

24. *Spravochnik po khimii tsementa* [Handbook on the chemistry of cement]. Leningrad: Stroyizdat, 1980, 221 p (in Russian).
25. Mchedlov-Petrosyan O. P., Chernyavskiy V. L. *Strukturoobrazovanie i tverdenie tsementnykh past i betonov pri ponizhennykh temperaturakh* [Formation and hardening of cement pastes and concretes at low temperatures]. Kiev: Budivel'nik, 1974, 112 p (in Russian).
26. Sarkisov Yu. S. Binders based oxide systems. *Vestnik TGASU*, 2013, no. 1, pp. 108–119 (in Russian).

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН

М. А. Елесин, Г. И. Бердов*, Е. В. Умнова,

Норильский индустриальный институт

***Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**

Ключевые слова: ячеистый бетон, портландцемент, механическая прочность, известково-серный затворитель, гидразин

Key words: cellular concrete, Portland cement, mechanical strength, lime and sulfur mixing, hydrazine

Ячеистый бетон отличается низкой плотностью и высокими теплозащитными характеристиками, что обусловлено особенностями пористой структуры. Значительный интерес представляет производство ячеистого бетона по неавтоклавной технологии, характеризующейся малой фондо- и энергоемкостью, безотходностью и экологической чистотой [1–3]. В отличие от ячеистого бетона автоклавного твердения, обладающего повышенными прочностными свойствами за счет вовлечения в реакцию кремнеземной составляющей, из бетона неавтоклавного твердения изготавливают в основном мелкие стеновые блоки для малоэтажного строительства [4, 5]. Получение легкого ячеистого бетона повышенной прочности расширяет сферу его применения в строительстве. Для решения этой актуальной задачи используют комплексный газообразователь, влияющий на макроструктуру поризованного камня, многокомпонентные вяжущие вещества, способствующие образованию сложных по составу и структуре дисперсий, устанавливающих более прочные межзерновые когезионные связи, активированные вяжущие вещества и промышленные отходы [5–9].

В данной работе для получения высокопрочного ячеистого бетона, характеризующегося высоким коэффициентом конструктивного качества (ККК), применен известково-серный затворитель (ИСЗ), представляющий собой высокоминерализованный раствор серы в гидроксиде кальция.

При проведении экспериментов использовали портландцемент М400 Норильского цементного завода следующего минералогического состава (в мас. %): C_3S 58,42, C_2S 17,35, C_3A 7,8, C_4AF 13,25, техническую серу и гидроксид кальция, технический гидроксид железа в виде пылевидного материала, высокодисперсный огарок, полученный прокаливанием гидроксида железа при 1100 °С, молотый доменный шлак, пластификатор С-3, а также алюминиевую пудру ПАП-2. Удельная поверхность портландцемента составляла 3000 см²/г. Химический состав цемента и порошкообразных заполнителей представлен в табл. 1. Для приготовления ИСЗ серу растворяли в нагретой до 95 °С механически перемешиваемой известковой суспензии.

Т а б л и ц а 1

Химический состав используемых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃
Цемент	21,4	5,9	4,6	62,7	2,7	–	1,9
Огарок	10,0	6,0	80,0	3,0	0,7	–	0,3
Молотый шлак	39,5	16,3	2,9	34,18	3,7	3,02	0,6

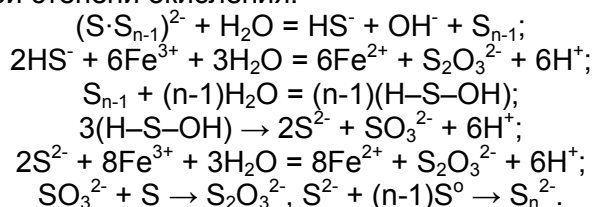
В исследуемых образцах ячеистого бетона соотношение цемент:заполнитель варьировали от 2:1 до 1:5. Кроме того, в смесь добавляли газообразователь – алюминиевую пудру (0,2% от массы цемента) или гидразин (0,72% от массы цемента), а также молотую негашеную известь (3,8%).

