

МРНТИ 67.09.33

Н.М. Беккалиев<sup>1</sup> – основной автор, | ©  
Д.С. Дуйсембинов<sup>2</sup>, Е.Е. Сабитов<sup>3</sup>, А.А. Жумагулова<sup>4</sup>



<sup>1</sup>Магистр, Докторант, <sup>2,3,4</sup>Канд. техн. наук, доцент

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-7745-1358> <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-6118-5238>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-3784-8657> <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-6310-2501>



<sup>1,2,3,4</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,



г. Астана, Казахстан



<sup>1</sup>[Nurlan\\_b-90@mail.ru](mailto:Nurlan_b-90@mail.ru)

<https://doi.org/10.55956/ECUX7838>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПУДРЫ НА ПАРАМЕТРЫ, ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА ГАЗОБЕТОНА

**Аннотация.** Производство газобетонов осуществляется с использованием газообразующих добавок – преимущественно алюминиевой пудры или пасты, которые вступают в реакцию с гидроксидом кальция в водной среде, в результате чего формируются поры за счет выделения водорода. Объем вводимого газообразователя подбирается в зависимости от требуемых характеристик конечного продукта. Целью данной работы является исследование физико-механических свойств легкого газобетона, полученного с применением золы-уноса с низким содержанием кальция и доменного шлака. Установлено, что увеличение дозировки алюминиевой пудры в составе смеси приводит к снижению плотности материала вследствие роста пористости, что, в свою очередь, негативно отражается на его прочности при сжатии и изгибе.

**Ключевые слова:** газобетон, ячеистый бетон, алюминиевая пудра, производственные отходы.



Беккалиев, Н.М. Исследование влияния добавления алюминиевой пудры на параметры, формирование структуры и свойства газобетона [Текст] / Н.М. Беккалиев, Д.С. Дуйсембинов, Е.Е. Сабитов, А.А. Жумагулова // Механика и технологии / Научный журнал. – 2025. – №3(89). – С.255-262. <https://doi.org/10.55956/ECUX7838>

**Введение.** Одними из наиболее массовых промышленных отходов в мире являются топливная зола-уноса и доменный шлак. Зола-уноса образуется в виде мелкодисперсных частиц при сжигании угля на тепловых электростанциях и уносится с дымовыми газами [1,2]. Эти частицы преимущественно состоят из оксидов кремния, алюминия, железа и серы, а также могут включать остатки несгоревшего угля [3,4]. Доменный шлак представляет собой побочный продукт производства чугуна из рудного сырья, формирующийся в виде гранул размером от 10 до 200 мм [5,6].

В условиях активной индустриализации и ускоренного роста производства электроэнергии и металлургической продукции в нашей стране наблюдается значительное увеличение объема таких отходов. Это создает

проблемы с утилизацией и размещением на полигонах, особенно в условиях ограниченной территории [7]. При неправильном хранении зола и шлаки могут загрязнять окружающую среду, включая водоемы и почвы [8].

В связи с этим, одной из приоритетных задач в стране становится реализация принципов циркулярной экономики, предполагающей ресурсосбережение и повторное использование промышленных побочных продуктов. Использование золы-уноса и шлаков в строительной отрасли, в частности в производстве бетонных материалов, представляет собой не только экологически, но и экономически целесообразное решение.

Газобетон – это ячеистый материал, получаемый путем газообразования внутри цементной смеси. При введении алюминиевых порошков или паст в состав образуется легкая пористая структура, востребованная в строительстве. Такой материал применяется как для тепло- и звукоизоляции [2,9], так и в несущих и огнестойких конструкциях, а также позволяет снижать общий вес строительных элементов и нагрузку на фундамент [3,4], что особенно актуально в сейсмоопасных районах. Благодаря этим свойствам, снижаются затраты на строительство [10].

Типичный легкий бетон обладает сухой плотностью в пределах от 300 до 2000 кг/м<sup>3</sup>, а его прочность на сжатие спустя 28 суток твердения варьируется от нескольких мегапаскалей до 60 МПа [11].

Целью настоящего исследования являлось выявление зависимости физико-механических характеристик легкого газобетона от содержания алюминиевой пудры при использовании золы-уноса и доменного шлака в качестве сырьевых компонентов.

**Условия и методы исследований. Применяемые материалы.** Для изготовления легких газобетонных образцов использовались следующие компоненты:

1. Портландцемент марки ЦЕМ II 42,5 Н, произведённый на предприятии «Стандарт цемент» (г. Шымкент). Этот цемент имел истинную плотность 3,15 г/см<sup>3</sup> и удельную поверхность 3650 см<sup>2</sup>/г. Химический и минералогический составы клинкера представлены в таблицах 1 и 2.

