

ВУ КИМ ЗИЕН¹, С.И. БАЖЕНОВА¹, ТАНГ ВАН ЛАМ²¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия²Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК, ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ, ДОМЕННОГО ШЛАКА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОБЕТОНА

Аннотация. В статье выполнена оценка совокупного влияния органически-минеральной добавки с суперпластификатором SR 5000F и активной минеральной добавки - золы уноса, шлака доменного и микрокремнезема МК-90 на свойства пенобетона. Расчет пропорций смеси пенобетона производился методом абсолютного объема. Прочность на сжатие и прочность на изгиб пенобетона определяются по российскому стандарту ГОСТ 10180-2012. Пористость пенобетона определяется по американским стандартам ASTM C457-1998.

Результаты исследований показывают, что прочность на изгиб и сжатие полученного пенобетона, составляет от 0,526 до 1,061 МПа и от 1,69 до 8,22 Мпа соответственно. В статье также были получены зависимости между прочностью на сжатие и временем выдержки образцов, прочностью на сжатие и на изгиб. Результаты исследования показали, что использование золы уноса и доменного шлака для замены природного песка в пенобетоне улучшает механические свойства образцов, а использование отходов промышленности ведет к улучшению окружающей среды.

Ключевые слова: золы уноса, доменный шлак, пенобетон, прочность на сжатие, прочность на изгиб.

DIEN VU KIM¹, S.I. BAZHENOVA¹, LAM TANG VAN²¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia² Hanoi University of Mining and Geology, Ha Noi, Vietnam

INFLUENCE OF MINERAL ADDITIVES FLY ASH, BLAST FURNACE SLAG ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE

Abstract. The present study evaluated the combined effects of organic-mineral additive based on a superplasticizer SR 5000F and the active mineral additive fly ash, blast furnace slag and silica fume SF-90 on properties of foam concrete.

The calculation of mixture proportions of foam concrete is applied by the absolute volume method. Besides, the compressive strength and flexural strength of foam concrete are determined by Russian standard GOST 10180-2012. The porosity of the foamed concrete is determined by American standards ASTM C457-1998.

The results from experiments show that flexural and compressive strength of the foam concrete obtained respectively, from 0.526 to 1.061 MPa and from 1.69 to 8.22 MPa. The relationship between compressive strength and curing age, compressive and flexural strengths of the FC were also determined in this investigation. The results of this study demonstrated that the use of fly ash and blast furnace slag to replace natural sand could produce foam concrete and environmental protection.

Keywords: fly ash, blast furnace slag, foam concrete, compressive strength, flexural strength.

1 Введение

Пенобетон представляет собой легкий бетон с пористой структурой, получаемый путем отверждения растворов, включая связующие, мелкие заполнители различного происхождения, воду и пенообразователь [1, 2].

Пенобетон является экономичным, экологически чистым, легким конструкционным материалом, который обеспечивает тепло-звукоизоляцию, а также огнестойкость и устойчивость к воздействию насекомых [2, 3], что очень актуально в условиях влажного климата Вьетнама.

Для Вьетнама керамический кирпич чрезвычайно важный материал в строительной отрасли. Согласно TCVN 1450:2009 [4] керамический кирпич используют для возведения несущих стеновых конструкциях с прочностью на сжатие $\geq 7,5$ МПа и плотностью > 1600 кг/м³. Использование плотного глиняного кирпича при возведении стен зданий утяжеляет конструкцию и приводит к увеличению нагрузки, приходящейся на фундамент. Поэтому использование блоков из легких бетонов вместо глиняных кирпичей способствует снижению нагрузки на первый этаж и основание здания. К тому же такое техническое решение экономически выгодно и ведет к снижению издержек при строительстве фундамента.

Кроме того, во Вьетнаме много тепловых электростанций и металлургических заводов, которые выпускают миллионы тонн промышленных отходов каждый год. По некоторым данным [5, 6] каждый год, металлургическая промышленность выдает около $45 \div 55$ миллионов тонн шлака, а отходы ТЭС составляют около $50 \div 60$ миллионов тонн. Поэтому проблема утилизации отходов и использования их в пенобетоне, полученном на местном сырье, имеет важное экономическое, экологическое и социальное значение для Вьетнама.

Целью настоящего исследования стало определение свойств пенобетона с влажной плотностью 900 кг/м³ (влажной плотностью является плотность полученных смесей в естественном состоянии) и прочностью на сжатие $\geq 7,5$ МПа, зола-унос ТЭС и доменные шлаки Вьетнама.

2 Методы и материалы

2.1 Материалы

В качестве сырьевых материалов в работе использовали кварцевый песок, зола-унос, доменный гранулированный шлак, микрокремнезем и портландцемент.

Кварцевый песок (П) реки Ло (Вьетнам) с истинной плотностью 2,66 г/см³ и размером частиц от 0,14 мм до 1,25 мм применялся в качестве мелкого заполнителя в бетонных смесях.

