогозин А.А., Игнатьева Т.С., Чурков А.В. Комплексирование данных ЯМР-релаксометрии и электрометрических исследований на примере пород-коллекторов месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 6. С. 62–66.
DOI: 10.24412/2076-6785-2021-6-62-66

Поступила в редакцию: 08.09.2021

GEOLOGY

UDC 551 | Original Paper

Integration of NMR relaxometry data and electrometric studies on the example of reservoir rocks of deposits of the Timan-Pechora oil and gas province

Rogozin A.A., Ignateva T.S., Churkov A.V.
"NK "Rosneft-STC" LLC, Krasnodar, Russia
aarogozin@ntc.rosneft.ru

Abstract

The specific pore surface and core permeability are one of the most important parameters in the study of reservoir rocks. At the same time, their determination by standard methods, such as capillarimetry and direct filtration studies, can be accompanied by the destruction of samples and take a long time. This article discusses the informative value of the NMR-relaxometry method for studying these parameters, as well as the applicability of a comprehensive analysis of the filtration-capacitance properties and properties of the pore space of rocks using electrometry data of saturated core samples. As will be shown below, combining the data of various methods allows us to determine for each lithotype such an NMR parameter as surface relaxivity.

The article presents a calculation and comparative analysis of the values of the specific pore surface determined by different methods; the applicability of some empirical and semi-empirical methods for calculating permeability is shown; relaxation constants for various lithotypes of reservoir rocks of the Timan-Pechora oil and gas province are determined.

Materials and methods

Laboratory studies by NMR-relaxometry, permeometry, determination of UES of rocks.

Keywords

nuclear magnetic resonance, relaxability, porosity, permeability, relaxation times, specific pore surface, pore tortuosity, electrical properties

For citation

Rogozin A.A., Ignateva T.S., Churkov A.V. Integration of NMR relaxometry data and electrometric studies on the example of reservoir rocks of deposits of the Timan-Pechora oil and gas province. Exposition Oil Gas, 2021, issue 6, P. 62–66. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2021-6-62-66

Received: 08.09.2021

Метод ЯМР-релаксометрии является одним из наиболее информативных и неинвазивных методов анализа кернового материала в лабораторных условиях. Как отмечается в ряде работ российских и зарубежных авторов [1–3], данный метод перспективен для анализа «сложных» коллекторов: рыхлых, слабосцементированных, глинистых, трещиноватых и нефтематеринских пород. Но, наряду с широким спектром потенциально решаемых задач, имеется и ряд ограничений и сложностей в реализации некоторых методик ЯМР-релаксометрии.

Интерпретация данных, полученных при исследованиях насыщенных образцов керны методом ЯМР, в ряде случаев сталкивается с трудно решаемыми проблемами. Основное соотношение между параметрами продольной релаксации имеет вид [4, 5]:

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_{1b}} + \rho_1 \times \frac{S}{V}, \quad (1)$$

где T_1 — время продольной релаксации, с;

T_{1b} — время продольной релаксации неограниченного объема флюида, с;

ρ_1 — поверхностная релаксивность T_1 (скорость релаксации T_1 на единице площади зерен), м/с;

S/V — удельная поверхность заполненных флюидом пор, 1/м.

В случае регистрации параметров поперечной релаксации:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2b}} + \rho_2 \times \frac{S}{V} + \frac{1}{T_{2diffusion}}, \quad (2)$$

где T_2 — время поперечной релаксации, с;

T_{2b} — время поперечной релаксации неограниченного объема флюида, с;

ρ_2 — поверхностная релаксивность T_2 (скорость релаксации T_2 на единице площади зерен), м/с;

S/V — удельная поверхность заполненных флюидом пор, 1/м;

$T_{2diffusion}$ — диффузионная составляющая поперечной релаксации, с.

