

УДК

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-??-??>

ТАНГ ВАН ЛАМ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, преподаватель-исследователь (tangvanlam@humg.edu.vn),  
 ФАМ ДЫК ЛЫОНГ<sup>1</sup>, магистр (luong100x@gmail.com);  
 НГУЕН БА БИНЬ<sup>2</sup>, магистр (babinhconinco3c@gmail.com);  
 Б.И. БУЛГАКОВ<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент (BulgakovBI@mgsu.ru),  
 С.И. БАЖЕНОВА<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент (BazhenovaS.I.@mgsu.ru)

<sup>1</sup> Ханойский горно-геологический университет (18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиен, Ханой, Вьетнам)

<sup>2</sup> Акционерное Общество «Coninco3c» (Нхан Чинь, Тхань Суан, Ханой, Вьетнам)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, Москва, Ярославское ш., д. 26)

## Газобетоны на геополимерном вяжущем из техногенных отходов

Газобетон – материал, широко используемый во Вьетнаме, благодаря ряду преимуществ по сравнению с тяжелым бетоном. В работе представлены некоторые результаты экспериментальных исследований свойств газобетонов, полученных с использованием геополимерного вяжущего из техногенных отходов, образующихся в больших количествах во Вьетнаме. Использованные сырьевые материалы включали золу-уноса ТЭС, доменный шлак, керамический порошок, алюминиевую пудру и активирующий щелочной раствор, состоящий из водных растворов гидроксида и метасиликата натрия. Испытания образцов из газобетонов разработанных составов проводили в соответствии с действующими российскими и вьетнамскими стандартами. Экспериментальные результаты подтвердили возможность получения газобетонов на геополимерном вяжущем на основе многотоннажных техногенных отходов, обладающих средней плотностью в сухом состоянии менее 1600 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии в возрасте твердения 28 сут 18,8–27,9 МПа. При этом, наибольшую прочность показал газобетон, содержащий 0,456 кг/м<sup>3</sup> алюминиевой пудры и 50 мас. % доменного шлака в составе геополимерного связующего, при соотношении активирующего щелочного раствора и активных минеральных добавок, равном 0,4.

**Ключевые слова:** газобетон, алюминиевая пудра, крупнотоннажные техногенные отходы, зола-уноса, доменный шлак, керамический порошок, активирующий щелочной раствор.

**Для цитирования:** Танг Ван Лам, Фам Дык Лыонг, Нгуен Ба Бинь, Булгаков Б.И., Баженова С.И. Газобетоны на геополимерном вяжущем из техногенных отходов // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 00–00.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-00-00>

TANG VAN LAM<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer-Researcher (tangvanlam@humg.edu.vn),  
 PHAM DUC LUONG<sup>1</sup>, Master (luong100x@gmail.com); NGUYEN BA BINH<sup>2</sup>, Master (babinhconinco3c@gmail.com);  
 B.I. BULGAKOV<sup>3</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor (BulgakovBI@mgsu.ru),  
 S.I. BAZHENOVA<sup>3</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor. (BazhenovaS.I.@mgsu.ru )

<sup>1</sup> Hanoi University of Mining and Geology (18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam)

<sup>2</sup> Joint Stock Company "Coninco3c" (Nhan Chinh, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam)

<sup>3</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Aerated Concrete with Geopolymer Binder from Technogenic Waste

Aerated concrete is a material widely used in Vietnam due to several advantages over heavy concrete. This article presents some results of experimental studies of the properties of aerated concrete produced using geopolymer binder from industrial waste generated in large quantities in Vietnam. The raw materials used included thermal power plant fly ash, blast furnace slag, ceramic powder, aluminum powder and an activating alkaline solution consisting of aqueous solutions of sodium hydroxide and sodium metasilicate. Testing of aerated concrete samples of the developed compositions was carried out in accordance with current Russian and Vietnamese standards. Experimental results confirmed the possibility of producing aerated concrete with a geopolymer binder based on large-tonnage technogenic waste, with an average dry density of less than 1600 kg/m<sup>3</sup> and a compressive strength at the age of hardening of 28 days of 18.8–27.9 MPa. At the same time, aerated concrete containing 0.456 kg/m<sup>3</sup> of aluminum powder and 50% wt. showed the greatest strength. blast furnace slag in the composition of the geopolymer binder, with a ratio of activating alkaline solution and active mineral additives equal to 0.4.

