



Research Article

Received: August 15, 2022

Accepted: September 10, 2022

Published: September 15, 2022

ISSN 2658-5553

Thermal performance of external wall panel made of cold-bonded fly ash aggregate concrete

Usanova, Kseniia Yuryevna¹ ¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Correspondence: * email plml@mail.ru

Keywords:

Concrete; Fly ash; Wall panel; Thermal conductivity; Aggregate; R-value; Building materials; Construction

Abstract:

The object of research is an external wall panel made of cold-bonded fly ash aggregate concrete. The purpose of this work is to study thermal performance of the external wall panel made of cold-bonded fly ash aggregate based on fly ash from Novosibirskaya GRES Thermal Power Plant. **Method.** The panel under study consists of three layers: an inner layer of concrete with cold-bonded fly ash aggregate, an intermediate layer of extruded polystyrene, and an outer layer of heavy concrete. For the thermotechnical calculation of the external wall panel, the thermal conductivity coefficient of cold-bonded fly ash aggregate concrete was experimentally determined using the thermal conductivity meter ITS-1 "150". Specimens were made in the form of plates with dimensions of 150x150x30 mm. Demoulding was carried out on the second day after the specimens were made. Subsequently, the samples were stored under normal conditions at a temperature of 20 ± 2 °C and a relative air humidity of at least 60%. After that, the thickness of the insulation was calculated for the panel under study. The thermal performance of the studied external wall panel was compared with a typical three-layer reinforced concrete panel. **Results.** The thermal conductivity coefficient of cold-bonded fly ash aggregate concrete was experimentally determined, which amounted to $0.94 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{°C})$. It is shown that in terms of thermal performance, the external wall panel made of cold-bonded fly ash aggregate concrete is not inferior to the well-known three-layer reinforced concrete wall panel. With the same thermal characteristics of the studied external wall panel, a heat-insulating layer of extruded polystyrene of a smaller thickness is required - 90 mm instead of 100 mm for a three-layer reinforced concrete panel.

1 Introduction / Введение

Бетонные и железобетонные стеновые панели представляют собой конструкции заводского изготовления с высокой степенью отделочной готовности [1]. Область применения бетонных и железобетонных стеновых панелей охватывает различные виды зданий: жилые здания средней этажности и многоэтажные, индивидуальное строительство, промышленные здания и т.д. [2], [3], [4].

Трехслойные стеновые панели используются в качестве ограждающих конструкций [5], [6]. В таких панелях внешний и внутренний слои выполняются из бетона, а промежуточный слой является теплоизоляционным [7]. По конструктивному решению наружные стеновые панели разделить на три основные группы: глухая панель, панель с проемом под оконный блок и панель с проемом под балконный блок (Рис. 1-3).

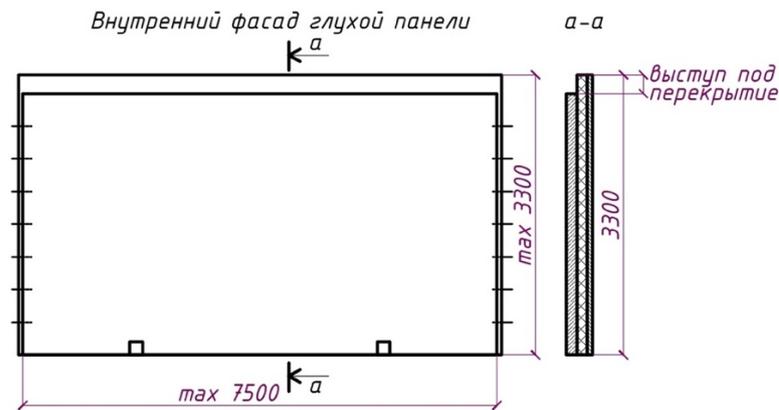


Рис. 1 - Схема глухой наружной стеновой панели
Fig. 1 - Scheme of blank external wall panel