2. Топливная зола-уноса (ЗУ) – материал низкокальциевой (кислой) природы, обладающий повышенной пуццоланической активностью за счёт высокого содержания аморфного кремнезёма.

3. Доменный шлак (ДШ) – побочный продукт металлургической промышленности, использовавшийся в качестве мелкофракционного заполнителя. Он также обладает гидравлической активностью и способствует увеличению прочности.

Химико-физические характеристики доменного шлака и топливной золы-уноса приведены в таблице 3.

Таблица 1

Химический состав клинкера портландцемента, %

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	ППП
62,23	22,27	5,37	4,12	2,40	2,63	0,98

Примечание: PPP – потери при прокаливании.

Таблица 2

## Минералогический состав клинкера, %

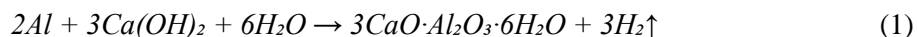
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Примеси
56,3	23,4	4,7	12,4	3,2

Таблица 3

## Свойства золы-уноса и доменного шлака

Показатель	Зола	Доменный шлак
Химический состав, %		
SiO <sub>2</sub>	54,2	36,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,3	12,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,8	3,4
SO <sub>3</sub>	2,5	5,7
K <sub>2</sub> O	1,5	0,4
Na <sub>2</sub> O	1,6	0,3
CaO	1,2	40,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,4	–
Потери при прокаливании	4,5	1,2
Физические свойства		
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	5,82	0,37
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,35	2,92
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1575	1550
Водопотребность, % от массы	101	145

Алюминиевая пудра (АП) использовалась в качестве газообразующей добавки. Размер её частиц составлял 50-75 мкм. Истинная плотность – 2650 кг/м<sup>3</sup>, а насыпная – 1560 кг/м<sup>3</sup>. При взаимодействии с гидроксидом кальция в присутствии воды пудра вступает в реакцию с образованием водорода по следующей формуле:



Пластифицирующая добавка: суперпластификатор SR 5000F на основе поликарбоксилатов от компании «Super RD», плотность раствора которого составляла 1,12 г/см<sup>3</sup> при 20 ± 5°C. Этот пластификатор соответствует категории G по ASTM C494.

Вода, использованная для замешивания, соответствовала стандартам ГОСТ 23732-2011.

*Методика приготовления смесей.* Композиции газобетонных смесей рассчитывались методом абсолютных объемов с последующей экспериментальной корректировкой. Среднюю плотность определяли по TCVN 3115:1993, а пористость – в соответствии с ГОСТ 12730.4-2020.

Прочность на сжатие (обозначение  $f_{cs}$ , МПа) определялась на кубических образцах 150×150×150 мм после 28 суток нормального твердения согласно ГОСТ 10180-2012. Прочность на изгиб оценивалась на призмах размером 100×100×400 мм.

Соотношения компонентов газобетонной смеси приведены в таблице 4.

Таблица 4

## Составные пропорции (относительно массы цемента)

Компонент	ДШ/Ц	ЗУ/Ц	SR5000/Ц	АП/Ц	В/Ц	Воздух, объем %
Значение	2,0	0,3	0,015	0,0025-0,01	0,5	2%

В рамках эксперимента применялись четыре варианта составов с различным количеством алюминиевой пудры – 0,25%, 0,5%, 0,75% и 1% от массы цемента (табл. 5).

Таблица 5

Составы бетонных смесей (в кг/м<sup>3</sup>)

Состав	АП, %	Ц	ДШ	ЗУ	В	SR5000	АП
№1	0,25	400	800	120	200	6	1
№2	0,50	400	800	120	200	6	2
№3	0,75	400	800	120	200	6	3
№4	1,00	400	800	120	200	6	4

**Результаты исследований и их обсуждение.** В ходе эксперимента было установлено, что изменение количества алюминиевой пудры оказывает существенное влияние на характеристики легкого газобетона, особенно на его пористую структуру, плотность и механическую прочность.

*Структура пористой системы.* Микроструктурный анализ показал, что увеличение дозировки алюминиевой пудры приводит к интенсификации газообразования в смеси, что выражается в формировании более развитой пористой структуры. Однако после достижения определённого уровня (0,75–1,00% от массы цемента) избыточное газообразование начинает вызывать слияние пор и нарушение однородности, что снижает прочностные показатели.