**Keywords:** aerated concrete, aluminum powder, large-scale industrial waste, fly ash, blast furnace slag, ceramic powder, activating alkaline solution.

**For citation:** Tang Van Lam, Pham Duc Luong, Nguyen Ba Binh, Bulgakov B.I., Bazhenova S.I. Aerated concrete with geopolymer binder from technogenic waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 00–00. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-00-00>

Главным недостатком традиционных тяжелых цементных бетонов является большая масса изготавливаемых из них изделий и конструкций, вызывающая необходимость сооружения массивных фундаментов [1–3]. Поэтому производство легких бетонов на основе портландцемента стало популярным во всем мире, включая Вьетнам. Такие бетоны используются для изготовления как несущих [4, 5], так и теплоизо-

ляционных конструкций различных зданий и сооружений [6, 7].

Согласно исследованиям [8–10], изделия и конструкции из легких бетонов на портландцементе обладают такими преимуществами, как меньшей толщиной и более низкой массой, что устраняет необходимость сооружения массивных фундаментов, позволяет уменьшить материалоемкость и снизить

стоимость строительства, а также хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами.

В последние годы во многих странах мира с целью снижения потребности в портландцементе особое внимание уделяется исследованию и производству высокопрочных легких бесцементных бетонов на активированных щелочных вяжущих [11–13].

Газобетоны представляют собой легкий бетон с пористой структурой, получаемые путем отверждения сырьевых смесей, состоящих из связующего, газообразователя, тонкодисперсных наполнителей и мелких заполнителей различного происхождения и воды [14, 15]. В строительстве они используются для самых разных целей: изготовления каркасов, полов и стен многоэтажных домов, тонких и изогнутых пластин, предварительно напряженных железобетонных конструкций, утепления стен, потолков и кровли.

Рациональное применение легких и особо легких газобетонов в строительных работах дает большие экономические и технические преимущества: экономия сырья, уменьшение потерь тепла, улучшение микроклимата в жилых и рабочих помещениях. Кроме того, легкий бетон — перспективный материал для сооружений на слабых грунтах и общая стоимость высотных зданий с использованием легкого бетона значительно ниже, чем с использованием других видов бетона, несмотря на его более высокую удельную стоимость [16].

Во всем мире исследования свойств и областей использования легких бетонов развивались в разных направлениях. Многие исследования посвящены получению пенобетонов и газобетонов автоклавного твердения на основе цементных вяжущих, с использованием активных минеральных добавок [17]. Эти исследования демонстрируют возможность изготовления высокопрочного легкого бетона, пригодного для использования при строительстве высотных зданий во Вьетнаме. Однако такой бетон требует сложного процесса пропаривания для получения изделий большой прочности. Также проводились исследования получения легких бетонов из цементного вяжущего и пустотелого заполнителя или пенополистирола. В результате были получены

легкие бетоны со средней плотностью в сухом состоянии менее  $2000 \text{ кг/м}^3$  и средней прочностью при сжатии 5–15 МПа [8, 9].

Во Вьетнаме проведен ряд исследований с целью использованию геополимерных вяжущих для изготовления безобжигового кирпича и легких бетонов [14–16]. В результате этих исследований было получено и изучено геополимерное связующее, состоящее из шлама глиноземного производства и золы-уноса ТЭС в сочетании с активирующим щелочным раствором. Результаты исследования [18] показывают, что легкие бетоны, полученные с использованием активирующего раствора щелочи и пористых гранул, имеют среднюю плотность менее  $1300 \text{ кг/м}^3$  и среднее значение прочности при сжатии порядка 5 МПа. Однако прочность при сжатии бетона, полученного в данном исследовании, все еще достаточно низкая и не соответствует требуемой прочности несущей кирпичной стены класса А<sub>1</sub>, равной 7,5 МПа [7].

