

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-304-314>

УДК 691.327.332

## Малоэнергоемкая технология изготовления и физико-технические свойства ячеистого бетона безавтоклавного твердения на гранитоидном микрозаполнителе

Магистр техн. наук Ю. Д. Самуйлов<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. Э. И. Батыновский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** Материал статьи отражает основные этапы и результаты разработки малоэнергоемкой технологии получения ячеистого газобетона безавтоклавного твердения с использованием микрозаполнителя на основе гранитных отсевов для сборного и монолитного строительства, включая ее применение в технологии 3D-бетонирования [1–10]. Разработаны и экспериментально обоснованы: методики расчета состава газобетона по критериям плотности и прочности на сжатие в диапазоне марок D350–D900 и классов B0,5–B7,5 конструкционно-теплоизоляционного назначения, а также марок D100–D300 (прочность на сжатие 0,04–1,50 МПа) теплоизоляционного назначения во взаимосвязи с дисперсностью применяемого микрозаполнителя из молотого гранитного отсева с удельной поверхностью соответственно:  $S_{уд} \sim 3000\text{--}500\text{ см}^2/\text{г}$  – для конструкционно-теплоизоляционного,  $S_{уд} \sim 30000\text{ см}^2/\text{г}$  (микрокремнезем) и  $S_{уд} \sim 20000\text{ см}^2/\text{г}$  (ультрадисперсные фракции гранитного отсева) – для теплоизоляционного газобетона; методика контроля реологических (технологических) свойств газобетонных смесей, обеспечивающих требуемые условия структурообразования газобетона расчетных составов; методика оценки бокового давления смеси при укладке в опалубку (формы), а также методика и прибор для неразрушающего контроля как кинетики роста прочности твердеющего, так и прочности затвердевшего или эксплуатируемого ячеистого бетона, полученного по разработанной или иным технологиям. Разработаны режимы беспрогревной и малоэнергоемкой (включающей пропаривание при атмосферном давлении) технологии ячеистого газобетона безавтоклавного твердения, что позволяет отказаться от энергозатратного, технически сложного и дорогостоящего автоклавного оборудования при изготовлении сборных изделий и обеспечивает возможность использования разработанной технологии теплоизоляционного газобетона в монолитном строительстве, включая тепло- и звукоизоляцию стен зданий, выполненных по технологии 3D-бетонирования, а также возведение (устройство) в съемных и несъемных опалубках строительных конструкций с использованием газобетона конструкционно-теплоизоляционного назначения.

**Ключевые слова:** цемент, газообразователь, молотый гранитный отсев, микрокремнезем, критерий плотности и прочности на сжатие, безавтоклавное твердение, беспрогревная и малоэнергоемкая технология, теплоизоляционный газобетон, монолитное строительство

**Для цитирования:** Самуйлов, Ю. Д. Малоэнергоемкая технология изготовления и физико-технические свойства ячеистого бетона безавтоклавного твердения на гранитоидном микрозаполнителе / Ю. Д. Самуйлов, Э. И. Батыновский // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 4. С. 304–314. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-304-314>

## Low-Energy Manufacturing Technology and Physical and Technical Properties of Cellular Concrete Autoclave-Free Hardening on Granitoid Micro-Filler

Yu. D. Samuilov<sup>1)</sup>, E. I. Batyanovsky<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The material in the paper reflects the main stages and results of the development of low-energy-intensive technology for producing cellular aerated concrete without autoclave hardening using a micro-filler based on granite screenings for

### Адрес для переписки

Батыновский Эдуард Иванович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-96-73  
bat47@mail.ru

### Address for correspondence

Batyanovskiy Eduard I.  
Belarusian National Technical University  
12, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-96-73  
bat47@mail.ru