Кроме того, в данной работе использовались зола-унос (ЗУ) ТЭС «Хай Фонг» (Вьетнам) с истинной плотностью $\rho = 2,34$ г/см³ и доменный гранулированный шлак (ДШ) завода «Хоа Фат» (Вьетнам) с истинной плотностью $\rho = 2,29$ г/см³. Помимо этого, в качестве добавки в бетонные смеси был использован микрокремнезем SF-90 (МК-90) (Vina Pacific) с $\rho = 2,15$ г/см³, Физико-химические характеристики материалов даны в таблице 1.

Для проведения исследований был взят портландцемент (Ц) ЦЕМ I 42,5Н производства завода «Бут сон» (Вьетнам) с истинной плотностью 3,10 г/см³. Его свойств приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические характеристики материалов

Средний химический состав, % масс.	Ц	ЗУ ТЭС	ДШ	МК-90
SiO ₂	22,56	59,91	35,45	91,63
Al ₂ O ₃	5,29	23,29	13,52	2,24
Fe ₂ O ₃	3,47	5,67	-	2,48
SO ₃	-	0,49	0,14	-
K ₂ O	0,61	-	0,28	-
Na ₂ O	0,14	-	-	0,56
MgO	2,01	1,45	7,89	-
CaO	63,37	1,68	40,88	0,52
TiO ₂	-	-	0,50	-
п.п.п.*	2,55	7,51	1,34	2,57
Насыпная плотность, кг/м ³	1100	850	830	760
Удельная поверхность, см ² /г	3660	3980	4550	10150

Примечание: п.п.п. - потери при прокаливании

Гранулометрический состав частиц всех сыпучих материалов показаны на рисунке 1.

В качестве пластифицирующей добавки использовали суперпластификатор SR 5000F SilkRoad (SR5000) (Корея), уменьшающей расход воды. Его плотность при температуре $25 \pm 5^\circ\text{C}$ составляла $1,1 \text{ г/см}^3$. Оптимальной дозировкой суперпластификатора является 1,5% от массы портландцемента, что позволяет снизить расход воды в бетонных смесях на 30%.

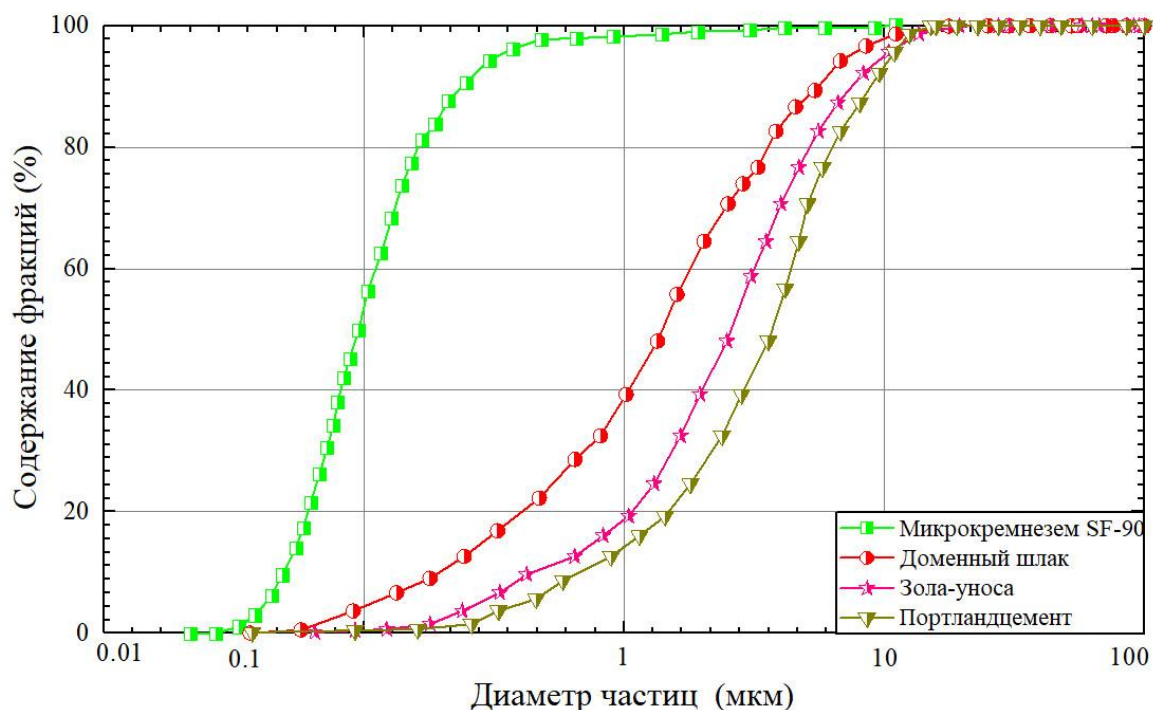


Рисунок 1 – Гранулометрический состав золы-уноса, доменного шлака, микрокремнезема и цемента

Для создания пористой структуры использовался пенообразователь EABASSOC (Пе) с истинной плотностью $1,02 \text{ г/см}^3$. В данных исследованиях пенообразователь EABASSOC разбавляли водой в пропорции 2,5% [18].