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований свойств разработанных газобетонов на основе геополимерного вяжущего, состоящего из золы-уноса, доменного шлака и керамического порошка «ТОТО», полученного с использованием алюминиевой пудры и активирующего щелочного раствора. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность получения газобетонов со средней плотностью в сухом состоянии менее  $1600 \text{ кг/м}^3$  и прочностью при сжатии на 28 сут твердения 18,8–27,9 МПа.

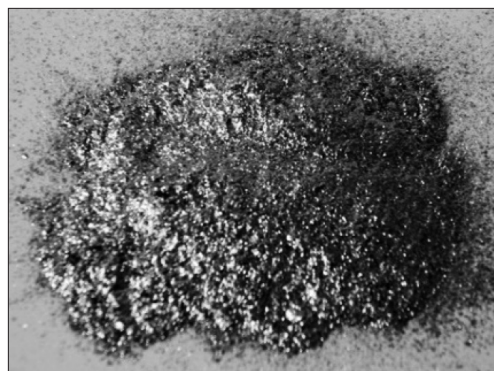
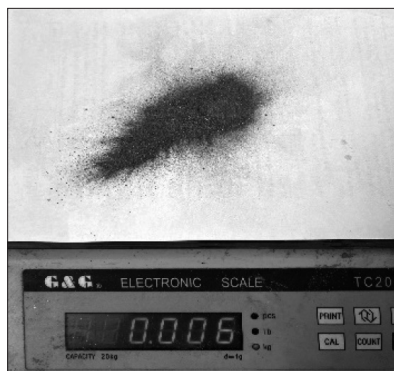
### Используемые материалы

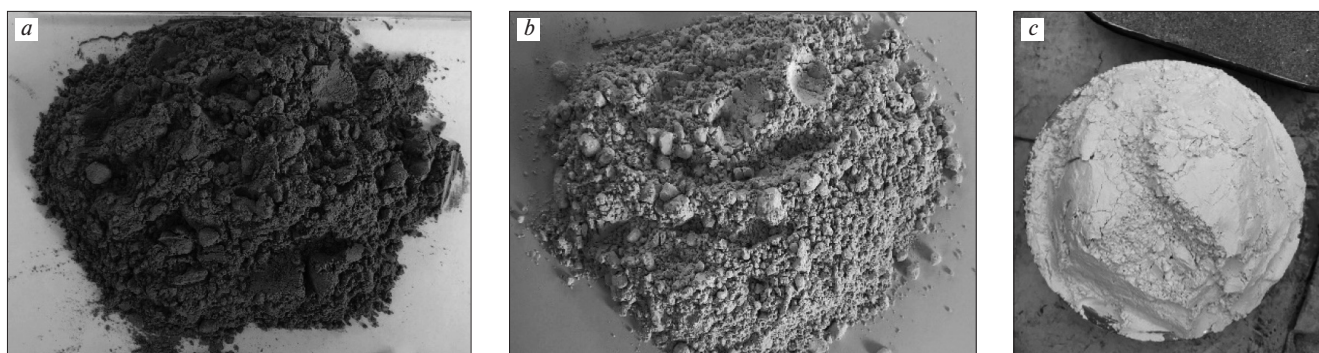
Для получения газобетона были использованы следующие сырьевые материалы.

Алюминиевая пудра (АП) была использована в качестве газообразователя, поризующего бетонную смесь и вызывающего увеличение ее объема. Пудра вьетнамского производства с чистотой 90%, размером частиц 50–75 мкм, истинной плотностью  $2,65 \text{ г/м}^3$  и насыпной плотностью  $1560 \text{ кг/м}^3$  (рис. 1), которая вступала в химическую реакцию с гидроксидом натрия активирующего щелочного раствора с выделением водорода [15–18]:



Рис. 1. Алюминиевая пудра  
Fig. 1. Aluminum powder





**Рис. 2.** Зола-уноса ТЭС «Вунг Анг» (а), доменный шлак металлургического завода «Хоа Фат» (b) и керамический порошок «ТОТО» (с)  
**Fig. 2.** Fly ash from the Vung Ang thermal power plant (a), blast furnace slag from the Hoa Phat metallurgical plant (b) and TOTO ceramic powder (c)



Коэффициент газообразования пудры составлял 1050 л водорода на 1 кг.

