

УДК 691.215.1

*КОРОВЯКОВ ВАСИЛИЙ ФЕДОРОВИЧ, докт. техн наук, профессор,
vasilykor@yandex.ru*

*СОЛОВЬЕВ ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн наук, профессор,
sol-v-n-@mail.ru*

*ГАЛЬЦЕВА НАДЕЖДА АЛЕКСЕЕВНА, ст. преподаватель,
galcevanadezda@mail.ru*

Национальный исследовательский

*Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26*

ЛЕГКИЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ВОДОСТОЙКОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО И ПЕНОСТЕКЛЬНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ДИАТОМИТОВОГО СЫРЬЯ

Приведены результаты исследований нового особо легкого пористого заполнителя, получаемого из диатомитового сырья по технологии производства пеностекла, и результаты исследований легкого бетона на его основе. Новый заполнитель выпускается в виде гранул с насыпной плотностью от 120 до 160 кг/м³ при прочности до 2 МПа (для крупных фракций). С использованием таких пеностекляных гранул были получены легкие бетоны на композиционном гипсовом вяжущем. Изучены свойства полученных вяжущих. Эти бетоны характеризуются средней плотностью от 430 до 900 кг/м³ при прочности на сжатие от 4,3 до 10,8 МПа, достаточной морозостойкостью. Они рекомендуются для производства различных стеновых изделий, предназначенных для массового строительства.

Ключевые слова: диатомитовое сырье; гранулят; пеностекляный; композиционное гипсовое вяжущее; легкий бетон; плотность; прочность; морозостойкость.

*VASILII F. KOROVYAKOV, DSc, Professor,
vasilykor@yandex.ru*

*VITALII N. SOLOV'EV, DSc, Professor,
sol-v-n-@mail.ru*

*NADEZHDA A. GALCEVA, Senior Lecturer,
galcevanadezda@mail.ru*

*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavl Road, 129337, Moscow, Russia*

LIGHT CONCRETE BASED ON WATER-RESISTANT GYPSUM BINDER AND DIATOMACEOUS FOAM GLASS FILLER

The article presents research results on new particularly light porous aggregate obtained from diatomite raw materials using the foam glass technology. The proposed aggregate is produced in the form of granules with the bulk density varying from 120 to 160 kg/m³ at 2 MPa strength (for coarse fractions). Based on such foam glass grains, the obtained lightweight concretes are based on a waterproof composite gypsum binder, whose properties are studied herein. These concretes are characterized by the average density ranging from 430 to 900 kg/m³

with 4.3–10.8 MPa compressive strength and sufficient frost resistance. The proposed concretes can be used in the production of walling materials used in mass construction.

Keywords: diatomaceous raw materials; granulate; foam glass; waterproof gypsum binder; light concrete; density; strength.

Целью проведенных исследований являлось изучение использования нового пористого гранулированного материала, получаемого из диатомита и трепела, для изготовления легких бетонов и изучение их свойств.

В последние годы внимание исследователей строительных материалов привлечено к сравнительно новому легкому материалу – пеностеклу. Технология получения пеностекла из стеклобоя была разработана в прошлом столетии советскими учеными. Однако данная технология была на долгие годы забыта. В последнее десятилетие к ней снова начали обращаться, но на другом техническом уровне. В частности, в качестве сырья, ввиду дефицита стеклобоя, стали использовать диатомиты и трепелы, которые состоят, в основном, из аморфного кремнезема SiO_2 . Химический состав диатомитов и трепелов почти одинаков, но они имеют различную микроструктуру. Природные запасы этих пород огромны.

Диатомиты состоят из обломков панцирей диатомовых рачков, которые практически полностью сохранили свою структуру. Трепелы имеют плотность выше, т. к. образовались из неорганических обломочных пород.

Высокая пористость и низкая средняя плотность диатомитов и трепелов позволяет эффективно использовать их в качестве теплоизоляционных материалов [1, 2].

