

В.В. Попов, С.В. Кулагин

## ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ МИКРОТРЕЩИНОВАТЫХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

В работе анализируются данные прямых определений фильтрационно-емкостных свойств трещиноватых карбонатных пород: трещинная пористость и проницаемость, их изменение, раскрытость трещин в атмосферных и пластовых условиях.

Проблеме трещиноватости в нефтяной геологии уделяется большое внимание, особенно при решении различных вопросов формирования, оценки запасов и разработки углеводородных (УВ) залежей. Особую значимость она приобретает в связи с внедрением в практику освоения скважин для повышения их продуктивности и приемистости метода гидрорыхления с целью создания искусственной трещиноватости. Тем не менее до сих пор остаются актуальными прямое экспериментальное моделирование и определение вклада трещиноватости в фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов нефти и газа в условиях пласта. Характерное отличие трещиноватых пород заключается в том, что в них трещинная проницаемость часто является основным параметром и в сравнении с поровой особенно чувствительна к величине эффективного давления.

В данной работе для изучения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) трещинных пород был использован пермеаметр-порозиметр AP-608 фирмы «Корэтест» (США), предназначенный для определения пористости ( $K_{пр}$ ) и проницаемости ( $K_{прп}$ ) по газу при атмосферных условиях и реальных пластовых напряжениях. Кроме бокового в приборе предусмотрено моделирование равнозначного осевого давления, что является необходимым условием при изучении трещинных пород. К несомненным достоинствам прибора следует отнести возможность одновременного измерения пористости и проницаемости на каждой ступени нагружения.

Задача анализа ФЕС состояла в уточнении некоторых методических вопросов, а главное – в экспериментальном определении на реальных образцах суммарного пустотного пространства и проницаемости коллекторов трещинно-порового типа, отдельно доли трещинной пустотности и проницаемости в сравнении с особенностями их изменения в однородных пористых породах при различном эффективном давлении ( $P_{эф}$ ). Проведенные исследования представляют определенный интерес и с точки зрения интерпретации результатов, получаемых на «AP-608», поскольку он используется во многих организациях.

В качестве объекта исследования были выбраны типичные коллекторы карбонатного типа – известняки и доломиты башкирских и турнейско-фаменских отложений Пермского нефтегазоносного региона Волго-Уральской провинции. При средней глубине залегания продуктивных отложений 1500 м в качестве реальной величины было принято эффективное давление 25 МПа, рассчитанное по приближенной формуле  $P_{эф} = 0,14H$ .

Для разновозрастных отложений эффективное давление было выбрано одинаковым с целью сопоставления пород различного литологического состава и отработки методических вопросов. В экспериментах использовались цилиндрические образцы с диаметром 25,4 мм и высотой 20...30 мм.

*Ключевые слова:* пермеаметр-порозиметр AP-608, фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС), карбонатные породы, эффективное давление, трещиноватость, пористость, проницаемость, доломиты, известняки, корреляция.

*ПОПОВ Валентин Всеволодович* – старший преподаватель ГРФ СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: pvv13091979@gmail.com

*ПОПОВ Valentin Vsevolodovich* – senior lecturer of Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

E-mail: pvv13091979@gmail.com

*КУЛАГИН Сергей Валерьевич* – студент ГРФ СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: kulaga376@gmail.com

*KULAGIN Sergey Valerievich* – student of Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

E-mail: kulaga376@gmail.com

V.V. Popov, S.V. Kulagin

## About the investigation of the filtration-capacity properties of fissured carbonate rocks

The data of direct determinations of filtration-capacitive properties of fractured carbonate rocks are analyzed: fracture porosity and permeability, their change, crack opening in atmospheric and reservoir conditions.

The problem of fracturing in petroleum geology is given a great deal of attention, especially when solving various problems of formation, estimation of reserves and development of hydrocarbon (HC) deposits. It acquires special significance in connection with the introduction into the practice of development of wells to increase their productivity and injectivity of the method of hydrofilling with the aim of creating artificial fracturing. Nevertheless, direct experimental modeling and determination of the contribution of fracturing to the filtration-capacitive properties of reservoir rocks of oil and gas in the conditions of the reservoir are still actual. The characteristic difference between fractured rocks is that in them the fracture permeability is often the main parameter and, in comparison with the porous one, is particularly sensitive to the value of the effective pressure.

In this paper, a Permeameterporosimeter AP-608 from Coretest (USA) was used to study the filtration-capacitive properties (FEC) of fractured rocks, designed to determine the porosity (Kpg) and permeability (Kpr) of gas under atmospheric conditions and real reservoir stresses. In addition to the side, the device provides for simulating an equivalent axial pressure, which is a prerequisite for studying fractured rocks. The undoubted merits of the device include the possibility of simultaneous measurement of porosity and permeability at each loading stage.

The task of the FES analysis was to clarify some methodological issues, and most importantly, in the experimental determination of the total void space and the permeability of the fractured-pore type collectors on real samples, separately fractions of fracture voidness and permeability in comparison with the features of their variation in homogeneous porous rocks at different effective pressures ( $Reff$ ). The conducted researches are of some interest from the point of view of interpreting the results obtained on «AP-608», as it is used in many organizations.

Typical carbonate-type reservoirs-limestones and dolomites of the Bashkirian and Tournaisian-Famennian deposits of the Perm oil-and-gas bearing region of the Volga-Ural province were chosen as the object of the study. At an average depth of occurrence of productive deposits of 1500 m, the effective pressure was assumed to be 25 MPa, calculated from the approximate formula  $Reff = 0.14H$ .

For uneven-aged deposits, the effective pressure was chosen to be the same for the purpose of comparing rocks of different lithologic composition and working out methodological issues. In the experiments we used cylindrical samples with a diameter of 25.4 mm and a height of 20 ... 30 mm.

*Keywords:* permeametr-porosimetr AP-608, filtration properties, carbonate rocks, effective pressure, fracture, porosity, permeability, the Dolomites, Limestones, correlation.

### Введение

В работе анализируются данные прямых определений фильтрационно-емкостных свойств трещиноватых карбонатных пород: трещинная пористость и проницаемость, их изменение, раскрытость трещин в атмосферных и пластовых условиях.

Проблеме трещиноватости в нефтяной геологии уделяется большое внимание, особенно при решении различных вопросов формирования, оценки запасов и разработки углеводородных (УВ) залежей. Особую значимость она приобретает в связи с внедрением в практику освоения скважин для повышения их продуктивности и приемистости метода гидрорыхления с целью создания искусственной трещиноватости. Тем не менее до сих пор остаются актуальными прямое экспериментальное моделирование и определение вклада трещиноватости в фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов нефти и газа в условиях пласта. Характерное отличие трещиноватых пород заключается в том, что в них трещинная проницаемость часто является основным параметром и в сравнении с поровой особенно чувствительна к величине эффективного давления.

