

- and methane production from coal fields]. Moscow, MGGU Publ., 1996. 441 p.
6. Vernigo V.M., Kulchitskiy V.B. Preduprezhdenie gornyykh udarov i vnezapnykh vybrosov v gornodobyvayushshey promyshlennosti [Prevention of mountain blows and sudden emissions in the mining industry]. *Gornaya Promyshlennost*, 2006, no. 4, pp. 6–7.
 7. Sikora P., Smyslov D. Osobennosti zablagovalennoy degazatsii ugolnykh plastov metodom burniya skvazhin s poverkhnosti [Features of preliminary decontamination of coal layers by the method of well surface drilling]. *Glyukauf*, 2008, no. 1, pp. 38–45.
 8. *Pravila bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh (PB 05–618–03)* [Safety rules for coal mines]. Moscow, Gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «Nauchno-tekhnicheskiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii». Ser. 05, Iss. 11, 2003. 296 p.
 9. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznnykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Ugli i goryuchie slantsy* [Methodical recommendations on application of Classification of stocks of fields and expected resources of firm minerals. Coals and combustible slates]. Moscow, FGU GKZ Publ., 2007. 34 p.

УДК 541.64:622.245.422

ПОРИСТОСТЬ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ ОБЛЕГЧЁННЫХ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ

Пахарев Александр Владимирович,

ассистент кафедры бурения Института природных ресурсов ТПУ,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: avpaharev@tpu.ru, gtn_tomsk@mail.ru

Приводятся свойства тампонажных растворов с полыми стеклянными микросферами для условий скважин Томской области. Рассмотрены пористость и проницаемость тампонажного камня. Пористость тампонажного камня определялась на основе метода А.Г. Перехоженцева. Была определена пористость цементной матрицы. Также была определена общая пористость тампонажного камня. По классификации Г.И. Горчакова была количественно оценена гелевая, капиллярная, воздушная пористость цементной матрицы и облегчённого тампонажного камня в зависимости от расхода полых стеклянных микросфер. После обработки полученных изотерм сорбции для образцов тампонажного камня были построены графики. Анализ этих графиков позволяет заключить, что при твердении тампонажного камня при давлениях формируется более плотная структура камня, также введение в состав облегчённого тампонажного раствора полых стеклянных микросфер снижает паропроницаемость камня.

Ключевые слова:

Облегчённые тампонажные растворы, полые стеклянные микросферы, свойства тампонажных растворов, пористость, проницаемость камня.

В статье [1] авторами был проведён подробный анализ геологических условий нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений Томской области. Авторы [2, 3] считают, что разработанный облегчённый тампонажный раствор с полыми стеклянными микросферами (ПСМС) для крепления скважин является одним из лучших способов обеспечения их надёжной эксплуатации. Тем более что такими растворами зацементировано более 100 скважин на месторождениях Севера Тюменской области, Нижней Волги и шельфа Каспийского моря.

Для комплексного изучения свойств тампонажного раствора с полыми стеклянными микросферами необходимо исследование пористости и проницаемости цементного камня. Минимальные значения этих характеристик после ожидания затвердевания цементного раствора (ОЗЦ) будут обеспечивать герметичность конструкции скважины, требуемые прочностные показатели. Свойства облегчённого тампонажного раствора с полыми стеклянными микросферами представлены в табл. 1.

Пористость тампонажного камня определялась на основе метода А.Г. Перехоженцева по сорбции водяного пара в порах цементных материалов раз-

ных диаметров [4]. Размер молекулы воды был принят $3,5 \cdot 10^{-10}$ м.

Таблица 1. Свойства облегченного тампонажного камня.
Условия твердения: температура $(75 \pm 2)^\circ\text{C}$, давление – атмосферное

Состав раствора, мас. %	Средняя плотность, г/см ³	Пористость матрицы, %	Прочность, МПа	
			изгиб	сжатие
100 ПЦТ; 50 В	1,815	15,1	5,6	17
100 ПЦТ1; 2,5 ПСМС2; 58 В	1,61	14,2	4,8	12,5
100 ПЦТ; 5 ПСМС; 62,5 В	1,425	18,2	3,5	7,5
100 ПЦТ; 7,5 ПСМС; 70 В	1,34	20	2,45	6
100 ПЦТ; 2,5 АПСМС3; 54 В	1,624	12,3	5,4	13,9
100 ПЦТ; 5 АПСМС; 59 В	1,48	13,8	4,5	8,7
100 ПЦТ; 7,5 АПСМС; 66 В	1,41	18,5	3,6	7,5

Примечание: 1 – полые стеклянные микросферы; 2 – портландцемент тампонажный; 3 – аппретированные полые стеклянные микросферы.

