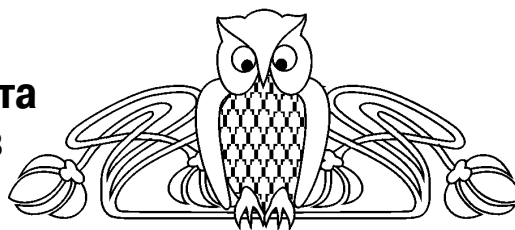




Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 137–147
Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 137–147

Научная статья
УДК 553.98
<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-2-137-147>

Исследование масштабного эффекта пористости в образцах известняков башкирского яруса



Д. И. Хасанов, М. А. Лоншаков 

Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Хасанов Дамир Ирекович, кандидат геолого-минералогических наук, damir.khassanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8168-3848>
Лоншаков Марат Андреевич, магистрант, maratlonsh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0439-7514>

Аннотация. В статье представлен алгоритм определения представительных элементов объемов двух интервалов керна длиной 1 м по значениям пористости. Изучена литература, посвященная вопросу практического определения представительного объема керна по флуктуации пористости. Проведено сравнение значений коэффициента открытой пористости одномерного интервала керна, установленных по данным пористости отобранных кернов большого диаметра (7.3 см) и цилиндрических образцов диаметром 3 см для двух интервалов. Проанализированы особенности проявления масштабного эффекта в образцах известняков башкирского яруса в зависимости от их представительных размеров и преобладающего вида пористости. Установлена причина изменения коэффициентов пористости образцов с увеличением их объемов, заключающаяся в проявлении трещинной пористости в образцах большого диаметра. Осуществлено сопоставление лабораторных величин пористости образцов керна и ее значений, установленных по данным метода нейтронного гамма-каротажа. Сформулированы основные факторы совпадения/несовпадения лабораторных данных и значений кривой пористости, связанные с особенностями метода нейтронного гамма-каротажа при исследовании высокопористых интервалов коллектора. Выявлена необходимость учета масштабного эффекта при анализе корреляционной зависимости «кern – геофизические исследования скважин».

Ключевые слова: представительный элемент объема (элементарный представительный объем), межформенная пористость, трещинная пористость, коэффициент открытой пористости, масштабный эффект, метод жидкостенасыщения, образец керна стандартного размера, kern большого диаметра, грейнстоун, пакстоун

Для цитирования: Хасанов Д. И., Лоншаков М. А. Исследование масштабного эффекта пористости в образцах известняков башкирского яруса // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 137–147. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-2-137-147>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Article
<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-2-137-147>

The investigation of the scale effect on porosity in Bashkirian limestones

D. I. Khassanov, M. A. Lonshakov 

Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya St., Kazan 420008, Russia

Damir I. Khassanov, damir.khassanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8168-3848>
Marat A. Lonshakov, maratlonsh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0439-7514>

Abstract. The article presents the methodology of the representative elementary volume definition for two 1 m long whole core segments. Scientific articles focused on practical methods of representative volume calculations using various physical parameter fluctuations have been studied. Porosity values of every whole core fragment evaluated in two ways using the 7.3 cm diameter core samples in the first approach and the 3 cm diameter core samples in the second one have been compared. Particularities of the scale effect occurring in core samples and depending on core size and porosity type have been analyzed. The cause of porosity increase in big core samples has been determined. The reason due to which porosity changes are explained by fracture porosity occurring in core samples having big volumes has been found. The comparison between neutron log porosity and core porosity has been made. Reasons of similarities or differences of core and log data have been established.

Keywords: representative elementary volume, intergranular porosity, fracture porosity, connected porosity, scale effect, buoyancy method, core plug, core sample of big diameter, grainstone, packstone



For citation: Khassanov D. I., Lonshakov M. A. The investigation of the scale effect on porosity in Bashkirian limestones. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 137–147 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-2-137-147>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Введение

Актуальность рассматриваемой проблемы заключается в том, что в зависимости от объемов изучаемых в лабораторных условиях образцов керн и частоты их отбора для одного и того же интервала пласта-коллектора могут быть определены разные значения коэффициента открытой пористости. Данное явление получило определение «масштабный эффект», а причины, его вызывающие, называются масштабными факторами [1]. Пренебрежение масштабным эффектом при проведении лабораторного анализа керн может привести к установлению недостоверных значений коэффициента открытой пористости образцов и, как следствие, некорректной корреляционной зависимости «кern–геофизические исследования скважин».

Цель статьи заключается в исследовании флуктуации коэффициентов открытой пористости образцов известняков каменноугольного возраста, отобранных в пределах двух интервалов керн длиной 1 м, при изменении геометрических размеров цилиндрических образцов.

Стандартный анализ керн (от англ. *RCA – routine core analysis*) проводится в петрофизических лабораториях с целью определения пористости и других свойств исследуемых образцов горных пород [2]. Изучаемые небольшие образцы керн отбираются из фрагментов интервалов керн с определенной частотой.

В зарубежных лабораториях при определении фильтрационно-емкостных свойств однородного коллектора цилиндрические образцы диаметром 2.54 см (1 дюйм) или 3.8 см (1.5 дюйма), длиной 5.08–7.62 см (2–3 дюйма) отбираются через каждые 25 см (30 см) из фрагментов полноразмерного керн длиной 3 фута [3]. В компании «Schlumberger» для проведения стандартного анализа однородного керн применяются образцы высотой около 6.4 см при диаметре 2.54 см или 3.8 см [2].

В отечественных петрофизических лабораториях образцы керн отбираются согласно требованиям, представленным в «Методических рекомендациях по исследованию пород-коллекторов нефти и газа физическими и петрографическими методами» [4] и в ГОСТе 26450.0-85 [5]. Цилиндрические образцы длиной 3 см и высотой 3 см, выбуренные из интервалов керн длиной 1 м через каждые 25–30 см, признаны оптимальными для определения пористости и абсолютной газопроницаемости однородных коллекторов. Для исследования коллекторов со сложным строением порового пространства в российских петрофизических лабораториях используют образцы керн диаметром 60–90 мм [4]. Зарубежный подход к

анализу неоднородных пород коллекторов заключается в исследовании образцов керн длиной до 15 см (6 дюймов) и диаметром 4.4–13.3 см (1.75–5.25 дюйма) [6].