Активные минеральные добавки (МДО) для получения геополимерного вяжущего включали многотоннажные техногенные отходы промышленных предприятий Вьетнама в виде золы-уноса тепловой электростанции «Вунг Анг», тонкомолотого доменного шлака металлургического завода «Хоа Фат» и порошкообразного отхода производства сантехнических керамических изделий завода «ТОТО» (рис. 2).

Низкокальциевая зола-уноса ТЭС «Вунг Анг» (ЗУ) класса F, соответствовала требованиям ГОСТ 25818–2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия». Ее влажностью составляла 1,15%.

В процессе производства сантехнических керамических изделий, таких как умывальники, ванны и унитазы на заводе «ТОТО» (Донг Ань – Ханой) ежемесячно образуется около 2000 т. твердых отходов, в основном в виде брака, загрязняющих окружающую среду. Для борьбы с этим негативным явлением бракованные изделия подвергают дроблению, в результате чего получают керамический порошок «ТОТО» (КП) с размером частиц 0,1–0,5 мм.

Химический состав и физические свойства использованных активных минеральных добавок приведены в табл. 1.

Активирующий щелочной раствор (АР) (рис. 3 и 4) состоял из водных растворов гидроксида (NaOH) и метасиликата натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) плотностью, соответственно,  $1,45 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$  и  $1,55 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$ , в соотношении  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2,5$  [11, 12]; его процентный состав по массе: NaOH=12%;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3=30\%$  и вода=58%.

Для снижения водопотребности газобетонной смеси использовали поликарбоксилатный суперпластификатор SR 5000F (SR5000) производства фирмы «Silk Road» (Вьетнам) с плотностью  $1,1 \text{ г/см}^3$  при температуре  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ . Это суперпластификатор типа G, который соответствует требованиям вьетнамского стандарта TCVN 8826:2011.

Вода (В), использованная для приготовления активирующего щелочного раствора, соответствовала требованиям ГОСТ 23732–2011 и TCVN 4506:2012 и имела pH=7,5.

### Определение соотношения компонентов газобетонной смеси

Как известно, плотность и прочность являются важными свойствами газобетона.

В настоящем исследовании соотношения компонентов газобетонной смеси, позволяющие получить газобетон, обладающий требуемыми плотностью и прочностью, были определены в соответствии стандартом ACI 211.4R-2008 [19], с использованием метода абсолютных объемов по формулам (1) и (2) [20–22]:

**Таблица 1**

**Table 1**

**Химический состав и физические свойства золы-уноса, доменного шлака и керамического порошка «ТОТО»**  
**Chemical composition and physical properties of fly ash, blast furnace slag and TOTO ceramic powder**

Показатели	Зола-уноса «Вунг Анг»	Тонкомолотый доменный шлак «Хоа Фат»	Керамический порошок «ТОТО»
Химический состав, мас. %			
$\text{SiO}_2$	54,2	36,3	64,5
$\text{Al}_2\text{O}_3$	23,3	12,6	19,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	9,8	3,4	4,35
$\text{SO}_3$	2,5	5,7	0,11
$\text{K}_2\text{O}$	1,5	0,4	2,16
$\text{Na}_2\text{O}$	1,6	0,3	0,73
$\text{CaO}$	1,2	40,1	5,31
$\text{P}_2\text{O}_5$	1,4	–	0,17
Потери при прокаливании	4,5	1,2	3,17
Физические свойства			
Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	2850	3600	1580
Истинная плотность, $\text{г/см}^3$	2,35	2,92	2,13
Насыпная плотность, $\text{кг/м}^3$	1575	1550	1620

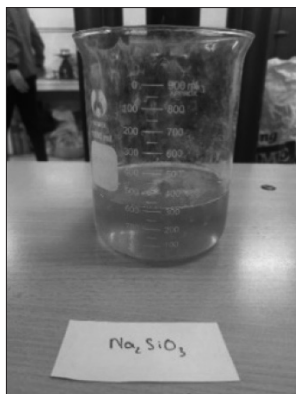




Рис. 3. Гидроксид натрия  
Fig. 3. Sodium hydroxide



Рис. 4. Раствор метасиликата натрия  
Fig. 4. Sodium metasilicate solution



$$D_{\text{газобетона}} = 3Y + \text{ДШ} + \text{КП} + \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{SR5000} \quad (1)$$

$$V_{\text{газа}} = K_{\text{ки}} \cdot \left[ 1000 - \left( \frac{3Y}{\rho_{3Y}} + \frac{\text{ДШ}}{\rho_{\text{ДШ}}} + \frac{\text{КП}}{\rho_{\text{КП}}} + \frac{\text{NaOH}}{\rho_{\text{NaOH}}} + \frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\rho_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}} + \frac{\text{SR5000}}{\rho_{\text{SR5000}}} \right) \right] \quad (2)$$