Была определена пористость цементной матрицы, которая располагается между водо- и газонепроницаемыми полыми стеклянными микросферами. Результаты представлены в табл. 1, 2. Анализ этих результатов показал, что при использова-

нии ПСМС (при расходе микросфер 2,5 %) и АПСМС (при расходе микросфер 2,5 и 5 % от массы ПЦТ) тампонажный камень имеет среднюю плотность на 12...22 % ниже, а также меньшую пористость цементной матрицы, чем цементный камень состава 1 (100 % ПЦТ).

Таблица 2. Пористость цементной матрицы и облегченного тампонажного камня

Пористость	Пористость, % объема камня, при расходе микросфер					
	2,5 ПСМС	5 ПСМС	7,5 ПСМС	2,5 АПСМС	5 АПСМС	7,5 АПСМС
Матрицы	14,2	18,2	20	12,3	15,8	18,5
Микросфер	7,3	12,5	18,8	7,2	12,3	18,3
Общая пористость камня	21,5	30,7	38,8	19,5	28,1	36,8

Также была определена общая пористость тампонажного камня с учетом внутреннего объема полых стеклянных микросфер (табл. 2). Она повышается по мере роста расхода ПСМС. Самая низкая общая пористость наблюдалась у состава с 2,5 % аппретированных микросфер. Она составляет 19,5 % при пористости матрицы, равной 12,3 %. Самая большая общая пористость у состава с 7,5 % ПСМС. Она равна 38,8 % при пористости матрицы 20 %. Определено, что самую низкую общую пористость имеет состав с 2,5 % АПСМС, а самую высокую – с 7,5 % ПСМС. Причем пористость матрицы составляет от двух третей до половины общей пористости у тампонажных камней с 2,5 и 7,5 % полых стеклянных микросфер соответственно.

Таблица 3. Пористость тампонажного камня, твердевшего при давлении 10 и 30 МПа

Поры	% от общей пористости матрицы при расходе микросфер					
	2,5 ПСМС	5 ПСМС	7,5 ПСМС	2,5 АПСМС	5 АПСМС	7,5 АПСМС
Атмосферное давление 0,1 МПа						
Гелевые	94,1	90,5	85,2	95,3	92,1	87,4
Капиллярные	5,2	8	12,3	4,1	6,7	10,8
Воздушные	0,7	1,5	2,1	0,6	1,2	1,8
Давление 10 МПа						
Гелевые	96,3	93,4	88,3	97,4	94,1	89,5
Капиллярные	3,4	5,9	10,6	2,4	5,3	9,6
Воздушные	0,3	0,7	1,1	0,2	0,6	0,9
Давление 30 МПа						
Гелевые	97,3	94,5	89,4	98,3	95,5	90,5
Капиллярные	2,5	3,9	9,6	1,6	4,1	8,8
Воздушные	0,2	0,6	1	0,1	0,4	0,7

По классификации Г.И. Горчакова [5] пористость цементных материалов делится на гелевую (диаметр пор менее $1 \cdot 10^{-7}$ м), капиллярную (диаметр пор от $1 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ м) и воздушную (диаметр пор более $5 \cdot 10^{-5}$ м). Капиллярные и воздушные поры наиболее проницаемы для различных

флюидов. На основании приведенной классификации была количественно оценена гелевая, капиллярная, воздушная пористость цементной матрицы и облегченного тампонажного камня в зависимости от расхода полых стеклянных микросфер (табл. 3).

Самая высокая гелевая пористость, самые низкие капиллярная и воздушная пористость определены у камня с содержанием 2,5 % АПСМС. С увеличением расхода микросфер гелевая пористость снижается, а капиллярная и воздушная возрастают. Причем гелевая пористость максимальна при расходе АПСМС 2,5 % от массы ПЦТ и равна 95,3 % от пористости цементной матрицы. Установлено, что самая низкая гелевая пористость при расходе обычных микросфер 7,5 %. Это связано с более высоким количеством воды затворения.

После обработки полученных изотерм сорбции для образцов тампонажного камня на основе 100 % ПЦТ, а также с полыми стеклянными неаппретированными – ПСМС, и аппретированными – АПСМС, микросферами были построены графики. Результаты представлены на рис. 1–3 и в табл. 1, 2. Эксперименты проводились в эксикаторах в течение 4 месяцев до прекращения прироста массы образцов. В эксикаторах поддерживалась требуемая относительная влажность: сначала низкая, затем она постепенно увеличивалась до 98 %. Образцы постоянно взвешивались.