Анализ образцов большого диаметра (60–90 мм), выбуренных из одного интервала керн, в настоящее время является способом получения наиболее точных значений пористости неоднородного карбонатного или терригенного коллектора [4]. Однако одновременное исследование нескольких больших образцов керн диаметром 60–90 мм приводит к значительным временным и финансовым затратам, поэтому крайне важной является задача установления «истинных» величин пористости интервала керн заданной длины при анализе единственного (цельного) образца керн минимального объема.

Понятие элементарного представительного объема (от англ. *REV – representative elementary volume*) горных пород применительно к аддитивным свойствам было сформулировано в работах J. Bear [7] и Б. И. Прилоуса [8]. В результате анализа указанных работ П. Ю. Томин уточнил практический способ определения элементарного представительного объема (ЭПО) (представительного элемента объема) керн путем построения графика флуктуации изучаемого свойства образца (пористости) с изменением объема керн (рис. 1) [9]. Очевидно, что значение измеряемого свойства не испытывает значительных флуктуаций лишь на конкретном интервале размеров. Данный подход был использован при исследовании образцов известняков каменноугольного возраста.

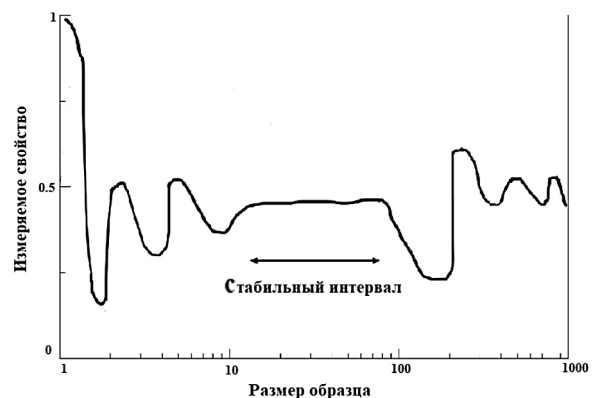


Рис. 1. Оценка элементарного представительного объема [9]

Объекты исследования

Изучаемые интервалы керн длиной 1 метр были отобраны из скважины № А месторождения N, относящегося к группе малоэффективных нефтяных месторождений [10].



Скважина № А в интервале глубин 935.0–1008.0 м вскрывает осадочные отложения среднекаменноугольного возраста. Нижняя часть пройденного интервала (952.0–1008.0 м) представлена породами башкирского яруса. Первый керн длиной 1 м, отобранный в интервале глубин 962.0–963.0 м, представлен грейнстоуном. Второй керн длиной 1 м, извлеченный в интервале глубин 974.0–975.0 м, – грейнстоуном и пакстоуном. Литотипы известняков были установлены в результате микроскопического исследования пород-коллекторов в шлифах, согласно классификации R. J. Dunham [11].

Методика исследования

На первом этапе работ было проведено литолого-минералогическое исследование образцов известняков каменноугольного возраста, отобранных из изучаемых интервалов. На втором этапе было осуществлено экстрагирование образцов с помощью аппарата Соклета и определение коэффициентов открытой пористости образцов керна методом жидкостенасыщения.

Из керна длиной 1 м (интервал отбора 962.0–963.0 м) были отобраны шесть образцов керна большого диаметра (7.3 см) высотой 5.2–5.4 см и пять цилиндрических образцов диаметром 3 см и высотой 6 см, выбуренных через каждые 20–30 см перпендикулярно оси исходного керна.

Из керна длиной 1 м (интервал отбора 974.0–975.0 м) были отобраны семь образцов керна большого диаметра (7.3 см) и четыре цилиндрических образца диаметром 3 см и высотой 10 см, выбуренных через каждые 20–30 см перпендикулярно оси исходного керна. Первоначальный диаметр интервалов керна, по данным буровых работ на глубине 962.0–963.0 м, составляет 100 мм, на глубине 974.0–975.0 м – 131 мм.

По итогам исследования всех образцов проводится расчет коэффициентов открытой пористости двух кернов длиной 1 м путем усреднения значений открытой пористости кернов большого диаметра и образцов керна диаметром 3 см, высотой 6(10) см, отобранных через каждые 20–30 см.

Эталонным («истинным») значением коэффициента открытой пористости интервала керна длиной 1 метр в данном случае будет являться среднее геометрическое (среднее арифметическое) значение пористости кернов большого диаметра. Определение коэффициента открытой пористости методом жидкостенасыщения, подробно описанным в работе [12], было проведено с помощью установки насыщения образцов «Напор-РМ», согласно ГОСТу 26450.1-85 [5].

Практические результаты

Коэффициенты открытой пористости $\phi_{\text{con}} = K_{\text{o.п}}$ кернов большого диаметра (7.3 см) и ци-

линдрических образцов диаметром 3 см приведены в табл. 1, 2. С целью выбора методов осреднения значений пористости исследуемых образцов для четырех выборок (керны большого диаметра и цилиндрические образцы диаметром 3 см) были рассчитаны коэффициенты Дикстра–Парсонса V_k [13]. Рассчитанные коэффициенты открытой пористости двух интервалов керна также представлены в табл. 1, 2. Далее были построены общие графики зависимости коэффициента открытой пористости от объема образца для интервалов 962.0–963.0 м (рис. 2) и 974.0–975.0 м (рис. 3).

Для каждого объема образца в интервалах 962.0–963.0 м и 974.0–975.0 м было определено среднее значение пористости, множество средних значений на рис. 2 и 3 соединены зелеными кривыми. В интервале 962.0–963.0 м при объемах от 21.19 до 222.2 см³ средние значения пористости колеблются от 24 до 27.2%, следовательно, распределение межформенных пор является относительно равномерным. Средние значения, превышающие 27%, наблюдаются в диапазоне 222.20–238.44 см³, следовательно, их рост связан с дополнительным проявлением трещинной пористости в образцах большого размера. Фиолетовым цветом на рис. 2 обозначена область проявления межформенной области, желтым – область проявления межформенной и трещинной пористости.