Пенообразующие свойства, такие как стабильность пены, оценивались методом высокоскоростного перемешивания. Сама методика заключалась в том, что раствор пенообразователя EABASSOC (2,5%) объемом 100 мл помещали в чашку из нержавеющей стали объемом 300 мл и перемешивали при 10000 об/мин в течение 10 минут с помощью лопастной мешалки. Пену переносили в мерную колбу (200 мл) и сразу измеряли объем пены [6]. Стабильность пенообразования рассчитывали по формуле (1):

$$\text{Стабильность пенообразования} = \frac{\text{Объем пены после 10 мин (мл)}}{100 \text{ (мл)}} \times 100\%. \quad (1)$$

Результаты испытаний пенообразователя EABASSOC представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Оценочный тест для пенного агента

Объемная массовая плотность (г/л)	45		
Время теста (часы)	1	2	3
Стабильность пенообразования (%)	92	76	65

Вода затворения для получения бетонной смеси, соответствует требованиям ГОСТ 23732-2011 [7], pH = 7,5;

2.2 Пропорции смеси и подготовка образцов

2.2.1 Пропорции смеси

Как известно, плотность и прочность являются очень важными свойствами пенобетона. Для пенобетона метод расчета состава смеси заключается в определении ее плотности для эффективного контроля прочности бетона в затвердевшем состоянии.

В настоящем исследовании пропорции компонентов смеси для испытаний пенобетона были получены в соответствии стандартом АСІ-523.3R-93, применяемом в соответствии с методом абсолютного объема и в сочетании с формулами (2) и (3) опубликованными в исследованиях [8 - 10].

$$D_{\text{Пенобетона}} = Ц + П + ЗУ + ДШ + МК-90 + SR5000 + В, \quad (2)$$

$$V_{\text{пены}} = K_{\text{ки}} \cdot \left(1000 - \frac{Ц}{\rho_{\text{Ц}}} - \frac{П}{\rho_{\text{П}}} - \frac{ЗУ}{\rho_{\text{ЗУ}}} - \frac{ДШ}{\rho_{\text{ДШ}}} - \frac{МК-90}{\rho_{\text{МК-90}}} - \frac{SR5000}{\rho_{\text{SR5000}}} - \frac{В}{\rho_{\text{В}}} \right), \quad (3)$$

где $D_{\text{Пенобетона}}$ - расчетная влажная плотность образцов пенобетона (кг/м^3);

Ц, П, ЗУ, ДШ, МК-90, SR5000, В – расходы соответственно портландцемента, песка, золы-уноса, доменного шлака, микрокремнезема, суперпластификатора SR5000 и воды (кг);

$\rho_{\text{Ц}}$, $\rho_{\text{П}}$, $\rho_{\text{ЗУ}}$, $\rho_{\text{ДШ}}$, $\rho_{\text{МК-90}}$, ρ_{SR5000} и $\rho_{\text{В}}$ - соответственно, истинные плотности портландцемента, кварцевого песка, золы-уноса, доменного шлака, микрокремнезема, суперпластификатора SR5000 и воды (кг/м^3);

$V_{\text{пены}}$ - объем пены (м^3);

$K_{\text{ки}}$ - коэффициент избыточности, в данной работе $K_{\text{ки}} = 1,1$ для пенообразователя EABASSOC (Великобритания) с хорошей стабильностью [11].

Плотность всех испытанных образцов бетона составляла 900 кг/м^3 , а прочность на сжатие подобранных составов пенобетона в затвердевшем состоянии составила $7,5 \div 10 \text{ МПа}$. Согласно [10], масса портландцемента как Ц=350 кг/м^3 .

При проектировании состава бетонных смесей учитываются следующие положения:

- Для смесей из пенобетона без суперпластификатора водоцементное отношение должно быть $В/Ц=0,5$ [12].

- В результате проведенных исследований было определено, что для смесей пенобетона с суперпластификатором SR5000 $В/Ц=0,25$ [13].

- Контрольный состав (По-1) не содержит минеральных добавок (зола-уноса, доменного шлака и кремнезема) и суперпластификатора. В составах пенобетона По-2 и По-3 с $В/(Ц+МК-90) = 0,5$, были использованы ДШ и ЗУ для замены 30% песка по массе [6, 14]. В состав пенобетонов По-4, По-5, По-6 и По-7 входит суперпластификатор SR5000 и микрокремнезем МК-90, заменяющий 10% Ц. (по массе) $В/(Ц+МК-90)$ смеси составило 0,25. Кроме этого в этих составах использовали ДШ и ЗУ для замены 30% и 100% песка по массе [14-17]. Составы пенобетонных смесей приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы пенобетонных смесей