Таблица 4. Паропроницаемость тампонажного камня с ПСМС, полученного при давлении: атмосферном и 30 МПа и температуре (75 ± 2) °С

Состав раствора, мас. %	Средняя плотность камня, г/см ³		Пористость матрицы, %	Паропроницаемость, мг/м ² Па	Сопротивление паропроницанию, м ² Па/мг
	в 2 сут.	сухого			
Тампонажный камень сформирован при атмосферном давлении					
100 ПЦТ	1,815	1,612	15,1	1,96·10 ⁻²	0,51
100 ПЦТ; 2,5 ПСМС	1,61	1,42	14,2	1,2·10 ⁻²	0,812
100 ПЦТ; 5 ПСМС	1,425	1,216	18,2	0,96·10 ⁻²	1,04
100 ПЦТ; 7,5 ПСМС	1,34	1,137	20	1,12·10 ⁻²	0,914
100 ПЦТ; 2,5 АПСМС	1,624	1,438	12,3	1·10 ⁻²	1,01
100 ПЦТ; 5 АПСМС	1,48	1,28	13,8	0,9 ·10 ⁻²	1,105
100 ПЦТ; 7,5 АПСМС	1,41	1,205	18,5	1,1·10 ⁻²	0,94
Тампонажный камень сформирован при давлении 30 МПа					
100 ПЦТ	2,01	1,81	6,1	0,87·10 ⁻²	1,1
100 ПЦТ; 2,5 ПСМС	1,65	1,4	5,8	0,56·10 ⁻²	1,75
100 ПЦТ; 5 ПСМС	1,49	1,22	6,7	0,42·10 ⁻²	2,27
100 ПЦТ; 7,5 ПСМС	1,45	1,2	7,3	0,51·10 ⁻²	1,94
100 ПЦТ; 2,5 АПСМС	1,65	1,45	5,2	0,46·10 ⁻²	2,2
100 ПЦТ; 5 АПСМС	1,55	1,26	5,9	0,39·10 ⁻²	2,38

Анализ рис. 1–3 позволяет заключить, что при твердении тампонажного камня при давлениях от 0,1 до 30 МПа формируется более плотная структура камня. При этом пористость цементной матрицы уменьшается более чем в 2 раза.

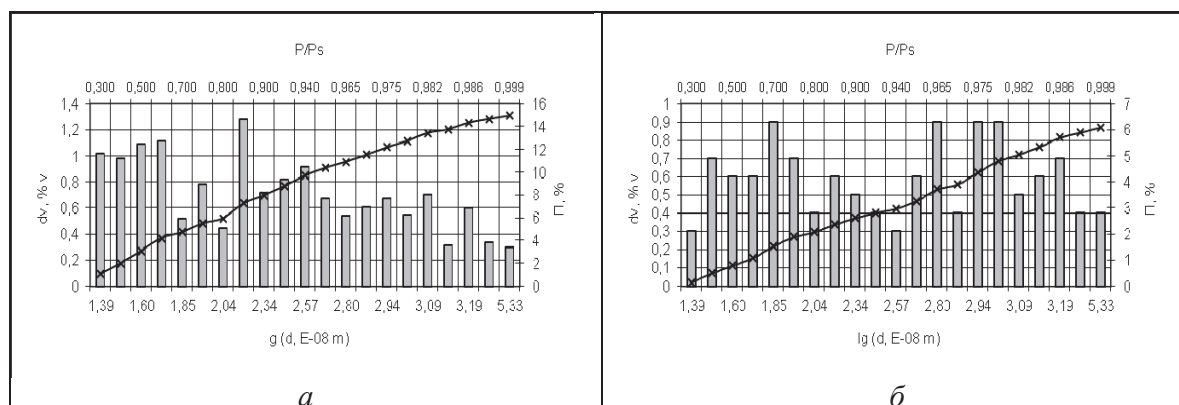


Рис. 1. Гистограмма дифференциального распределения и интегральная кривая распределения пор по диаметрам тампонажного камня состава 100 % ПЦТ в зависимости от относительной влажности: а) при атмосферном давлении; б) при давлении 30 МПа