На среднюю плотность диатомита влияет его месторождение, она может составлять от 380 до 1000 кг/м^3 [3, 4]. В материалах для теплоизоляции применяют комовый диатомит, который в соответствии с ТУ 5761-001-25310144-99 должен обладать следующими характеристиками: средняя плотность $\leq 800 \text{ кг/м}^3$, влажность 50 %, теплопроводность при средней температуре 323 К – 0,181 Вт/(м·К), при 573 К – 0,195 Вт/(м·К), температуростойкость 900 °С [5].

Достоинством такого сырья является высокое содержание аморфной фазы диоксида кремния (до 70 %), а также наличие в его составе других стеклообразующих и модифицирующих оксидов. Необходимо отметить, что для кремнезема опал-кристаллитовых пород требуется менее высокий температурный режим (1500–1550 °С), чем для рядового кварца (1713–1728 °С), в результате чего снижается температура варки стекла [6, 7].

В результате проведенного исследования [8, 9] был получен продукт со следующими физико-химическими характеристиками: плотность 125–135 кг/м^3 , прочность при сжатии 0,7–1,1 МПа, коэффициент теплопроводности 0,050–0,055 Вт/(м·К), водопоглощение 3–5 % (об.).

На снижение температуры в процессе стеклообразования до 1300–1350 °С влияет размер частиц аморфного кремнезема, который составляет 7 мкм и содержится в количестве до 70 % от всего объема. Эффективность процесса увеличивается, так как суммарное снижение температуры завершения процесса стеклообразования достигает от 140 до 830 °С.

Было установлено [10, 11], что прочность диатомитового пеностекла равна 2 МПа, а прочность аналогичного промышленного – 1 МПа. Такие от-

личия в прочности вызваны микроглобулярным строением межпоровой перегородки. При изготовлении пеностекла из диатомитового сырья с добавлением сажи с измельчением в планетарной мельнице можно достичь прочности 1,3 МПа. Такой эффект достигается за счет увеличения удельной поверхности до $850 \text{ м}^2/\text{кг}$ с конечным снижением плотности до $120 \text{ кг}/\text{м}^3$. При аналогичных параметрах промышленное пеностекло будет иметь прочность только 0,7 МПа [12].

Основным преимуществом планетарной мельницы по сравнению с шаровой является возможность создавать структуру у диатомитового пеностекла с примесью сажи до 0,3 %. В итоге получается материал с меньшей плотностью (до $125 \text{ кг}/\text{м}^3$) и равномерной пористостью, которая достигается за счет введения в пеностекло эффективного пенообразователя с коэффициентом вспенивания 8,3.

Пеностекло на основе диатомитового стекла имеет пониженную плотность и нулевое водопоглощение при достаточно высоких значениях прочности.

Физико-механические характеристики диатомитового пеностекла оказались следующими: плотность 120–160 $\text{кг}/\text{м}^3$, теплопроводность 0,05–0,06 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, предел прочности на сжатие 1–2 МПа, паропроницаемость 0,0005 $\text{мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$.

Методики подбора составов бетонов, разработанные для керамзитобетона, не подходят ввиду значительно меньшей плотности пеностекла, меньшим размером зерен, большей прочностью. В связи с этим остро стоит проблема практических исследований составов легких бетонов на этом виде заполнителя.

В качестве вяжущего применяли композиционное гипсовое вяжущее (КГВ) [13, 14], состоящее из гипсового вяжущего марки Г-6 производства ООО «Пешеланский гипсовый завод» по ГОСТ 125–79, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ООО «Тулацемент» по ГОСТ 31108–2003, активную минеральную добавку, в качестве которой использовали микрокремнезем МКУ-85 (по ТУ 5743-048-02495332–96) и модифицирующие добавки (пластифицирующие, воздухововлекающие и т. д.).

В качестве пластифицирующей добавки был использован: пластификатор Sika ViscoCrete 5 New на основе поликарбоксилатных эфиров производства ООО «Зика» (по ГОСТ 24211–2008).