п/п	В/Ц	ДШ/ П	ЗУ/ П	SR5000/ Ц	МК-90/ Ц	Ц	П	SR5000	ДШ	ЗУ	МК-90	В	В*	Пе(м3)
По-1 (контроль)	0,5	-	-	-	-	350	375	-	-	-	-	175	175	0,571
По-2	0,5	-	0,3	-	-	350	263	-	-	113	-	175	186,3	0,565
По-3	0,5	0,3	-	-	-	350	263	-	113	-	-	175	197,6	0,564
По-4	0,25	-	0,3	0,015	0,1	315	345	5,25	-	113	35	88	98,8	0,612
По-5	0,25	0,3	-	0,015	0,1	315	345	5,25	113	-	35	88	110,1	0,611
По-6	0,25	-	1,0	0,015	0,1	315	-	5,25	-	458	35	88	133,3	0,594
По-7	0,25	1,0	-	0,015	0,1	315	-	5,25	458	-	35	88	179,1	0,590

Примечание: В(*) - реальный расход воды на 1 м3 пенобетона (кг), который рассчитывается по формулам (4).

Реальный расход воды на 1 м³ пенобетона (кг)

$$B(*) = B + \alpha \cdot \text{ЗУ} + \beta \cdot \text{ДШ}, \quad (4)$$

где - α , β коэффициент для золы-уноса и доменного шлака, который определялся по общему количеству смачиваемых водой поверхностей минеральных примесей. На основании экспериментальных результатов этой работы, для золы-уноса α составляет 10% по массе и для доменного шлака β составляет 20% по массе.

2.2.2. Подготовка образцов

Портландцемент, песок, золу-унос, доменный шлак и микрокремнезем в сухом состоянии добавляли в смеситель «MasterMix» и перемешивали со скоростью 50 об/мин от 1 до 3 минут при температуре 20°C для получения однородной сухой смеси. Затем добавляли воду и суперпластификатор и перемешивали в течение 2 минут для получения бетонной смеси. Тем временем пенообразователь EABASSOC подавался в генератор. Полученную с помощью генератора пену, впрыскивали в пенобетонный смеситель и перемешивали в течение 1 минуты [18]. Сразу после смешивания пенобетон заливали в форму и выдерживали в статическом состоянии в течение 24 часов.

2.3 Методы

Изучение формы и морфологии частиц и физических характеристик материалов методами лазерной гранулометрии.

Для определения состава пенобетонной смеси использовался метод абсолютного объема [19].

Средняя плотность пенобетона (ρ , кг/м³) была определена путем испытаний образцов - кубиков размером 150x150x150 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1-78.

Прочность на сжатие ($R_{сж}$, МПа) пенобетона определяли в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток на образцах-кубах размером 150×150×150 мм (рисунок 3), при этом прочность пенобетона на изгиб определялась на образцах-балках размером 100×100×400 мм в возрасте 28 сут (рисунок 2) в соответствии с российским стандартом ГОСТ 10180-2012.



Рисунок 2 - Испытание прочности на изгиб



Рисунок 3 - Испытание прочности на сжатие

Для определения пористости [14] из середины двух (150 × 150 × 150 мм) образцов, которые использовались для испытания на пористость в соответствии с американским стандартом ASTM C457-1998, с использованием алмазного резца Грани были подготовлены пластины размером около 20 × 20 мм с минимальной толщиной около 12 мм. Пластины были вырезаны перпендикулярно литой поверхности, то есть параллельно направлению литья [20]. После сушки при температуре от 105°C до постоянной массы и для обеспечения стабильности пор. Затем, образцы охлаждали в лаборатории в течение 2 дней. Затем образцы пропитывают в растворе ЕРОХУ, полированном с помощью роторного измельчителя в соответствии с американским стандартом ASTM C457-1998. Затем полированные и

очищенные образцы были высушены при комнатной температуре в течение не менее 12 часов перед тестированием [20].

3 Результаты и их обсуждение

Механические свойства образцов пенобетона в разном возрасте приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Составы пенобетонных смесей

п/п	Плотность (кг/м ³)	Прочность на сжатие в разных возрастах, сутка (МПа)					Прочность на изгиб в возрасте 28 дней (МПа)
		1	3	7	14	28	
По -1 (контроль)	855	0,54	1,03	1,1	1,38	1,69	0,526
По -2	861	0,49	1,17	1,37	1,87	2,46	0,578
По -3	866	0,65	1,23	1,69	2,5	3,23	0,631
По -4	848	1,66	3,61	4,12	5,01	5,53	0,787
По -5	852	1,77	4,01	4,58	5,55	5,91	0,841
По -6	836	2,47	6,76	7,76	8,07	8,22	1,061
По -7	841	2,38	6,37	7,14	7,68	7,89	1,034

Значения прочности при изгибе и прочности на сжатие образцов бетона в возрасте 28 суток находились в диапазоне 0,526÷1,061 МПа и 1,69÷8,22 МПа. Плотность всех образцов пенобетона в сухом состоянии ($W = 0\%$) меньше, чем расчетная влажная плотность ($W = 100\%$), составляющая 900 кг/м³.

