

## ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА КАВЕРНОЗНОСТИ

В. П. Митрофанов  
(ООО "ПермНИИНефть")

Отличительная особенность карбонатных пород состоит в высокой неоднородности пустотного пространства. На их емкостные, а иногда и на фильтрационные свойства в значительной степени влияет кавернозность. Это нашло отражение уже в первых работах Г.Е. Арчи, И.В. Хворовой, Л.Б. Рухина, К.И. Багринцевой, В.Н. Быкова и др., посвященных разработке их классификации. Реальное представление об эффективном объеме сложных коллекторов может способствовать правильной оценке запасов и рациональной разработке залежей, связанных с ними.

В карбонатных отложениях кавернозность развита широко и наиболее интенсивно под поверхностями несогласного залегания в зонах интенсивного палеовыщелачивания [1]. Она свойственна породам различного возраста в районах Иркутского амфитеатра, Предкавказья, Русской платформы, Днепроовско-Донецкой впадины, Предуральского прогиба и др. Каверны могут достигать гигантских размеров, но чаще встречаются миллиметровые.

Единого подхода к размерам каверн еще не разработано. В некоторых работах к ним относят пустоты с 0,1 до 0,3 мм на основании признака вторичности их образования [2]. Несмотря на то, что каверн в породе значительно меньше, чем пор, они существенно сказываются на емкостных свойствах коллекторов и их нефтенасыщенности. Например, средний размер пор в известняках башкирской залежи Осинского месторождения составляет около 20 мкм, объем одной поры такого размера равен  $42 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3$ . Даже одна из изометрических каверн диаметром 2 мм, которые наиболее характерны для данных отложений, имеет объем  $4,2 \text{ мм}^3$ , т. е. больше объема поры примерно в 1 млн раз. Тогда у гипотетического образца в  $10 \text{ см}^3$ , имеющего пористость 15 %, объем пустотного пространства, равный  $1,5 \text{ см}^3$ , будет эквивалентен 357 млн пор диаметром 20 мкм или 357 кавернам диаметром 2 мм. В случае редких 10-мм каверн эта разница достигает 126 млн раз. Если учесть, что нефтенасыщенность каверн принимается близкой к единице, то все это свидетельствует о значительной роли кавернозности в структуре эффективной емкости коллекторов нефти и газа.

Инструментальные объемметрические методы определения кавернозности позволяют оценивать только суммарный объем всех крупных пустот без учета доли отдельных классов по размерности [3]. В данной работе

По данным кавернозности на внешней поверхности образца и серии срезов приведены распределения каверн по размеру и их объему, определения каверновой плотности и просветности, расчетной кавернозности.

In the article it is given cavern distribution according to their size and volume, determination of cavernous density and clearance, calculated cavity, according to cavity data on external surface of a sample and set of shears.

рассмотрены особенности кавернозности на основе статистического анализа распределения пустот и их объемов, фиксируемых в пределах реальных образцов керна. Исследования проведены на образцах кубической формы для среднекаменноугольных и пермских отложений.

Методика изучения кавернозности состояла в определении объема образца после парафинирования внешних каверн кубиков, суммарного объема всех каверн образца по разнице объемов всего пустотного пространства и отдельно порового, в сканировании размеров каверн диаметром более 0,5 мм под биноклем на внешних гранях кубиков и на серии параллельных срезов. Эти данные позволили получить распределения диаметров ( $d_k$ ) каверн, их объемов ( $V_k$ ), рассчитать плотность (Пл) каверн, просветность (Пр), сравнить экспериментальную кавернозность ( $K_k$ ) с расчетной ( $K_{rk}$ ). В большинстве случаев форма каверн у образцов близка к изометрической, поэтому для расчетов использовано среднее значение диаметра каверн двух взаимно перпендикулярных направлений.