В качестве воздухововлекающей добавки использовалась смола нейтрализованная воздухововлекающая (СНВ) производства ЗАО «Технопромстрой» по ТУ 1400281074-75–98.

Для замедления процессов схватывания составов на основе гипсового вяжущего применялась винная кислота марки «х. ч.».

Образцы особо легкого пеностекляного заполнителя предоставлены НПО «Диатомит» под фирменным названием «Баугран».

Коэффициент теплопроводности насыпного гранулята уменьшается с ростом размера гранул заполнителя: наибольшую теплопроводность показала фракция 0,16–0,63 мм – 0,091 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, наименьшую – фракция 5–10 мм – 0,0581 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

Результаты испытаний на прочность при сдавливании в цилиндре имели значения в интервале 0,75–3,10 МПа. Материал оказался стоек к железистому и силикатному видам распада.

Водопоглощение испытанных образцов гранулята увеличивается с уменьшением размера фракции: для фракции 5–10 мм оно составило 9,06 %, для наименьшей фракции 0,63–1,25 мм – 16,42 %. Невысокие значения водопоглощения говорят о преобладающих замкнутых порах в структуре гранул, что положительно скажется при приготовлении бетонных смесей на их основе.

После ста циклов попеременного замораживания-оттаивания исследованные образцы ИПЗ «Баугран» показали удовлетворительные значения по потере массы: от 5 до 7 %.

Поскольку в данной работе наибольшая фракция заполнителя представлена размером 5–10 мм, подбор состава фактически сводился к определению состава мелкозернистого бетона на легком заполнителе.

Были использованы общие принципы при проектировании составов легких бетонов независимо от видов заполнителя:

– обеспечение максимально низкой средней плотности бетона путем насыщения пористым заполнителем бетонной смеси;

– достижение максимальной прочности легкого бетона при минимальном возможном расходе вяжущего и заданной средней плотности. Это может быть достигнуто снижением водоцементного соотношения, использованием цементов с высоким классом по прочности, применением пластифицирующих добавок и т. д.

Составы с использованием композиционного гипсового вяжущего приведены в табл. 1. Результаты определения физико-механических характеристик бетонов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Составы и свойства легких бетонов

Маркировка состава	Расход сырьевых материалов, кг/м ³						В/(Ц; Г)	Средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	
	КГВ	ИПЗ «Баугран»							28 сут	4 ч
		фр. 0,16–0,63 мм	фр. 0,63–1,25 мм	фр. 1,25–2,5 мм	фр. 2,5–5,0 мм	фр. 5–10 мм				
1 ГВ	324	16	32	32		86	205	0,63	705	4,4
2 ГВ	360	16	31	31	52	83	241	0,67	790	6,9
3 ГВ	400	16	31	31			250	0,63	850	8,6

Таблица 2

Влияние состава легких бетонов на водостойком гипсовом вяжущем на их основные свойства

Маркировка состава	Расход сырьевых материалов, кг/м ³										Средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/м ³	Прочность на сжатие/изгиб, 28 сут, МПа		
	Цемент	ГВ	ИПЗ «Баугран»					Вода	Добавка					
			фр. 0,16–0,63 мм	фр. 0,63–1,25 мм	фр. 1,25–2,5 мм	фр. 2,5–5,0 мм	фр. 5–10 мм		ГП ¹	МК ²			ЗС ³	
1 ВГВ	100	436	19	37	37	62	100	156	2,0	25	0,2	0,29	890	10,6/2,8
2 ВГВ	72	350	22	40	35	58	85	130	1,2	20	0,18	0,31	730	8,4
3 ВГВ	55	260	21	38	40	55	90	110	1,0	14	0,13	0,35	610	5,8
4 ВГВ	40	225	0	10	30	39	68	67	1,0	6	0,11	0,25	430	4,3

¹ Гиперпластификатор (Sika ViscoCrete 5 New).

² Микрокремнезём.

³ Замедлитель схватывания (винная кислота).