где  $D_{\text{газобетона}}$  – расчетная плотность образцов пенобетона во влажном состоянии, кг/м<sup>3</sup>; 3Y, ДШ, КП, NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, SR5000 – расходы соответственно золы-уноса, доменного шлака, керамического порошка, водных растворов гидроксида и метасиликата натрия и суперпластификатора, кг.;  $\rho_{3Y}$ ,  $\rho_{\text{ДШ}}$ ,  $\rho_{\text{КП}}$ ,  $\rho_{\text{NaOH}}$ ,  $\rho_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}$  и  $\rho_{\text{SR5000}}$  – соответственно, истинные плотности золы-уноса, доменного шлака, керамического порошка, растворов гидроксида и метасиликата натрия и суперпластификатора, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{газа}}$  – объем выделяющегося газа, м<sup>3</sup>;  $K_{\text{ки}}$  – коэффициент

Таблица 2  
Table 2  
Соотношения по массе сырьевых компонентов для получения газобетонов  
Ratios by mass of raw materials for the production of aerated concrete

Соотношения	КП МДО	3Y МДО	ДШ МДО	SR5000 МДО	AP МДО	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> NaOH
Значения	20%	50%; 40%; 30%	30%; 40%; 50%	1%	0,4	2,5

остаточного газа; по данным исследований [16, 20, 21]  $K_{\text{ки}}=1,1-1,3$  (принят  $K_{\text{ки}}=1,2$  [7, 8, 21, 22]).

#### Методы исследований

Составы газобетонных смесей рассчитывали методом абсолютных объемов с последующей их корректировкой по результатам экспериментальных испытаний.

Среднюю влажность газобетонов в естественном состоянии в возрасте твердения 28 сут определяли в соответствии со стандартом TCVN 9030:2017.

Среднюю плотность газобетонов во влажном и сухом состоянии определяли в соответствии со стандартом TCVN 3115:1993.

Прочностные показатели при сжатии в возрасте твердения 7, 14 и 28 сут и на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут определяли по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» соответственно на образцах-кубах размером 150×150×150 мм и на образцах-призмах 100×100×400 мм с помощью универсальной испытательной установки «ADVANTEST 9».

#### Приготовление газобетонных смесей

Требовалось рассчитать составы сырьевых смесей, позволяющие получить газобетоны на геополимерном связующем, обладающие прочностью при сжатии в возрасте твердения 28 сут не ниже 18 МПа и средней плотностью во влажном состоянии порядка 1600 кг/м<sup>3</sup>.

Требуемую массу алюминиевой пудры ( $m_{\text{ап}}$ ) рассчитывали по формуле (3) [14, 15]:

$$m_{\text{ап}} = \frac{\text{Объем выделяющегося газа, л}}{1050}, \text{ кг} \quad (3)$$

Таблица 3  
Table 3

Составы газобетонных смесей  
The compositions of aerated concrete mixtures

Состав	3Y ДШ	Содержание сырьевых компонентов, кг/м <sup>3</sup>							
		МДО	3Y	ДШ	КП	SR5000	Раствор NaOH	Раствор Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Алюминиевая пудра
№ 1	50/30	1135	568	340	227	11,35	130	324	0,431
№ 2	40/40	1135	454	454	227	11,35	130	324	0,433
№ 3	30/50	1135	340	568	227	11,35	130	324	0,456



**Рис. 5.** Изготовление газобетонных образцов  
**Fig. 5.** Production of aerated concrete samples

На основании вышеизложенного и используя предварительные экспериментальные результаты были выбраны исходные соотношения сырьевых компонентов, которые приведены в табл. 2.

Полученные в результате проведенных расчетов составы трех газобетонных смесей представлены в табл. 3.

