

УДК 691.327.32

## ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА АВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА

**Федоров В.И., Абдимерзитов М.К., Дьяконов А.А., Попов А.Л., Местников А.Е.**

*ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,  
Якутск, e-mail: elley-90@mail.ru*

В статье рассмотрена разработка состава конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона с использованием отходов автоклавного пенобетона. Выявлена и обоснована необходимость применения отходов автоклавного пенобетона в создании эффективных стеновых материалов, обладающих высокими техническими и эксплуатационными свойствами. В статье особое внимание обращается на определение основных физико-механических показателей щебня, полученного из отходов автоклавного пенобетона. На основе анализа характеристик исходных компонентов легкого бетона составлен математический план эксперимента, состоящий из 5 факторов и 27 опытов. Разработка состава легкого бетона с использованием метода математического планирования эксперимента позволяет выявить основные закономерности формирования структуры материала и причинно-следственные связи между входными факторами и выходными данными. Экспериментальные исследования выполнены согласно требованиям действующих нормативно-технических документов и методов измерения. Наряду с этим, для статистической обработки экспериментальных данных использованы стандартные методики и современные программные обеспечения. На основе проведенных исследований обоснован и подобран состав легкого бетона на основе отходов производства автоклавного бетона.

**Ключевые слова:** пенобетон автоклавного твердения, отходы, стеновой материал, щебень, прочность при сжатии, водопоглощение, физико-механические показатели, легкий бетон, фракция, класс бетона, безотходность

## LIGHT CONCRETE FROM WASTE MANUFACTURE AUTOCLAVED FOAM CONCRETE

**Fedorov V.I., Abdimezhitov M.K., Dyakonov A.A., Popov A.L., Mestnikov A.E.**

*North-Eastern Federal University named after Ammosov, Yakutsk, e-mail: elley-90@mail.ru*

The article describes the development of the composition of constructive insulating lightweight concrete with waste of autoclaved foam concrete. Also here revealed and proved the necessity of using waste autoclaved foam concrete in the creation of effective wall construction materials having high technical and operational characteristics. Great attention in this article is drawn to the definition of the basic physical and mechanical properties of crushed stone produced from the waste of autoclaved foam concrete. Based on the analysis of the characteristics of the original components of lightweight concrete, compiled the mathematical plan of the experiment, consisting of 5 factors and 27 experiments. Development of the composition of lightweight concrete using the method of mathematical planning of the experiment allows to reveal basic regularities formation of the structure of the material and cause-and-effect relationship between input factors and output data. Experimental research performed in accordance with applicable regulatory and technical documents and measurement methods. In addition, for the statistical analysis of experimental data used standard techniques and modern software. From conduct research was grounded and matched the composition of lightweight concrete based on waste production of autoclaved foam concrete.

**Keywords:** autoclaved foam concrete, waste, wall material, crushed stone, water absorption, compressive strength, physical and mechanical properties, lightweight concrete, fraction, concrete class, wastelessness

Текущий рост производства промышленной продукции приводит к непрерывному увеличению потребления природных ресурсов, повышению расхода энергии, увеличению образующихся отходов и загрязнению окружающей среды. Современное строительное материаловедение тесно взаимосвязано с решением таких задач, как повышение эффективности производства, снижение стоимости и трудоемкости технологических процессов, рациональное использование материальных и энергетических ресурсов.

Создание эффективных конструкционно-теплоизоляционных материалов является сложным процессом и относится к приоритетным направлениям строительного материаловедения [1]. Следует отметить, что первостепенное значение в этой обла-

сти имеет рациональность использования сырьевых ресурсов и полнота вовлечения в производство техногенных отходов.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, одним из наиболее перспективных направлений утилизации промышленных отходов является их использование в производстве строительных материалов, что позволяет в развитых странах до 40% удовлетворить потребности в сырье [5]. Применение отходов промышленности дает возможность снизить на 10–30% затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством их из природного сырья [3].

Одним из актуальных вопросов производства пенобетона автоклавного твердения является утилизация производственных

отходов. При правильном использовании данные отходы являются ценным сырьевым компонентом для изготовления различных видов композиционных материалов на цементной основе. В свою очередь, отходы производства пенобетона автоклавного твердения делятся на два основных типа. К первому типу относятся так называемые «технологические» отходы, которые образуются в процессе резки пенобетонных массивов. Ко второму типу относится производственный брак. Наиболее простым и эффективным способом переработки отходов является использование в качестве заполнителя в легких бетонах [3, 4].