На рисунках 4 и 5 показана динамика увеличения прочности на сжатие и изгиб соответственно в зависимости от пропорций ЗУ и ДШ в составах пенобетонной смеси. Кроме того, из рисунка 5 видно, что с увеличением прочности на сжатие прочность на изгиб также увеличивается.

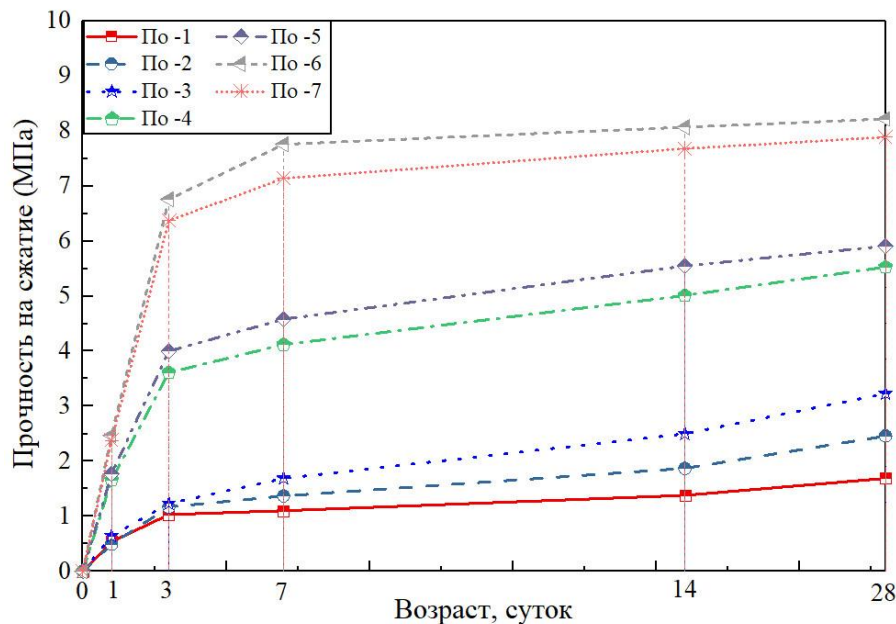


Рисунок 4 – Зависимости прочности пенобетона от возраста образцов

На рисунке 4 показана динамика роста прочности пенобетона на сжатие. При сравнении прочности в возрасте 7 сут. видно, что составы без микрокремнезема (По-1, По-2, По-3) набирают только около 60–70% от прочности при сжатии в возрасте 28 сут, в то время как составы, содержащие микрокремнезем (По-4, По-5, По-6, По-7) имеют прочность почти 85–90% от конечной.

Кроме того, замещение части песка золой-унос или доменным шлаком повышает как прочность при сжатии, так и прочность при изгибе. Это объясняется тем, что зола-унос и доменный шлак обладают высокой пуццолановой активностью, благодаря среднему содержанию в них аморфного диоксида кремния 59,91% и 35,45% соответственно.

Согласно литературным данным [17], известно, что у пенобетона связь между прочностью на сжатие и прочностью на изгиб определяется по следующей формуле:

$$R_{сж} = a \cdot (R_{из})^b, \quad (5)$$

где $R_{сж}$ - прочность бетона на сжатие (МПа) в возрасте 28 суток;

$R_{из}$ - прочность на изгиб (МПа) в возрасте 28 дней;

a, b – коэффициенты.

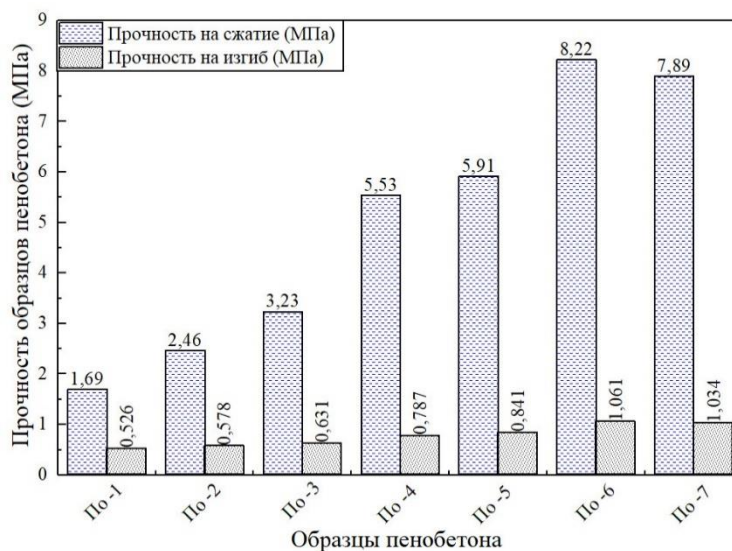


Рисунок 5 – Средние значения прочности на сжатие и изгиб образцов пенобетона в возрасте 28 суток