### Исследования фильтрационно-емкостных свойств

В данной работе для изучения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) трещинных пород был использован пермеаметр-порозиметр AP-608 фирмы «Корэтест» (США), предназначенный для определения пористости ( $K_{пр}$ ) и проницаемости ( $K_{прг}$ ) по газу при атмосферных условиях и реальных пластовых напряжениях. Кроме бокового в приборе предусмотрено моделирование равнозначного осевого давления, что является необходимым условием при изучении трещинных пород. Согласно работе, исследование при всесторонней одинаковой нагрузке в первом приближении вполне допустимо. К несомненным достоинствам прибора следует отнести возможность одновременного измерения пористости и проницаемости на каждой ступени нагружения.

Задача анализа ФЕС состояла в уточнении некоторых методических вопросов, а главное – в экспериментальном определении на реальных образцах суммарного пустотного пространства и проницаемости коллекторов трещинно-порового типа, отдельно доли трещинной пустотности и проницаемости в сравнении с особенностями их изменения в однородных пористых породах при различном эффективном давлении ( $P_{эф}$ ). Проведенные исследования представляют определенный интерес и с точки зрения интерпретации результатов, получаемых на «AP-608», поскольку он используется во многих организациях.

В качестве объекта исследования были выбраны типичные коллекторы карбонатного типа – известняки и доломиты башкирских и турнейско-фаменских отложений Пермского нефтегазоносного региона Волго-Уральской провинции. При средней глубине залегания продуктивных отложений 1500 м в качестве реальной величины было принято эффективное давление 25 МПа, рассчитанное по приближенной формуле  $P_{эф} = 0,14H$  [4]. Для разновозрастных отложений эффективное давление было выбрано одинаковым с целью сопоставления пород различного литологического состава и отработки методических вопросов. В экспериментах использовались цилиндрические образцы с диаметром 25,4 мм и высотой 20...30 мм.

Подтверждением сказанному служат результаты анализа пористости и проницаемости при  $P_{эф} = 1$  и 3,5 МПа в сравнении с данными при пластовом эффективном давлении, в нашем случае равном 25 МПа (табл. 1). Значения  $K_{прг}$  при  $P_{эф} = 1$  МПа находились способом экстраполяции с учетом закономерности изменения пористости в диапазоне  $P_{эф} = 3,5...25,0$  МПа.

Они показывают, что абсолютное уменьшение  $K_{прг}$  при  $P_{эф} = 3,5$  МПа достигает 0,21...1,55 % и в среднем составляет 0,52 %. Максимальная сжимаемость среди карбонатных пород свойственна доломитам, у известняков она несколько меньше, но обнаруживает явную тенденцию усиления по мере увеличения их начальной пористости. Относительное изменение пористости от ее конечного уменьшения при  $P_{эф} = 25$  МПа равно в среднем 36,8 % и может колебаться от 29,9 до 53,7 %. Причем на величину относительного изменения в отличие от абсолютного литологические особенности практически не влияют, определяющим фактором является начальная пористость породы.

Примерно аналогичное влияние эффективное давление в 3,5 МПа оказывает и на проницаемость (см. табл. 1). О средних абсолютном (8,1 фм<sup>2</sup>) и относительном (25,8 %) уменьшения значений  $K_{прг}$  можно говорить условно, поскольку для них характерны большие диапазоны колебания: соответственно 0,007...40,6 фм<sup>2</sup> и 11,4...43,9 %. Индивидуальность изменения проницаемости в зависимости от ее начального значения и литологических особенностей проявляется сильнее, чем для пористости пород. Таким образом, в диапазоне  $P_{эф} = 1,0...3,5$  МПа происходит треть изменений ФЕС, а то и половина от наблюдаемых при пластовых условиях. Поэтому все определения пористости и проницаемости на «AP-608» при  $P_{эф} = 3,5$  МПа необходимо в обязательном порядке корректировать и приводить к значениям при  $P_{эф} = 1,0$  МПа.

Дальнейшие исследования пористости и проницаемости карбонатных пород при атмосферных и пластовых условиях были проведены с учетом изложенных выше соображений. Выборка исследованных образцов была представлена однородными известняками и доломитами, в различной степени пористыми, иногда слабокавернозными и трещиноватыми.

Методика исследования трещиноватых пород заключалась в следующем. Сначала определение ФЕС производилось на однородных пористых образцах цилиндрической формы. Затем они аккуратно раскалывались вдоль цилиндрической образующей с помощью специального при-

Таблица 1

Данные об изменении фильтрационно-емкостных свойств карбонатных пород при эффективном давлении 3,5 МПа

Номер скважины	Интервал отбора, м	Пласт	Порода	Образец	Номер цилиндра	Пористость по газу (Клпг), %			Газопроницаемость (Клпг), фм <sup>2</sup>			Коллектор				
						при 1 Мпа	при 3,5 Мпа	при 25 Мпа	абсолютное изменение при 3,5 Мпа	относительное изменение при 3,5 Мпа	при 1 Мпа		при 3,5 Мпа	при 25 Мпа	абсолютное изменение при 3,5 Мпа	относительное изменение при 3,5 Мпа
259	1189,7..1194,8	Бш	Известняк	3	124032*	7,64	7,41	6,97	-0,23	34,3	0,08	0,07	0,059	-0,007	33,3	п
53	1848,3..1857,1	Фм	Доломит	114	124242	3,09	2,49	1,82	-0,6	47,2	0,11	0,1	0,028	-0,014	17,1	сл.к
131	1914,0..1923,0	Бш	Доломит	38	123815*	2,7	2,3	1,36	-0,4	29,9	0,048	0,037	0,007	-0,011	26,7	п
53	1131,9..1134,9	Бш	Известняк	2	124092	9,7	9,41	8,86	-0,29	34,5	0,58	0,54	0,48	-0,04	40	п
259	1184,0..1189,7	Бш	Известняк	2	124031	9,08	8,87	8,47	-0,21	34,4	1,02	0,99	0,94	-0,03	37,5	п
53	1151,5..1158,5	Бш	Известняк	4	124094	10,9	10,49	9,68	-0,41	33,6	1,9	1,8	1,502	-0,14	35,2	п
53	1848,3..1857,6	Фм	Доломит	116	124243*	4,1	3,33	1,86	-0,77	34,4	4,04	2,6	0,16	-1,44	37,1	п
259	1215,0..1221,5	Бш	Известняк	9	124040	11,25	10,98	10,49	-0,27	35,5	15,7	15,6	15,09	-0,08	13,1	п
259	1194,8..1200,5	Бш	Известняк	4	124033	14,1	13,78	13,12	-0,32	32,7	29,3	29,1	27,2	-0,24	11,4	п
2306	1119,7..1123,2	Бш	Известняк	121	118758	13,3	12,96	12,4	-0,34	37,8	27	26,9	26,09	-0,11	12,1	п
259	1665,6..1672,0	Т	Известняк	67	124303	17,3	16,75	15,81	-0,55	36,9	109,1	98,8	82,16	-10,3	38,2	п
259	1665,6..1672,3	Т	Известняк	63	124297	14,6	14,01	12,98	-0,59	36,4	203,7	194,5	151,9	-9,2	17,7	п
2306	1018,0..1022,8	Бш	Известняк	6	118833	20	19,61	18,65	-0,39	28,9	416	413,1	386,5	-2,92	9,9	п
259	1665,6..1672,0	Т	Известняк	70	124307	15,49	14,78	13,56	-0,71	36,8	549,4	517,3	451,2	-32,1	32,7	сл.к
259	1672,7..1677,9	Т	Известняк	75	124314	17,37	16,73	15,8	-0,64	40,8	879,5	867,7	810,8	-11,8	17,2	сл.к
259	1672,7..1677,9	Т	Известняк	78	124320	18,3	17,8	17,04	-0,5	39,7	984,4	943,8	892	-40,6	43,9	п
259	1672,7..1677,9	Т	Известняк	74	124312	17,8	16,25	14,86	-1,55	52,7	1360	1332,1	1181	-27,91	15,60	сл.к
Диапазон изменения						2,70..	2,3..	1,36..	0,21..	28,9..	0,048..	0,037..	0,007..	0,007..	11,4..	
Среднее значение						20,0	19,61	18,65	1,55	52,7	1360,0	1332,1	1181,19	40,6	43,9	
						12,6	11,64	10,81	0,52	36,8	269,5	261,5	236,9	8,06	25,8	