*Изменение плотности.* Наблюдается устойчивая тенденция к снижению плотности образцов при увеличении количества алюминиевой пудры. Это объясняется увеличением количества водорода, выделяющегося при взаимодействии пудры с гидроксидом кальция, и, как следствие, формированием большего объема замкнутых пор. Минимальная плотность зафиксирована при дозировке АП = 1,0%.

*Прочностные характеристики.* Результаты испытаний на сжатие и изгиб приведены в таблице 6. Отмечается, что оптимальный уровень прочности достигается при добавлении алюминиевой пудры в пределах 0,—0,75%. При дальнейшем увеличении содержания газообразующей добавки прочность резко снижается, что связано с ухудшением связности цементного матрикса и увеличением числа макропор. Влияние содержания алюминиевой пудры на прочность газобетонов на сжатие приведены на рисунках 1 и 2.

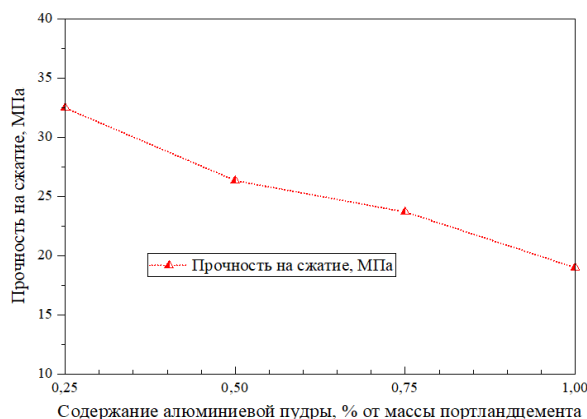


Рис. 1. Влияние содержания алюминиевой пудры на прочность газобетонов на сжатие в возрасте 28 суток

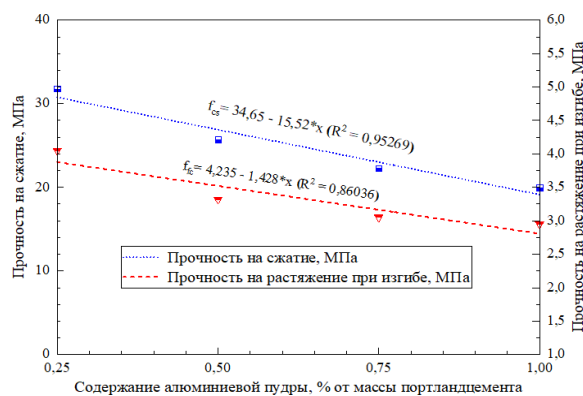


Рис. 2. Зависимость прочностных показателей газобетонов на сжатие и на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток от содержания алюминиевой пудры

Таблица 6

Свойства легкого газобетона в зависимости от количества алюминиевой пудры

Состав	АП, %	Средняя плотность, кг/м³	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа
№1	0,25	1295	7,75	1,41
№2	0,50	1240	8,50	1,58
№3	0,75	1155	6,96	1,26
№4	1,00	1095	5,38	1,02

Наибольшее значение прочности на сжатие (8,50 МПа) было получено при дозировке алюминиевой пудры 0,5%. При дальнейшем увеличении её содержания прочность уменьшалась, несмотря на снижение плотности. Это подтверждает, что оптимальный баланс между плотностью и прочностью достигается при умеренном газообразовании.

**Пористость и распределение пор.** Микрофотографии (рис. 3) показывают равномерное распределение мелких сферических пор в образцах с 0,5% алюминиевой пудры. В то же время при 1,0% наблюдается наличие крупных пор и участков порового слияния, указывающих на нестабильность структуры. Таким образом, увеличение содержания алюминиевой пудры способствует снижению плотности и улучшению теплоизоляционных свойств, однако чрезмерное её количество снижает прочность из-за ухудшения однородности пористой структуры.

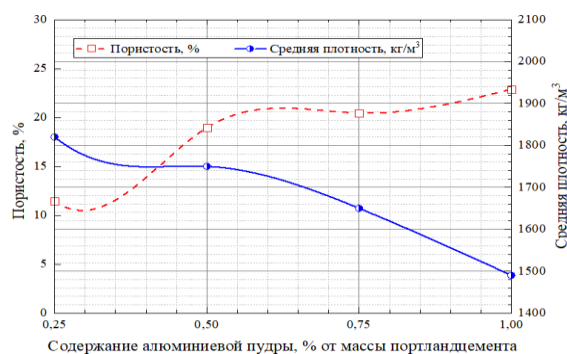


Рис. 3. Влияние содержания алюминиевой пудры на среднюю плотность и пористость газобетонов

Для корреляции полученных экспериментальных данных был использован метод линейной регрессии, в результате чего были получены уравнения (2) и (3) со значениями коэффициента корреляции ( $R^2$ ) соответственно 0,95269 и 0,86036 для прочности газобетонных образцов на сжатие и на растяжение при изгибе в зависимости от содержания алюминиевой пудры:

– для прочности на сжатие в возрасте 28 суток:

$$f_{cs} = 34,65 - 15,52 \cdot x \quad (R^2 = 0,95269) \quad (2)$$

– для прочности на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток:

$$f_{fs} = 4,235 - 1,428 \cdot x \quad (R^2 = 0,86036) \quad (3)$$

где,  $x$  соответствует содержанию алюминиевой пудры в бетонной смеси, в % от массы портландцемента.