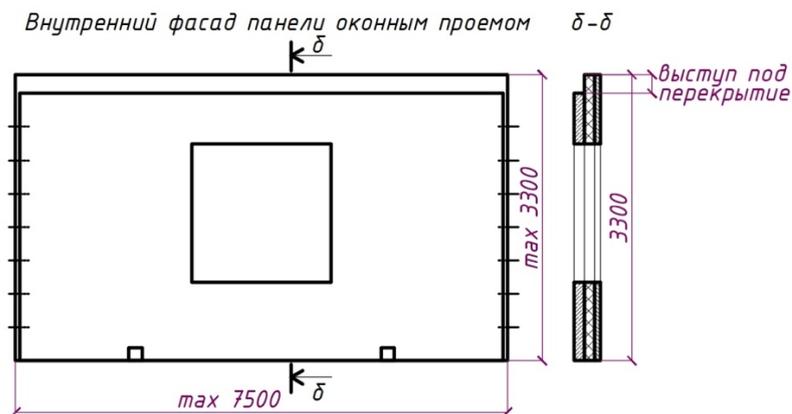


Рис. 2 - Схема наружной стеновой панели с оконным проемом
Fig. 2 - Scheme of external wall panel with window opening

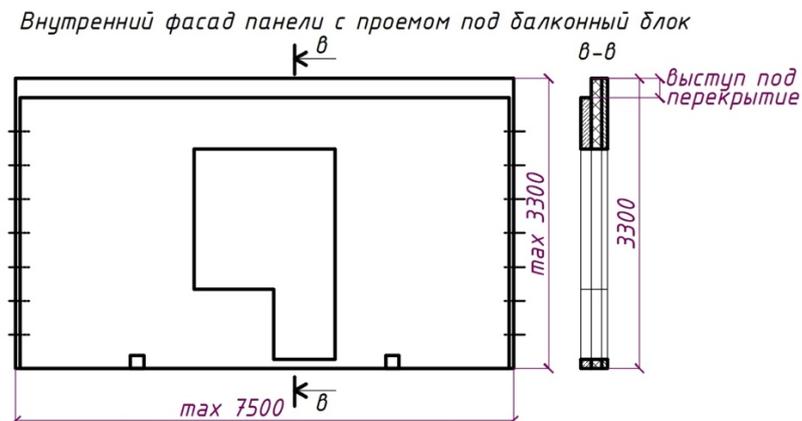


Рис. 3 - Схема наружной стеновой панели с проемом под балконный блок
Fig. 3 - Scheme of external wall panel with balcony opening

К настоящему времени исследователями выполнено большое количество разработок в области использования различных видов бетонов для производства трехслойных наружных стеновых панелей. Чаще всего используется железобетон, тяжелые виды бетона или конструкционный керамзитобетон плотностью 1600...1800 кг/м³ [8]. При использовании перечисленных материалов толщина конструкции составляет около 300 мм [9], и соответствующий вес ~ 500 кг на м² площади стены [10]. Чтобы снизить нагрузку на фундамент необходимо уменьшить вес стеновых панелей, но при этом прочностные характеристики панели не должны ухудшиться. Одним из путей решения этой проблемы является замена природного крупного заполнителя (щебня или гравия) на более легкие заполнители, к которым можно отнести аглопорит [11], [12], керамзит [13], [14], [15] обжиговый и безобжиговый зольный гравий [16], [17],



[18]. Последний из перечисленных имеет самую простую технологию изготовления и, следовательно, является экономически более выгодным.

Безобжиговый зольный гравий обладает хорошими механическими характеристиками и может быть использован для бетонов средней прочности [19]. Авторы [20] показали возможность использования зольного гравия для уменьшения усадки бетона. Кроме того, использование этого заполнителя вместо природного позволяет увеличить прочность на растяжение, сжатие и срез [21]. Также возможно использование зольного гравия в бетонах, подверженных воздействию высокой температуры [22]. Не смотря на все достоинства данного материала, зольный гравий, полученный из золы уноса различных тепловых станций, имеет различные физико-механические и теплотехнические свойства.

Целью данной работы является исследование теплотехнических характеристик наружной стеновой панели из бетона с безобжиговым зольным гравием на основе золы-уноса Новосибирской ТЭЦ-5.

2 Materials and Methods / Материалы и методы

2.1 Материалы

Для изготовления бетона использовались следующие материалы:

Цемент ЦЕМ I 42,5Н производства Heidelbergcement «Сланцевский цементный завод «Цесла» с содержанием вспомогательных компонентов не более 5 %, удельной поверхностью по Блейну 400 м²/кг, средней активностью в возрасте 2 суток 26,2 МПа, нормальной густотой 24,6 %.