способления. После соединения половинок цилиндра и укрепления скотчем ФЕС определялись повторно. Разница в измерениях на целом и расколоте цилиндра позволяет установить экспериментально и достаточно надежно долю пустотного пространства и проницаемости, обусловленных трещиноватостью. Если цилиндр был изначально трещиноватый, то он раскалывался по имеющейся трещине, стягивался скотчем, и только после этого производились определения ФЕС.

Далее этот цилиндр по трещине разделялся, между половинками цилиндра наносился тонкий слой сухого герметика, половинки соединялись и сжимались таким образом, чтобы они полностью повторяли по внешним размерам первоначально нерасколотый цилиндр цилиндра без сдвига по плоскости скола. Замеры ФЕС на таком цилиндре принимались за аналог пористости и проницаемости поровой части породы. Очевидное преимущество такого подхода перед исследованиями трещиноватости по шлифам или репликам состоит в том, что нет необходимости ни в каких поправочных коэффициентах для адаптации расчетных алгоритмов реальной фильтрационно-емкостной структуре пород.

В проведенных экспериментах моделирование трещинно-порового коллектора достигалось за счет создания искусственной микротрещины. Удельная плотность трещиноватости в этом случае для исследованных образцов составляет 0,5 см/см<sup>2</sup>, что по классификации К.И. Багринцевой соответствует низкотрещиноватым породам [7]. Тем не менее присутствие в породе всего лишь одной микротрещины раскрытостью порядка 0,1 мм сильно отражается на ФЕС как в атмосферных, так и в пластовых условиях (табл. 2, 3).

Таблица 2

**Доля трещинного объема в атмосферных и пластовых условиях при одной моделируемой трещине**

Порода	Номер образца	Пустотный объем пород, %							
		при атмосферных условиях				при пластовых условиях			
		пористых	трещиноватых	абсолютное увеличение	относительное увеличение	пористых	трещиноватых	абсолютное увеличение	относительное увеличение
Доломит	114	3,1	3,6	0,5	16,1	1,8	2,5	0,7	38,9
Доломит	116	4,1	4,6	0,5	12,2	1,9	2,7	0,8	42,1
Известняк	3	7,6	8	0,4	5,3	7	7,2	0,2	2,9
Известняк	14	14,1	14,6	0,5	3,5	13,1	13,3	0,2	1,5
Доломит	38	2,7	5	2,3	85,2	1,4	3,7	2,3	164,3

Таблица 3

**Доля трещинной проницаемости в атмосферных и пластовых условиях при одной моделируемой трещине**

Порода	Номер образца	Газопроницаемость пород, фм <sup>2</sup>							
		при атмосферных условиях				при пластовых условиях			
		пористых	трещиноватых	абсолютное увеличение	Относительное увеличение, разы	пористых	трещиноватых	абсолютное увеличение	относительное увеличение
Доломит	114	0,1	14,0	13,9	126,3	0,03	2,0	1,97	71,0
Доломит	116	4,0	804,0	800,0	198,0	0,16	153,3	153,1	958,0
Известняк	3	0,1	69,6	69,5	869,0	0,06	4,3	4,24	72,0
Известняк	14	29,3	40,9	11,6	0,4	27,20	30,7	3,50	1,1
Доломит	38	0,1	650,0	649,9	13542	0,006	200,8	200,79	33467,0

В атмосферных условиях за счет трещиноватости объем пустотного пространства у пород с различными свойствами увеличивается в абсолютных значениях обычно на 0,4...0,5 %, в редких случаях на 2,3 % (см. табл. 2). Изменения примерно такого же порядка (характерное среднее 0,5 %) происходят и в пластовых условиях. Абсолютные приращения у пород с различными начальными свойствами отличаются мало, тогда как относительные явно выше у более плотных пород.

В зависимости от литологических особенностей пород трещиноватость различным образом отражается на их пористости. Проявляется это в том, что в доломитах в сравнении с известняками наблюдается большее увеличение пустотного пространства, особенно в пластовых условиях. Такое улучшение емкостных свойств в типичных трещиноватых коллекторах имеет существенное значение, например, анализ скважин, вскрывших залежи в коллекторах трещинного типа, на приток показал, что критической величиной для выделения эффективных пропластков может быть трещинная емкость порядка 0,76 % [1].

Та же тенденция, но выраженная более резко и контрастно, характерна для газопроницаемости трещиноватых пород, порядок изменения которой значительно больше (см. табл. 3). Индивидуальность реакции проницаемости пород сильнее проявляется при пластовых условиях. Трещиноватость приводит иногда к превышению проницаемости над исходной в сотни и тысячи раз, особенно в более плотных породах.

Дальнейшее исследование было направлено на определение количественного уменьшения ФЕС пористых и трещиноватых пород с широким диапазоном их начальных значений представлены в табл. 4. Эти данные достаточно убедительно свидетельствуют о том, что в пластовых условиях происходит весьма значительное снижение ФЕС пород, на которые влияют одновременно как их начальные коллекторские свойства, так и литологический состав.