Параметры T_1 и T_2 являются регистрируемыми, так же как и релаксация в свободном объеме насыщающего флюида. В идеальном случае выполняется соотношение $T_{1b} \approx T_{2b}$. Остальные слагаемые уравнений (1) и (2) являются неразрешимыми без привлечения специальных методов исследований для установления удельной поверхности пор (капилляриметрии, порометрии) или применения специальных технических средств для учета диффузионной составляющей (приставки в виде катушки, создающей регулируемый градиент магнитного поля), повышающих сложность и стоимость исследовательского оборудования. Существующие обобщенные петрофизические зависимости дают в лучшем случае лишь полуколичественную оценку таких параметров, как удельная поверхность пор и проницаемость. С достаточно высокой точностью без привлечения других методик анализа методом ЯМР-релаксометрии определяется лишь общая пористость.

В настоящей статье предложен метод комплексирования данных ЯМР-релаксометрии и электротометрии на примере группы месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции для получения

дополнительной информации как при интерпретации сведений ЯМР-релаксометрии с использованием материалов исследований электрических свойств пород, так и для расчета электрических параметров керны из данных ЯМР. Фактический объем использованного материала составил около 700 образцов керны, представленного как терригенными, так и карбонатными породами.

Как известно, одним из самых востребованных петрофизических параметров системы порода-флюид является проницаемость. Несмотря на то, что на протяжении нескольких последних десятилетий в специализированной литературе было предложено множество эмпирических зависимостей проницаемости от различных петрофизических параметров, вопрос точности получаемых расчетных данных и применимости отдельных зависимостей для различных литотипов пород и геологических формаций является до сих пор актуальным [7]. Наряду с чисто эмпирическими зависимостями, некоторыми авторами предложены уравнения, получаемые из основных физических законов. Так, Йозефом Козени была предложена зависимость для расчета проницаемости, основанная на законах Дарси и Пуазейля для пучка извилистых поровых каналов. В интерпретации М.Р.Дж. Вилли и М.Б. Спэнгера [1] уравнение выглядит следующим образом:

$$K_{ПП} = \left(\frac{1}{K_{ps} \sqrt{\tau} S_{Vgr}} \right) \frac{K_{II}^3}{(1 - K_{II})^2}, \quad (3)$$

где $K_{ПП}$ — коэффициент проницаемости, мД;

K_{ps} — коэффициент учета формы пор;

τ — извилистость пор;

S_{Vgr} — удельная поверхность пористого материала, 1/м;

K_{II} — коэффициент пористости, доли ед.

Коэффициент формы пор K_{ps} для горных пород принимает различные значения в зависимости от сферичности и окатанности зерен породы и достигает 6 в случае сферических пор. Извилистость порового канала τ легко может быть рассчитана из данных электрических исследований по зависимости М.Р.Дж. Вилли и А. Гарднера [2]:

$$\tau = (P_{II} \times K_{II}^2)^2, \quad (4)$$

где P_{II} — параметр пористости;

K_{II} — коэффициент пористости, доли ед.

Для расчета удельной поверхности пор воспользуемся простыми соображениями, отражающими геометрию изогнутых цилиндрических каналов:

$$V_{пор} = S_{Vgr} \times L_0 \tau, \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{S_{пор}}{S_0}, \quad (6)$$

$$K_{II} = \frac{V_{пор}}{V_0}, \quad (7)$$

где L_0 — длина образца, м;

φ — просветность или поверхностная пористость;

$S_{пор}$ и $V_{пор}$ — суммарная площадь сечения поровых каналов и объем пор, м² и м³ соответственно;

S_0 и V_0 — площадь сечения цилиндрического образца и его объем, м² и м³ соответственно.

Рассматривая совместно уравнения (6) и (7), получаем:

$$\frac{\varphi}{K_{II}} = S_{Vgr} \times L_0. \quad (8)$$

Что, в свою очередь, при рассмотрении поровых каналов в геометрии изогнутых цилиндрических трубок, а также с учетом соотношения (6)

$$\varphi = \frac{\tau}{P_{II}} \quad (9)$$

может быть представлено в следующем виде:

$$S_{Vgr} = \frac{\tau}{P_{II} \times K_{II} \times L_0}. \quad (10)$$

Уравнение (10) позволяет получать требуемые для дальнейших расчетов параметры прямыми измерениями геометрических значений цилиндрических образцов керны и их электрических свойств в насыщенном состоянии.