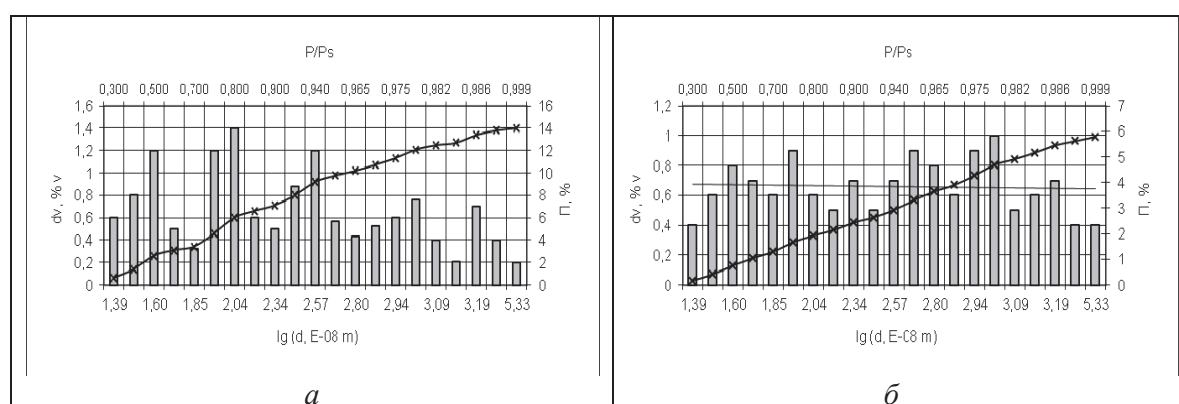


Рис. 2. Гистограмма дифференциального распределения и интегральная кривая распределения пор по диаметрам тампонажного камня состава 100 ПЦТ; 2,5 ПСМС в зависимости от относительной влажности: а) при атмосферном давлении; б) при давлении 30 МПа

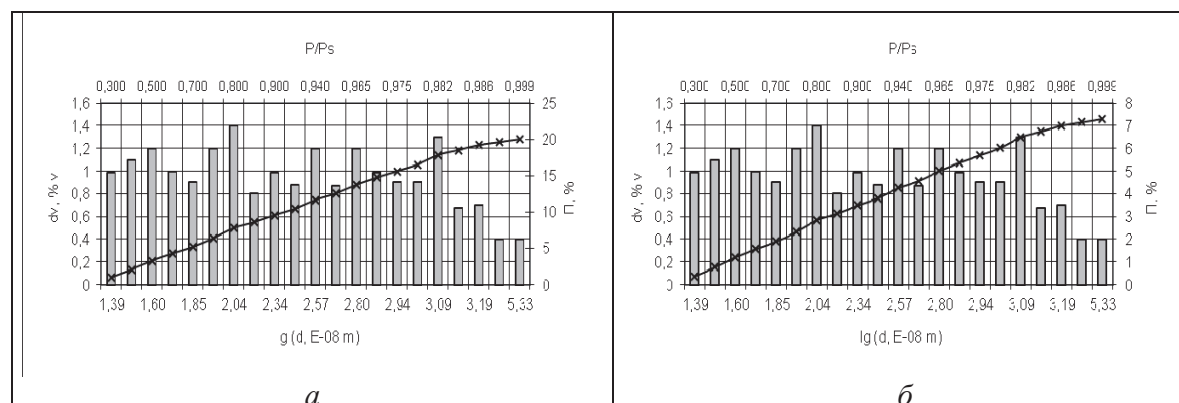


Рис. 3. Гистограмма дифференциального распределения и интегральная кривая распределения пор по диаметрам тампонажного камня состава 100 ПЦТ; 7,5 ПСМС в зависимости от относительной влажности: а) при атмосферном давлении; б) при давлении 30 МПа

Для подтверждения факта уплотнения структуры были определены паропроницаемость и сопротивление паропроницанию облегченных тампонажных растворов с ПСМС или АПСМС с расходом микросфер от 2,5 до 7,5 % от массы ПЦТ в НИИ строительной физики по «ГОСТ 25898–83. Методы определения сопротивления паропроницанию». Паропроницаемость определялась у высу-

шенного образца. Результаты представлены в табл. 4. Было установлено, что по показателям паропроницаемости тампонажный раствор в этом диапазоне расхода микросфер соответствует рубероиду. При расходе микросфер 5 % от массы ПЦТ паропроницаемость уменьшается более чем в 2 раза. Для всех других составов она значительно ниже, чем у камня из чистого ПЦТ. Это снижение было

более полутора раз. Рост сопротивления паропрооницанию при этом был в таких же пределах.