Таким образом, интервал керна на глубине 962.0–963.0 м представлен трещиноватым карбонатным коллектором со сложной структурой порового пространства [14]. Общий график зависимости коэффициента открытой пористости от объема образца с учетом данных пористости интервала керна и его отдельных фрагментов представлен на рис. 4. Соответствующие большим фрагментам метрового керна (диаметром 10 см) коэффициенты открытой пористости были установлены по данным пористости кернов большого диаметра. Определение представительного элемента объема интервала керна длиной 1 м на глубине 962.0–963.0 м сопровождается расчетом максимального отклонения (по модулю) от среднего значения открытой пористости (установленного для каждого рассматриваемого размера) для каждого объема образца. Полученные результаты представлены на рис. 5, 6.

Установление участка минимальной флуктуации пористости было проведено путем определения приращений величин максимального отклонения коэффициента открытой пористости от среднего значения с изменением объема образца (см. рис. 5). Участок нулевых приращений наблюдается в интервале объема от 44 до 94 см³, следовательно, элементарный представительный объем интервала керна на глубине 962.0–963.0 м, при котором возможно исследование межформенных пор и их вклада в открытую пористость, составляет 44 см³, допустимый представительный объем образца варьируется в интервале от 44 до 94 см³.



Таблица 1

Коэффициенты открытой пористости кернов большого диаметра и цилиндрических образцов диаметром 3 см, отобранных в интервале глубин 962.0–963.0 м

Номер выборки	Номер образца	Глубина отбора, м	Объем образца, см ³	$\phi_{\text{кон}}, \%$	V_k	Средние значения пористости интервала керна длиной 100 см и диаметром 10 см, %	Метод осреднения
1	1	962.12	221.91	25.22	0.15	28.08	Арифметический
	2	962.22	220.79	23.83			
	3	962.34	229.84	27.28			
	4	962.49	224.67	29.75			
	5	962.64	221.44	32.57			
	6	962.8	247.05	29.82			
2	I	962.03	44.67	24.27	0.33	22.73	Геометрический
	II	962.19	21.77	15.94			
	III	962.42	44.50	20.78			
	IV	962.59	43.40	27.28			
	V	962.92	31.19	27.69			

Таблица 2

Коэффициенты открытой пористости кернов большого диаметра и цилиндрических образцов диаметром 3 см, отобранных в интервале глубин 974.0–975.0 м

Номер выборки	Номер образца	Глубина отбора, м	Объем образца, см ³	$\phi_{\text{кон}}, \%$	V_k	Средние значения пористости интервала керна длиной 100 см и диаметром 13.1 см, %	Метод осреднения
1	1	974.12	197.236	14.39	0.16	13.22	Арифметический
	2	974.22	245.286	16.01			
	3	974.35	77.326	11.55			
	4	974.45	157.922	14.95			
	5	974.55	255.615	15.50			
	6	974.75	231.003	12.78			
	7	974.94	204.473	11.96			
2	I	974.06	69.653	10.08	0.42	9.6	Геометрический
	II	974.41	22.261	10.83			
	III	974.64	70.456	10.26			
	IV	974.85	70.179	7.58			

По аналогии с рис. 5 анализ графика на рис. 6 дал возможность определить представительный элемент объема интервала керна длиной 100 см и диаметром 10 см, позволяющий исследовать вклад межформенной и трещинной пористости, а также каверн в коэффициент открытой пористости. Участок стабильных значений пористости наблюдается в интервале 3455–6518 см³, следовательно, минимальный представительный объем интервала керна на глубине 962.0–963.0 м равен 3455 см³. Значения представительных объемов в интервале 962.0–963.0 м и соответствующие им линейные размеры образцов представлены в табл. 3. Погрешность определения коэффициентов открытой пористости образцов разного размера не превышает 1.25%.

В результате анализа графика, представленного на рис. 3, было установлено, что при объемах образцов до 90 см³ (желтая область) значения открытой пористости меньше, по сравнению со зна-

чениями больших образцов (синяя область), что объясняется проявлением разных видов пустот. Участок, обозначенный на рис. 3 зеленым цветом, представляет собой область перехода между:

1) межформенной пористостью, которая отчетливо проявляется в небольших образцах объемом менее 90 см³;

2) межформенной в совокупности с трещинной (макротрещины) пористостью (а также с кавернами), которая явно прослеживается в образцах объемом свыше 90 см³.

Справедливость вышеупомянутых выводов была доказана в результате исследования порового пространства в шлифах и составления макроописания образцов керна. В процессе составления макроописания керового материала в интервале глубин 974.0–975.0 м были обнаружены наглядные макротрещины длиной 2–3 см и шириной (раскрытость) 1–2 мм (рис. 7). Таким образом, рассматриваемый интервал керна 974.0–975.0 м

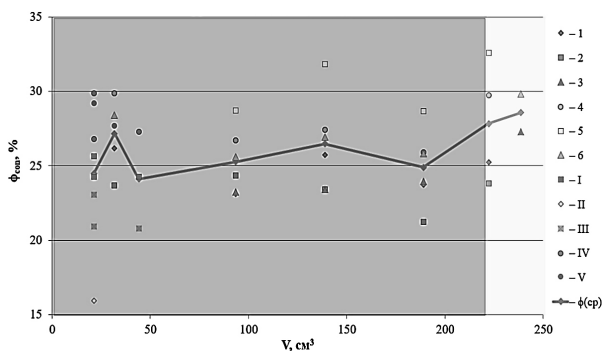


Рис. 2. Кроссплот «коэффициент открытой пористости–объем образца» для интервала 962.0–963.0 м. Справа представлена нумерация образцов в соответствии с табл. 1. Фиолетовым цветом обозначена область проявления межформенной области, желтым – область проявления межформенной пористости в совокупности с трещинной пористостью и кавернами (цвет online)

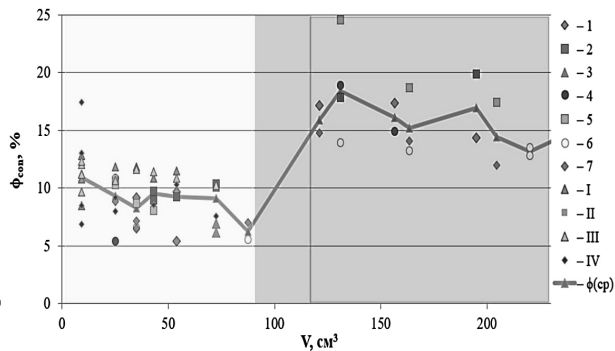


Рис. 3. Общий график зависимости коэффициента открытой пористости от объема образца для интервала 974.0–975.0 м. Справа представлены номера образцов в соответствии с табл. 2. Синим цветом обозначена область проявления межформенной пористости в совокупности с трещинной пористостью, желтым – область проявления межформенной пористости, зеленым – переходная область (цвет online)