Коэффициент пористости K_{II} легко и надежно определяется по результатам ЯМР-релаксометрии. Таким образом, неопределенными в уравнении (3) остается 2 параметра: коэффициент проницаемости и удельная поверхность пор. В зависимости от поставленных задач сторонними методами может определяться один из пары этих параметров. Проницаемость, для последующего расчета удельной поверхности пор, можно определить с помощью пермеметра, и в зависимости от условий проведения исследований будет получена абсолютная или эффективная проницаемость. Исходя из этих предположений, может быть рассчитана абсолютная поверхность пор (т.е. полная поверхность зерен сухой чистой породы) или поверхность пор, смоченных остаточным флюидом. Безусловно, это применимо и при определении указанных параметров в пластовых условиях. Удельная поверхность пор, для последующего расчета проницаемости, может быть определена из исследований электрических свойств насыщенных пород, по уравнениям (8) или (10).

Косвенным итогом комплексного использования данных ЯМР-релаксометрии и электрических исследований может быть определение поверхностной релаксивности для пород отдельных геологических формаций и определенного литотипа. Полученные константы могут быть использованы в дальнейшем, в уравнении (1), для оперативного определения удельной поверхности пор только по данным ЯМР без привлечения других методов исследований.

При определении поверхностной релаксивности (в нашем случае относительно времени T_1) исходили из положения, что в случае некавернозной водонасыщенной породы T_{1b} много больше обратной величины поверхностной релаксивности ρ_1 и удельной поверхности пор. В данном случае первым членом

уравнения (1) можно пренебречь и, используя указанное соотношение, легко вычислить ρ_1 .

Таким образом, используя приведенные выше предпосылки: сферичность пор для уравнения (3), а также расчетные уравнения для извилистости, просветности и удельной поверхности пор, по данным электрических исследований, — были вычислены $K_{пр}$ керна по воде как насыщающему флюиду. На рисунке 1 приведено сопоставление полученных

расчетных величин и прямых замеров методом газовой пермеаметрии.

Сопоставление данных, рассчитанных предложенным методом, с результатами фильтрационных исследований (ограниченная коллекция, фильтрация насыщающим флюидом в режиме установившегося ламинарного потока) показывает хорошую сходимость результатов, что отображено в таблице 1 и представлено на рисунке 1.

На рисунке 2 показано сопоставление значений удельной поверхности пор, рассчитанных по результатам электротометрии по уравнению (10) и по результатам замеров методом ЯМР-релаксометрии с привлечением данных определения $K_{пр}$ методом газовой пермеаметрии исходя из зависимости (3).

Видно, что оба предложенных метода расчета удельной поверхности пор дают в большинстве случаев сходные результаты, что наиболее показательнее при значениях удельной поверхности выше 0,01 1/м. Разброс значений объясняется тем, что для расчетов использовалась модель сферических пор, в то время как коэффициент формы пор K_{ps} для различных пород может изменяться. Косвенным итогом комплексного использования данных ЯМР-релаксометрии и электрических исследований может быть определение поверхностной релаксивности для пород отдельных геологических формаций и определенного литотипа. Полученные константы могут быть использованы в дальнейшем, в уравнении (1), для оперативного

Табл. 1. Сопоставление расчетных $K_{пр}$ и определенных прямым методом
Tab. 1. Comparison of calculated $K_{пр}$ and those determined by the direct method

Условный номер образца	$K_{пр}$ по результатам прямых фильтрационных исследований, мД	$K_{пр}$ расчетным методом, мД
1	3,45	2,70
2	1,02	0,90
3	1,28	2,74
4	1,68	1,31