У однородных известняков с поровым типом коллектора абсолютное среднее уменьшение пористости достигает 0,8 %, а у аналогичных доломитов – 1,65 %, что составляет соответственно 7,9 и 48 % относительного уменьшения. Ухудшение коллекторов происходит и по проницаемости, для которой относительное изменение в сравнении с пористостью намного больше – у известняков 16,8 %, у доломитов 85,9 %. Влияние пластовых условий у конкретных образцов проявляется по-разному и может привести к очень сильному преобразованию породы и утрате, например, фильтрационных свойств на 96 % (см. табл. 4, обр. 116).

Исследованные образцы пористых разностей доломитов имеют более низкие коллекторские свойства, поэтому следует ориентироваться только на относительное изменение ФЕС. У доломитов в сравнении с известняками относительное уменьшение пористости больше в 6 раз, а проницаемости – в 5 раз, хотя изначальная пористость у них ниже. Прямые определения прочности на сжатие, проведенные В.А. Приклонским (1952), показали, что у доломитов она превышает 200 МПа, а у известняков находится в диапазоне 1...200 МПа. В дальнейшем эта особенность карбонатных пород была подтверждена работами Н.Н. Павловой и И.В. Безбородовой (1970) [7]. Более низкая трещиноватость в доломитах отмечена З.Н. Ипатовой (1962) и М.А. Рынским (1976) при изучении карбонатных отложений Припятской впадины. Все это свидетельствует о более сжимаемости доломитов в пластовых условиях и должно учитываться при решении вопросов разработки залежей.

Наличие трещин в породе оказывает дополнительное влияние на ФЕС в пластовых условиях, закономерность изменения которых отражена в табл. 4. Как и в случае однородных пористых пород, особенности этих изменений в значительной степени определяются литологическим фактором. Что касается емкостных свойств, то, во-первых, у трещиноватых доломитов в пластовых условиях изменение происходит значительно интенсивнее, чем у известняков, т.е. сохраняется тенденция, характерная для пористых разностей пород. Среднее снижение пористости составляет 32,4 % против 10,2 у известняков. Во-вторых, в трещиноватых разностях известняков в сравнении с пористое относительное уменьшение пустотного объема больше в 1,29 раза и составляет в среднем 10,2 % против 7,9, а в доломитах, наоборот, меньше в 1,48 раза, в среднем 32,4 % против 48,0.

По проницаемости трещиноватые породы претерпевают большее изменение, чем по пористости. Особенно сильное снижение проницаемости происходит у известняков – в среднем

Таблица 4

Фильтрационно-емкостные свойства пористых, кавернозно-пористых и трещиноватых пород при пластовых условиях

Номер скважины	Интервал отбора, м	Пласт	Порода	Номер образца	Цилиндр	Пустотный объем (Кпр), %			Газопроницаемость (Кпрг), фм2			Структурный параметр (Стр), мкм	Коллектор		
						Атмосферные условия (Кпрв)	Пластовые условия (Кпрп)	Абсолютное изменение	Относительное изменение	Мпа	Атмосферные условия (Кпрв)			Пластовые условия (Кпрп)	Абсолютное изменение
53	1848,3... 1857,6	Фм	Доломит	114	124242	3,1	1,8	-1,3	-41,1	0,052	0,11	0,028	-0,082	-74,2	Слабокавернозный Трещиновый; слабокавернозный Поровый; трещины закрыты
						3,6	2,5	-1,1	-30	0,044	14	2	-12	-98,6	
53	1848,3... 1857,6	Фм	Доломит	116	124243	4,1	1,9	-2,3	-54,6	0,092	4,04	0,16	-3,88	-96	Трещинно-поровый Поровый; трещины закрыты
						4,6	2,7	-1,9	-41,2	0,076	804	153,3	-650,7	-80,9	
259	1189,7... 1194,8	Бш	Известняк	3	124032	7,6	7	-0,6	-8,8	0,024	0,08	0,06	-0,02	-26,3	Поровый; трещины закрыты
						8	7,2	-0,8	-9,8	0,032	69,6	4,3	-65,3	-93,8	
259	1665,6... 1672,0	Т	Известняк	69	124305	11,2	9,9	-1,3	-11,7	0,052	25	5,9	-19,1	-76,1	Трещинно-поровый Поровый
						14,1	13,1	-1	-7	0,04	29,3	27,2	-2,1	-7,2	
259	1194,8... 1200,5	Бш	Известняк	4	124033	14,6	13,3	-1,3	-9	0,052	40,9	30,70	-10,20	-24,9	Поровый
						2,7	1,4	-1,3	-48,2	0,054	0,048	0,006	-0,042	-87,5	
131	1914,0... 1923,0	Бш	Доломит	38	123815	5	3,7	-1,34	-26	0,05	650	200,80	-449,80	-69,2	Трещинно-поровый
						10,85	10,1	-0,8	-7,9	0,032	14,7	13,60	-1,06	-16,8	
Среднее известняки			Среднее	поровые известняки		3,3	1,67	-1,63	-48	0,066	1,4	200,80	-1,34	-85,9	
Среднее известняки			Среднее	трещиноватые известняки		11,27	10,1	-1,17	-10,2	0,045	45,2	13,60	-31,50	-65	
Среднее известняки			Среднее	трещиноватые известняки		4,4	3	-1,40	-32,4	0,057	489,3	118,70	-371,00	-82,9	

до 65 %, что в 3,9 раза превышает ее изменение в однородных пористых породах. Для трещиноватых доломитов характерно примерно такое же уменьшение проницаемости (в среднем на 82,9 %), как и для пористых (85,9 %).

На основании проведенных определений проницаемости появляется возможность оценить раскрытость трещин как в атмосферных, так и в пластовых условиях. Для этого была использована формула Е.С. Ромма (1958) для проницаемости трещиноватых пород, которая позволяет рассчитывать параметры самих трещин:

$$V^3 = 10^3 K_{np} S / L 85, \tag{1}$$

где  $V$  – ширина трещины, мкм;  $K_{np}$  – проницаемость,  $\text{мд}^2$ ,  $S$  – площадь сечения образца,  $\text{мм}^2$ ,  $L$  – длина трещины, мм. В глубоко залегающих отложениях вероятная раскрытость трещин, по Е.С. Ромму (1966), составляет 10...40 мкм. Все расчеты для образцов, исследованных в этой работе, представлены в табл. 5.

В атмосферных условиях раскрытость трещин изменяется в диапазоне 6,9...64,8 мкм, в пластовых – от 3,3 до 33,0 мкм. По размерности они относятся к классу субкапиллярных (10...50 мкм). У пород в нагруженном состоянии раскрытость трещин уменьшается на 32...82 %, тем не менее, как было показано выше, они многократно улучшают суммарные фильтрационные свойства пород. Снижение трещинной проницаемости в пластовых условиях у тех же самых образцов происходит значительно в большей степени (на 69,8...99,4 %) по сравнению с закрытием трещин. Моделирование трещин, поведение их в пластовых условиях, последующее сжатие и потеря фильтрационных свойств у образцов происходят строго индивидуально. Однако в целом более интенсивное уменьшение параметров трещиноватости характерно для пород с высокой матричной пористостью.