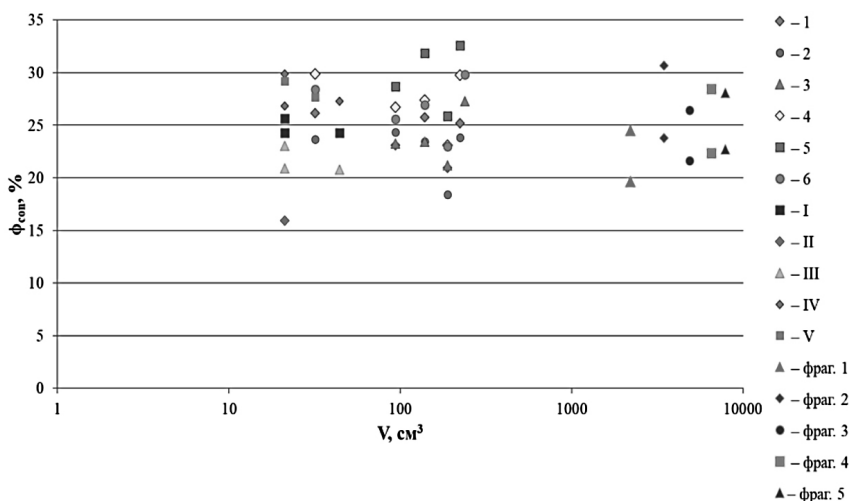


Рис. 4. Кроссплот «коэффициент открытой пористости–объем образца» для интервала 962.0–963.0 м с учетом данных пористости фрагментов интервала керна диаметром 10 см на глубине 962.0–963.0 м (цвет online)

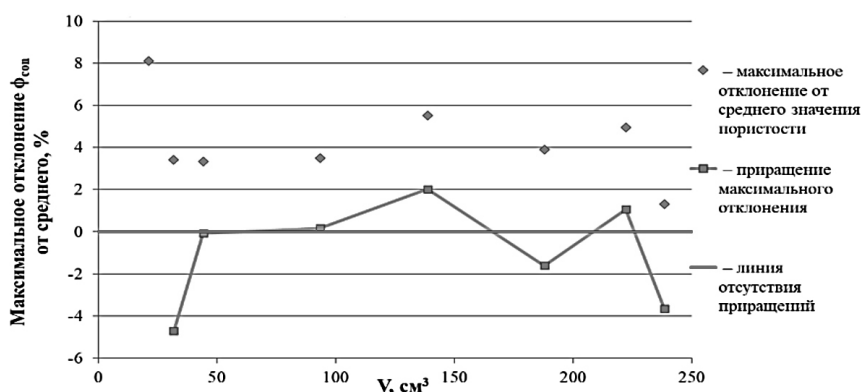


Рис. 5. График изменения максимального отклонения коэффициента открытой пористости относительно среднего значения с приращением объема образца (не превышающего 238.44 см³) для интервала 962.0–963.0 м (цвет online)

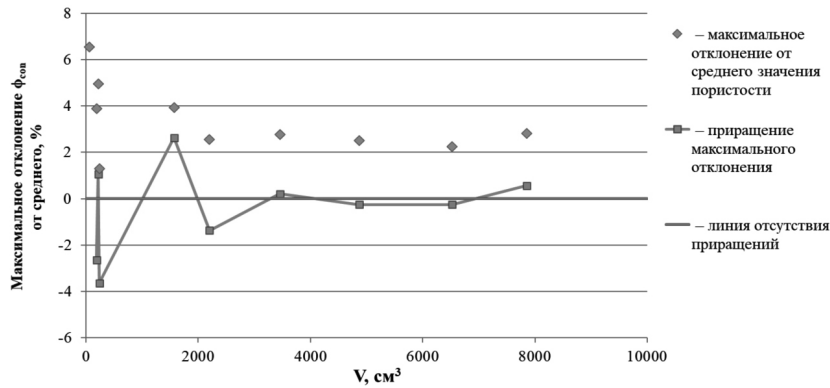


Рис. 6. График изменения максимального отклонения коэффициента открытой пористости относительно среднего значения с приращением объема образца для интервала 962.0–963.0 м (цвет online)



Рис. 7. Макротрещины в образцах известняков в интервале 963.0–964.0 м (М. А. Лоншаков, 2020 г.)

Таблица 3

Значения представительных объемов и соответствующие линейные размеры образцов в интервале 962.0–963.0 м

Исследование	ЭПО, см³	Высота образца, см	Диаметр образца, см	Диапазон представительных объемов, см³
Межформенных пор	44	6	3	44–94
Совокупности межформенных пор, макротрещин и каверн в объеме керна длиной 100 см и диаметром 10 см	3455	44	10	3455–6518

по аналогии с интервалом 962.0–963.0 относится к трещиноватому коллектору со сложной структурой порового пространства [14].

По итогам определения пористости в интервале 974.0–975.0 м для каждого объема образца было определено максимальное отклонение коэффициента открытой пористости $\phi_{\text{кон}}$ от среднего значения. Полученные результаты представлены на рис. 8, 9.

Анализ графиков (см. рис. 8, 9) для интервала 974.0–975.0 м сопровождается предварительными расчетами погрешности определения коэффициентов открытой пористости образцов разного размера, которая в данном случае не превышает 1.4%. График, представленный на рис. 8, позволяет установить элементарный представительный объем при условии, что размер образца не превышает 90 см³. Постоянные (стабильные) значения

пористости не наблюдаются в рассматриваемом диапазоне объемов по причине сложного строения порового пространства образцов керна. Изучение представительных образцов размером не более 90 см³ позволит рассчитать значения коэффициента открытой пористости, обусловленные главным образом наличием межформенных пор (без учета трещин).