Исследуемые кубики имели грани размером от 2,5 до 4,0 см. Сравнение конкретных значений каверновой просветности (Пр), представляющей долю площади сечения каверн относительно внешней поверхности куба, приведено в табл. 1. Если судить по внешним граням, то кавернозность в карбонатных породах развита крайне неравномерно и занимает часто значительную часть площади. Средние значения Пр по 6 граням у некоторых кубиков могут достигать 7,6 %, а по отдельным граням они колеблются от 0,7 до 10,5 %. Каждому из кубиков свойственны свои особенности кавернозности, иногда (куб I) каверновая просветность развита на всех гранях достаточно равномерно, но в большинстве случаев она отличается в 2...5 раз.

Более полные представления о развитии кавернозности в объеме образца были получены по данным серии параллельных срезов на примере двух кубиков I и X. Для этого кубики последовательно сошлифовывали параллельно одной грани не более чем на 2,6 мм и производился статистический анализ каверн на каждой из вскрытых плоскостей. По средним значениям просветности эти образцы отличаются практически в 3 раза: у кубика I Пр = 6,2 %, у кубика X — 2,3 % (табл. 1). Неравномерность встречаемости каверн внутри образцов иллюстрируется рис. 1, показывающим, что каждый из них обладает своим иерархическим уровнем неоднородности. У кубика I наблюдается

Таблица 1

## Значения каверновой просветности по граням и срезам

Месторождение	Скважина	Глубина, м	Возраст	Образец	Куб	Грани, срезы	Количество, шт.	Каверновая просветность по граням и срезам, %															
								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Осинское	601	1062,7...1068,7	C <sub>1s</sub>	21	I	Грани	6	3,3	3,7	2,4	2,7	3,6	3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,1
						Срезы	12	3,3	5,3	3,7	3,0	4,3	4,3	4,4	6,4	20,6	11,5	5,3	2,5	—	—	—	—
Осинское	615	1133,9...1139,2	C <sub>1s</sub>	345	X	Грани	2	2,6	2,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,4
						Срезы	16	2,6	2,8	1,8	2,5	1,8	2,1	2,0	2,4	2,4	2,8	2,3	2,6	1,7	2,1	2,5	2,1
Осинское	601	1062,7...1068,7	C <sub>1s</sub>	28	II	Грани	6	2,5	1,6	4,6	4,4	0,5	5,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,3
Осинское	615	1128,0	C <sub>1s</sub>		VI	Грани	6	1,1	2,8	1,9	0,7	2,6	2,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,9
Осинское	615	1135,0	C <sub>1s</sub>	337	VII	Грани	6	1,9	2,0	0,9	1,1	0,8	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,4
Елпачихинское	57	1261,8...1265,3	C <sub>1s</sub>	39	XIV	Грани	6	1,5	1,0	1,8	1,3	1,3	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,3
Крушское	1353	530,3...535,3	P <sub>1s</sub> +ar	10	IV	Грани	6	8,7	4,7	8,8	8,3	6,6	8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,6
Крушское	1353	530,3...535,3	P <sub>1s</sub> +ar	4	III	Грани	6	3,7	2,2	2,7	4,7	2,9	10,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,3
Крушское	1353	530,3...535,3	P <sub>1s</sub> +ar	4	III-I	Грани	6	2,4	3,5	2,3	4,0	1,2	6,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,2

единичное сильное увеличение просветности в 9- и 10-м срезах на фоне достаточно постоянной в остальной, большей, части образца, тогда как у кубика X отмечается ритмичное изменение просветности в каждом последующем срезе, но по амплитуде менее резкое. Сложное распределение каверн в карбонатных породах на уровне отдельных образцов находится в полном соответствии с неравномерной встречаемостью кавернозных участков в разрезе продуктивных пластов в целом, что подтверждается многочисленными макроописаниями керна и эпизодическими катастрофическими поглощениями бурового раствора при проходке скважин. Приведенные результаты позволяют утверждать, что расчетные способы оценки кавернозности, основанные на изучении только поверхностной части образца и на допущении ее изотропности в объеме, могут отражать этот параметр пород весьма ориентировочно.