Песок месторождения «Островское» (поставщик ООО «Цементно-бетонные изделия» п. Сертолово Ленобласти), с $M_{кр}=2,17$ и истинной плотностью 2,79 г/см³. Содержание пылеватых и глинистых частиц не более 2,0 %.

Безобжиговый зольный гравий на основе золы уноса Новосибирской ТЭЦ-5. Гравий имеет серый цвет, округлую форму и шероховатую поверхность (рис.1). Содержит до 99,5 % гранул фракции 5-20 мм, характеризуется маркой по плотности М900, по прочности – П200.

Вода затворения. Вода удовлетворяла требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».

Добавки. С целью обеспечения необходимой подвижности и жизнеспособности бетонной смеси, при минимально допустимых расходах портландцемента применена химическая суперпластифицирующая добавка MC-PowerFlow 2695 производства ООО «Эм-Си Баухеми».

Подбор состава осуществлялся согласно ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава». Из перечисленных материалов для экспериментального определения коэффициента теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием был приготовлен состав смеси (Таблица 1). Предварительно расчетным путем были вычислены параметры состава бетона. Затем полученные параметры корректировались путем пробных замесов.

Таблица 1. Состав бетонной смеси
Table 1. Composition of concrete mixture

Материалы	Расходы материалов в кг/м ³
Цемент	360
Песок	720
Безобжиговый зольный гравий	780
Вода	160
Суперпластификатор MC-PowerFlow 2695	2
Итого	2022
В/Ц отношение	0,44

2.2 Модель исследования

В качестве модели исследования использована наружная стеновая панель с оконным блоком (Рис.2). Стеновая панель состоит из трех слоев: внутреннего - несущего, промежуточного - теплоизоляционного, внешнего - защитного. Состав панели и ее теплотехнические показатели представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Теплотехнические показатели наружной стеновой панели
Table 2. Thermal performance of external wall panel

№ слоя	Слой. Материал	Толщина, мм	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)
1	Внутренний слой. Бетон с безобжиговым зольным гравием (2000 кг/м ³)	120	0,94 (см. п. 3.1)
2	Экструдированный пенополистирол (35 кг/м ³)	по расчету	0,034
3	Внешний слой. Тяжелый бетон (2300 кг/м ³)	65	1,41

2.3 Методы

Для теплотехнического расчета наружной стеновой панели (Рис. 2) экспериментальным путем был определен коэффициент внутренней теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием. Испытание проведено в соответствии с ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» с помощью измерителя теплопроводности ИТС-1 «150».

Образцы для испытания на теплопроводность изготавливались в виде плит размерами 150x150x30 мм. Формы для образцов заливались в вертикальном положении. Распалубка производилась на 2 суток после изготовления образцов. Последующее время образцы хранились в нормальных условиях при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не ниже 60 %. До и после испытания образцы взвешивались.

На Рис. 4 представлен образец, установленный в измеритель теплопроводности.

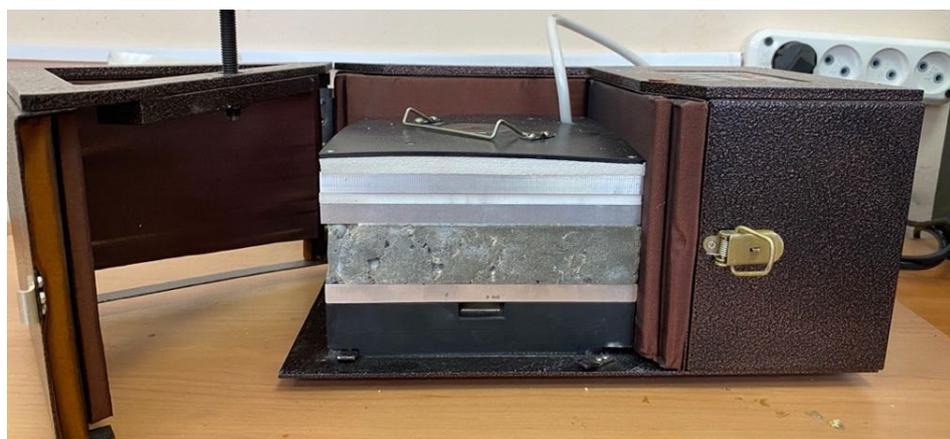


Рис. 4 - Образец перед началом испытания
Fig. 4 - Specimen before testing

3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

3.1 Теплотехнические характеристики наружной стеновой панели с безобжиговым зольным гравием