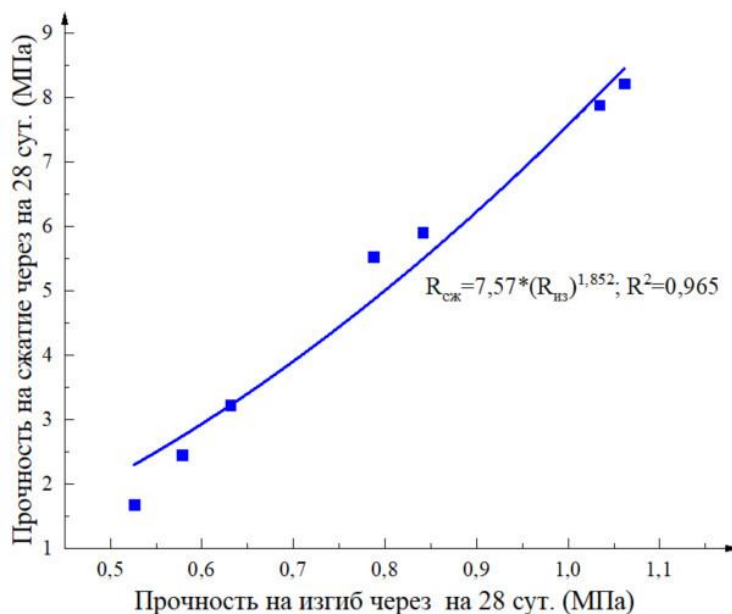


Рисунок 6 – Корреляция прочности на сжатие и изгиб пенобетона

Взаимосвязь между прочностью на сжатие ($R_{сж}$, МПа) и прочностью на изгиб ($R_{из}$, МПа) для исследованных составов показаны на рисунке 6, при этом формула имеет вид:

$$R_{сж} = 7.57 \cdot (R_{из})^{1.852}, \quad (6)$$

Для выявления зависимости между $R_{сж}$ и $R_{из}$, был взят диапазон прочностей в возрасте 28 суток от 1,69 МПа до 8,22 МПа и от 0,526 МПа до 1,061 МПа. Коэффициент зависимости был определен как $R^2 = 0,965$, что указывает на положительную линейную зависимость.