prefabricated and monolithic construction, including its application in 3D concreting technology [1–10]. The paper has made it possible to develop and experimentally to substantiate: methods for calculating the composition of aerated concrete according to the criteria of density and compressive strength in the range of grades D350–D900 and classes B0.5–B7.5 for structural and thermal insulation purposes, as well as grades D100–D300 (compressive strength 0.04–1.5 MPa) for thermal insulation purposes in conjunction with the dispersion of the applied micro-fillers from ground granite screenings with a specific surface area, respectively:  $S_{sp} \sim 3000\text{--}500\text{ cm}^2/\text{g}$  for structural and thermal insulation, and for thermal insulation aerated concrete:  $S_{sp} \sim 30000\text{ cm}^2/\text{g}$  (micro-silica) and  $S_{sp} \sim 20000\text{ cm}^2/\text{g}$  (ultra-disperse fractions of granite screenings) – for thermal insulating aerated concrete; methodology for monitoring the rheological (technological) properties of aerated concrete mixtures that provide the required conditions for the structure formation of aerated concrete of calculated compositions, a method for evaluating the lateral pressure of a mixture when laying in formwork (molds), as well as a method and device for non-destructive testing of both the kinetics of strength growth of hardening and the strength of hardened or used cellular concrete, obtained according to the developed or other technology. Modes of non-heating and low-energy (including steaming at atmospheric pressure) technology of cellular aerated concrete of non-autoclave hardening have been developed, which makes it possible to abandon energy-consuming, technically complex and expensive autoclave equipment in the manufacture of prefabricated products and provides the possibility of using the developed technology of thermal insulating aerated concrete in monolithic construction, including heat and sound insulation of the walls of buildings made using 3D concreting technology, as well as the construction (installation) in removable and non-removable formwork of building structures using aerated concrete for structural and thermal insulation purposes.

**Keywords:** cement, gasifier, ground granite screenings, micro-silica, density and compressive strength criterion, non-autoclave hardening, heat-free and low-energy technology, thermal insulating aerated concrete, monolithic construction

**For citation:** Samuilov Yu. D., Batyanovsky E. I. (2024) Low-Energy Manufacturing Technology and Physical and Technical Properties of Cellular Concrete Autoclave-Free Hardening on Granitoid Micro-Filler. *Science and Technique*. 23 (4), 304–314. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-304-314> (in Russian)

## Введение

Ячеистые бетоны широко применяются в строительном производстве. В наибольших объемах – это штучные изделия автоклавного твердения, производство которых характеризуется значительными энергетическими затратами и целенаправленным использованием в качестве стенового строительного материала. Решение научно-технической задачи по снижению энергоемкости процесса получения изделий из ячеистого бетона – одно из наиболее актуальных направлений по снижению стоимости строительной продукции. Не менее значимым для строительного производства является отраженное в материале статьи использования гранитных отсеков, накапливающихся в отвалах РУПП «Гранит» Брестской области. Также актуальна к применению разработанная технология ячеистого газобетона безавтоклавного твердения теплоизоляционного и конструкционно-теплоизоляционного назначения, которая обеспечивает его применение при возведении (устройстве) монолитных строительных конструкций, в частности в сочетании с устройством несъемных опалубок с использованием развивающейся технологии 3D-бетонирования. В статье изложены основные результаты исследований, направленных на решение означенных научно-технических задач.

## Материалы

### и авторские методики исследований

В исследованиях использовали в качестве:

- вяжущего – портландцемент ЦЕМ 1 42,5Н по ГОСТ 31108–2020 или СЕМ 1 42,5Н по СТБ ЕН 197-1–2007 (соответствует М500-Д0 по ГОСТ 10178–85, 2-я группа эффективности);
- активного высокодисперсного микрозаполнителя – микрокремнезем по СТБ ЕН 13263-1–2012 с удельной поверхностью  $\sim 30000\text{ cm}^2/\text{г}$ ;
- инертного микрозаполнителя – молотый до  $S_{уд} \sim 500\text{--}6000\text{ cm}^2/\text{г}$  гранитный отсев, а также отсеянный фракций 0–0,16 мм с удельной поверхностью до  $20000\text{ cm}^2/\text{г}$ ;
- газообразователя – алюминиевую пудру ПАП-1;
- добавки-пластификатора – суперпластификатор на основе полиоксиэтиленовых производных полиметакриловой кислоты «Реламикс ПК», отвечающей требованиям ТУ 5745-034-58042865–2008 (производство АО ГК «Полипласт», Беларусь–Россия).

В процессе исследований отработан и предлагается к использованию ряд авторских методик определения свойств газобетонных смесей и ячеистого бетона. Так, существующая стандартизированная (по ГОСТ 23789–79) методика определения текучести газобетонной смеси реализуются с использованием цилиндриче-

ской емкости (объемом  $16 \text{ см}^3$ ) и жесткого основания – пластины размерами  $\geq 500 \times 500 \text{ мм}$ , что создает неудобства при оперативном контроле как на строительной площадке, так и у мест формирования сборных изделий. Предложена экспериментально обоснованная (рис. 1, 2) методика определения текучести, соответствующая по результатам ее оценки методике ГОСТ 23789–79, но легко реализуемая как в стационарных (заводских), так и в построчных условиях строительной площадки.