Каверновая просветность на любом срезе породы является интегральным параметром пустотного пространства. Более глубокую информацию об его неоднородности и значении кавернозности в формировании емкости коллектора дают распределения каверн конкретных размеров и их объемов. На рис. 2 и 3 такие результаты представлены на примере одного кубика по данным обчета каверн только на внешних гранях и отдельно внутри образца по 12 срезам. Распределения, полученные по внешним граням и для образца в целом, по срезам сильно отличаются в первую очередь по диапазонам диаметров каверн. Срезы дают более полное представление о возможных размерах каверн, характерных для данной породы. На гранях наибольшие отмеченные каверны не превышают 1,8 мм, однако по анализу срезов в образце имеются пустоты размером до 3,5 мм. Максимальный установленный размер каверн является достаточно вероятным, и пропуск более крупных каверн исключен, поскольку срезы сделаны через 0,9...2,6 мм. Кроме того, количество каверн диаметром более 1 мм, отмеченных на гранях и срезах, составляет соответственно 8 и 12 %.

По граням и срезам более резкое отличие в кавернозности наблюдается по распределениям объемов каверн. Дифференциальное распределение объемов, полученное по срезам, характеризуется высокой однородностью. В связи с этим информация по ним дает реальное представление о долевом вкладе каверн различного диаметра в суммарный пустотный объем. Во-первых, по граням каверны более 1,8 мм отсутствуют, а по срезам их число составляет около 2 %. Во-

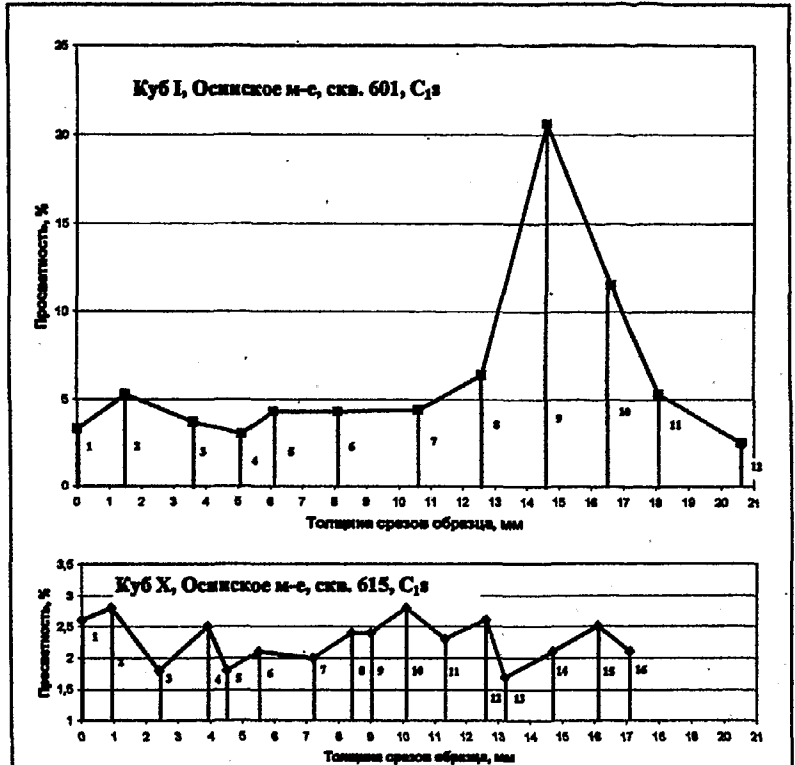


Рис. 1. Распределение каверновой просветности пустот диаметром более 0,5 мм в различных срезах образцов