Коэффициент теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием использовался состав, указанный в Таблице 1. Результаты испытаний бетона представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Результаты определения теплопроводности бетона
Table 3. Results of determining thermal conductivity of concrete

№ образца	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)
1	0,937
2	0,915
3	0,981
Среднее значение	0,944

По результатам испытаний коэффициент теплопроводности бетона составил 0,94 Вт/(м·°С), что находится между аналогичными значениями для плотного керамзитобетона и тяжелого бетона.

Usanova, K. Y.

Thermal performance of external wall panel made of cold-bonded fly ash aggregate concrete; 2022; *AlfaBuild*; 24 Article No 2401. doi: 10.57728/ALF.24.1



Тепловая защита основных строительных элементов и конструкций рассчитана в соответствии нормативной документации [23], [24], [25]. Климатические и микроклиматические условия для Санкт-Петербурга согласно [23]:

1. Продолжительность отопительного периода $z_{от} = 211$ дней.
 2. Средняя температура наружного воздуха отопительного периода $t_{om} = -1,2^\circ\text{C}$.
 3. Зона влажностного режима - 1 (влажная).
 4. Расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, $^\circ\text{C}$, принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 – «минус» 24.
 5. Условия эксплуатации ограждающих конструкций - Б.
 6. Температура внутри помещений (жилое здание) - $t_e = +20^\circ\text{C}$ ([24]).
- Определение градусо-суток отопительного периода [25]:

$$ГСОП = (t_b - t_{от})z_{от} = (20 + 1,2) \times 211 = 4673,2^\circ\text{C} \cdot \text{сут} \quad (1)$$

Нормативное значение приведенного сопротивления теплопередаче следует принимать не менее нормируемых значений, определяемых по [25] в зависимости от градусо-суток района строительства:

$$R_o^{mp} = a \cdot ГСОП + b = 0,00035 \times 4673,2 + 1,4 = 2,966 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт} \quad (2)$$

Из приведенных выше вычислений за требуемое сопротивление теплопередачи из условия энергосбережения выбираем $R_o^{mp} = 2,966 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Для каждого слоя заданной стены необходимо рассчитать термическое сопротивление по формуле:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

где δ_i - толщина слоя, м;

λ_i - расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, Вт/(м $^\circ\text{C}$)

Расчет термического сопротивления по первому слою:

$$R_1 = \frac{0,12}{0,94} = 0,13 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Расчет термического сопротивления по третьему слою:

$$R_3 = \frac{0,065}{1,41} = 0,05 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Термическое сопротивление участка стены определяем по формуле:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_b} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (4)$$

где $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, принимаемый согласно [25];

$\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, принимаемый согласно [25];

Без учета утеплителя термическое сопротивление стены равно:

$$R_o = 1/8,7 + (0,13 + 0,05) + 1/23 = 0,338 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Таким образом термическое сопротивление слоя теплоизоляции должно быть не менее $R_o^{mp} - R_o = 2,966 - 0,338 = 2,628 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$. Тогда минимальная толщина теплоизоляции должна быть:

$$\delta_{тепл} \geq R \cdot \lambda_{тепл} = 2,628 \cdot 0,034 = 0,089 \text{ м}.$$

Принимаем толщину экструдированного пенополистирола 90 мм.

Тогда приведенное сопротивление теплопередаче равно:

$$R_{пр} = 1/8,7 + (0,13 + 0,05 + 2,64) + 1/23 = 3,06 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Из полученного результата можно сделать вывод, что $R_{пр} = 3,06 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}) > R_o^{mp} = 2,966 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт})$, следовательно, толщина утеплителя подобрана правильно.

Общая толщина стены в данном случае будет равна **275 мм**.