Вывод

Получены особо легкие бетоны плотностью 430–890 кг/м³. Показатели по прочности и морозостойкости соответствуют требованиям нормативов к бетонам для ограждающих и несущих конструкций для малоэтажного строительства. Благодаря использованию быстротвердеющего вяжущего производство изделий из такого бетона может осуществляться без тепловой обработки, что способствует энергосбережению в отрасли. Это позволяет рекомендовать легкие бетоны на основе водостойких гипсовых вяжущих и особо легкого пеностеклянного заполнителя для изготовления строительных изделий (камней, блоков, кирпича, пазогребневых плит, панелей и др.), а также для монолитного возведения стен зданий. Применение таких бетонов будет способствовать снижению энергозатрат на отопление зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Оконникова, Е.В.* Легкие ангидритовые бетоны с гранулированным диатомитом / Е.В. Оконникова, Г.Н. Первушин // СТРОЙКОМПЛЕКС-2013 : Международная научно-техническая конференция, Ижевск, 18–20 февраля 2013 г. – С. 448–452.
2. *Диатомиты Ямала* в технологии строительных материалов для арктических условий / К.С. Иванов, А.А. Мельникова, Е.А. Коротков, П.В. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – С. 18–23
3. *Ильина, В.П.* Диатомиты Карелии для производства стекла / В.П. Ильина, Т.С. Шелехова // Стекло и керамика. – 2009. – С. 34.
4. *Структурные, спектроскопические и теплофизические исследования* природных диатомитов некоторых месторождений Республики Казахстан / В.П. Селяев, Р.Е. Нурлыбаев, Б.Ф. Мамин, В.А. Неверов, Л.И. Куприяшкина // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – С. 5–10.
5. *Теплоизоляционные материалы и конструкции* / Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко, Б.М. Шойхет, Е.Ю. Петухова. – М. : ИНФР А-М, 2010. – С. 84, 85.
6. *Дистанов, У.Г.* Кремнистые породы СССР / У.Г. Дистанов. – Казань : Татарское книжное изд-во, 1976. – 412 с.
7. *Иванов, К.С.* Диатомиты в технологии гранулированного пеностекла / К.С. Иванов, С.С. Радаев, О.И. Селезнева // Стекло и керамика. – 2014. – № 5. – С. 15–19.
8. *Диатомит как перспективное сырье* для получения пеностекла / А.Л. Виницкий, Г.К. Рябов, Н.О. Сенник [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2012. – Т. 8. – № 2. – С. 63–67.
9. *Мелкоян, Р.Г.* Аморфные горные породы – новое сырье для стекловарения и строительных материалов / Р.Г. Мелкоян. – М. : НИА Природа, 2002. – 389 с.
10. *Получение высокоэффективного теплоизоляционного материала* на основе диатомита путем низкотемпературного вспенивания / Н.А. Сенник, А.В. Мешков, А.Л. Виницкий, Т.В. Вакалова, В.И. Верещагин // Техника и технология силикатов. – 2012. – Т. 19. – № 4. – С. 6–12.
11. *Подготовка пенообразующей смеси* для получения пеностекла на основе диатомита / В.Е. Маневич, Е.А. Никифоров, А.В. Мешков [и др.] // Строительные материалы. – 2012. – № 7. – С. 100–102.
12. *Сапачева, Л.В.* Пеностекло для экологичного строительства в России / Л.В. Сапачева, С.Ю. Горегляд // Строительные материалы. – 2015. – № 1. – С. 30–31.
13. *Коровяков, В.Ф.* Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве / В.Ф. Коровяков // Российский химический журнал. – 2003. – № 4. – Т. XLVII. – С. 18–25.
14. *Коровяков, В.Ф.* Научно-технические предпосылки эффективного использования гипсовых материалов в строительстве / В.Ф. Коровяков, А.Ф. Бурьянов // Жилищное строительство. – 2015. – С. 38–40.