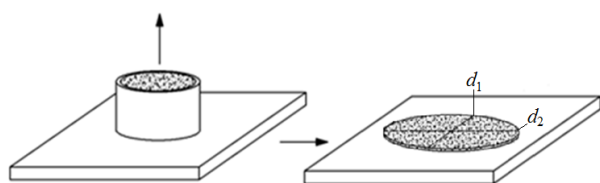


Рис. 1. Принципиальная схема определения текучести газобетонной смеси

Fig. 1. Schematic diagram for determining the fluidity of aerated concrete mixture

Ее сущность заключается в определении диаметра расплыва залитой в металлическое кольцо (с диаметром основания и высотой внутренней полости 28 и 26 мм соответственно) газобетонной смеси, после вертикального подъема кольца со стеклянной пластины размерами не менее  $150 \times 150 \text{ мм}$ , размещенной на жесткой пластине размерами не менее  $200 \times 200 \text{ мм}$ , и соотношении полученного результата с данными рис. 2 [1].

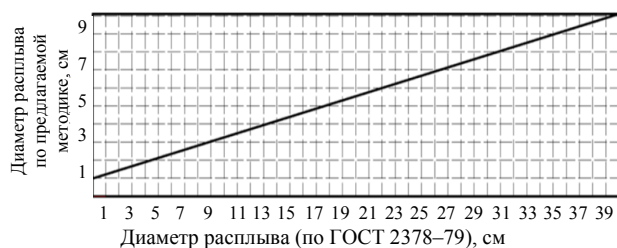


Рис. 2. Взаимозависимость значений текучести газобетонной смеси по предлагаемой методике и по методике ГОСТ 23789–79

Fig. 2. Interdependence of fluidity values of aerated concrete mixture according to the proposed method and according to GOST (GOST – All Union State Standard) 23789–79

Для ведения работ с газобетонной смесью с учетом разработанных в исследованиях методов расчета составов газобетона по заданной

прочности или средней плотности предложены методики определения времени и коэффициента вспучивания газобетонной смеси. С этой целью используются стандартные формы для формирования образцов кубов  $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$  (рис. 3) [2].

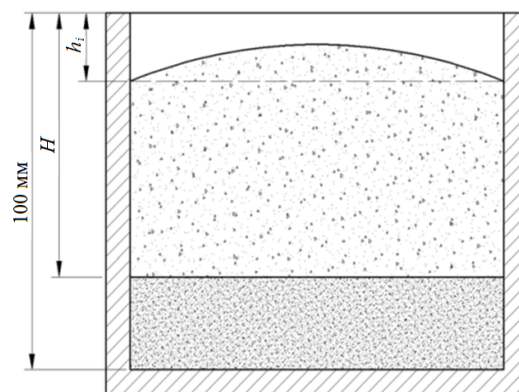


Рис. 3. К определению времени вспучивания

Fig. 3. To determine the swelling time

При определении времени вспучивания в форму заливается проба газобетонной смеси расчетного состава объемом  $0,25 \text{ дм}^3$  и определяется время стабилизации высоты  $h_i$  (рис. 3). Для определения коэффициента вспучивания газобетонной смеси (используется затем при расчетах составов газобетона), который отражает прирост объема смеси после вспучивания по отношению к первоначальному при постоянном содержании в ее составе 1 г газообразователя на  $0,25 \text{ дм}^3$  смеси, получена формула

$$k_{\text{всп}} = \frac{V_{\text{б.см.всп}}}{V_{\text{б.см}}} - 1 \text{ (доли ед.)}, \quad (1)$$

или с учетом размера формы и высоты заливки смеси

$$k_{\text{всп}} = \frac{100 - h_i}{25} - 1 \text{ (доли ед.)}. \quad (2)$$

Для оперативной оценки кинетики роста прочности [3–5] и уровня прочности затвердевшего ячеистого бетона разработаны прибор (патент № ВУ 20155) и методика неразрушающего контроля, применяемая для вариантов сборного и монолитного строительства с использованием штучных изделий и монолитных конструкций (рис. 4, 5).