Представленный на рис. 9 общий график флуктуации максимального отклонения коэффициента открытой пористости от среднего значения был построен для определения ЭПО керна длиной 1 метр и диаметром 13.1 см, открытая пористость которого связана с распространенностью как межформенных пор, так и трещин длиной 2–3 см с кавернами. Наибольшее приращение максимального отклонения при изменении объема от 6739 до 13478 см³ не превышает 1.15% (по модулю).

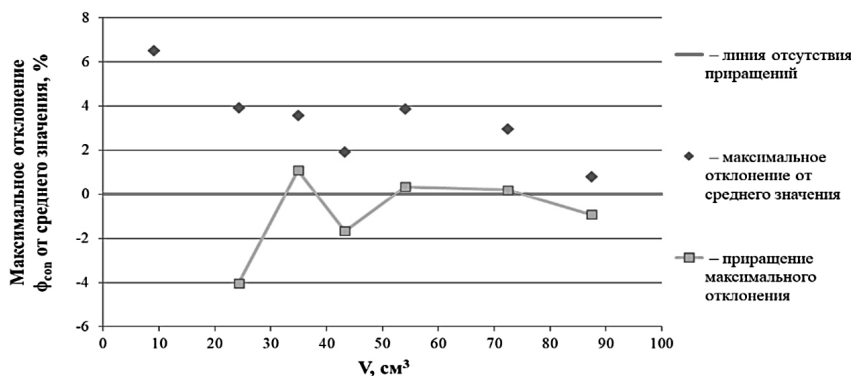


Рис. 8. График флуктуации максимального отклонения коэффициента открытой пористости от среднего значения с изменением объема образца (не превышающего 90 см³) в интервале 974.0–975.0 м

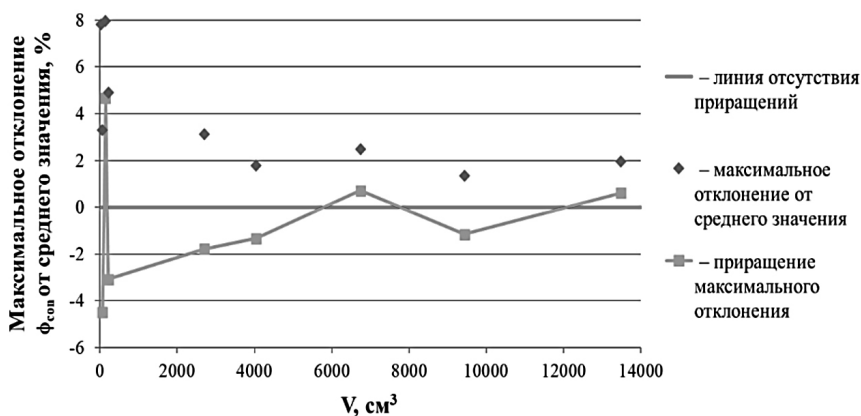


Рис. 9. Общий график флуктуации максимального отклонения коэффициента открытой пористости от среднего значения с изменением объема образца для интервала 974.0–975.0 м

Следовательно, так как при меньших объемах от 66 до 4000 см³ приращения достигают первых процентов, можно утверждать, что участок от 4000 до 13478.22 см³ является интервалом минимальной флуктуации коэффициента открытой пористости рассматриваемого фрагмента керна, ЭПО равен 4000 см³ (табл. 4).

Таким образом, наиболее близкое к «истинному» значение открытой пористости интервала керна диаметром 10 см, отобранного на глубине 962.0–963.0 м, может быть определено при исследовании образца керна диаметром 10 см и высотой 44 см (минимальные параметры). Коэффициент открытой пористости интервала керна (наиболее близкий к «истинному» значению пористости) диаметром 13.1 см, отобранного на глубине 974.0–975.0 м, может быть установлен при ис-

следовании образца керна диаметром 13.1 см и высотой 30 см или образца керна диаметром 10 см и высотой 51 см.

Для проведения оперативного лабораторного анализа предлагается наиболее эффективный алгоритм определения достоверного значения открытой пористости изучаемого интервала керна (длиной 1 м и свыше 1 м) диаметром более 9 см в максимально короткие сроки:

- составление макроописания изучаемого интервала керна и проведение литолого-минералогического исследования горных пород для установления литотипа;
- отбор кернов большого диаметра в направлении, перпендикулярном к главной оси (цилиндрического) интервала керна. На интервале длиной 1 метр необходимо отбирать 5–8 образцов.

Таблица 4

Значения представительных объемов и соответствующие линейные размеры образцов в интервале 974.0–975.0 м

Исследование	ЭПО, см³	Высота образца, см	Диаметр образца, см	Диапазон представительных объемов, см³
Межформенных пор	–	–	–	–
Совокупности межформенных пор, макротрещин и каверн в объеме керна длиной 100 см и диаметром 13.1 см	4000	30	13.1	4000–13478.22
	4000	51	10	



Их диаметр должен составлять не менее 40 мм по причине необходимости рассмотрения ядер объемом свыше 150–200 см³ и не более 8 см для проведения экстракции, высота должна быть максимально возможной;

– экстрагирование отобранных образцов при использовании аппарата Сокслета;

– определение пористости ядер большого диаметра методом жидкостенасыщения (проведение исследований не требует много времени и значительных финансовых затрат);

– аналитический расчет пористости отдельных фрагментов интервала ядра первоначального диаметра 20–90 см;

– построение графика зависимости коэффициента открытой пористости от объема образца, установление интервала минимальной флуктуации пористости.

Дополнительно для двух рассматриваемых интервалов было произведено сравнение коэффициентов общей пористости, установленных по данным методов нейтронного гамма-каротажа (НГК), гамма-гамма-плотностного каротажа

(ГГП_п) и акустического каротажа (АК), с коэффициентами открытой пористости ядер большого диаметра (7.3 см), образцов ядра диаметром и высотой 3 см (рис. 10, 11).

Интервал 962.0–963.0 м, по данным литолого-минералогических исследований горных пород полностью представлен грейстоуном. Кривая пористости, рассчитанная по данным нейтронного гамма-каротажа (НГК) в интервале 962.0–962.7 м, не испытывает значительных флуктуаций. Разница между минимальным и максимальным значениями пористости в данном интервале не превышает 1.5%, кривая является монотонной, что объясняется незначительным изменением плотности пород (применительно к методу НГК). В интервале 962.7–963.0 м значения пористости уменьшаются, разница между минимальным и максимальным значениями составляет 4.5%. Очевидно, что уменьшение пористости, по данным нейтронного гамма-каротажа, связано с увеличением содержания глины в интервале 962.7–963.0 м (см. рис. 10) [15].