Газобетонные образцы выдерживали 1 сут в форме, по истечении которых извлекали, срезали излишки смеси и погружали в бак с водой до достижения возраста испытаний (рис. 5). Определение размеров образцов производилось посредством измерения линейкой; масса определялась взвешиванием на лабораторных весах. Прочность определяли на прессе, скорость нагружения составляла 500 Н/с.

### Результаты

Полученные результаты испытаний образцов разработанных газобетонов на геополимерном вяжущем приведены в табл. 4.

В результате проведенных испытаний установлено, что у исследованных газобетонов на геополимерном связующем в возрасте твердения 28 сут показатели средней влажности в естественном состоянии, а также средней плотности во влажном и сухом состояниях находились в пределах соответственно 10,75–15,39 мас. %, 1602–1619 кг/м<sup>3</sup> и 1540–1572 кг/м<sup>3</sup>, и в соответствии с ТCVN 9029:2017 [23] разработанные газобетоны относятся к легким бетонам со средней плотностью от 500 до 1850 кг/м<sup>3</sup>.

Фотографии поверхности газобетонных образцов после прочностных испытаний, представлены на рис. 6. На приведенных фотографиях видно, что у газобетонов на геополимерном связующем (рис. 6, а) по сравнению с газобетоном на портландцементе (рис. 6, б) при сопоставимом расходе алюминиевой пудры наблюдаются более крупные и неравномерно распределенные поры, что можно объяснить большим газообразованием в результате взаимодействия алюминиевой пудры с гидроксидом натрия, содержащимся в геополимерном вяжущем, чем со свободным гидроксидом кальция портландцемента.

Результаты прочностных испытаний, представленные в табл. 4, свидетельствуют что разработанные

газобетоны на геополимерном вяжущем достигли на 28-е сут твердения среднего значения прочности при сжатии в диапазоне 18,8–27,9 МПа, что соответствует заданному значению этого показателя не ниже 18 МПа. Прочность на растяжение при изгибе в том же возрасте находились в пределах 2,28–4,09 МПа. При этом, повышение прочностных показателей исследованных газобетонов с увеличением содержания доменного шлака в составе геополимерного связующего с 30 до 50 мас. % можно объяснить гидравлической активностью шлака, способствующей появле-

**Таблица 4**  
**Table 4**

**Результаты испытаний образцов разработанных газобетонов на геополимерном вяжущем**  
**The test results of samples of developed aerated concrete with geopolymer binder**

Показатель	Состав					
	№ 1		№ 2		№ 3	
	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Средняя влажность в естественном состоянии в возрасте твердения 28 сут, мас. %	15,39	2,1	12,82	1,4	10,75	1,5
Средняя плотность во влажном состоянии в возрасте твердения 28 сут, кг/м <sup>3</sup>	1602	4,8	1611	5,3	1619	5,5
Средняя плотность в сухом состоянии в возрасте твердения 28 сут, кг/м <sup>3</sup>	1540	5,5	1560	4,8	1572	6,2
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	2,28	1,1	3,35	1,2	4,09	1,5
Прочность при сжатии, МПа:	11,5	2,0	17,1	1,9	19,8	2,3
	15,7	2,4	20,2	2,2	24,5	2,1
	18,8	2,7	24,9	2,6	27,9	2,6