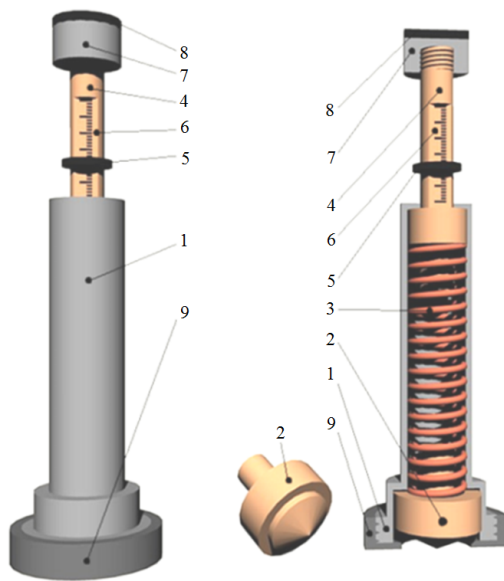
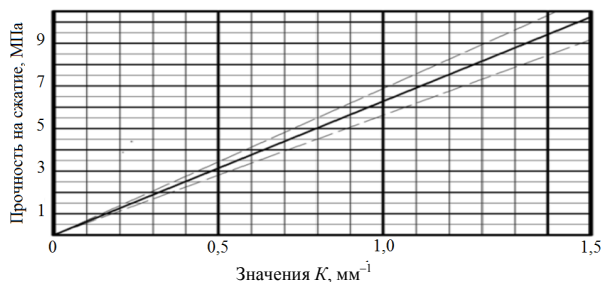


Рис. 4. Устройство прибора

Fig. 4. Device design

Рис. 5. Тарировочная зависимость коэффициента прибора  $K$  и прочности газобетона на гранитоидном микрозаполнителе (штриховые линии показывают диапазон погрешности)Fig. 5. Calibration dependence of the device  $K$  coefficient and strength of aerated concrete on granitoid micro-filler (dashed lines indicate error range)

При оценке прочности ячеистого бетона снимаются показания шкалы 6 ( $L$ , усл. ед.), которые характеризуют силу удара, а также измеряется диаметр отпечатка ( $D$ , мм) от индентора на поверхности испытуемого образца. Учитывая, что определяется соотношение силы удара и образующегося при этом отпечатка от индентора на оцениваемом бетоне, энергия наносимого удара может быть произвольной.

Прибор состоит из следующих элементов (рис. 4): корпуса 1, бойка с индентором 2, пружины 3 и толкателя со штоком 4, насадки, фиксирующей длину деформации пружины, 5, шкалы 6, ударной шайбы 7, амортизирующей резиновой накладки 8, крышки корпуса 9.

На основании полученных данных рассчитывается коэффициент  $K$

$$K = \frac{L - 0,334D}{D^2} \text{ (мм}^{-1}\text{)}. \quad (3)$$

Прочность на сжатие  $R$  испытуемого образца определяют по графической зависимости (рис. 5) или по формуле

$$R = K \operatorname{tg} \alpha_{\text{cp}} \text{ (МПа)}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{\text{cp}}$  – угол между осью  $OK$  и графиком линейной зависимости.

### Подготовка микрозаполнителя

Подготовка микрозаполнителя [6] осуществлялась помолом в шаровой мельнице гранитного отсева до разной удельной поверхности с учетом применения для газобетона конструкционно-теплоизоляционного и теплоизоляционного назначения. Авторские методики расчета (по плотности) составов ячеистого бетона безавтоклавного твердения (в диапазоне плотностей марок D100–D300 и D350–D900) и прочности на сжатие (в диапазоне от 0,04 МПа до соответствующей классу по прочности на сжатие B7,5) разрабатывались с учетом особенностей использования микрозаполнителя с удельной поверхностью в диапазоне  $S_{\text{уд}} = 500\text{--}30000 \text{ см}^2/\text{г}$ . При этом исходили из того, что в разрабатываемой технологии газобетона заполнитель не является компонентом вяжущего вещества. Он реализует функцию именно «микрозаполнителя» в объеме цементного микробетона, образующего стенки пор. От размера частиц микрозаполнителя соответственно будут зависеть их толщина, степень поризации газобетона, его плотность, а также другие механические и физико-технические характеристики.

На рис. 6 приведена зависимость роста удельной поверхности продукта помола в процессе диспергации гранитного отсева. Использовали лабораторную (шаровой и цельпесовой загрузки) мельницу: навеску (5 кг) помещали в мельницу и измельчали, отбирая через указанные на рис. 6 промежутки времени пробы не менее 50 г. При «мокром» помоле (содержание воды больше 50 % массы исходного сухого отсева) пробы высушивали (при  $t \sim 105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) до

постоянной массы ( $\pm 0,1$  г), а затем определяли удельную поверхность ( $S_{уд}$ ,  $\text{см}^2/\text{г}$ ).