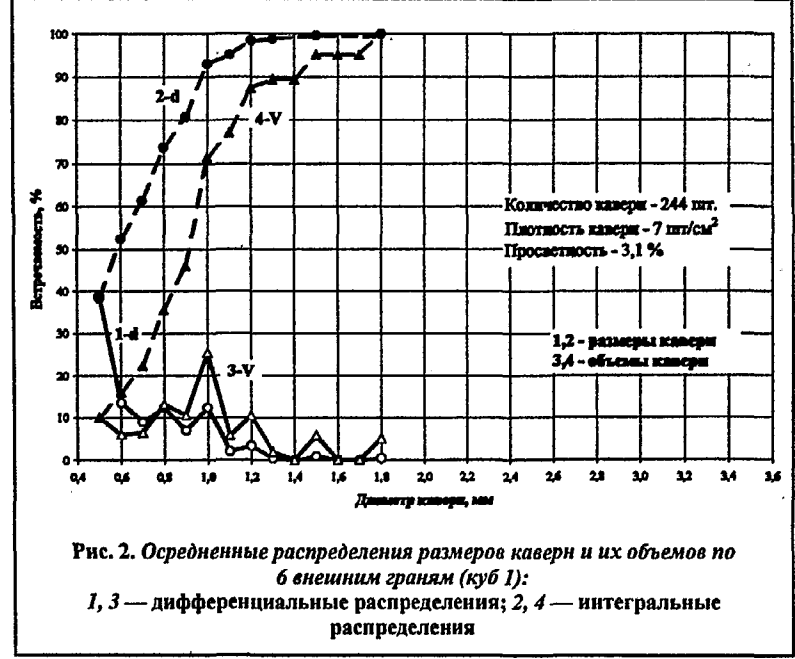


Рис. 2. Осредненные распределения размеров каверн и их объемов по 6 внешним граням (куб I): 1, 3 — дифференциальные распределения; 2, 4 — интегральные распределения

вторых, такое незначительное количество этих каверн тем не менее обеспечивает значительный вклад в пустотный объем пород — примерно 40 % от объема всех учтенных каверн в диапазоне 0,5...3,5 мм.

На практике к кавернам относят обычно пустоты диаметром более 1 мм [4]. При такой градации пустот на каверны диаметром более 1 мм, согласно рис. 3, у кубика I приходится около 67 % объема всех пустот в диапазоне размерности 0,5...3,5 мм. Абсолютный процент объема этих каверн от объема образца со-



Рис. 3. Осредненные распределения размеров каверн и их объемов по 12 срезам (куб 1):  
1, 3 — дифференциальные распределения; 2, 4 — интегральные распределения

ставляет 2,2 %. После парафинирования поверхностных каверн для образца был определен суммарный объем пор и каверн, который оказался равным 14 %. От этого объема на каверны диаметром более 1 мм приходится 15,7 %, нефтенасыщенность которых можно принять близкой к единице.

Средние статистические параметры плотности каверн (Пл) и каверновой просветности (Пр) исследованных образцов представлены в табл. 2. Рассчитаны они отдельно для каверн диаметром более 0,5 и 1,0 мм. По средним значениям Пл и Пр можно говорить, что кавернозность в образцах развита достаточно интенсивно. Плотность каверн более 1 мм в некоторых случаях достигает 2,5 шт./см<sup>2</sup>, а просветность — 3,3...6,6 %. Средние значения Пл и Пр у различных образцов отличаются существенно, что еще раз свиде-

тельствует о крайней неоднородности образования каверновых коллекторов.