В лаборатории «Вяжущие вещества и бетоны» Инновационно-технологического центра «Энергоэффективные строительные материалы» при СВФУ им. М.К. Аммосова выполнены комплексное исследование сырья и состава легкого бетона на основе отходов производства пенобетона автоклавного твердения.

Для изготовления образцов легкого бетона использованы дробленые отходы пенобетона автоклавного твердения (далее щебень), портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2003, речной песок (из карьера ОАО «ДСК») по ГОСТ 8736-93, суперпластификатор марки СП-1 и техническая вода по ГОСТ 23732-2011. Насыпная плотность, водопоглощение и прочность при сдавливании в цилиндре щебня выполнены согласно требованиям ГОСТ 9758-2012. Лабораторные испытания образцов проводились на поверенных приборах и оборудовании испытательного центра «ЯКУТСК-ЭКСПЕРТ». Исследования физико-механических показателей легкого бетона проведены на базе инновационно-технологического центра «Энергоэффективные строительные материалы». Микрофотографии щебня получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM-7600F в лаборатории «Технологии полимерных наноконструкций».

Обработка экспериментальных данных выполнена на базе следующих прикладных программ: «Microsoft Office Excel 2007», «MathCAD 2001i».

Заполнитель представляет собой светло-серый кусок неправильной геометрической формы с шероховатой неровной поверхностью и развитой открытой пористостью. Внешний вид фракционированного заполнителя показан на рис. 1. Определены основные физико-механические показатели заполнителя (табл. 1).

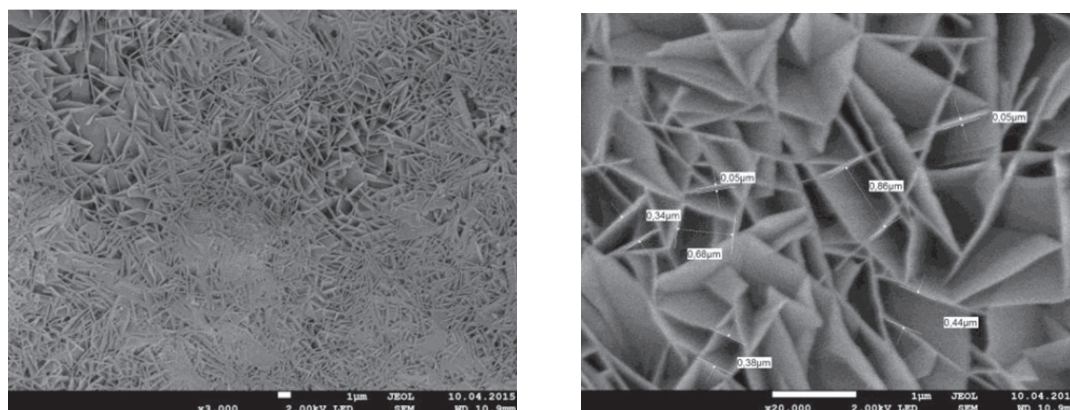
Анализ микрофотографий образцов щебня выявил однородный рост кристаллических новообразований низкоосновных гидросиликатов кальция тоберморитовой группы в виде кристаллов пластинчато-сотовых ячеек, объединенных в непрерывную высокопрочную структуру (рис. 2). Расстояние между новообразованными пластинчатыми структурами находится в пределах 0,34–0,68 мкм, толщина пластин – не более 0,05 мкм. Гидросиликаты группы C-S-H (I) при повышенных температурах (150–200°C) имеют вид пластинок толщиной до 10–20 мономолекулярных слоев, что обуславливает резкое уменьшение удельной поверхности новообразований по сравнению с поверхностью тех же фаз, но возникающих при обычных температурах в виде лепестков толщиной в два-три молекулярных слоя. Благодаря пластинчато-сотовой структуре, предполагается более высокое сцепление щебня с цементным камнем.

Сырьевая смесь легкого бетона на 27% состоит из фракционированного щебня, 26–28% цемента, 42% песка и 1% суперпластификатора. Расход цемента на 1 м<sup>3</sup> легкого бетона составляет 300–400 кг.