Порядок приготовления бетонной смеси был следующим: вначале в мешалку загружали расчетное количество затворителя с заполнителем и перемешивали в течение 2 мин, затем загружали вяжущее и порошкообразные добавки, перемешивали в течение 2 мин, добавляли суспензию газообразователя и дополнительно перемешивали в течение 1 мин, после чего сразу же измеряли подвижность полученной растворной смеси и заливали ее в формы размером 10x10x10 см.

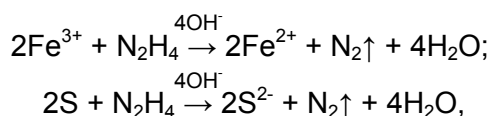
Вспучивание и предварительная выдержка образцов производились при температуре окружающей среды 20–25 °С и относительной влажности 60–75%. В период выдержки измеряли пластическую прочность. После достижения требуемой пластической прочности образцов срезали горбушку. Прочность ячеистого бетона определяли как среднее арифметическое результатов испытаний шести образцов каждого состава при сжатии на лабораторном прессе, развивающем максимальную нагрузку $5 \cdot 10^5$ Н.

Высокая концентрация в ИСЗ полисернистого соединения CaS_n , обладающего восстановительным потенциалом, обуславливает повышенную гидратацию цемента, химическое взаимодействие полисульфида кальция с гидроксидом кальция до полного исчерпания последнего в жидкой фазе, а также продуцирование в системе катиона Fe^{2+} восстановлением ферритного железа.

Механизм превращения полисульфид-иона в тиосульфат-ион можно представить в виде последовательного ряда валентных превращений серы, инициируемых фактором среды, в частности гидролизом, совмещенным с реакциями окисления и обусловленным наличием в системе ионов в высшей степени окисления:



Для повышения восстановительного потенциала системы и поризации теста использовали гидразин, сочетающий в себе свойства восстановителя и газообразователя. Взаимодействие осуществлялось по реакциям



где S – сера, содержащаяся в полисульфиде кальция.

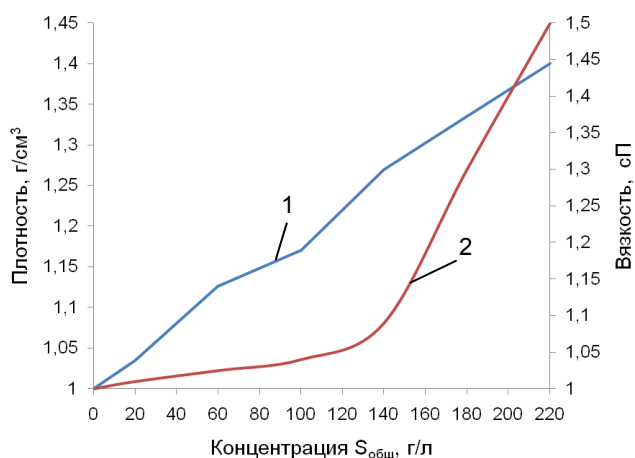


Рис. 1. Зависимость плотности (1) и вязкости (2) ИСЗ от концентрации растворенной серы

На рис. 1 приведены данные об изменении плотности и вязкости ИСЗ в зависимости от концентрации растворенной серы.

Перемешивание и укладку теста в формы производили вручную без вибрационного уплотнения. Отверждение происходило при комнатной температуре в течение нормативного срока (28 сут).

Концентрация серы в затворителе существенно влияет на макроструктуру поризованного камня (рис. 2). Наблюдается уменьшение размеров пор с увеличением концентрации серы в затворителе: если при низкой концентрации серы (5–10 г/л) поры достаточно крупные, то при применении концентрированного ИСЗ размеры пор весьма малы.

При использовании в качестве минерального заполнителя гидроксида железа, а в качестве газообразователя – алюминиевой пудры образуются более крупные поры, чем в образцах, полученных с применением гидразина (рис. 3). По всей вероятности, это связано с восстановлением Fe^{3+} до Fe^{2+} , входящего в структуру полисиликатов.