Расчет кавернозности образца в целом, с учетом внутренних каверн, по статистике пустот на внешних гранях можно оценить при допущении изотропности пустотного пространства, как это сделано в работе [5]. В этом случае плотность каверн на воображаемых плоскостях, проведенных на расстоянии одного радиуса азиметрической каверны, принимается постоянной. Тогда для кубического образца будет справедливо следующее выражение расчетной кавернозности:

$$K_{pk} = \sum_i^n \left( \frac{V_{K_i}}{S_i} \cdot S_i \cdot N_i \right) / V_0 \quad (1)$$

или

$$K_{pk} = \frac{\sum_i^n 4,187 \cdot r_i^3 \cdot n_i \cdot N_i}{10 \cdot V_0} \quad (2)$$

где  $K_{pk}$  — кавернозность, %;  $r_i$  — радиус каверн конкретного размера, мкм;  $n_i$  — число каверн данного радиуса на внешней грани и на всех воображаемых;  $N_i$  — число воображаемых в кубе параллельных плоскостей, проведенных с интервалом  $r_i$  ( $N = h/r_i$ ) ( $h$  — сторона куба, см);  $V_0$  — объем образца, см<sup>3</sup>.

Определения кавернозности подобным образом отдельно для каверн диаметром более 0,5 и 1,0 мм представлены в табл. 3. Оказалось, что значения  $K_{pk}$  при учете пустот, начиная с 0,5 мм, изменяются в пределах 1,9...9,9 %, а в случае пустот более 1,0 мм — от 0,5 до 8,5 %. Относительно общего кавернопорового объема на долю каверн диаметром больше 1,0 мм, приходится 3,2...40,7 %.

При таких значениях кавернозности в каверно-

Таблица 2

Статистические параметры кавернозности карбонатных пород

Месторождение	Скважина	Глубина, м	Возраст	Образец	Куб	Грани, срезы	Количество, шт.	Количество каверн, шт.	Площадь каверн, мм <sup>2</sup>	Плотность каверн (Пл), шт./см <sup>2</sup>	Просветность каверн (Пр), %
Осинское	601	1062,7...1068,7	C <sub>1s</sub>	21	I	Грани	6	244/47	106,7/44,7	7/1,4	3,1/1,3
						Срезы	12	866/167	480,9/265,3	11,1/2,1	6,2/3,3
Осинское	615	1133,9...1139,2	C <sub>1s</sub>	345	X	Грани	2	69/6	37,1/7,1	6,4/0,6	3,4/0,7
						Срезы	16	806/56	290,2/60,9	9,3/0,6	3,4/0,7
Осинское	601	1062,7...1068,7	C <sub>1s</sub>	28	II	Грани	6	173/46	135/93,7	4,2/1,1	3,3/2,3
Осинское	615	1128,0	C <sub>1s</sub>	295	VI	Грани	6	367/65	201,8/112,0	3,3/0,6	1,8/1,0
Осинское	615	1135,0	C <sub>1s</sub>	337	VII	Грани	6	148/18	86,5/49,8	2,5/0,3	1,4/0,8
Елпачихинское	57	1261,8...1265,3	C <sub>1s</sub>	39	XIV	Грани	6	163/13	58,6/16,2	3,7/0,3	1,3/0,4
Крушское	1353	530,3...535,3	P <sub>1s</sub> +ar	10	IV	Грани	6	385/170	515,7/448,8	5,6/2,5	7,6/6,6
Крушское	1353	530,3...535,3	P <sub>1s</sub> +ar	4	III	Грани	6	560/253	580,8/478,9	4,2/1,9	4,3/3,6
Крушское	1353	530,3...535,3	P <sub>1s</sub> +ar	4	III-I	Грани	6	262/96	233,4/177,8	3,7/1,3	3,3/2,5

Примечание. Числитель и знаменатель — данные соответственно для каверн диаметром более 0,5 и 1,0 мм.