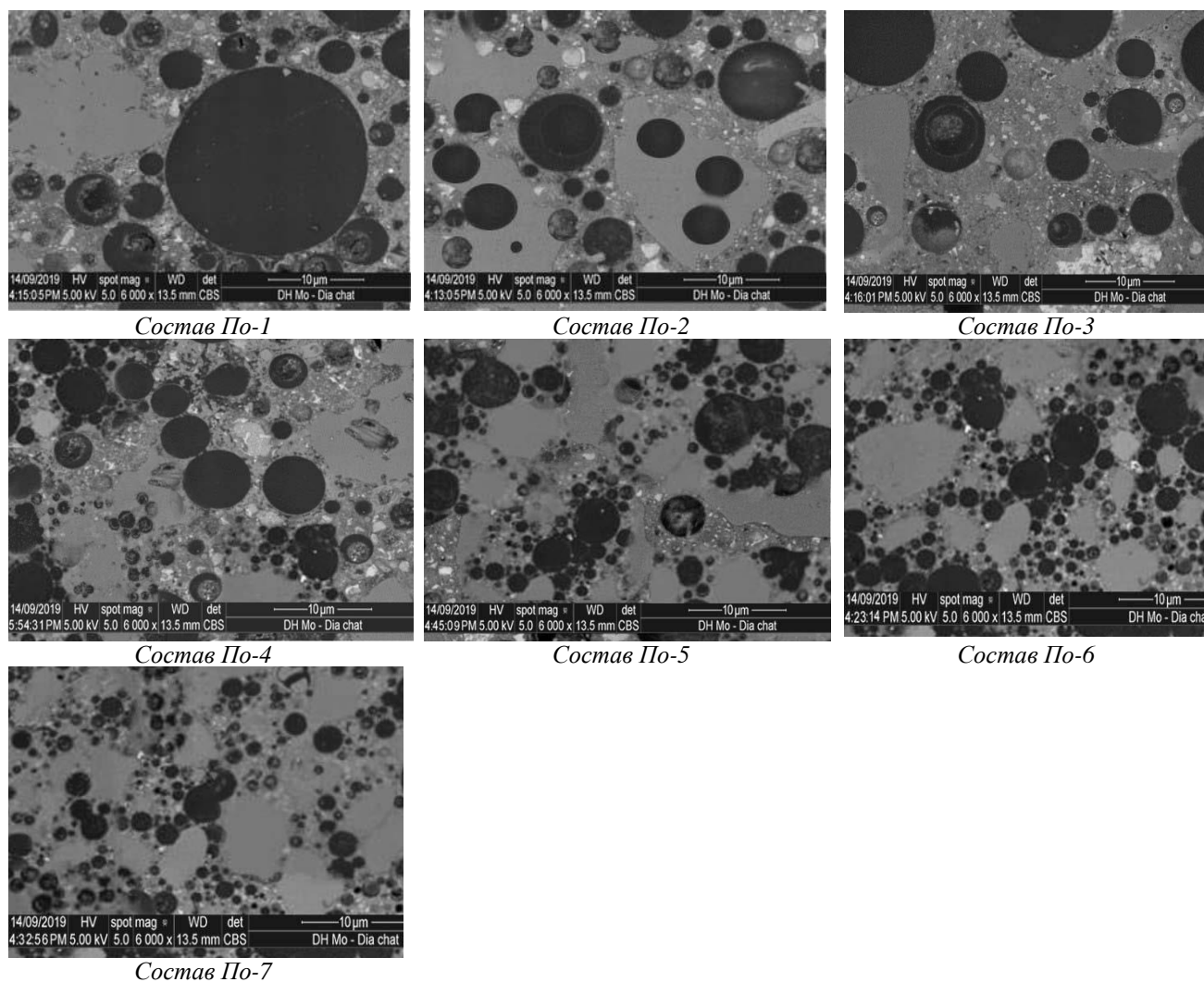


Рисунок 7 – Микроструктура образцов пенобетона

При изучении образцов под микроскопом (рисунок 7) можно видеть, что диаметр пустот сильно изменяется при замене песка на золу-унос и доменный шлак в количестве 30% и 100% по массе, при этом при введении в составы 10% по массе микрокремнезема, поры пенобетона распределяются более равномерно и становятся более округлой формы. Мелкие пузырьки от пенообразования EABASSOC в смесях равномерно распределялись в структуре образцов в процессе перемешивания [11].

4 Выводы

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- прочность на сжатие пенобетона составов По-6, По-7 (8,22 МПа и 7,89 МПа соответственно) сравнима с прочностью керамического кирпича ($\geq 7,5$ МПа), что доказывает возможность замены кирпича на блоки из пенобетона;
- блоки из пенобетона обладают пористостью, что обеспечивают хорошую тепло и звукоизоляцию зданий, а их небольшая масса способствует снижению нагрузки на первый этаж и фундамент здания, снижает общую массу конструкций;
- основными источниками загрязнения окружающей среды являются промышленные отходы, поэтому замена песка в пенобетонах на техногенные отходы, может защитить окружающую среду, а также снизить стоимость материала и конструкций в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neville A M. Properties of Concrete. London: Pitman, second edition. 1973.
2. Шахова Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика. М.: Издательство АСВ, 2010. 248 с.
3. Даулетияров М.С., Жанабаев М.Г., Колесников А.С. Исследование состава и свойств цемента для пенобетона // Достижения науки и образования. 2017. № 1 (14). С. 12-13.
4. TCVN 1450:2009. Hollow clay bricks. Vietnam Construction Standards. Ed. Construction. Hanoi. 2019. 9 p.
5. T.V. Lam., N.T. Chuc., N.X. Hung., D.V. Phi., B.I. Bulgakov., S.I. Bazhenova. Effect of natural pozzolan on strength and temperature distribution of heavyweight concrete at early ages. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 193. 03024. DOI: 10.1051/mateconf/201819303024.
6. Lam Tang Van, Tho Vu Dinh, Dien Vu Kim, Bulgakov B., Aleksandrova O. and Bazhenova S. Combined Effects of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light-weight Concrete Properties. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 251. 01007. DOI: 10.1051/mateconf/201825101007.
7. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.
8. Ruiwen Kong. Properties of high-strength foam concrete. Singapore: National University of Singapore. 2004. 254 p.
9. Шугуан Х., Чжоу В. Ф. Легкие бетоны. М.: Изд. АСВ, 2016. 304 с.
10. Данг Ши Лан, Критарасов Д.С. Пенобетон с добавлением золы рисовой шелухи // Технологии бетонов. 2006. №2. С.22-27.
11. Zhang J., Jiang N., Li H., Wu C. Study on mix proportion design of cement foam concrete. *IOP Conf. Ser.: MSE.* 2018. Vol. 439. 042053. DOI: 10.1088/1757-899X/439/4/042053
12. Ameer A. H. Properties and Microstructure of Pre-formed Foamed Concretes. Nottingham: University of Nottingham. 256 p.
13. Babu D. S. Mechanical and Deformational Properties and Shrinkage Cracking Behaviour of Lightweight Concretes. Singapore: National University of Singapore. 2008. 289 p.
14. ACI 211.4R-2008. Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash. 2010. 13 p.
15. Isa Y., Ömer Ö., Turhan B. Use of granulated blast-furnace slag in concrete as fine aggregate // *ACI Materials Journal.* 2006. Vol 103. Is. 3. Pp. 203-208. DOI: 10.14359/15854
16. Nataraja M C., Kumar P. G. D. Manu A. S., Sanjay M. C. Use of Granulated Blast Furnace Slag as Fine Aggregate in Cement Mortar // *Int. J. Struct. and Civ. Eng. Research.* 2013. Vol. 2. No. 2.
17. Valcuende M., Benito F., Parra C., Miñano I. Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate // *Construction and Building Materials.* 76 (2015) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.029>
18. Chen B., Wu Z., Liu N. Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete // *J. of Mater. in Civ. Eng.* 2012. 24(1). Pp. 113-118.
19. Баженов Ю.М. Технология бетона. Изд. АСВ. М., 2011. 524 с.
20. ASTM C457-1998. Standard test method for Microscopical Determination of Parameters of the AirVoid System in Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials.