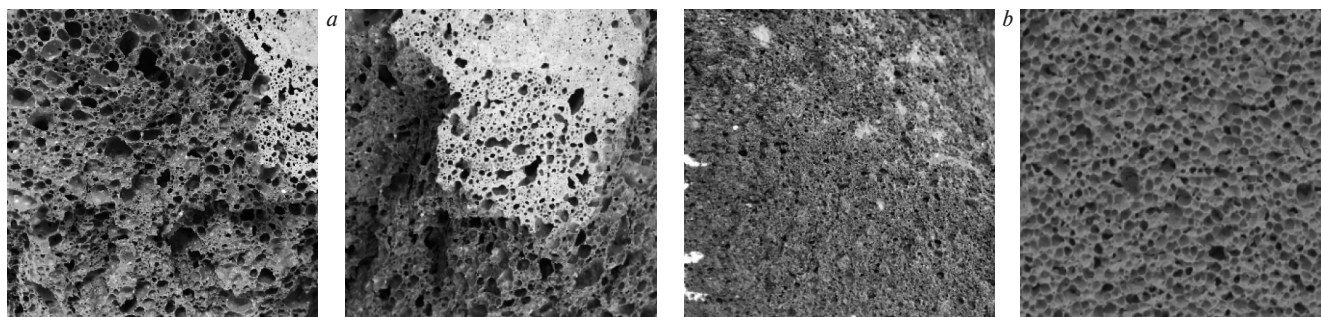


Рис. 6. Поверхности образцов газобетонов, разрушенных в результате прочностных испытаний: а – на геополимерном вяжущем; б – на портланд-цементе

Fig. 6. Surfaces of aerated concrete samples destroyed as a result of strength tests: a – on geopolymer binder; b – on Portland cement

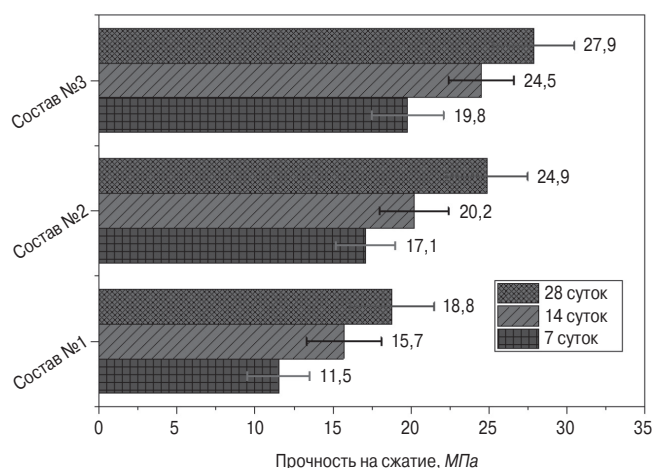


Рис. 7. Зависимость прочности при сжатии газобетонных образцов от времени твердения

Fig. 7. Dependence of compressive strength of aerated concrete samples on hardening time

нию новых С–S–Н-образований, уплотняющих и упрочняющих структуру газобетона.

Рост прочности при сжатии газобетонных образцов на разработанном геополимерном вяжущем показан на рис. 7. Из полученных данных следует, что прочность в возрасте 7 и 14 сут составляет соответственно примерно 60% и 80% от их 28-суточной прочности.

### Выводы

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждена возможность получения газобетонов со средней плотностью в сухом состоянии менее  $1600 \text{ кг/м}^3$  на геополимерном вяжущем, изготовленным с использованием многотоннажных отходов промышленных предприятий Вьетнама и состоящим из низкокальциевой золы-уноса ТЭС «Вунг Анг», доменного шлака металлургического завода «Хоа Фат», порошкообразного отхода производства сантехнических керамических изделий завода «ТОТО» и активирующего щелочного раствора, применяя в качестве газообразователя алюминиевую пудру.

2. Повышение прочностных показателей исследованных газобетонов с увеличением содержания до-

менного шлака в составе геополимерного связующего с 30 до 50 мас. % можно объяснить гидравлической активностью шлака, способствующей появлению новых С–S–Н-образований, уплотняющих и упрочняющих структуру газобетона.

3. Следует продолжить научные исследования с целью установления наиболее оптимальных решений использования разработанных газобетонов на геополимерном вяжущем в реальных строительных объектах во Вьетнаме.