Сопоставление данных пористости, установленных в лабораторных условиях и с помощью

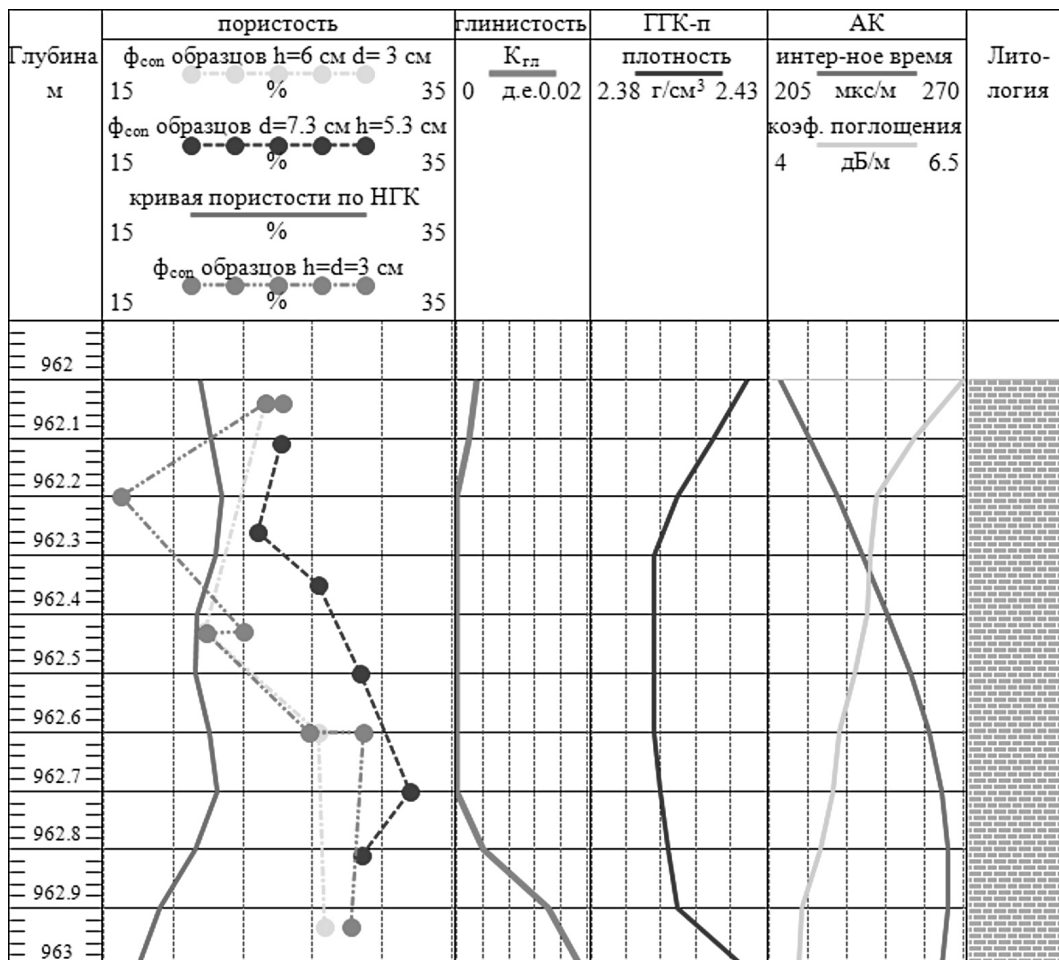


Рис. 10. Сравнение значений общей пористости по данным НГК и коэффициентов открытой пористости ядер большого диаметра, образцов диаметром и высотой 3 см, образцов высотой 6 см и диаметром 3 см в интервале 962.0–963.0 м. В литологической колонке зеленым цветом обозначен интервал грейстоуна.

Вертикальный масштаб 1:10 (цвет online)