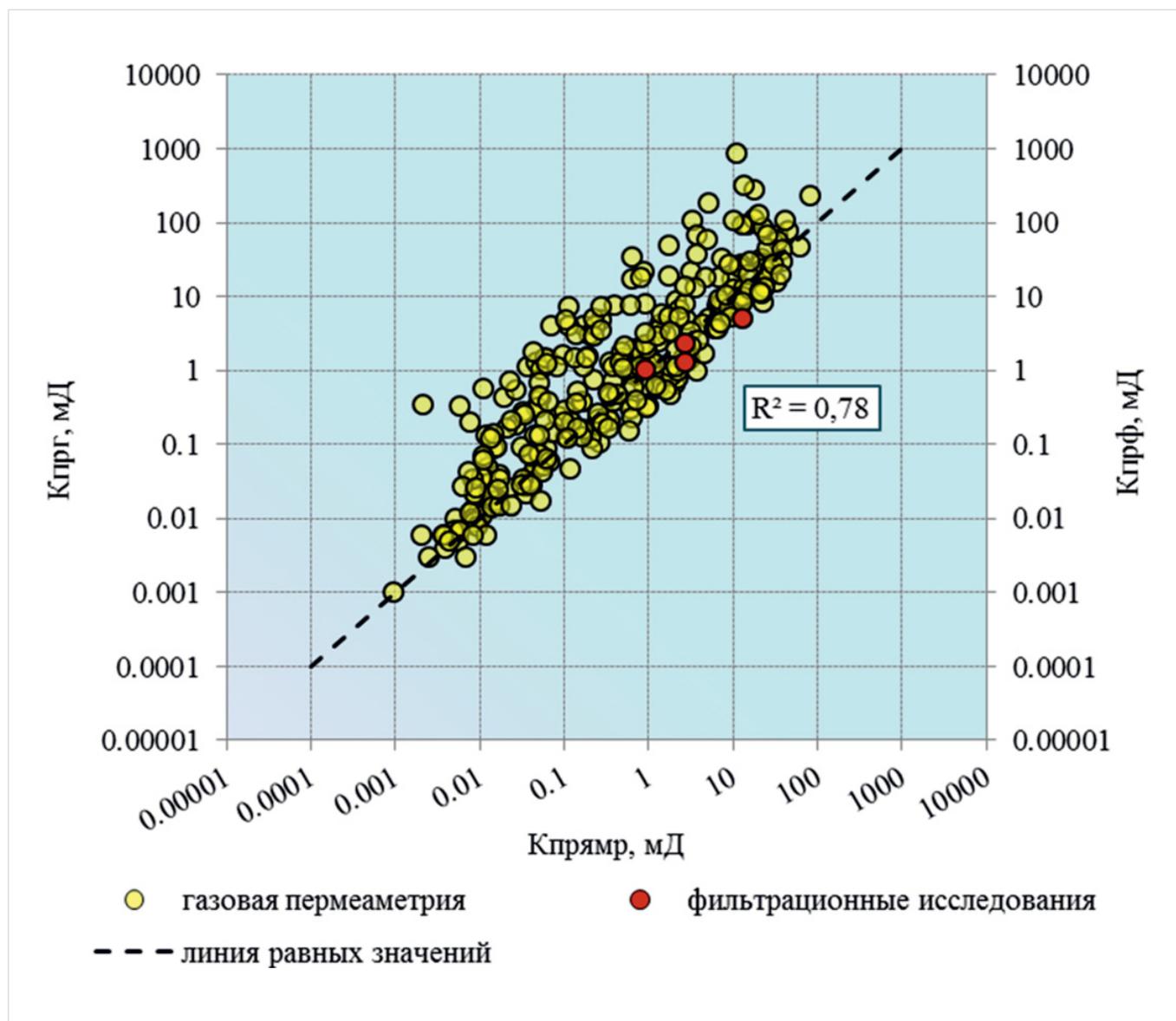


Рис. 1. Сопоставление значений проницаемости $K_{пр}$, определенных методом газовой пермеаметрии, расчетных значений $K_{пр}$ ямр, полученных из результатов ЯМР-релаксометрии и электрических исследований, и прямых замеров $K_{пр}$ при фильтрационных исследованиях