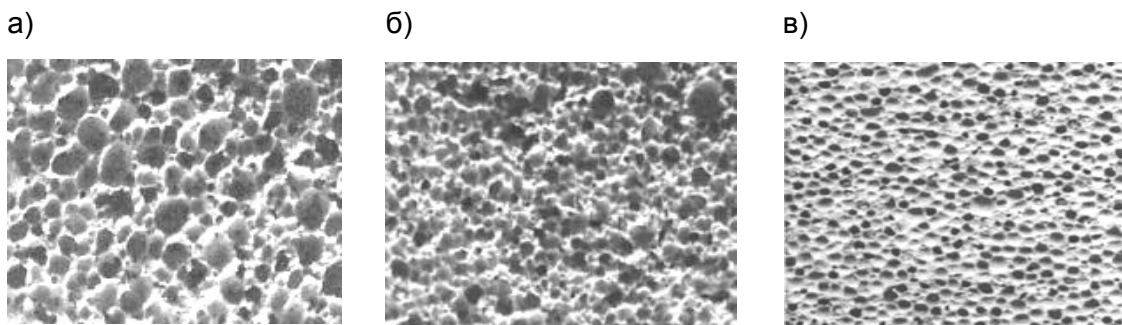


Рис. 2. Макроструктура образцов ячеистого бетона, полученных с использованием ИСЗ с различной концентрацией растворенной серы: а – 5–10 г/л; б – 40–60 г/л; в – 180–200 г/л

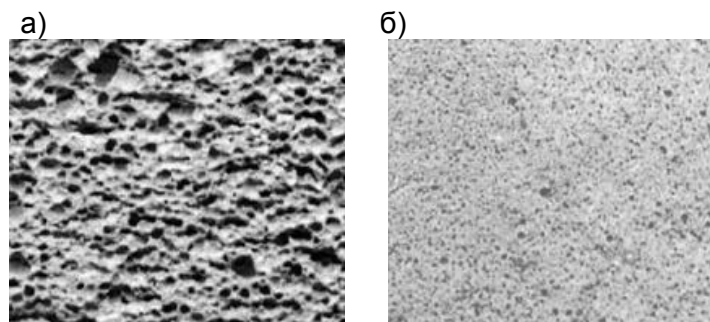
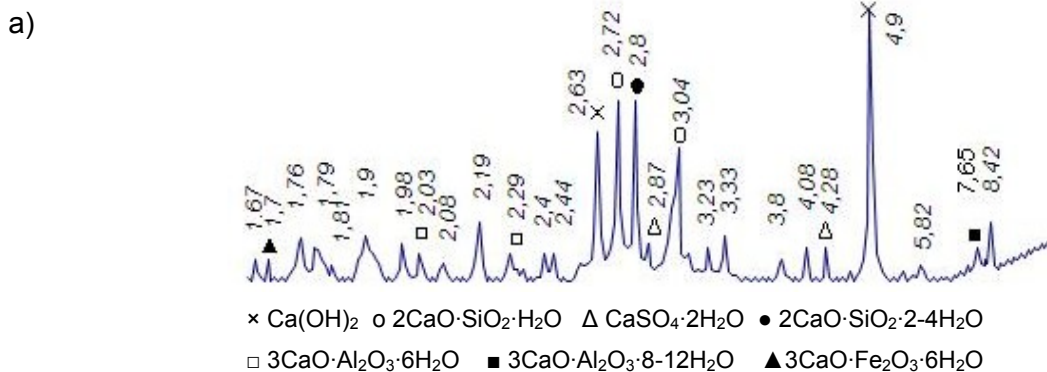


Рис. 3. Макроструктура образцов ячеистого бетона с добавкой гидроксида железа, полученных с использованием ИСЗ: а – газообразователь – алюминиевая пудра; б – газообразователь – гидразин

Судя по дифрактограммам продуктов гидратации вяжущих систем (рис. 4), у образцов, полученных с использованием ИСЗ, большая часть силикатов в камне представлена полисиликатами двойной цепочечной структуры со структурной единицей $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_n^{6-}$ в амфиболах и двухмерными бесконечными макроионами $[\text{Si}_2\text{O}_5]_n^{2-}$ в слоистых апофиллитах, а также алюмосиликатом в виде гидрогаленита. Гидроалюминаты в камне представлены гидросульфоалюминатами, в которых в условиях дефицита в жидкой фазе растворенного гидроксида кальция сульфогруппа SO_4^{2-} частично либо полностью замещена S_2O_3^- -ионом, продуцируемым в системе за счет химической конверсии S_n^{2-} -иона [10]. При этом в структуре камня отсутствуют не только одно- и трехсульфатная формы гидроалюминатов, но и гидроферриты вследствие полного вхождения Fe^{2+} в структуры полисиликатов.