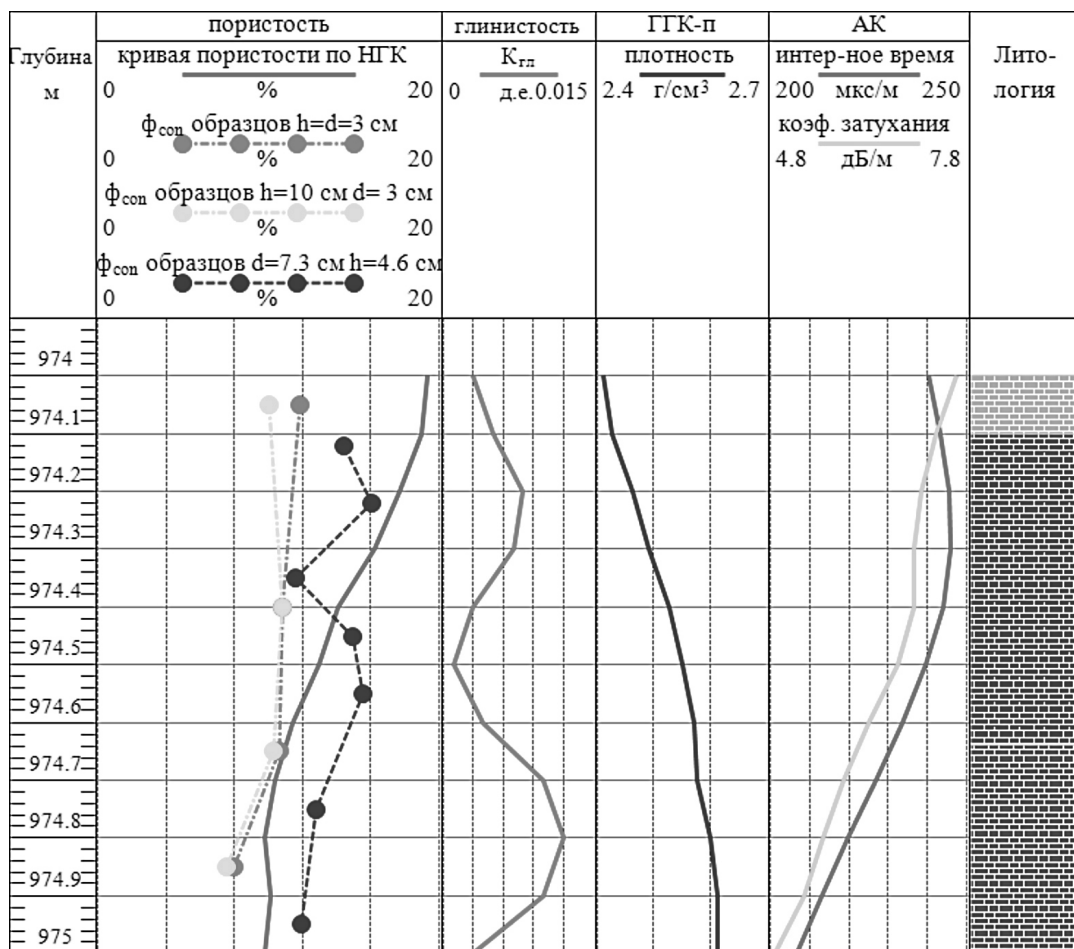


Рис. 11. Сравнение значений общей пористости по данным НГК и коэффициентов открытой пористости кернов большого диаметра, образцов диаметром и высотой 3 см, образцов высотой 10 см и диаметром 3 см в интервале 974.0–975.0 м. В литологической колонке оранжевым цветом обозначены грейнстон, зеленым – пакстоун, фиолетовым – переходная зона между двумя литотипами. Вертикальный масштаб 1:10 (цвет online)

метода НГК, позволило выделить три зоны в интервале 962.0–963.0 м:

1) 962.0–962.1 м – зона маленькой разницы между значениями пористости кернов большого диаметра и образцов диаметром 3 см и высотой 3(6) см;

2) 962.1–962.6 м – зона значительной разницы между значениями пористости кернов большого диаметра и образцов диаметром 3 см и высотой 3(6) см (максимальная разница между кривыми пористости, представленными пунктиром, достигает 8%), связанная с проявлением как межформенной, так и трещинной пористости, а также каверн в образцах большого объема, что подтверждается уменьшением плотности пород и увеличением интервального времени (следовательно, повышением общей пористости) [16]. Величины пористости образцов диаметром 3 см и высотой 6 см и образцов стандартного размера практически совпадают;

3) 962.6–963.0 м – зона маленькой разницы между значениями пористости кернов большого диаметра и образцов диаметром 3 см и высотой 3(6) см. Постепенное уменьшение коэффициентов

открытой пористости кернов большого диаметра, образцов диаметром 3 см и высотой 3(6) см объясняется увеличением плотности пород, что подтверждается плавным (незначительным) уменьшением интервального времени (следовательно, понижением общей пористости).

Кривая пористости, рассчитанная по данным метода НГК, отображает недостоверные значения пористости в интервале 962.0–963.0 м, что объясняется:

1) низкой чувствительностью метода нейтронного гамма-каротажа к изменению плотности не более чем на 0.04 г/см³;

2) влиянием глинистости на интенсивность гамма-излучения, которое усиливается с увеличением пористости пород [15].

В нижней части интервала 974.0–975.0 м на глубинах 974.64–975.0 м коэффициенты открытой пористости цилиндрических образцов высотой 3 см и 10 см практически совпадают с кривой пористости, построенной по данным НГК, чего не скажешь о коэффициентах открытой пористости кернов большого диаметра, которые



значительно отличаются от значений пористости, установленных по каротажу (см. рис. 11). В интервале 974.0–974.64 м наблюдается обратная закономерность: значения открытой пористости кернов большого диаметра соответствуют данным кривой пористости наилучшим образом по сравнению со значениями открытой пористости образцов керна высотой 3 см и 10 см. В интервале 974.0–975.0 м величины пористости не превышают 20%, следовательно, влияние глинистости на показания НГК незначительно. По этой причине наблюдается довольно хорошая сопоставимость лабораторных данных и значений пористости, рассчитанных по методу НГК.

Следует отметить, что в интервале 974.64–975.0 м разница между значениями пористости цилиндрических образцов диаметром 3 см и высотой 3(10) см и кернов большого диаметра не превышает 4%, в то время как на глубинах 974.0–974.64 м она может достигать 6%. Следовательно, в нижней части интервала 974.0–975.0 м залегают менее трещиноватые известняки, по сравнению с известняками в верхнем интервале на глубинах 974.0–974.64 м, что подтверждается увеличением плотности пород. Величины пористости образцов диаметром и высотой 3 см, а также образцов диаметром 3 см и высотой 10 см практически совпадают на всем интервале.

Увеличение интервального времени в интервале 974.0–974.3 м и дальнейшее уменьшение в интервале 974.3–975.0 м свидетельствуют о повышении и последующем понижении величин общей пористости пород [16], что соответствует изменению коэффициентов открытой пористости кернов большого диаметра на глубинах от 974.0 до 974.3 м и от 974.3 до 975.0 м. По аналогии с интервалом 962.0–963.0 м трещинная пористость образцов в интервале 974.0–975.0 м проявляется только в кернах большого диаметра, в цилиндрических образцах диаметром 3 см распространены преимущественно межформенные поры.

Изучение корреляционной зависимости «кern–геофизические исследования скважин» по данным пористости для рассматриваемых образцов возможно при использовании значений открытой пористости кернов большого диаметра, так как именно тренд кривой, которая может быть построена по данным пористости кернов этого вида, наилучшим образом соответствует тренду кривой пористости, построенной по данным НГК, на всем интервале исследований (см. рис. 11).

Следует отметить, что уменьшение значений кривой пористости с глубиной происходит неравномерно. В интервалах 974.0–974.1 м и 974.64–975.0 м значения кривой пористости являются практически стабильными: в первом интервале пористость составляет около 19.15%, во втором – около 10%.

Значительное уменьшение пористости в пределах небольшого интервала предположительно может быть объяснено изменением:

- 1) содержания глин с глубиной;
- 2) плотности вследствие смены литотипов башкирского яруса.

Изучение изменений значений коэффициента глинистости горных пород на данном интервале (см. рис. 11) позволило установить их небольшие флуктуации, разность между максимальным (1.2%) и минимальным (0.1%) значениями не превышает 1.1%. Следовательно, объемное содержание глин не может оказывать существенного влияния на данные пористости образцов керна.