REFERENCES

1. Neville A M. Properties of Concrete. London: Pitman, second edition. 1973.
2. Shakhova L.D. Tekhnologiya penobetona. Teoriya i praktika [Technology of foam concrete. Theory and practice]. Moscow: Publishing house ASV, 2010. 248 p.
3. Dauletiyarov M.S., Zhanabayev M.G., Kolesnikov A.S. Issledovaniye sostava i svoystv tsementa dlya peno-betona [The study of the composition and properties of cement for foam concrete]. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2017. No 1 (14). Pp. 12-13.
4. TCVN 1450:2009. Hollow clay bricks. Vietnam Construction Standards. Ed. Construction. Hanoi. 2019. 9 p.
5. T.V. Lam., N.T. Chuc., N.X. Hung., D.V. Phi., B.I. Bulgakov., S.I. Bazhenova. Effect of natural pozzolan on strength and temperature distribution of heavyweight concrete at early ages. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 193. 03024. DOI: 10.1051/mateconf/201819303024.
6. Lam Tang Van, Tho Vu Dinh, Dien Vu Kim, Bulgakov B., Aleksandrova O. and Bazhenova S. Combined Effects of Bottom Ash and Expanded Polystyrene on Light-weight Concrete Properties. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 251. 01007. DOI: 10.1051/mateconf/201825101007.
7. Standard of RF GOST 23732-2011. Water for concrete and mortar. Technical conditions. Moscow: Standartinform. 2014. 7 p. (rus)

8. Ruiwen Kong. Properties of high-strength foam concrete. Singapore: National University of Singapore. 2004. 254 p.
9. Shuguan H., Zhou V.F. Legkiye betony [Lightweight concrete]. Moscow: Publishing ASV, 2016. 304 p. (rus)
10. Dang Shi Lan, Kritarasov D.S. Penobeton s dobavleniyem zoly risovoy shelukhi [Foam concrete with the addition of rice husk ash]. Tekhnologii betonov. 2006. No 2. Pp. 22-27
11. Zhang J., Jiang N., Li H., Wu C. Study on mix proportion design of cement foam concrete. *IOP Conf. Ser.: MSE*. 2018. Vol. 439. 042053. DOI: 10.1088/1757-899X/439/4/042053
12. Ameer A. H. Properties and Microstructure of Pre-formed Foamed Concretes. Nottingham: University of Nottingham. 256 p.
13. Babu D. S. Mechanical and Deformational Properties and Shrinkage Cracking Behaviour of Lightweight Concretes. Singapore: National University of Singapore. 2008. 289 p.
14. ACI 211.4R-2008. Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash. 2010. 13 p.
15. Isa Y., Ömer Ö., Turhan B. Use of granulated blast-furnace slag in concrete as fine aggregate. *ACI Materials Journal*. 2006. Vol 103. Is. 3. Pp. 203-208. DOI: 10.14359/15854
16. Nataraja M C., Kumar P. G. D. Manu A. S., Sanjay M. C. Use of Granulated Blast Furnace Slag as Fine Aggregate in Cement Mortar. *Int. J. Struct. and Civ. Eng. Research*. 2013. Vol. 2, No. 2.
17. Valcuende M., Benito F., Parra C., Miñano I. Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 76 (2015) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.029>
18. Chen B., Wu Z., Liu N. Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete. *J. of Mater. in Civ. Eng.* 2012. 24(1). Pp. 113-118.
19. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: Publishing ASV, 2011. 524 p. (rus)
20. ASTM C457-1998. Standard test method for Microscopical Determination of Parameters of the AirVoid System in Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials.

Информация об авторах

Ву Ким Зиен

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, аспирант кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов».

E-mail: kimdienxdb@gmail.com

Баженова Софья Ильдаровна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов».

E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

Танг Ван Лам

Ханойский горно-геологический университет, Ха Ной, Вьетнам.

кандидат технических наук, кафедры «Факультет гражданского строительства».

E-mail: lamvantang@gmail.com

Information about authors

Vu Kim Dien

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, postgraduate student, Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes.

E-mail: kimdienxdb@gmail.com

Bazhenova Sofya I.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate, Associate Professor of Department of Technologies of Cohesive Materials and Concretes.

E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

Tang Van Lam

Hanoi University of Mining and Geology, Ha Noi, Vietnam, candidate of Faculty of Civil Engineering.

E-mail: lamvantang@gmail.com