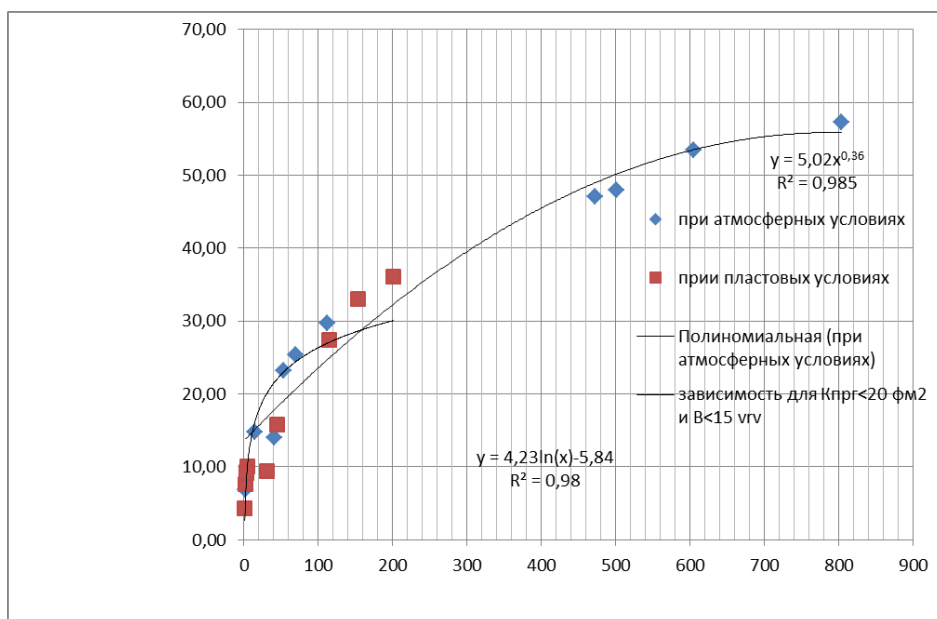


Рис. 1. Соотношение раскрытости трещин и проницаемости в атмосферных и пластовых условиях

Взаимозависимость трещин и проницаемости для пород, находящихся в состоянии различного нагружения, приведена на рис. 1:

$$V_T = 5,02(K_{np})^{0,36}, R = 0,985 \tag{2}$$

Высокая корреляция параметров является доказательством подобию закономерностей их соотношения при условиях начальной и пластовой деформации пород. Это позволяет оценивать с достаточной надежностью раскрытость трещин или, наоборот, проницаемость отложений в условиях естественного залегания пород по зависимости, справедливой для атмосферных условий. Асимптота левой ветви графика и она же в увеличенном масштабе свидетельствуют о том, что трещины в пластовых условиях полностью не смыкаются. Есть даже мнение, что при



раскрытости менее 24 мкм они ведут себя подобно поровым каналам [8]. Для исследованных пород при нагрузке 25 МПа за минимальную раскрытость можно принять 1 мкм. Из этих же графиков следует и то, что с микротрещинами шириной до 10 мкм связано незначительное увеличение проницаемости. В практическом отношении важное значение имеют с раскрытостью, превышающей 10...15 мкм, а особенно трещины с раскрытостью более 20...25 мкм, когда они обуславливают значительное улучшение фильтрационных свойств пород.

Соотношение раскрытости трещин, измеренной у пород в разгруженном состоянии и в пластовых условиях, с проницаемостью, соответствующей атмосферным условиям, представлено на рис. 2:

$$\text{атмосферные условия} - V_{\tau}^{\text{ат}} = 5,02(K_{\text{пр}}^{\text{ат}})^{0,36}, R=0,985, \quad (3)$$

$$\text{пластовые условия} - V_{\tau}^{\text{пл}} = 2,69(K_{\text{пр}}^{\text{пл}})^{0,36}, R=0,928, \quad (4)$$

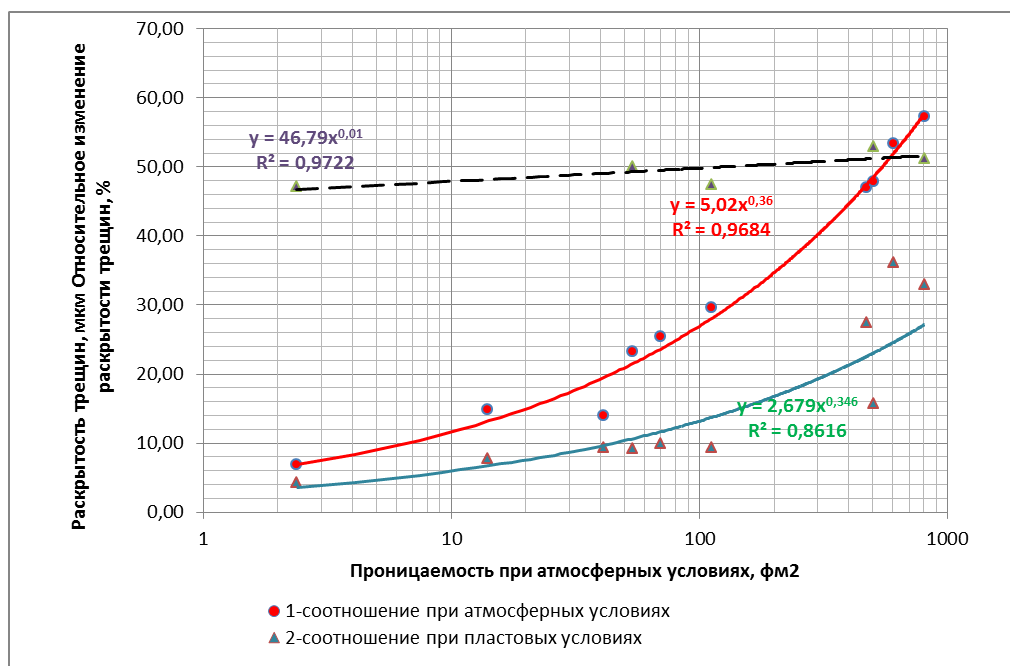


Рис. 2. Соотношение раскрытости трещин в различно нагруженных породах с их проницаемостью в атмосферных условиях

На нем приводится также и уменьшение раскрытости трещин в условиях естественного залегания пород. Степень взаимосвязи параметров такова, что полученные аналитические выражения можно использовать при оценке трещиноватости удаленной зоны пласта, степени его разуплотненности в призабойной зоне скважины и др.