Главными факторами, обуславливающими высокие прочность и ККК (табл. 2), являются значительная концентрация полисульфида кальция в ИСЗ, а также присутствие гидразина, облегчающего продуцирование в твердеющем тесте катиона-модификатора Fe^{2+} . В оптимальных условиях высокие показатели качества образцов достигнуты при использовании как алюминиевой пудры, так и гидразина. Наилучшие показатели характерны для сочетания гидразин – $\text{Fe}(\text{OH})_3$, особенно при введении добавки пластификатора. При этом оптимальное соотношение цемент: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ увеличивается с 1:1 до 1:4, что расширяет масштабы утилизации отходов, повышает экономическую эффективность технологии производства ячеистого бетона, способствует росту его прочности и улучшению качества.



б)

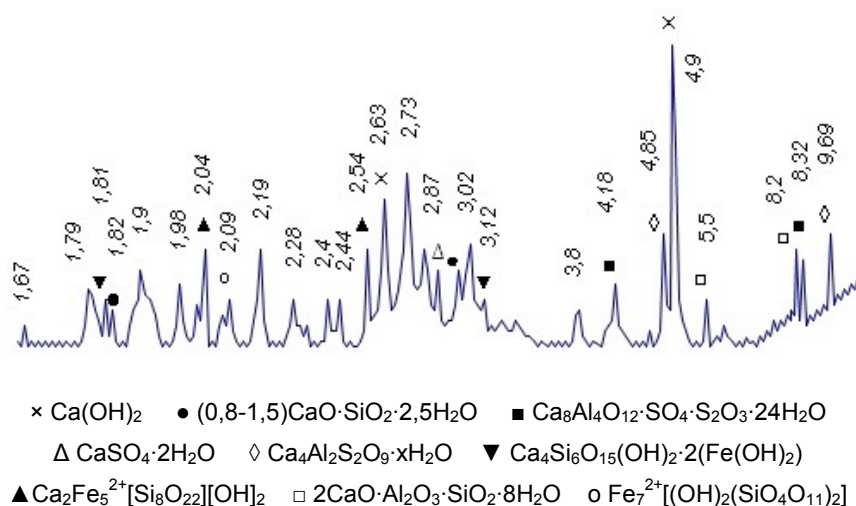


Рис. 4. Дифрактограмма продуктов гидратации вяжущих систем в возрасте 28 сут:
а – цемент – алюминиевая пудра – вода; б – цемент – Fe(OH)₃ – гидразин – ИСЗ

Т а б л и ц а 2

**Свойства образцов ячеистого бетона на ИСЗ
с концентрацией растворенной серы 250–300 г/л при Ж:Т = 0,4**

Соотношение цемент:заполнитель	Плотность ρ, кг/м ³	R _{сж} , МПа	ККК, R _{сж} /ρ·10
<i>Газообразователь – алюминиевая пудра (0,2%)</i>			
Цемент:огарок			
1:5	1385	13,9	1,00
1:3	1407	16,4	1,16
1:2	1340	17,2	1,28
1:1	1250	15,6	1,28
Цемент:молотый шлак			
1:3	1336	14,4	0,98
1:2	1305	13,2	1,06
1:1	1308	13,9	1,40
Цемент:Fe(OH) ₃			
2:1	1103	13,9	1,26
1:1	1158	13,5	1,17
1:2	1260	13,7	1,09
<i>Газообразователь – гидразин (0,72%)</i>			
Цемент:огарок			
1:5	1295	11,9	0,92
1:3	1283	14,0	1,08
1:2	1140	16,2	1,40
1:1	1127	16,0	1,40
Цемент:молотый шлак			
1:3	1327	14,5	1,09
1:2	1294	15,3	1,19
1:1	1307	14,4	1,10
Цемент:Fe(OH) ₃			
2:1	1125	14,8	1,30
1:1	1235	14,9	1,12
1:2	1300	11,9	0,91
Цемент:Fe(OH) ₃ с добавкой С-3			
1:2	1440	17,7	1,23
1:4	1508	18,4	1,22