**Закключение.** На основе анализа экспериментальных данных установлено, что увеличение количества алюминиевой пудры в составе легких газобетонных смесей оказывает существенное влияние на структуру и свойства получаемого материала. Рост содержания алюминиевой пудры приводит к интенсификации процессов газовыделения в реакционной среде за счёт более активного взаимодействия алюминия с гидроксидом кальция. Это способствует увеличению объема вовлеченного воздуха, что отражается на росте общей пористости бетона. Как следствие, наблюдается систематическое снижение средней плотности исследуемых образцов. Вместе с тем, увеличение пористости влечёт за собой ухудшение прочностных характеристик бетона – как при сжатии, так и при изгибе, что подтверждается результатами испытаний на 28 сутки твердения.

Несмотря на уменьшение прочностных показателей, газобетоны, изготовленные с различным содержанием алюминиевой пудры, сохранили свои конструкционные свойства в соответствии с требованиями ГОСТ 25820-2021. По значениям средней плотности и предела прочности на сжатие, все исследованные составы относятся к классу конструкционных легких бетонов. Это позволяет рассматривать их как потенциально пригодные материалы для изготовления сборных железобетонных изделий, в частности – стеновых панелей, применяемых в строительстве многоэтажных зданий, где особенно важны такие параметры, как снижение массы конструкций и повышение их теплоизоляционных свойств.

Использование в составе газобетонной смеси золы-уноса и доменного гранулированного шлака вместо части портландцемента позволило не только снизить расход вяжущего вещества, но и обеспечить более устойчивый с экологической точки зрения подход к производству строительных материалов. Зола-уноса и доменный шлак, обладающие высокой пуццоланической активностью, эффективно вовлекаются в процессы гидратации, формируя дополнительные прочностные соединения, в том числе гидросиликаты кальция. Таким образом, наряду с улучшением экологических характеристик, достигается значительное снижение себестоимости материала за счёт утилизации промышленных отходов.

### Список литературы

1. Малиновский, Б.Н. Технология ячеистых бетонов [Текст] / Б.Н. Малиновский. – М. : Стройиздат, 1986. – 320 с.
2. Юнусов, Л.Р. Легкие бетоны на основе золы-уноса [Текст] / Л.Р. Юнусов, И.А. Ахмедзянов. – Казань : КГАСУ, 2009. – 185 с.
3. Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. Concrete / 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2003. – 644 p.
4. Константинов, Л.А. Газобетоны: состав, свойства, применение [Текст] / Л.А. Константинов, В.Н. Кулаков. – СПб.: СПбГАСУ, 2015. – 214 с.
5. Lukpanov R.E., Dusembinov D.S., Yenkebayev S.B., Tsygulyov D.V. Ratio of the ash concentration to the cement binder in the composition of concrete with the use of a modified additive // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 35-41.
6. Sabitov Y.Y., Dyusseminov D.S., Zhumagulova A.A., Bazarbayev D.O., Lukpanov R.E. Composite non-autoclaved aerated concrete based on an emulsion // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – P. 132-138.
7. Lukpanov R., Dyusseminov D., Altynbekova A., Yenkebayev S., Zhumagulova A. Investigation of effect of proposed two-stage foam injection method and modified additive on workability of foam concrete // Materials. – 2024. – P. 72-79.
8. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013.07.01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 47 с.
9. ГОСТ 12730.4-2020. Бетоны. Метод определения пористости. – Введ. 2021.09.01. – М. : Стандартинформ, 2020. – 21 с.
10. ГОСТ 25820-2021. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – Введ. 2022.09.01. – М. : Стандартинформ, 2021. – 15 с.
11. TCVN 3115-2022. Concrete – Method for determining density. – Hanoi: Ministry of Science and Technology of Vietnam, 2022. – 12 p.