Полученные зависимости наглядно отражают тенденцию изменения размерности трещин у трещиноватых пород, как при атмосферных, так и при пластовых условиях. Смыкание трещин различной раскрытости значительно отличается, на что большое влияние оказывает, как подчеркивается во всех работах по данной проблеме, степень шероховатости стенок трещин. Самые широкие трещины (правая часть графиков) соответствуют преимущественно более пористым породам, имеющим естественно, самую шероховатую плоскость скола. Вероятные значения абсолютных и относительных уменьшений раскрытости трещин на основании графиков рис. 2 представлены ниже

$K_{\text{пр}}^{\text{ат}}, \text{фм}^2$	2,0	10,0	50,0	100,0	300,0	500,0	800
$V_{\tau}^{\text{ат}}, \text{мкм}$	6,4	11,5	20,5	26,4	39,1	47,0	55,7
$V_{\tau}^{\text{пл}}, \text{мкм}$	3,4	5,9	10,4	13,2	19,3	23,0	27,1
$\Delta V_{\tau}, \text{мкм}$	3,0	5,6	10,2	13,2	19,9	24,0	28,6
$\Delta V_{\tau} / V_{\tau}^{\text{ат}}, \%$	46,9	48,7	49,8	50,0	50,9	51,1	51,3

Абсолютное уменьшение раскрытости ( $\Delta B_T$ ) различных трещин значительное, примерно двукратное, и пропорциональное их первичной величине, а относительные изменения ( $\Delta B_T / B_T^{ar}$ ) для всего исследованного диапазона трещин отличаются всего лишь на 4,4 % в пределах 46,9...51,3 % (см. рис. 2):

$$\Delta B_T / B_T^{ar} = (46,79 K_{np})^{0,01}, R=0,986 \quad (5)$$

Следовательно, при создаваемых пластовых нагрузках максимальное схлопывание трещин данных пород можно принять равным примерно 51 %.

Все это свидетельствует о том, что подобные исследования следует рассматривать в качестве обязательной петрофизической основы, необходимой для установления реальных подсчетных параметров и построения достоверной гидродинамической модели пласта. При оценке изменений ФЕС продуктивного пласта в целом крайне необходимо учитывать неоднородность его нефтенасыщенной части по литологическим и коллекторским свойствам. Полученные экспериментальные данные однозначно свидетельствуют о том, что доломиты являются более пластичными и их пустотный объем в отличие от известняков при одинаковых нагрузках уменьшается больше.

Для интерпретации материалов ГИС, анализа разработки и состояния призабойной зоны пласта несомненный интерес представляет динамика ФЕС пород при различных эффективных давлениях. В проведенных экспериментах эффективное давление моделировалось за счет всесторонней нагрузки на породу, а не за счет внутривисочного давления, поэтому полученные результаты не являются прямым отражением происходящих в пласте процессов. Тем не менее, для понимания тенденции изменения ФЕС в принципе они являются весьма информативными. Типичный пример влияния на пористость и проницаемость трещиноватых пород постепенно увеличивающегося эффективного давления приведен на рис.3,4. На них кроме абсолютных (кривая 1) и относительных (кривая 4) значений ФЕС, показаны также изменения их дифференциальных (кривая 3) и интегральных (кривая 2) градиентов на единицу эффективного давления. С целью совмещения разномасштабных кривых на одном рисунке первые увеличены в 100 раз, а вторые – 10 раз.

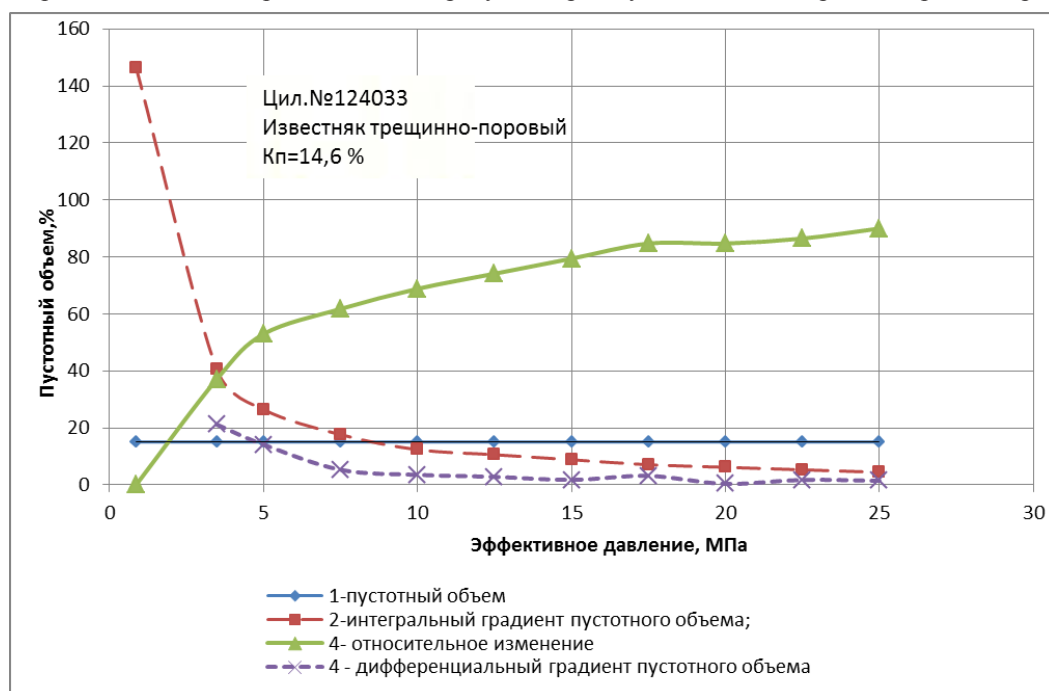


Рис. 3. Изменение пустотного объема известняка при различных эффективных давлениях

Дифференциальные и интегральные градиенты ФЕС рассчитывались по соответствующим формулам:

$$\frac{\Delta K_{пл}}{K_{пл}} \cdot \frac{\Delta K_{прг}}{K_{прг}} / \Delta P_{i}^{эф} \quad (6)$$

$$\frac{K_{пл}}{K_{прг}} \cdot \frac{K_{прг}}{P_{i}^{эф}} \quad (7)$$

Кривые интегральных градиентов ФЕС отражают также и зависимости от  $P_{эф}$  так называемого коэффициента сжимаемости ( $K_{сж}$ ) порового пространства ( $V_n$ ):

$$K_{сж} = -[\Delta V_n^{пл} / \Delta K_n^{пл} / \Delta P_{эф}], \quad (8)$$

поскольку используемое в работе отношение

$$K_n^{пл} / P_{эф}^{пл} = (K_n^a - \Delta K_n^{пл}) / P_{эф}^{пл} \quad (9)$$

и отличается у конкретного образца на постоянную величину  $K_n^a / P_{эф}^{пл}$ .