В отличие от технологии тяжелого бетона данный способ изготовления имеет ряд специфических особенностей, связанных с подготовкой заполнителя. Учитывая высокий показатель водопоглощения ячеистого бетона, особое место занимает снижение водотвердого отношения смеси.



Рис. 1. Фракционированный щебень из отходов автоклавного пенобетона



а) Увеличение 3000х

б) Увеличение 20000х

Рис. 2. Микроструктура щебня из отходов автоклавного пенобетона

Таблица 1

Физико-механические показатели заполнителя

| № п/п | Фракция, мм | Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа | Водопоглощение по массе, % | Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup> |
|-------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| 1     | 0–5         | 500,22                                | –                                         | 61,14                      | 2544,44                               |
| 2     | 5–10        | 328,88                                | 0,26                                      |                            |                                       |
| 3     | 10–20       | 303,19                                | 0,24                                      |                            |                                       |
| 4     | 20–40       | 290,46                                | 0,23                                      |                            |                                       |

Таблица 2

Уровни варьирования входных факторов

| № п/п | Название фактора                                     | Уровни варьирования |              |               | Шаг варьирования |
|-------|------------------------------------------------------|---------------------|--------------|---------------|------------------|
|       |                                                      | Нижний (– 1)        | Основной (0) | Верхний (+ 1) |                  |
| 1     | Содержание фракции 5–10 мм (по массе), %             | 30                  | 50           | 70            | 20               |
| 2     | Соотношение песка, г                                 | 0                   | 300          | 600           | 300              |
| 3     | Содержание цемента, г                                | 300                 | 350          | 400           | 50               |
| 4     | Содержание суперпластификатора (от массы цемента), % | 0                   | 0,5          | 1             | 0,5              |

Методика изготовления образцов легкого бетона состоит из следующих этапов: подготовка щебня, последовательное смешивание всех компонентов смеси, виброформование, твердение и набор прочности изделий.

В целях установления влияния содержания щебня на физико-механические показатели легкого бетона использован метод математического планирования эксперимента [2]. Для обеспечения точности и объективности интерпретации результатов эксперимента выбран дробный факторный эксперимент, состоящий из четырех факторов, трех уровней и 27 опытов. В целях минимизации «человеческого» фактора на результат эксперимента каждый опыт выполнен три раза. На

основании результатов литературного обзора, патентного поиска и результатов собственных исследований в работе приняты следующие входные факторы:

$P_{5-10}$  – содержание фракции 5–10 мм (по массе), %;

$P^n$  – соотношение песка, г;

$P_{mn}$  – содержание технологической пыли, г (технологическая пыль добавлена для замещения объема);

$P^c$  – содержание цемента, г;

$P_{cn}$  – содержание суперпластификатора (от массы цемента), %.

В качестве выходных данных принята средняя плотность ( $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>) и предел прочности на сжатие ( $P_{сж}$ , МПа). Уровни варьирования входных факторов показаны в табл. 2.