Расчетная кавернозность образцов по данным отдельных граней

Месторождение	Скважина	Глубина, м	Возраст	Образец	Куб	Объем пор и каверн ( $K_{пк}$ ), %	Кавернозность по граням, %						Среднее по 6 граням	Доля каверн с $d > 1$ мм, %
							для каверн диаметром более 0,5 мм							
							1-я грань	2-я грань	3-я грань	4-я грань	5-я грань	6-я грань		
Осинское	601	1062,7...1068,7	$C_{1s}$	21	I	14,0	4,4	4,7	3,2	3,6	4,8	4,0	4,1/1,7	12,1
Осинское	615	1133,9...1139,2	$C_{1s}$	345	X	12,7	3,6	—	2,8	—	—	—	3,2/0,6	4,7
Осинское	601	1062,7...1068,7	$C_{1s}$	28	II	13,3	3,3	2,3	5,9	6,5	2,0	6,9	4,5/3,2	24,1
Осинское	615	1128,0	$C_{1s}$	295	VI	19,9	1,5	3,8	2,6	0,9	3,4	2,8	2,5/1,4	7,0
Осинское	615	1135,0	$C_{1s}$	337	VII	14,8	2,5	2,7	1,3	1,5	1,1	2,5	1,9/1,1	7,4
Елпачихинское	57	1261,8...1265,3	$C_{1s}$	39	XIV	15,8	2,3	1,3	2,9	2,4	0,4	2,5	2,0/0,5	3,2
Крушское	1353	530,3...535,3	$P_{1s+ar}$	10	IV	20,9	11,5	7,4	10,5	10,9	8,7	10,5	9,9/8,5	40,7
Крушское	1353	530,3...535,3	$P_{1s+ar}$	4	III		4,8	3,0	3,0	6,4	3,9	13,8	5,8/4,8	—
Крушское	1353	530,3...535,3	$P_{1s+ar}$	4	III-I	9,9	3,1	4,7	3,0	5,4	1,6	7,9	4,3/3,2	32,3

Примечание. Числитель и знаменатель — соответственно для каверн диаметром более 0,5 и 1,0 мм.

поровых коллекторах будут совершенно другими распределение эффективного объема и соотношение вытесняемой нефти. Например, в обычном коллекторе при пористости, равной 15 %, и 65%-й нефтенасыщенности эффективный поровый объем составляет 9,8 %. Если в качестве среднего коэффициента вытеснения принять 0,60, то получим значение динамической пористости около 6 %. Следовательно, значения кавернозности, приведенные в табл. 3, могут обеспечить вытеснение нефти, сопоставимое с пористой частью породы, поскольку нефтенасыщенность каверн близка к 100 %, а вытеснение из них приближается к единице.

Таким образом, в коллекторах карбонатного типа структуру пустотного пространства и его эффективную часть в значительной степени определяет кавернозность. Для каверн размером более 0,5 мм плотность достигает 9,3 шт./см<sup>2</sup>, просветность — 7,6 %, а объем — 9,9 %. Несоизмеримость исследуемых образцов и пласта позволяет полагать, что реальная кавернозность может быть больше. Развита кавернозность в породе крайне неравномерно и данные о ней

по внешней поверхности образцов отражают особенности ее распределения ориентировочно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смехов Е.М., Дорофеева Т.В. Вторичная пористость горных пород-коллекторов нефти и газа. — М.: Недра, 1987. — 95 с.
2. Бочко Р.А. Типы микропустотности в породах-коллекторах карбонатного состава // Фундаментальные проблемы нефти и газа: Докл. Всерос. науч. конф. — Т. 4. — С. 155—175.
3. Орлов Л.И., Мельникова Ю.С. Метод определения открытой емкости пустот кавернозно-пористых пород // Состояние и перспективы изучения коллекторов нефти и газа: IV Всесоюз. совещ. по коллекторам нефти и газа. — М., 1971. — С. 87—90.
4. Иванов А.М. Комплексное изучение карбонатных пород как коллекторов нефти и газа. — М.: Недра, 1976. — 294 с.
5. Шишигин С.И. Кавернозность пород нефтеносного горизонта Шаимского района и ее роль в формировании емкости коллектора // Геология и геофизика. — 1969. — № 1. — С. 56—62.