3.2 Сравнение теплотехнических характеристик исследуемой наружной стеновой панели с типовой трехслойной железобетонной панелью

Ближайшим аналогом панели из бетона с безобжиговым зольным гравием является трехслойная железобетонная панель. Это изделие, как и исследуемое, состоит из трех слоев: внутреннего железобетонного слоя, внешнего бетонного или железобетонного слоя и промежуточного теплоизоляционного слоя, толщина которых варьируется в диапазонах 65 мм - 100 мм, 50 мм - 200 мм, 120 мм - 200 мм, соответственно. Для сравнения с исследуемой панелью была выбрана конструкция панели, отличающаяся только материалом внутреннего несущего слоя. Состав конструкции наружной стеновой панели представлена в Таблице 4.

Таблица 4. Теплотехнические показатели трехслойной железобетонной панели
Table 4. Thermal performance of three-layer reinforced concrete panel

№ слоя	Слой. Материал	Толщина, мм	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)
1	Внутренний слой. Железобетон (2500 кг/м ³)	120	2,04
2	Экструдированный пенополистирол (35 кг/м ³)	по расчету	0,034
3	Внешний слой. Тяжелый бетон (2300 кг/м ³)	65	1,41

Расчет термического сопротивления по первому слою:

$$R_1 = \frac{0,12}{2,04} = 0,06 \text{ м}^2\text{°C/Вт.}$$

Расчет термического сопротивления по третьему слою:

$$R_3 = \frac{0,065}{1,41} = 0,05 \text{ м}^2\text{°C/Вт.}$$

Без учета утеплителя термическое сопротивление стены равно:

$$R_o = 1/8,7 + (0,06 + 0,05) + 1/23 = 0,268 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

Таким образом термическое сопротивление слоя теплоизоляции должно быть не менее $R_o^{mp} - R_o = 2,966 - 0,268 = 2,698 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$. Тогда минимальная толщина теплоизоляции должна быть:

$$\delta_{тепл} \geq R \cdot \lambda_{тепл} = 2,698 \cdot 0,034 = 0,092 \text{ м.}$$

Принимаем толщину экструдированного пенополистирола 100 мм.

Тогда приведенное сопротивление теплопередаче равно:

$$R_{пр} = 1/8,7 + (0,06 + 0,05 + 2,94) + 1/23 = 3,316 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

Из полученного результата можно сделать вывод, что $R_{пр} = 3,316 \text{ (м}^2\text{°C/Вт)} > R_o^{mp} = 2,966 \text{ (м}^2\text{°C/Вт)}$, следовательно, толщина утеплителя подобрана правильно.

Общая толщина стены в данном случае будет равна **285 мм**.

По теплотехническим характеристикам наружная стеновая панель из бетона с безобжиговым зольным гравием не уступает известной трехслойной железобетонной стеновой панели. При одинаковых теплотехнических характеристиках исследуемой наружной стеновой панели требуется теплоизоляционный слой из экструдированного пенополистирола меньшей толщины - 90 мм вместо 100 мм для трехслойной железобетонной панели.

4 Conclusions / Заключение

В результате исследования теплотехнических свойств наружной стеновой панели из бетона с безобжиговым зольным гравием, можно сделать следующие выводы:

1. Определен экспериментально коэффициент теплопроводности бетона с безобжиговым зольным гравием, который составил 0,94 Вт/(м·°C).

2. Показано, что по теплотехническим характеристикам наружная стеновая панель из бетона с безобжиговым зольным гравием не уступает известной трехслойной железобетонной стеновой панели. При одинаковых теплотехнических характеристиках исследуемой наружной стеновой



панели требуется теплоизоляционный слой из экструдированного пенополистирола меньшей толщины - 90 мм вместо 100 мм для трехслойной железобетонной панели.

5 Acknowledgements

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-33-90015.