*Материал поступил в редакцию 06.05.25, принят 02.09.25.*

**Н.М. Беккалиев<sup>1</sup>, Д.С. Дуйсембинов<sup>1</sup>, Е.Е. Сабитов<sup>1</sup>, А.А. Жумагулова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетіні, Астана қ., Қазақстан*

### **АЛЮМИНИЙ ҰНТАҒЫНЫҢ БЕТОННЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНЕ, ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ**

**Аңдатпа.** Газдалған бетон өндірісі газ түзетін қоспаларды – негізінен алюминий ұнтағы немесе паста көмегімен жүзеге асырылады. Олар кальций гидроксидімен сулы ортада әрекеттеседі, нәтижесінде сутегінің бөлінуіне байланысты кеуектер пайда болады. Енгізілген газ түзетін агенттің көлемі соңғы өнімнің қажетті сипаттамаларына байланысты таңдалады. Бұл жұмыстың мақсаты – төмен кальцийлі күлді және домна пешінің қожын қолдану арқылы алынған жеңіл газды бетонның физика-механикалық қасиеттерін зерттеу. Қоспадағы алюминий ұнтағының дозасын ұлғайту кеуектіліктің жоғарылауынан материалдың тығыздығының төмендеуіне әкелетіні анықталды, бұл өз кезегінде оның қысу және иілу кезіндегі беріктігіне теріс әсер етеді.

**Тірек сөздер:** газдалған бетон, ұялы бетон, алюминий ұнтағы, өндірістік қалдықтар.

N.M. Bekkaliyev<sup>1</sup>, D.S. Dyusseminov<sup>1</sup>, Y.Y. Sabitov<sup>1</sup>, A.A. Zhumagulova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

#### STUDY OF THE EFFECT OF ALUMINUM POWDER ON THE PARAMETERS, STRUCTURE AND PROPERTIES OF CONCRETE

**Abstract.** The production of aerated concrete is carried out using gas-forming additives – mainly aluminum powder or paste, which react with calcium hydroxide in an aqueous medium, resulting in pore formation due to the release of hydrogen. The amount of gas-forming agent introduced is selected depending on the required characteristics of the final product. The purpose of this study is to investigate the physical and mechanical properties of lightweight aerated concrete obtained with the use of low-calcium fly ash and blast furnace slag. It was found that increasing the dosage of aluminum powder in the mixture leads to a decrease in the density of the material due to increased porosity, which, in turn, has a negative effect on its compressive and flexural strength.

**Keywords:** aerated concrete, cellular concrete, aluminum powder, industrial waste.

#### References

1. Malinovskij, B.N. Tekhnologiya yacheistyx betonov [Technology of cellular concretes]. – Moscow : Strojizdat, 1986. – 320 p. [in Russian].
2. Yunusov, L.R., Akhmedzyanov, I.A. Legkie betony na osnove zoly-usosa [Lightweight concretes based on fly ash]. – Kazan KGASU, 2009. – 185 p. [in Russian].
3. Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. Concrete / 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2003. – 644 p.
4. Konstantinov, L.A., Kulakov V.N. Gazobeton: sostav, svoystva, primeneniye [Aerated concretes: composition, properties, application]. – Saint Petersburg : SPbGASU, 2015. – 214 p. [in Russian].
5. Lukpanov R.E., Dusembinov D.S., Yenkebayev S.B., Tsygulyov D.V. Ratio of the ash concentration to the cement binder in the composition of concrete with the use of a modified additive // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 35-41.
6. Sabitov Y.Y., Dyusseminov D.S., Zhumagulova A.A., Bazarbayev D.O., Lukpanov R.E. Composite non-autoclaved aerated concrete based on an emulsion // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – P. 132-138.
7. Lukpanov R., Dyusseminov D., Altynbekova A., Yenkebayev S., Zhumagulova A. Investigation of effect of proposed two-stage foam injection method and modified additive on workability of foam concrete // Materials. – 2024. – P. 72-79.
8. GOST 10180-2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nyy obraztsam [Concretes. Methods for determination of strength on control samples]. – Introduced: 2013.07.01. – Moscow : Standartinform, 2012. – 47 p. [in Russian].
9. GOST 12730.4-2020. Betony. Metod opredeleniya poristosti [Concretes. Method for determination of porosity]. – Introduced: 2021.09.01. – Moscow : Standartinform, 2020. – 21 p. [in Russian].
10. GOST 25820-2021. Betony. Klassifikatsiya i obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Concretes. Classification and general technical requirements]. – Introduced: 2022.09.01. – Moscow : Standartinform, 2021. – 15 p. [in Russian].
11. TCVN 3115-2022. Concrete – Method for determining density. – Hanoi: Ministry of Science and Technology of Vietnam, 2022. – 12 p.