Fig. 1. Comparison of the values of the $K_{пр}$ permeability determined by the gas permeametry method, the calculated values of the $K_{пр}$ obtained from the results of NMR relaxometry and electrical studies, and direct measurements of the $K_{пр}$ during filtration studies

определения удельной поверхности пор только по данным ЯМР без привлечения других методов исследований. Исходя из того, что время релаксации в объеме значительно больше времени релаксации на поверхности, мы пренебрегаем в дальнейших расчетах первым членом уравнения (1). Исходя из этой предпосылки рассчитана поверхностная релаксивность:

$$\rho_1 = \frac{1}{S_{Vgr}} \times \frac{1}{T_1}, \quad (11)$$

где T_1 — время продольной релаксации, с;

ρ_1 — поверхностная релаксивность T_1 (сила релаксации T_1 на поверхностях зерен), $(\text{м} \cdot \text{с})^{-1}$;

$S_{Vgr} = S/V$ — удельная поверхность заполненных флюидом пор, $1/\text{м}$.

По результатам комплексного исследования 253 образцов керна, исходя из уравнений (10) и (11), рассчитаны

значения поверхностной релаксивности ρ_1 , а также средние значения для укрупненных литотипов пород, рассматриваемых в работе (табл. 2).

Сопоставление средних арифметических значений и медиан для различных пород позволяет увидеть степень расхождения результатов (наличие выбросов) и их отклонения от нормального распределения. Так, очевидно, что распределение результатов наиболее близко к нормальному и имеет наименьшее

количество выбросов в случае песчаников и алевролитов, т.е. для терригенных пород в силу более выдержанных характеристик пористой среды. Наиболее подвержены неоднородности свойств поверхностной релаксации доломиты, в меньшей степени — известняки, в значительно меньшей степени (сопоставимой с терригенными породами) — силициты и спонголиты: для них выражено значительное отклонение среднего арифметического значения от медианы, что говорит о наличии

Табл. 2. Значения поверхностной релаксивности ρ_1 для различных литотипов
Tab. 2. The values of the surface relaxivity ρ_1 for different lithotypes

Укрупненный литотип	Поверхностная релаксивность ρ_1 , $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	
	Среднее арифметическое	Медиана
Силициты+спонголиты	0,49	0,39
Алевролиты+песчаники	0,61	0,48
Известняки	0,54	0,26
Доломиты	1,78	0,70