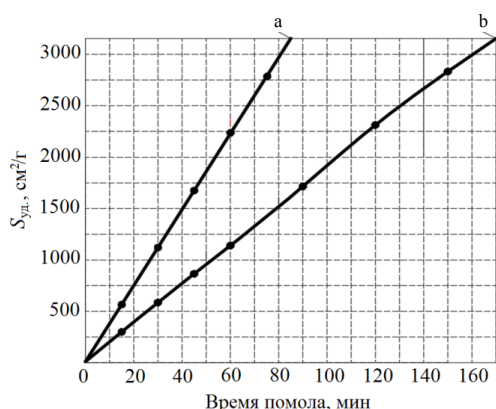


Рис. 6. Зависимость роста удельной поверхности микрозаполнителя в пределах  $S_{уд} \leq 3000 \text{ см}^2/\text{г}$  от времени помола гранитного отсева: а – мокрый помол; б – сухой помол

Fig. 6. Dependence of growth of micro-filler specific surface within the range of  $S_{sp} \leq 3000 \text{ см}^2/\text{г}$  on the grinding time of granite screenings: а – wet grinding; б – dry grinding

В качестве микродисперсного заполнителя для газобетона теплоизоляционного назначения марок D200–D300 использовали отходящую при производстве на РУПП «Гранит» кубовидного щебня и отделенную посредством воздушной сегрегации пылеобразную фракцию 0–0,16 мм (с  $S_{уд} \leq 20000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), а для получения газобетона марок D100–D200 – микрокремнезем МК-80 (с  $S_{уд} \leq 30000 \text{ см}^2/\text{г}$ ).

В исследованиях использовали газобетон, полученный на составах, рассчитанных по представленным в своей основе в данном тексте авторским методикам расчета, поскольку, как показал анализ, известные методики, включая вариант действующих норм, не отражают специфику использования в качестве микрозаполнителя как фракций измельченной гранитной породы (в диапазоне  $S_{уд} \sim 500\text{--}20000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), так и микрокремнезема (при  $S_{уд} \sim 30000 \text{ см}^2/\text{г}$ ).

### Методики расчета составов газобетона

Основные положения предлагаемой методики расчета состава газобетона по требуемой плотности включают следующие этапы:

– принимаем к расчету требуемую плотность газобетона  $\rho_6$  в соответствии с проектной

документацией либо маркой по плотности (по СТБ 1570–2005);

– выбираем соотношение МЗ/Ц (где МЗ – расход микрозаполнителя на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона; Ц – расход цемента на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона) в рекомендуемом диапазоне 0,5–2,0 (в зависимости от требуемой (по СТБ 1570–2005) минимальной прочности бетона для расчетной плотности);

– определяем требуемое (в рекомендуемом диапазоне 0,4–0,65) соотношение В/Т (где В – расход воды на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона; Т – суммарный расход твердых компонентов на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона, с учетом данных рис. 7 и экспериментальных зависимостей «В/Т – прочность» (здесь не приводятся).

Далее определим расход цемента (Ц) на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона, исходя из его плотности в сухом состоянии ( $\rho_6$ ):

$$\rho_6 = \frac{m_{6, \text{см}} - В + Ц \cdot 0,15}{V_{\phi}} \quad (\text{кг}/\text{м}^3), \quad (5)$$

где 0,15 – эмпирический коэффициент, который характеризует относительное содержание химически связанной цементной воды ( $k_{х.в}$ ); после ряда преобразований определим расход цемента на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона (Ц) при  $V_{\phi} = 1 \text{ м}^3$ :

$$Ц = \frac{\rho_6}{(1,15 + (МЗ / Ц))} \quad (\text{кг}). \quad (6)$$

Вычислим расход микрозаполнителя (МЗ) на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона

$$МЗ = Ц \cdot (МЗ / Ц) \quad (\text{кг}). \quad (7)$$

Суммарный расход твердых компонентов (Т) на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона

$$Т = Ц + МЗ \quad (\text{кг}). \quad (8)$$

Расход воды (В) на приготовление  $1 \text{ м}^3$  газобетона

$$В = Т \cdot (В / Т) \quad (\text{кг}), \quad (9)$$

в том числе количество воды, необходимое для приготовления газообразующей суспензии:

$$В_c = 15Г \quad (\text{кг}). \quad (10)$$

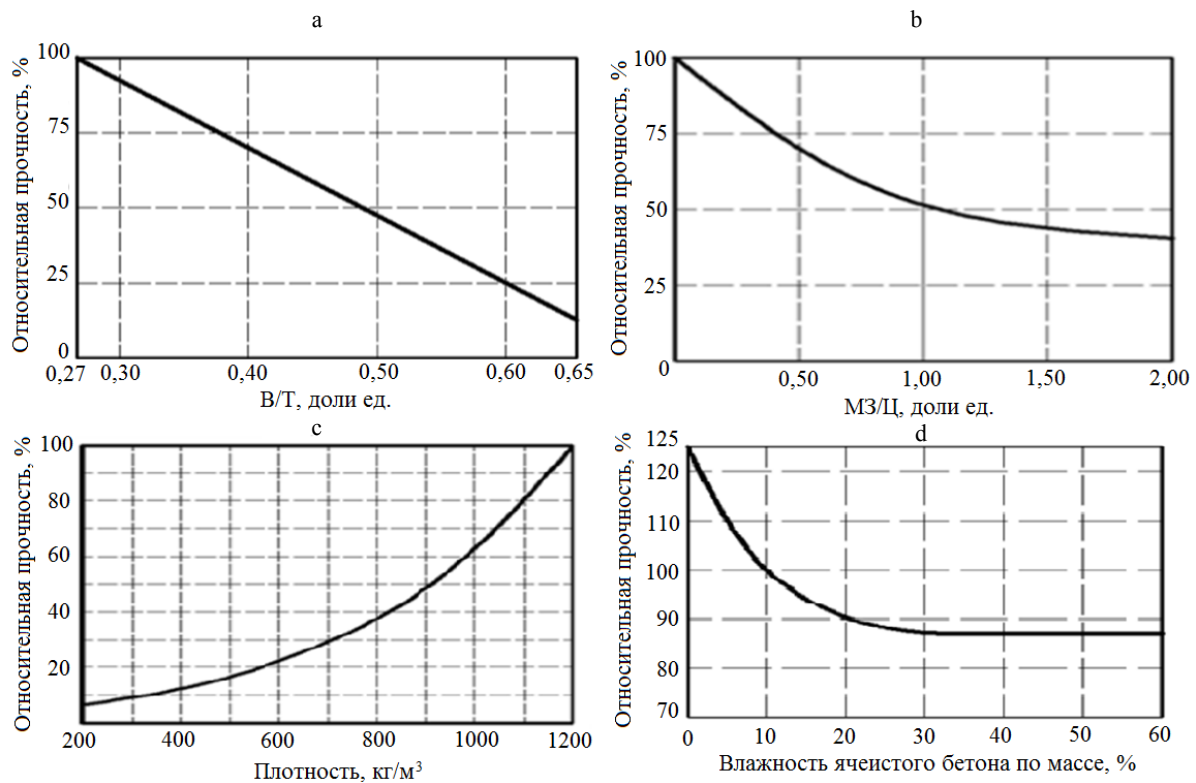


Рис. 7. а – график зависимости прочности ячеистого бетона на осевое сжатие от В/Т;  
 б – то же относительной прочности газобетона от соотношения МЗ/Ц;  
 с – то же от его плотности; д – то же от соотношения МЗ/Ц

Fig. 7. а – graph of the dependence of the strength of cellular concrete on axial compression on В/Т;  
 б – the same for the relative strength of aerated concrete on the ratio of МЗ/Ц;  
 с – the same for the relative strength on its density;  
 д – the same for the relative strength of aerated concrete on the ratio of МЗ/Ц

Рассчитаем расход газообразователя ПАП (пудры алюминиевой) на приготовление 1 м³ ячеистого бетона (Г)

$$\Gamma = \frac{V_{\phi} - V_{\text{б.см}}}{0,25k_{\text{всп}}} \quad (\text{кг}), \quad (11)$$

где  $V_{\text{б.см}}$  – объем залитой в форму ячеистобетонной смеси до газообразования, м³;  $k_{\text{всп}}$  – коэффициент вспучивания (методика определения приведена ранее).

Предлагаемая методика предусматривает введение при необходимости в состав извести для повышения коэффициента вспучивания.