Таблица 3

## Физико-механические свойства легкого бетона

| №<br>п/п | $P_{5-10}$ ,<br>% | $P_n$ ,<br>г | $P_{mn}$ ,<br>г | $P_u$ ,<br>г | $P_{сж}$ ,<br>% | В/Ц  | $\rho_0$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $P_{сж}$ ,<br>МПа |
|----------|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|------|---------------------------------|-------------------|
| 1        | 2                 | 3            | 4               | 5            | 6               | 7    | 8                               | 9                 |
| 1        | 30                | 600          | 0               | 300          | 0               | 1,3  | 1368                            | 4,8               |
| 2        | 30                | 600          | 0               | 350          | 1               | 1    | 1335                            | 5,4               |
| 3        | 30                | 600          | 0               | 400          | 0,5             | 0,92 | 1464                            | 7,6               |
| 4        | 30                | 300          | 133             | 300          | 1               | 1,26 | 1249                            | 4                 |
| 5        | 30                | 300          | 133             | 350          | 0,5             | 1,36 | 1209                            | 4,5               |
| 6        | 30                | 300          | 133             | 400          | 0               | 1,36 | 1157                            | 3,6               |
| 7        | 30                | 0            | 267             | 300          | 0,5             | 1,72 | 1009                            | 2,3               |
| 8        | 30                | 0            | 333             | 350          | 0               | 1,62 | 1140                            | 3,5               |
| 9        | 30                | 0            | 333             | 400          | 1               | 1,29 | 1193                            | 5,1               |
| 10       | 50                | 600          | 0               | 300          | 1               | 1,22 | 1377                            | 4,5               |
| 11       | 50                | 600          | 0               | 350          | 0,5             | 1,24 | 1401                            | 5,3               |
| 12       | 50                | 600          | 0               | 400          | 0               | 1,17 | 1395                            | 5,4               |
| 13       | 50                | 300          | 166             | 300          | 0,5             | 1,67 | 1243                            | 3,2               |
| 14       | 50                | 300          | 166             | 350          | 0               | 1,52 | 1179                            | 4,1               |
| 15       | 50                | 300          | 166             | 350          | 0,5             | 1,33 | 1212                            | 5,4               |
| 16       | 50                | 0            | 333             | 300          | 0               | 1,78 | 999                             | 2,6               |
| 17       | 50                | 0            | 333             | 350          | 1               | 1,52 | 1126                            | 2,8               |
| 18       | 50                | 0            | 333             | 400          | 0,5             | 1,42 | 1180                            | 3,2               |
| 19       | 70                | 600          | 0               | 300          | 0,5             | 1,44 | 1345                            | 5                 |
| 20       | 70                | 600          | 0               | 350          | 0               | 1,33 | 1385                            | 4,3               |
| 21       | 70                | 600          | 0               | 400          | 1               | 1,08 | 1418                            | 7,3               |
| 22       | 70                | 300          | 166             | 300          | 0               | 1,67 | 1256                            | 4,6               |
| 23       | 70                | 300          | 166             | 350          | 1               | 1,33 | 1214                            | 5,9               |
| 24       | 70                | 300          | 166             | 400          | 0,5             | 1,21 | 1208                            | 6,8               |
| 25       | 70                | 0            | 333             | 300          | 1               | 1,67 | 977                             | 3,5               |
| 26       | 70                | 0            | 333             | 350          | 0,5             | 1,52 | 1009                            | 3,7               |
| 27       | 70                | 0            | 333             | 400          | 0               | 1,42 | 1046                            | 5,5               |

С точки зрения экономии материальных ресурсов из приведенных выше входных факторов наиболее дорогостоящим является расход цемента. Поэтому в силу объективных причин верхним уровнем приняли 400 г на один образец легкого бетона (соответственно на 1 м<sup>3</sup> бетона расходуется 400 кг цемента). Физико-механические показатели изготовленных образцов легкого бетона приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, отмечается тесная корреляционная связь между фракцией заполнителя со средней плотностью и прочностью бетона. С увеличением фракции заполнителя средняя плотность снижается. Это связано с уменьшением количества контактов между зернами щебня и понижением плотности упаковки щебня друг относительно друга. Наряду с этим, повышение содержания щебня

фракции 5–10 значительно увеличивает прочность при сжатии. Данный эффект объясняется снижением В/Ц отношения. Более плотная упаковка зерен щебня увеличивает его объемное содержание [1], тем самым повышается водопоглощение, а следовательно, В/Ц отношение. Аналогичное воздействие на прочность при сжатии имеет содержание песка и технологической пыли. За счет высокого показателя водопоглощения щебня влияние суперпластификатора не играет особой роли в формировании прочности легкого бетона. Наиболее высокую прочность имеют те составы, у которых наблюдается низкое содержание технологической пыли и высокий расход цемента.

На основании проведенных исследований можно утверждать, что сухие отходы имеют низкую насыпную плотность и от-

носителю высокую прочность при сдавливании в цилиндре, что позволяет получить бетон с плотностью 1100–1300 кг/м<sup>3</sup> с высокой марочной прочностью до класса бетона В5. Для повышения физико-механических показателей легкого бетона следует использовать фракцию 5–10 мм.

Использование отходов пенобетона автоклавного твердения в качестве крупного заполнителя в легком бетоне позволяет достичь двух целей: во-первых – значительно повысить уровень безотходности производства, во-вторых – производить энергоэффективный и экологически чистый строительный материал.

### Список литературы

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 528 с.
2. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 328 с.
3. Дворкин Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности: учебное пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов н/Д.: Феникс, 2006. – 264 с.
4. Иванов И. А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. – М.: Стройиздат, 1993. – 182 с.
5. Использование вторичного сырья в производстве строительных материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://diplomba.ru/work/71590.html> (дата обращения: 18.12.2015).