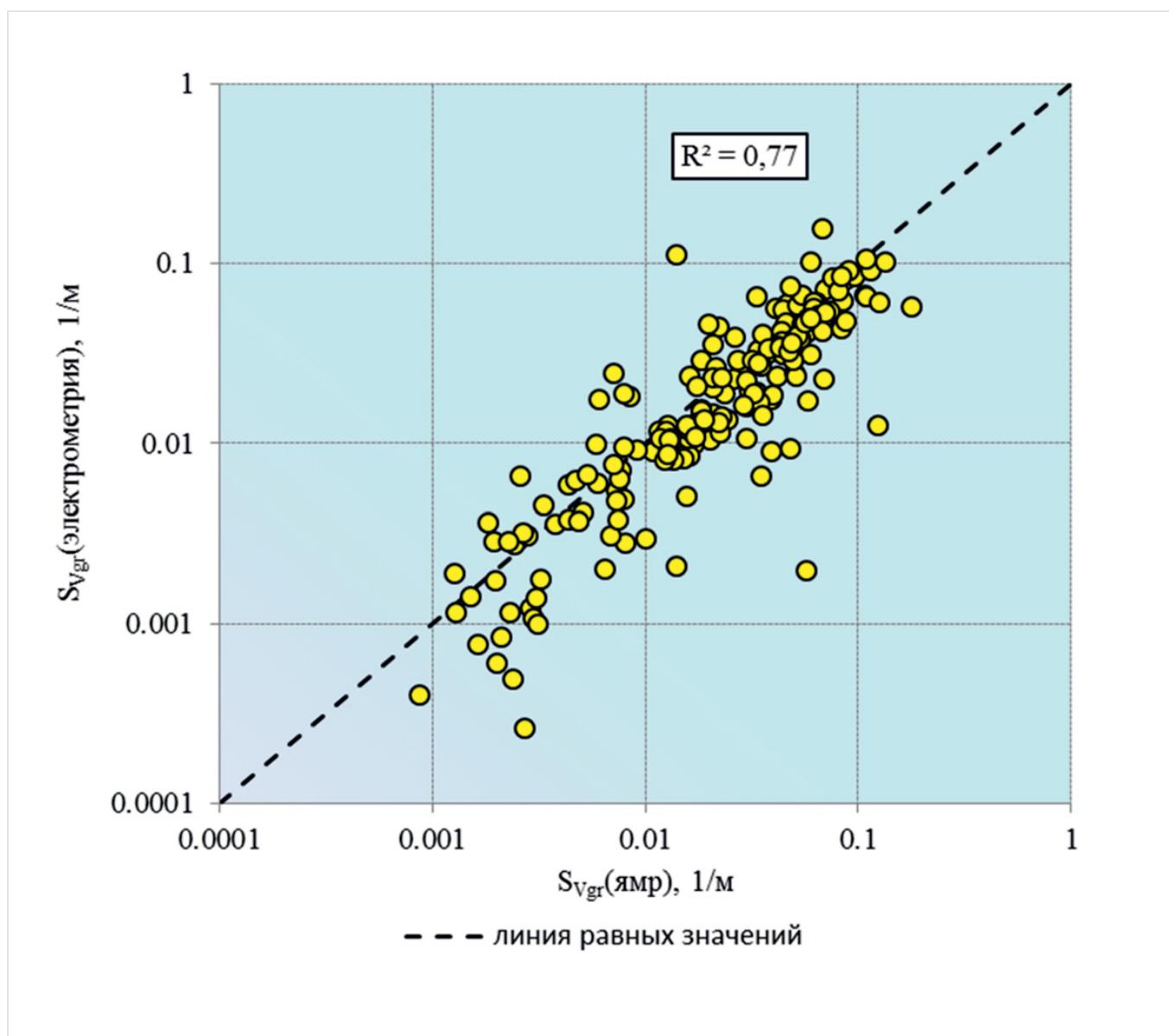


Рис. 2. Сопоставление значений удельной поверхности пор, полученных методом комплексирования данных ЯМР и газовой пермеаметрии S_{Vgr} (ямп), и из результатов электрометрических исследований S_{Vgr} (электрометрия)

Fig. 2. Comparison of the values of the specific pore surface obtained by combining NMR and gas permeometry S_{Vgr} (nmr), and from the results of electrometric studies S_{Vgr} (electrometry)

выбросов и отклонении совокупности от нормального распределения. В свою очередь, это означает неравномерный состав или наличие ферромагнитных включений, а также наличие трещиноватости в данных породах, более выраженной в представленной коллекции образцов у карбонатов, менее выраженной в кремневых породах.

Таким образом, при рассмотрении данных поверхностной релаксивности ρ_1 , исходя из ненормальности распределений полученных выборок, более оправданным считается в дальнейшем применение медианного значения параметра.

Итоги

Проведена оценка проницаемости по жидкости различными методами, определены константы релаксивности для оперативных расчетов.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

- Расчет проницаемости по комплексу данных ЯМР (полная пористость, удельная поверхность пор) и электрометрии

(просветность, извилистость и удельная поверхность пор) показал хорошую сходимость результатов с прямыми измерениями проницаемости по жидкости и газу. Это открывает возможность оценки проницаемости образцов в тех случаях, когда измерение другими методами невозможно или экономически не выгодно.

- Выполнено определение коэффициента релаксивности для отдельных литотипов в целях последующего оперативного расчета удельной поверхности и, как следствие, проницаемости пород без привлечения данных электрометрии и пермеаметрии.
- В дальнейшем анализе полученных результатов возможно уточнение коэффициента формы пор K_{pr} для различных литотипов для более точного расчета проницаемости.