Основные положения предлагаемой методики расчета состава газобетона по требуемой прочности включают следующие этапы:

– определяем уровень требуемой прочности по проектной документации, исходя из того, что зависимость прочности неавтоклавного

ячеистого газобетона от основных влияющих факторов отражается формулой

$$R_0 = R_{\text{эт}} k_{\text{В/Т}} k_{\text{МЗ/Ц}} k_p k_W \quad (\text{МПа}), \quad (12)$$

где  $R_{\text{эт}}$  – прочность эталонного образца (за эталон принят образец ячеистого бетона плотностью 1200 кг/м³, влажностью по массе 10 %, твердевший с прогревом по приведенному далее режиму ТВО, изготовленный из поризованного цементного камня (цементное тесто нормальной густоты, при водотвердом отношении (В/Т) = 0,27 доли ед.);  $R_{\text{эт}} \approx 21$  МПа;  $k_{\text{В/Т}}$  – коэффициент, зависящий от В/Т, определяется с помощью экспериментально полученной графической зависимости рис. 7а;  $k_{\text{МЗ/Ц}}$  – то же, зависящий от МЗ/Ц, определяется по графической зависимости рис. 7б,  $k_p$  – то же, зависящий от плотности проектируемого газобетона, определяется с помощью графической зависимости рис. 7с и формулы



$$k_p = \frac{R_{отн}}{100}, \quad (13)$$

$R_{отн}$ , %, – относительная прочность по графической зависимости рисунка 7с,  $k_W$  – коэффициент, зависящий от влажности газобетона, определяется с помощью графической зависимости рис. 7д;

– по экспериментальным данным и выявленной закономерности взаимосвязи прочности на сжатие и соотношения МЗ/Ц вычисляем МЗ/Ц, требуемое для получения проектной прочности газобетона, с учетом рекомендуемого для теплоизоляционно-конструкционного материала диапазона 0,5–1,0;

– далее рассчитаем расходы компонентов на 1 м<sup>3</sup> смеси по зависимостям, приведенным ранее в расчете состава газобетона по плотности.

Методика расчета состава газобетона с пониженной плотностью (D100–D200) [7] характеризуется следующими особенностями: в качестве микрозаполнителя необходимо применять тонкодисперсный твердофазный материал (использовали микрокремнезем с  $S_{уд} = 30000$  см<sup>2</sup>/г); экспериментально установлено, что оптимальное значение текучести составляет ~40 мм (при меньшем смесь не вспучивается в полной мере, при большем лишнее количество воды повлечет снижение прочности); объем не вспученной смеси должен составлять не менее четверти объема формы, так как прирост объема смеси

на ~300 % в процессе вспучивания – это предел, превышение которого (что установлено экспериментально) сопровождается разрушением (оседанием) структуры вспученной смеси.

Последовательность расчета:

– задаемся проектной плотностью газобетона, кг/м<sup>3</sup>;

– задаемся соотношением (МЗ/Ц), исходя из того, что чем ниже требуемая плотность бетона, тем выше (МЗ/Ц), диапазон рекомендуемых значений данного соотношения от 0,5 до 1,0;

– определяем: по ранее приведенным зависимостям расход цемента и микрозаполнителя, суммарный расход твердых компонентов, соотношение (В/Т) для (МЗ/Ц) = 1 (при условии, что оптимальное значение текучести соответствует 40 мм (рис. 8) и при последующей корректировке по факту вспучивания смеси);

– далее вычисляем: расход воды, объем залитой в форму ячеистобетонной смеси до газообразования по формуле

$$V_{б.см} = \frac{МЗ}{\rho_{МЗ.ист}} + \frac{Ц}{\rho_{Ц.ист}} + \frac{В}{\rho_в} \quad (м^3), \quad (14)$$

где  $\rho_{МЗ.ист}$  – истинная плотность микрозаполнителя (для гранита  $\rho_{МЗ.ист} = 2670$  кг/м<sup>3</sup>, для микрокремнезема  $\rho_{МЗ.ист} = 2196$  кг/м<sup>3</sup>);  $\rho_{Ц.ист}$  – истинная плотность цемента (3100 кг/м<sup>3</sup>);

– затем определяем расходы компонентов на 1 м<sup>3</sup> смеси по ранее приведенным зависимостям.