По данным литолого-минералогических исследований кернавого материала было установлено, что в интервале 973–975 м отложения башкирского яруса представлены грейнстоунами и пакстоунами. На территории Республики Татарстан пористость грейнстоунов составляет 10–20%, пакстоунов – 3–8% [17]. Таким образом, в интервале 974.0–974.1 м залегают грейнстоуны, на глубинах 974.64–975.0 м – пакстоуны, интервал 974.1–974.64 м является переходной зоной между двумя литотипами. Следовательно, уменьшение пористости с 19.3 до 9.8% связано с ростом плотности пород вследствие смены литотипов башкирского яруса.

Заключение

Представленные в данной статье результаты практического исследования образцов известняков башкирского яруса позволило установить, что проявление масштабного эффекта в обоих интервалах керна объясняется наличием трещинной пористости в кернах большого объема (диаметра). Определение достоверного значения коэффициента открытой пористости интервала керна длиной 1 метр и диаметром 10 см, отобранного на глубине 962.0–963.0 м, возможно при исследовании керна первоначального диаметра (10 см) высотой 44 см. Расчет достоверного значения коэффициента открытой пористости интервала керна длиной 1 м и диаметром 13.1 см, отобранного на глубине 974.0–975.0 м, возможен при анализе керна первоначального диаметра (13.1 см) высотой 30 см. Анализ цельных образцов керна первоначального диаметра, высотой 30–40 см при наличии специальных аппаратов Сокслета значительно повышает точность определения коэффициента открытой пористости керна длиной 1 м.

Значение открытой пористости интервала керна длиной 1 метр и диаметром 10 см, установленное по данным пористости образцов высотой 6 см и диаметром 3 см, на 19% меньше эталонного значения коэффициента открытой пористости интервала керна, отобранного на глубине 962.0–963.0 м. Для интервала керна 974.0–975.0 м коэффициент открытой пористости, рассчитанный по данным пористости образцов высотой 10 см и диаметром 3 см, на 27% меньше эталонного значения.



Изучение корреляционной зависимости «керна–геофизические исследования скважин» для рассматриваемого трещиноватого коллектора смешанного типа в интервале 974.0–975.0 м по данным пористости возможно при использовании значений открытой пористости кернов большого диаметра и кривой пористости, построенной по данным метода нейтронного гамма-каротажа.

Сопоставление данных пористости по каротажу и керну в интервале 962.0–963.0 м возможно при использовании величин пористости, рассчитанных по данным плотностного гамма-гамма-каротажа или акустического каротажа. Исследование высокопористого интервала по данным метода нейтронного гамма-каротажа, как было показано, приводит к получению недостоверных значений пористости с увеличением глинистости.

Представленный алгоритм оперативного определения представительного элемента объема интервала керна длиной 1 м и более позволит в кратчайшие сроки рассчитать минимальные геометрические размеры репрезентативного образца керна для получения достоверных значений пористости целого интервала.

Библиографический список

1. Шашенко А. Н., Сдвижкова Е. А., Кужель С. В. Масштабный эффект в горных породах. Донецк : Норд-Пресс, 2004. 126 с.
2. Andersen M. A., Brent D., McLin R. Core Truth in Formation Evaluation // Oilfield Review. 2013. Vol. 25, № 2. P. 1625–1629.
3. Glover P. Formation Evaluation MSc Course Notes. Aberdeen University, 2001. 141 p.
4. Гороян В. И. Методические рекомендации по исследованию пород-коллекторов нефти и газа физическими и петрографическими методами. Москва : ВНИГНИ, 1978. 395 с.
5. ГОСТ 26450.1–85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщенным. Москва : Издательство стандартов, 1985. 8 с.
6. The Oilfield Glossary. URL: https://glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/w/whole_core.aspx, свободный (дата обращения: 13.07.2020).
7. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier Publishing Co., 1972. 764 p.
8. Прилуц Б. И. О введении понятия представительного объема элемента в теорию структурированного континуума // ГЕО-Сибирь-2013 : сб. материалов IX Междунар. науч. конгресса. Новосибирск : СГГА, 2013. С. 115–120.
9. Томин П. Ю. О понятии Representative elementary volume // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2011. № 13. С. 1–23.
10. Нефтегазоносность Республики Татарстан. Геология и разработка нефтяных месторождений : в 2 т. / Р. Г. Аdblумазитов, В. В. Ананьев, Е. Д. Войтович [и др.]. Казань : Издательство «Фен» Академии наук РТ, 2007. 316 с.
11. Мизенс Г. А. Изучение осадочных пород в прозрачных шлифах : учеб.-метод. пособие по дисциплине «Литология» для студ. спец. 130304 – «Геология нефти и газа». Екатеринбург : Издательство УГГУ, 2006. 86 с.
12. Glover P. Petrophysics MSc Course Notes. Aberdeen University, 2009. 376 p.
13. Tiab D., Donaldson E. C. Petrophysics : theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. Gulf Houston Tx. : Publishing Company, 2012. 950 p.
14. Недоливко Н. М., Ежова А. В. Петрографические исследования терригенных и карбонатных пород-коллекторов : учеб. пособие. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2012. 172 с.
15. Определение емкостных свойств и литологии пород в разрезах нефтегазовых скважин по данным радиоактивного и акустического каротажа : наставление по интерпретации с комплектом палеток / В. А. Велижанин, И. В. Головацкая, Ю. А. Гулин [и др.]. Калинин : Издательство ВНИГИК, 1984. 111 с.
16. Подборнов Д. А., Тарасов С. В. Краткое пособие по интерпретации основных методов геофизических исследований скважин и их сопоставление с зарубежными аналогами : учеб. пособие. Саратов : ТНК-ВР, 2005. 43 с.
17. Нугманов И. И., Зиганишин Э. Р., Кудусова Д. И. Экспериментальные геомеханические исследования карбонатных массивов горных пород для выбора оптимальной технологии разработки трудноизвлекаемых запасов высоковязкой нефти. Казань : Казанский федеральный университет, 2018. 78 с.

Поступила в редакцию 20.08.2020, после рецензирования 09.01.2021, принята к публикации 15.03.2021
Received 20.08.2020, revised 09.01.2021, accepted 15.03.2021