Таким образом, высокие прочность и ККК полученных образцов дают основание рассматривать предлагаемый бетон как эффективный вариант высокопрочных легких бетонов на пористых заполнителях для несущих конструкций. Применение ИСЗ позволяет вовлекать в производство в качестве заполнителей промышленные отходы, активирующие вяжущие свойства портландцемента. При этом перспективно использование слабоутилизируемого в настоящее время гидроксида железа из шламонакопителей – отхода гидрометаллургии и травления металлопроката.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров Г. П., Скориков Е. П. Неавтоклавный энергоэффективный поробетон естественного твердения // Изв. вузов. Строительство. – 2005. – № 7. – С. 49–54.
2. Леонтьев Е. Н., Коковин О. А. К вопросу о неавтоклавном газобетоне // Технология бетонов. – 2007. – № 5. – С. 50–52.
3. Аминев Г. Г. Малоцементный неавтоклавный ячеистый бетон // Строительные материалы. – 2005. – № 12. – С. 50–51.
4. Рекомендации по проектированию и применению панелей покрытий из ячеистых бетонов для жилых и общественных зданий. – М.: ЦНИИЭП жилища, 1982. – 85 с.
5. Трамбовский В. П. Ячеистый бетон в современном строительстве // Технология бетонов. – 2007. – № 2. – С. 30–31.
6. Удачкин И. Б. Повышение качества ячеистобетонных изделий путем использования комплексного газообразователя // Строительные материалы. – 1983. – № 6. – С. 11–12.
7. Шихненко И. В., Круглов В. А. Газобетон на основе промышленных отходов // Технология бетонов. – 2009. – № 6. – С. 14–15.
8. Чистов Ю. Д., Тарасов А. С. Разработка многокомпонентных минеральных вяжущих веществ // Российский химический журнал. – 2003. – № 4. – С. 12–17.
9. Урханова Л. А., Чимитов А. Ж. Газобетон на основе активированных вяжущих веществ // Бетон и железобетон. – 2008. – № 2. – С. 9–12.
10. Исследование механизма гидратационного преобразования портландцемента в растворе полисульфида кальция / М. А. Елесин, А. В. Павлов, Г. И. Бердов [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2002. – Т. 75, вып. 6. – С. 903–907.

REFERENCES

1. Sakharov G. P., Skorikov E. P. Non-autoclaved energy efficient natural hardening cellular concrete. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo*, 2005, no. 7, pp. 49–54 (in Russian).
2. Leont'ev E. N., Kokovin O. A. To the question of non-autoclaved aerated concrete. *Tekhnologiya betonov*, 2007, no. 5, pp. 50–52 (in Russian).
3. Aminev G. G. Non-autoclaved cellular concrete low cement. *Stroitel'nye materialy*, 2005, no. 12, pp. 50–51 (in Russian).
4. *Rekomendatsii po proektirovaniyu i primeneniyu paneley pokrytiy iz yacheistykh betonov dlya zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Recommendations for the design and application of panel coatings cellular concretes for residential and public buildings]. Moscow: TsNIIEP zhilishcha, 1982, 85 p (in Russian).
5. Trambovskiy V. P. Cellular concrete in modern construction. *Tekhnologiya betonov*, 2007, no. 2, pp. 30–31 (in Russian).
6. Udachkin I. B. Improving the quality of cellular concrete products through an integrated gasifier. *Stroitel'nye materialy*, 1983, no. 6, pp. 11–12 (in Russian).
7. Shikhnenko I. V., Kruglov V. A. Aerated concrete based on industrial wastes. *Tekhnologiya betonov*, 2009, no. 6, pp. 14–15 (in Russian).
8. Chistov Yu. D., Tarasov A. S. Development of multicomponent mineral binders. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2003, no. 4, pp. 12–17 (in Russian).
9. Urkhanova L. A., Chimitov A. Zh. Aerated concrete based on activated binders. *Beton i zhelezobeton*, 2008, no. 2, pp. 9–12 (in Russian).
10. Elesin M. A., Pavlov A. V., Berdov G. I., et al. Investigation of the mechanism of hydration of Portland cement in calcium polysulfide solution. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2002, vol. 75, is. 6, pp. 903–907 (in Russian).