References

1. Wang, J.; Li, B. Cyclic testing of square CFST frames with ALC panel or block walls. *J Constr Steel Res* **2017**, *130*, 264–279.
2. Bazhenov A A; Rukavishnikov A.M. Sovremennye tekhnologii sbornogo zhelezobetona. *Vestnik stroitel'stva i arhitektury. Sbornik nauchnykh trudov. Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu poligraficheskaya firma «Kartush». Orel* **2017**, 66–70.
3. Blazhko, D. N.; Guseva, A. L. Trudnosti i vozmozhnosti sovremennogo panel'nogo domostroeniya. *1*.
4. Yudina, A. F.; Belozerov, P. G. Types of joint connections in modern panel construction, the advantages and disadvantages. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* **2021**, *18*, 97–102.
5. Aldiyarov, ZH. A.; Azhidinov, A. S.; Kuandykov, N. K.; Mok, L. YU. Issledovanie raboty otdel'nykh sloev trekhslojnykh zhelezobetonnykh konstrukcij. *Nauchnye trudy YUKGU IM. M. Auezova* **2018**, *2*, 3–6.
6. Kornienko, S. V. Temperaturnyj rezhim trekhslojnoj stenovoj paneli. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* **2001**, *9*, 20–21.
7. Mugahed Amran, Y. H.; El-Zeadani, M.; Huei Lee, Y.; Yong Lee, Y.; Murali, G.; Feduik, R. Design innovation, efficiency and applications of structural insulated panels: A review. *Structures* **2020**, *27*, 1358–1379.
8. Ovsyannikov, S. N.; Maksimov, V. B. Energoeffektivnye naruzhnye stenovye paneli karkasno-panel'nykh zdaniy. *Vestnik TGASU T.20* **2018**, *6*, 107–114.
9. Einea, A.; Salmon, D. C.; Fogarasi, G. J.; Culp, T. D.; Tadros, M. K. State-of-the-art of Precast Concrete Sandwich Panels. *PCI Journal* **1991**, *36*, 78–92.
10. O'Hegarty, R.; Kinnane, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. *Constr Build Mater* **2020**, *233*, 117145.
11. Itkin, Y. v; Shpirt, M. Y.; Grekhov, I. T. Change in the bulk density of the products of the thermal treatment of carbonaceous rocks on heating. *Solid Fuel Chemistry* **1976**, *10*, 65–69.
12. Donat, F.; Itkin, Y. v; Maslennikova, M. G.; Nekrasov, K. D.; Shpirt, M. Ya. Thermal properties of a porous filler based on powdered ekibastuz coal rock. *Solid Fuel Chemistry* **1978**, *12*, 99–101.
13. Lo, T. Y.; Tang, W. C.; Cui, H. Z. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Build Environ* **2007**, *42*, 3025–3029.
14. Bogas, J. A.; de Brito, J.; Figueiredo, J. M. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. *J Clean Prod* **2015**, *89*, 187–195.
15. Rashad, A. M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Constr Build Mater* **2018**, *170*, 757–775.
16. Narattha, C.; Chaipanich, A. Phase characterizations, physical properties and strength of environment-friendly cold-bonded fly ash lightweight aggregates. *J Clean Prod* **2018**, *171*, 1094–1100.
17. Thomas, J.; Harilal, B. Mechanical properties of cold bonded quarry dust aggregate concrete subjected to elevated temperature. *Constr Build Mater* **2016**, *125*, 724–730.
18. Venkata Suresh, G.; Pavan Kumar Reddy, P.; Karthikeyan, J. Effect of GGBS and Fly ash aggregates on properties of geopolymer concrete. *Journal of Structural Engineering (India)* **2016**, *43*, 436–444.
19. Gomathi, P.; Sivakumar, A. Synthesis of geopolymer based class-F fly ash aggregates and its composite properties in Concrete. *Archives of Civil Engineering* **2014**, *60*, 55–75.
20. Priyadharshini, P.; Mohan Ganesh, G.; Santhi, A. S. Effect of cold bonded fly ash aggregates on strength & restrained shrinkage properties of concrete. *IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012* **2012**, 160–164.
21. Gesoğlu, M.; Özturan, T.; Güneyisi, E. Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes. *Cem Concr Compos* **2006**, *28*, 598–605.



22. Thomas, J.; Harilal, B. Mechanical properties of cold bonded quarry dust aggregate concrete subjected to elevated temperature. *Constr Build Mater* **2016**, *125*, 724–730.
23. SP 131.13330.202. Building climatology. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358>
24. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. **2012**. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053>
25. SP 50.13330.2012 thermal performance of the buildings. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525>