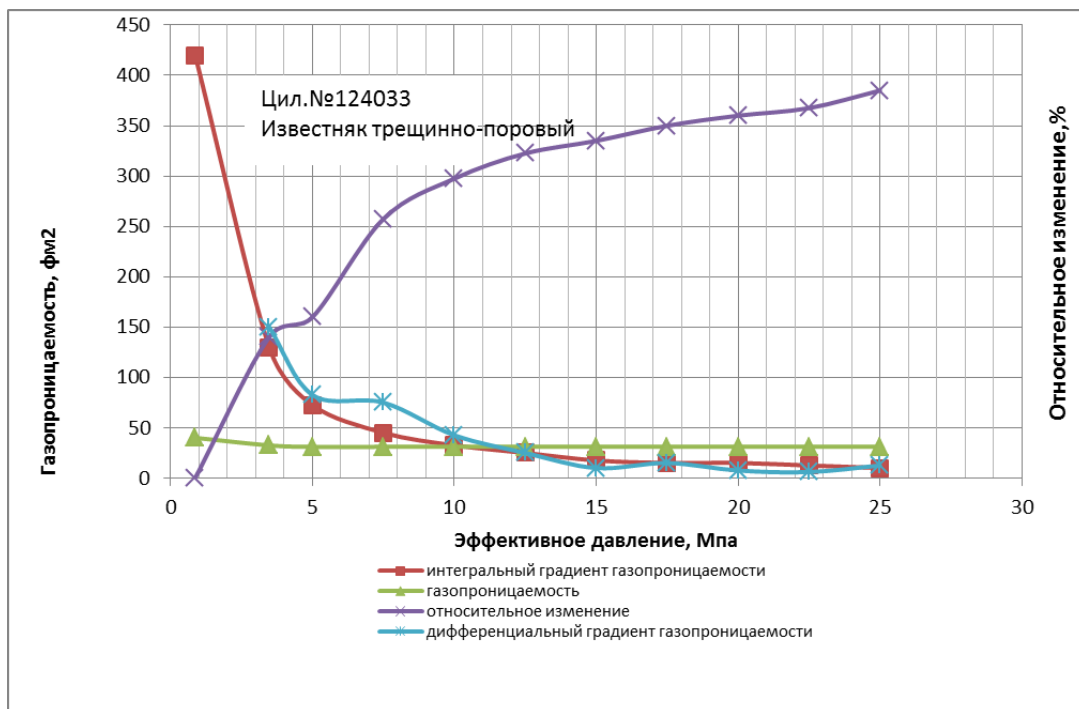


Рис. 4. Изменение газопроницаемости известняка при различных эффективных давлениях

Согласно кривым интегральных градиентов ФЕС, преобразование породы происходит во всем диапазоне эффективных давлений от атмосферных до пластовых, но основная их часть приходится на  $P_{эф} < 10$  МПа. Причем самое интенсивное снижение ФЕС обусловлено давлением до 7,0...7,5 МПа. Об этом же достаточно убедительно свидетельствуют и кривые относительных изменений ФЕС. Характерно, что при этих давлениях пористость проявляет себя как более чувствительный параметр и уменьшается больше по сравнению с проницаемостью. Так, при  $P_{эф} = 3,5$  МПа среднее относительное изменение пористости от суммарного в пластовых условиях составляет 36,8 %, а проницаемости – 25,8 % (см. табл. 1).

Дифференциальные кривые градиентов пористости и проницаемости свидетельствуют о дискретном изменении ФЕС пород, наиболее резко проявляющемся на проницаемости. причем у каждого образца деформация происходит строго индивидуально и колебание ФЕС на последующих ступенях  $P_{эф}$  может отличаться в 7...15 раз, и более. Очевидно, что перестройка каркаса породы под влиянием горного давления происходит в импульсном режиме, связанном с чередованием периодов сжатий и расширений. Они могут приводить, как отмечается в работах [9,10], к образованию новых микротрещин и их последующему схлопыванию.

Кривые интегральных градиентов позволяют рассчитать и абсолютные значения коэффициента сжимаемости пустотного пространства, выраженные через пористость, для всех давлений в диапазоне от атмосферного до пластового. В табл.4 приведены только конечные его величины при  $P_{эф} = 25$  МПа. Для изученных пород они колеблются от 0,024 до 0,092 % МПа. Тенденция их изменения полностью аналогична характеру изменения абсолютных и относительных значений пустотного пространства. Тем не менее следует еще раз подчеркнуть важность литологического фактора при оценке сжимаемости пустотного пространства на стадии проектирования

разработки карбонатных залежей, так как в пористых доломитах в сравнении с известняками коэффициент сжимаемости в 2 раза больше.

Конечные результаты изучения трещинно-пористых пород на рис. 5 приведены в виде абсолютных изменений проницаемости ( $\Delta K_{\text{прг}}$ ), соответствующих пластовым условиям, от начальной проницаемости при атмосферных условиях. Они позволили установить отдельные зависимости для пород с различным литологическим составом и типом коллектора:

Известняки пористые, кавернозные:

$$\Delta K_{\text{прг}} = 0,1225 K_{\text{прг}}^{0,974}, R=0,970 \quad (10)$$

Доломиты пористые, кавернозные:

$$\Delta K_{\text{прг}} = 0,9091 K_{\text{прг}}^{1,018}, R=0,998 \quad (11)$$

Известняки и доломиты трещиноватые:

$$\Delta K_{\text{прг}} = 0,6310 K_{\text{прг}}^{1,054}, R=0,993 \quad (12)$$

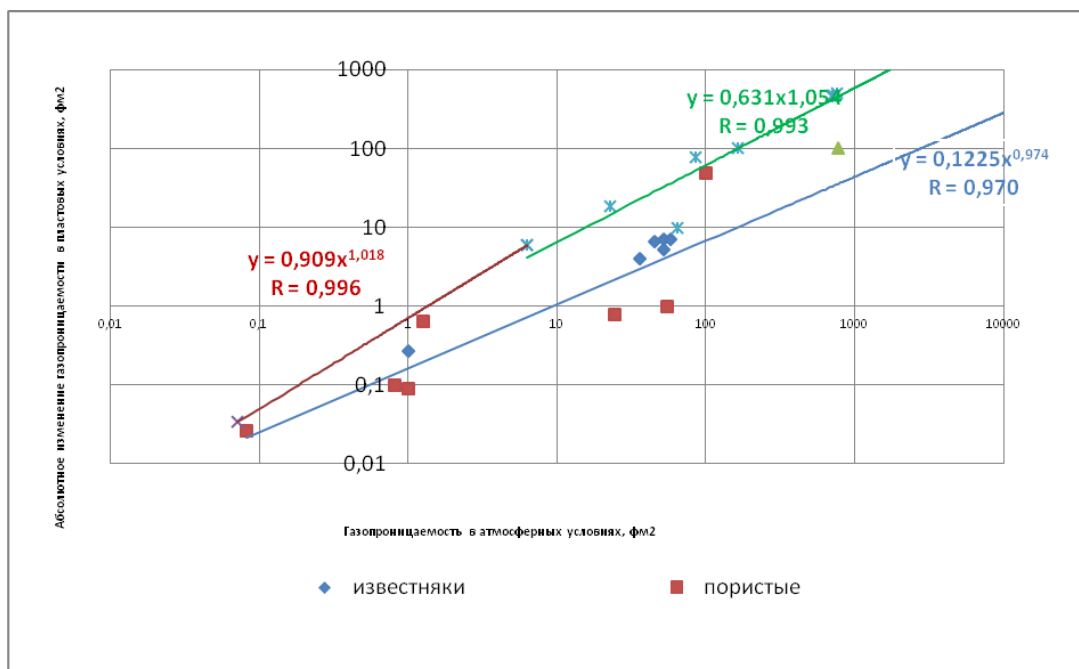


Рис. 5. Абсолютное изменение проницаемости пористых и кавернозных карбонатных пород в пластовых условиях