REFERENCES

1. Okonnikova E.V., Pervushin G.N. Legkie angidritovye betony s granulirovannym diatomitom [Anhydrite concretes with granulated diatomite]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'STROYCOMPLEX-2013'*. Izhevsk, February 18–20, 2013. Pp. 448–452. (rus)
2. Ivanov K.S., Melnikova A.A., Korotkov E.A., Smirnov P.V. Diatomity Yamala v tekhnologii stroitel'nykh materialov dlya arkticheskikh uslovii [Diatomites of Yamal in building materials technology for arctic conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. Pp. 18–23. (rus)
3. Il'ina V.P., Shelekhova T.S. Diatomity Karelii dlya proizvodstva stekla [Diatomites of Karelia for glass production]. *Steklo i keramika*. 2009. P. 34. (rus)
4. Selyaev V.P., Nurlybaev R.E., Mamin B.F., Neverov V.A., Kupriyshkina L.I. Strukturnye, spektroskopicheskie i teplofizicheskie issledovaniya prirodnykh diatomitov nekotorykh mestorozhdenii respubliki Kazakhstan [Structural, spectroscopic and thermophysical studies of natural diatomite deposits in the Republic of Kazakhstan]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. Pp. 5–10. (rus)
5. Bobrov Yu.L., Ovcharenko E.G., Shoikhet B.M., Petukhova E.Yu. Teploizolyatsionnye materialy i konstruksii [Thermal insulation materials and structures]. Moscow: INFR A-M Publ., 2010. Pp. 84, 85. (rus)
6. Distanov U.G. Kremnistye porody SSSR [Siliceous rocks of the USSR]. Kazan': Tatarskoe knizhnoe izd-vo, 1976. 412 p. (rus)
7. Ivanov K.S., Radaev S.S., Selezneva O.I. Diatomity v tekhnologii granulirovannogo penostekla [Diatomites in granular foam glass technology]. *Steklo i keramika*. 2014. No. 5. Pp. 15–19. (rus)
8. Vinitsky A.L., Ryabov G.K., Senik N.O., Meshkov O.V., et al. Diatomit kak perspektivnoe syr'e dlya polucheniya penostekla [Diatomite as promising raw material for foam glass production]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012. V. 8. No. 2. Pp. 63–67. (rus)
9. Melkonyan R.G. Amorfnye gornye porody – novoe syr'e dlya steklovareniya i stroitel'nykh materialov [Amorphous rocks as new raw materials for glass making and building materials]. Moscow: NIA Priroda Publ., 2002. 389 p. (rus)
10. Senik N.A., Meshkov A.V., Vinitsky A.L., Vakalova T.V., Vereshchagin V.I. Poluchenie vysokoeffektivnogo teploizolyatsionnogo materiala na osnove diatomita putem nizkotemperaturnogo vspenivaniya [High-efficient diatomaceous insulating material produced by low-temperature foaming]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2012. V. 19. No. 4. Pp. 6–12. (rus)
11. Manevich V.E., Nikiforov E.A., Meshkov A.V., et al. Podgotovka penobrazuyushchei smesi dlya polucheniya penostekla na osnove diatomita [Preparation of foam-forming mixture for diatomaceous foam glass production]. *Stroitel'nye materialy*. 2012. No. 7. Pp. 100–102. (rus)
12. Sapacheva L.V., Goreglyad S.Yu. Penosteklo dlya ekologichnogo stroitel'stva v Rossii [Foam glass for sustainable construction in Russia]. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 1. Pp. 30–31. (rus)
13. Korovyakov V.F. Gipsovye vyazhushchie i ikh primenenie v stroitel'stve [Gypsum binders and their use in construction]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2003. No. 4. V. XLVII. Pp. 18–25. (rus)
14. Korovyakov V.F., Bur'yanov A.F. Nauchno-tekhnicheskie predposylki effektivnogo ispol'zovaniya gipsovykh materialov v stroitel'stve [Scientific and technical prerequisites for effective use of gypsum materials in construction]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2015. Pp. 38–40. (rus)