Литература

1. Wyllie M.R.J., Spangler M.B. Application of electrical resistivity measurements to problems of fluid flow in porous media. AAPG Bulletin, 1952, Vol. 36, issue 2, P. 359–403. (In Eng).

2. Archie G.E. Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. AAPG Bulletin, 1952, Vol. 36, issue 2, P. 278–298. (In Eng).
3. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1966. 283 с.
4. Джордж Р. Коатес, Ли Чи Хиао, Манфред Д. Праммер Каротаж ЯМР. Принципы и применение. Хьюстон: Халлибуртон Энерджи Сервисез, 2011. 338 с.
5. Джафаров И.С., Сынкаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерно-магнитного резонанса для характеристик состава и распределения пластовых флюидов. М.: Химия, 2002. 439 с.
6. Джеббар Тиаб, Эрл Ч. Доналдсон Петрофизика: Теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М.: Премиум инжиниринг, 2009. 862 с.
7. Методические рекомендации по исследованию пород-коллекторов нефти и газа физическими и петрографическими методами. М.: ВНИГНИ, 1978. 381 с.

ENGLISH

Results

The fluid permeability was evaluated by various methods, the relaxation constants for operational calculations were determined.

Conclusions

- The calculation of permeability from a set of NMR data (total porosity, specific pore surface) and electrometry (lumen, tortuosity and specific pore surface) showed good convergence of the results with direct measurements of permeability in liquid and gas. This opens

up the possibility of assessing the permeability of samples in cases where measurement by other methods is impossible or economically unprofitable.

- The reactivity coefficient was determined for individual lithotypes for the subsequent operational calculation of the specific surface area without involving electrometry data.
- It is possible to refine the pore shape coefficient K_{pr} for different lithotypes: the selection of the constant that gives the greatest convergence of the K_{pr} (calculated and measured).

References

1. Wyllie M.R.J., Spangler M.B. Application of electrical resistivity measurements to problems of fluid flow in porous media. AAPG Bulletin, 1952, Vol. 36, issue 2, P. 359–403. (In Eng).
2. Archie G.E. Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. AAPG Bulletin, 1952, Vol. 36, issue 2, P. 278–298. (In Eng).
3. Romm E.S. Filtration properties of fractured rocks. Moscow: Nedra, 1966, 283 p. (In Russ).
4. George R. Coates, Li Chi Hao, Manfred D. Example NMR logging. Principles and application. Houston: Halliburton Energy Services, 2011, 338 p. (In Russ).
5. Jafarov I.S., Syngaevsky P.E., Khafizov S.F. Application of the nuclear magnetic resonance method for the characteristics of the composition and distribution of reservoir fluids. Moscow: Khimiya, 2002, 439 p. (In Russ).
6. Jebbar Tiab, Earl Ch. Donaldson Petrophysics: Theory and practice of studying the reservoir properties of rocks and the movement of reservoir fluids. Moscow: Premium inzhiniring, 2009, 862 p. (In Russ).
7. Methodological recommendations for the study of oil and gas reservoir rocks by physical and petrographic methods, Moscow: VNIGNI, 1978, 381 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рогозин Александр Анатольевич, начальник отдела
ООО «НК «Роснефть–НТЦ», Краснодар, Россия
Для контактов: aarogozin@ntc.rosneft.ru

Rogozin Aleksandr Anatolevich, head of department
of “NK “Rosneft-STC” LLC, Krasnodar, Russia
Corresponding author: aarogozin@ntc.rosneft.ru

Игнатьева Татьяна Сергеевна, инженер 1 категории
ООО «НК «Роснефть–НТЦ», Краснодар, Россия

Ignateva Tatyana Sergeevna, engineer of the 1st category
of “NK “Rosneft-STC” LLC, Krasnodar, Russia

Чурков Александр Викторович, заведующий лабораторией
ООО «НК «Роснефть–НТЦ», Краснодар, Россия

Churkov Aleksandr Viktorovich, head of the laboratory
of “NK “Rosneft-STC” LLC, Krasnodar, Russia