Для большего обоснования зависимостей были привлечены данные исследования водонасыщенности, которые по тенденции изменения находятся в едином поле корреляции с газонасыщенными породами. высокие значения коэффициента корреляции (R) свидетельствует о том, что, несмотря на неодинаковую изученность данного вопроса, породы различного состава и типа коллектора по абсолютным изменениям проницаемости дифференцируются уверенно.

Согласно полученным зависимостям проницаемости меньше всего снижается у пористых известняков (в диапазоне 0,1...1000 фм<sup>2</sup> – на 10...13 %). Экспериментально она хорошо обоснована и с высокой надежностью может использоваться в практических расчетах для оценки влияния эффективного пластового давления. В случае доломитов наблюдается максимальное снижение проницаемости, но из-за ограниченности экспериментальных данных эту зависимость можно рассматривать в качестве тенденции изменения проницаемости, хотя нужно отметить, что она очень близка к функциональной. Для трещиноватых разностей известняков и доломитов изменение проницаемости с достаточной точностью описывается единой зависимостью, показывающей, что в диапазоне 10...2000 фм<sup>2</sup> относительное уменьшение составляет 58,5...90,6 %.

### Заключение

Решены некоторые методические вопросы дифференцированной оценки влияния трещиноватости на ФЕС пород и реализации на приборе «АР-608».

Проведены прямые определения пористости и газопроницаемости в пластовых условиях для карбонатных коллекторов порового и трещинно-порового типов Пермского Прикамья. Оценена доля трещинной емкости и газопроницаемости отдельно для известняков и доломитов.

Исследована динамика фильтрационно-емкостных свойств однородных поровых, а также трещинно-поровых коллекторов при различных эффективных давлениях. Показано, что упоровых коллекторов основное ухудшение ФЕС происходит при эффективных давлениях до 7,0...7,5 МПа, а у трещиноватых – до 5 МПа.

Установлены зависимости для оценки абсолютного уменьшения газопроницаемости в пластовых условиях для различных литотипов карбонатных пород с поровым и трещинно-поровым коллектором.

Определены коэффициенты сжимаемости известняков и доломитов, пористых и трещиноватых, раскрытость трещин в атмосферных условиях и их уменьшение в пластовых.

### Литература

1. Аганов В.А., Мустафаев Н.Б., В.В. Холодилов и др. Оценка пластовых свойств в предгорных карбонатных и газовых пластах Дагестана // Сборник научных трудов. – М.: ОАО «ЦНИИТнефтехим», 2003. – С. 62-72.
2. Ковалев Ю.Н., Карев В.И. Метод георыхления – новый подход к проблеме повышения продуктивности скважин // Технология ТЭК. – 2003. – № 1. – С. 31-35.
3. Тульбович Б.И. Методы изучения пород-коллекторов нефти и газа. – М.: Недра, 1979. – 198 с.
4. Авчан Г.М. Физические свойства осадочных пород при высоких давлениях и температурах. – М.: Недра, 1972. – 144 с.
5. Методические рекомендации по исследованию пород – коллекторов нефти и газа физическими и петрофизическими методами / под ред. В.И. Горояна, В.И. Петерсилье. – М.: ВНИГНИ, 1978. – С. 297-331.
6. Ханин А.А. Петрофизика нефтяных и газовых коллекторов. – М.: Недра, 1976. – 295 с.
7. Багринцева К.И. Трещиноватость осадочных пород. – М.: Недра, 1982. – 235 с.
8. Бураков И.А., Струков Г.И. Деформации трещиноватых карбонатных коллекторов Ставрополя // Геология нефти и газа. – 1978. – № 3. – С. 48-51.
9. Марморштейн Л.М. Изучение изменения пористости, проницаемости и электропроводности песчаных пород при всесторонних давлениях // Методика исследования поровых коллекторов. – М.: Недра, 1965. – С. 178-185.
10. Павлова Н.Н. Деформационные и коллекторские свойства горных пород. – М.: Недра, 1975. – 183 с.

### References

1. Aganov V.A., Mustafaev N.B., V.V. Holodilov i dr. Ocenka plastovykh svoystv v predgornykh karbonatnykh i gazovykh plastakh Dagestana // Sbornik nauchnykh trudov. – M.: ОАО «ЦНИИТнефтехим», 2003. – С. 62-72.
2. Kovalev Ju.N., Karev V.I. Metod georyhlenija – novyj podhod k probleme povyshenija produktivnosti skvazhin // Tehnologija TJeK. – 2003. – № 1. – С. 31-35.
3. Tul'bovich B.I. Metody izuchenija porod-kollektorov nefiti i gaza. – M.: Nedra, 1979. – 198 s.
4. Avchan G.M. Fizicheskie svoystva osadochnykh porod pri vysokih davlenijah i temperaturah. – M.: Nedra, 1972. – 144 s.
5. Metodicheskie rekomendacii po issledovaniju porod – kolektorov nefiti i gaza fizichesкими i petrofizichesкими metodami / pod red. V.I. Gorojana, V.I. Petersil'e. – M.: VNIIGNI, 1978. – S. 297-331.
6. Hanin A.A. Petrofizika nefitjanyh i gazovykh kollektorov. – M.: Nedra, 1976. – 295 s.
7. Bagrinceva K.I. Treshhinovatosť osadochnykh porod. – M.: Nedra, 1982. – 235 s.
8. Burlakov I.A., Strukov G.I. Deformacii treshhinovatykh karbonatnykh kollektorov Stavropol'ja // Geologija nefiti i gaza. – 1978. – № 3. – S. 48-51.
9. Marmorshtejn L.M. Izuchenie izmenenija poristosti, pronicaemosti i jelektroprovodnosti peschanykh porod pri vsestoronnih davlenijah // Metodika issledovanija porovykh kollektorov. – M.: Nedra, 1965. – S. 178-185.
10. Pavlova N.N. Deformacionnye i kollektorskie svoystva gornykh porod. – M.: Nedra, 1975. – 183 s.