Введение в состав облегченного тампонажного раствора полых стеклянных микросфер от 2,5 до 7,5 % от массы ПЦТ снижает паропроницаемость камня, а значит, повышает герметичность скважины и системы «обсадная труба – цементное кольцо – горная порода» за счёт газо- и водонепроницаемых полых стеклянных микросфер и максимально плотности структуры облегченного тампонажного камня.

Для формирования образцов при повышенных давлениях использовался консистометр НТНР

ОФТЕ модели 120 (США). Формовались кубы с ребром 50 мм и применялась счетверенная форма для призм 20?20?100 мм.

Таким образом, количественно определены пористость цементной матрицы, общая, гелевая, капиллярная, воздушная пористости тампонажного камня с полыми стеклянными микросферами, а также его паропроницаемость и сопротивление паропрооницанию. Установлено, что при повышении давления от 0,1 до 30 МПа, при котором происходит твердение облегченного тампонажного камня, пористость и проницаемость камня уменьшается более чем в 1,5–2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы качества крепления скважин в Томской области / П.С. Чубик, А.В. Пахареv, Д.В. Орешкин, К.В. Беляев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – № 7. – С. 35–37.
2. Пахареv А.В., Беляев К.В. Свойства тампонажного камня, сформированного в условиях скважины Томской области // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 6. – С. 42–44.
3. Орешкин Д.В., Беляев К.В., Пахареv А.В. Разработка универсального тампонажного раствора для геологических условий Томской области // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – № 10. – С. 42–44.
4. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчёта влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. – Волгоград: ВолгГАСА, 1997. – 273 с.
5. Горчаков Г.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.

Поступила 30.08.2013 г.

UDC 541.64:622.245.422

POROSITY AND PERMEABILITY OF LIGHTWEIGHT CEMENT MORTARS

Aleksandr V. Pakharev,

Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30. E-mail: avpakharev@tpu.ru

The paper introduces the properties of cement mortars with hollow glass microspheres for wells of Tomsk region. The author has considered porosity and permeability of cement stone. Porosity of cement stone was determined based on the method of A.G. Perekhzhentsev. The cement matrix porosity as well as porosity of cement stone were defined. Based on G.I. Gorchakov classification the author estimated gel, capillary and air porosity of cement matrix and light-weight cement stone depending on consumption of hollow glass microspheres. The author constructed a diagram for the cement stone samples after the obtained sorption isotherms have been processed. The analysis of these diagrams allows making the conclusion that stone compact structure is formed at cement stone hardening at pressures; introduction of hollow glass microspheres into the structure of cement mortars decreases stone vapor permeability.

Key words:

Light-weight cement mortars, hollow glass microspheres, properties of cement mortars, porosity and permeability of stone.

REFERENCES

1. Chubik P.S., Pakharev A.V., Orshkin D.V., Belyaev K.V. Problemy kachestva krepeleniya skvazhin v Tomskoy oblasti [Problems of quality of fastening of wells in Tomsk the region]. *Stroitelstvo neflyanykh i gazovykh skvazhin na sushi i v more*, 2011, no. 7, pp. 35–37.
2. Pakharev A.V., Belyaev K.V. Svoystva tamponazhnogo kamnya, sformirovannogo v usloviyakh skvazhin Tomskoy oblasti [Properties of the plugging stone formed under conditions of a well in Tomsk region]. *Stroitelstvo neflyanykh i gazovykh skvazhin na sushi i v more*, 2012, no. 6, pp. 42–44.
3. Orshkin D.V., Belyaev K.V., Pakharev A.V. Razrabotka universal'nogo tamponazhnogo rastvora dlya geologicheskikh usloviy Tomskoy oblasti [Development of universal plugging solution for geological conditions of Tomsk region]. *Stroitelstvo neflyanykh i gazovykh skvazhin na sushi i v more*, 2011, no. 10, pp. 42–44.
4. Perekhzhentsev A.G. *Voprosy teorii i rascheta vlazhnostnogo sostoyaniya neodnorodnykh uchastkov ograzhdayushchikh konstruksiy* [Questions of the theory and calculation of a moist condition of non-uniform sites of protecting designs of buildings]. Volgograd, VolgGASA Publ., 1997. 73 p.
5. Gorchakov G.I. *Sostav, struktura i svoystva tsementnykh betonov* [Composition, structure and properties of cement concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976. 145 p.