### Список литературы / References

1. Truong Thi Kim Xuan, Nguyen Duy Hieu, Nguyen Huu Nhan. Use of lightweight concrete in construction work in Vietnam. Faculty of Civil Engineering. University of Architecture, Hanoi, 2010, pp. 10–18. (In Vietnamese).
2. Nguyen Van Chanh. The use of lightweight concrete in housing construction for sustainable urban development. Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, 2012. 56 p. (In Vietnamese).
3. Vu Kim Dien, Tang Van Lam, Bazhenova S.I. Review of properties and applications of foam concrete. Proceedings of the National Conference on Land and Natural Resources with Sustainable Development (ERSD 2020). Hanoi. 11/12/2020. (In Vietnamese).
4. Nguyen Van Phi4u, Nguyen Van Chanh. Lightweight concrete technology. Ed. Construction. 2005. 100 p. (In Vietnamese).
5. Nguyen Cong Thang, Pham Huu Hanh. Research to improve the quality of autoclaved aerated concrete used for super-tall buildings in Vietnam. *Journal of Construction Science and Technology*. 2014. No. 21. pp. 75–80. (In Vietnamese).
6. Dao Van Dung. Textbook on the technology of new materials in construction. Ed. Construction. 2021. 210 p. (In Vietnamese).
7. Nguye Duy Hieu. Technology for the production of high-quality lightweight concrete with hollow aggregate. Ed. Construction. 2016. 175 p. (In Vietnamese).
8. Vilches J. The development of novel infill materials for composite structural assemblies. Doctoral dissertation.



- Auckland University of Technology. 2014. (In Vietnamese).
9. Saidani M., Ogbologugo U., Coakley E., George S. Lightweight cementitious (GEM-TECH) structural material. *Conference: CITEDUB3 International Congress on Technology and Concrete Durability*. Algiers, Algeria. September 2016, pp.186-195.
10. Chen G., Li F., Geng J., Jing P., Si, Z. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 294. 123572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123572>
11. Nguyen Thanh Bang, Dinh Hoang Quan, Nguyen Tien Trung. Research into the use of an environmentally friendly combination of fly ash and blast furnace slag to produce concrete (without the use of cement) with an activated alkali binder suitable for irrigation and marine use. National level research project code KC.08.21/16-20.2021. 287 p. (In Vietnamese).
12. Tang Van Lam, Bulgakov B.I. The possibility of using ash-slag waste and rice husk ash on geopolymer concrete for the construction of structures in Vietnam. *BDU Journal of Science & Technology*. 2021. Vol. 03. No. 01, pp. 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218>
13. M.M. Al Bakri Abdullah, K. Hussin, M. Bnhussain, K.N. Ismail, Z. Yahya, and R.A. Razak. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent. *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13. No. 6, pp. 7186–7198. Doi: 10.3390/ijms13067186
14. Nguyen Trong Lam, Pham Huu Hanh. Research to improve the quality of autoclaved aerated concrete used for super-tall buildings in Vietnam. *Journal of Construction Science and Technology*. No. 21. 2014, pp. 75–80. (In Vietnamese).
15. Tang Van Lam, Dien Vu Kim, Hung Ngo Xuan, Tho Vu Dinh, B. Bulgakov, S. Bazhenova. Effect of aluminium powder on light-weight aerated concrete properties. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. 02005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702005>
16. Ву Ким Зиен. Ячеистые бетоны с использованием плазмомодифицированного доменного шлака. Дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2023. 168 с.
16. Wu Kim Zien. Cellular concrete using plasma-modified blast furnace slag. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2023. 168 p. (In Russian).
17. Zhang J., Jiang N., Li H., Wu C. Study on mix proportion design of cement foam concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 439. No. 4. 2018.042053. doi:10.1088/1757-899X/439/4/042053
18. Trinh Ngoc Duy. Study of mechanical and mechanical properties of geopolymer mortar for lightweight brick production. Thesis for the degree of Master of Technical Sciences. Ho Chi Minh City Technical Pedagogical University. Ho Chi Minh City, 2016. 87 p. (In Vietnamese).
19. ACI 211.4R-2008. Guide for selecting proportions for high-strength concrete using portland cement and other cementitious materials. 2010. 13 p.
20. C. Shi. Composition of materials for use in cellular lightweight concrete and methods thereof. *Adv. Mater. Technol. LLC*. 2002. Vol. 1. No. 12, pp. 3–7.
21. Kim D.V., Cong L.N., Van L.T., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic-mineral additives. *Journal of Physics: Conference Series. Modelling and Methods of Structural Analysis*. Vol. 1425. 2020, pp. 12–22. Doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012199
22. Hamad J., Materials A., Production, properties and application of aerated lightweight concrete: review. *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2, pp. 152–158.
23. Vietnam National Standard TCVN 9029:2017. Lightweight concrete. Products made from non-autoclaved foam and aerated concrete. Technical requirements. 16 p. (In Vietnamese).