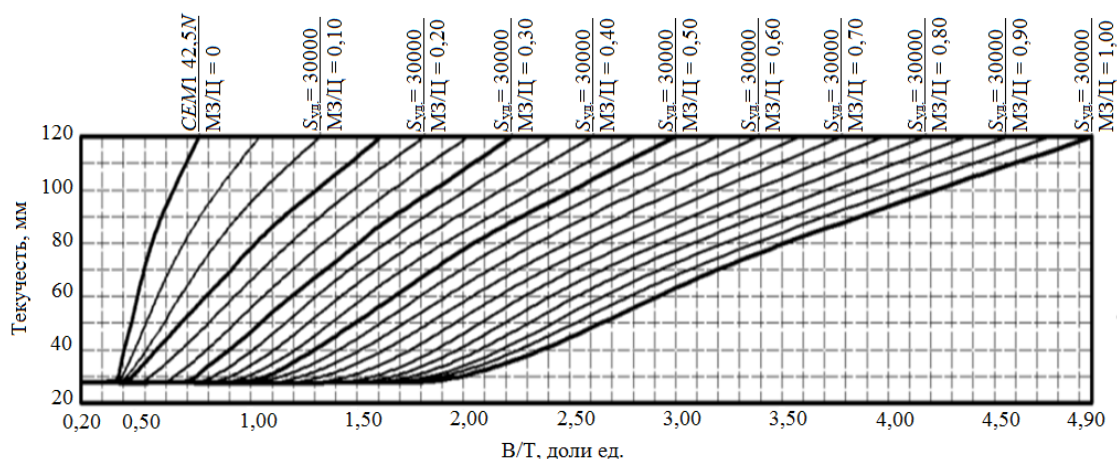


Рис. 8. Зависимость текучести от (В/Т) для различных соотношений (МЗ/Ц) при использовании в качестве микрозаполнителя микрокремнезема с удельной поверхностью 30000 см<sup>2</sup>/г

Fig. 8. Dependence of fluidity on (В/Т) for various ratios (МЗ/Ц), when using micro-silica micro-filler with a specific surface area of 30 000 см<sup>2</sup>/g

Для оценки свойств газобетонной смеси и затвердевшего газобетона составов, рассчитанных по приведенным методикам, предложена методика изготовления контрольных образцов газобетона в лабораторных условиях по технологии, которая включает в себя следующие стадии: приготовление газобетонной смеси; заливку в формы (например, 100×100×100 мм) и вспучивание (либо вибровспучивание: частота 50 Гц; амплитуда 272,5 мкм) газобетонной смеси; выдержку вспученных образцов до набора распалубочной прочности в течение 24–48 ч; срезку горбушки и распалубку образцов газобетона; твердение газобетона в нормально-влажностных условиях либо тепловлажностную обработку (ТВО) образцов газобетона по режиму рис. 9; сушку образцов газобетона до постоянной массы.

#### Влияние технологических факторов на свойства смесей и газобетона

Экспериментально установлены закономерности изменений технологических свойств газобетонных смесей конструкционно-теплоизоляционного и теплоизоляционного назначения в зависимости от технологических факторов, а также их влияние на кинетику твердения и прочность газобетона. В частности, экспериментально выявлена зависимость текучести газобетонной смеси от водо-твердого отношения (рис. 10а–б) при различных соотношениях расходов микрозаполнителя и цемента. На рис. 10с–ф частично приведены результаты экспериментальных исследований влияния основных технологических факторов на процессы газообразования и вспучивания газобетонной смеси.

В итоге экспериментально выявлены закономерности влияния на технологические свой-

ства газобетонных смесей основополагающих факторов: водо-твердого отношения, соотношения микрозаполнителя и цемента, удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) примененного микрозаполнителя, температуры смеси и окружающей среды, времени и интенсивности перемешивания смеси, расхода газообразователя. Определено влияние различных факторов на динамику вспучивания газобетонной смеси, что обеспечило возможность выбора необходимых параметров с целью получения газобетона расчетной средней плотности в диапазоне марок D100...D300 (как теплоизоляционного материала) и D350–D900 (как конструкционно-теплоизоляционного материала).

По результатам исследований выявлены закономерности их влияния на кинетику твердения – рост прочности на сжатие газобетона и ее уровень к проектному 28-суточному возрасту, что позволило установить рациональные соотношения между: степенью дисперсности ( $S_{уд}$ ) применяемого микрозаполнителя, водотвердым отношением, соотношением расхода микрозаполнителя и цемента, расходом газообразователя, температурой среды твердения и режимов тепловой обработки, во взаимосвязи с прочностью затвердевшего газобетона. В совокупности с этим обеспечивается целенаправленный выбор параметров технологического процесса, создающий возможность получения материала с требуемыми прочностными характеристиками в сочетании с его средней плотностью.

На этой основе сформулированы базовые положения технологии приготовления и применения конструкционно-теплоизоляционного газобетона на гранитоидном микрозаполнителе марок D350–D900 для производства сборных изделий, а также теплоизоляционного марок D100–D300 для использования в монолитном строительстве.

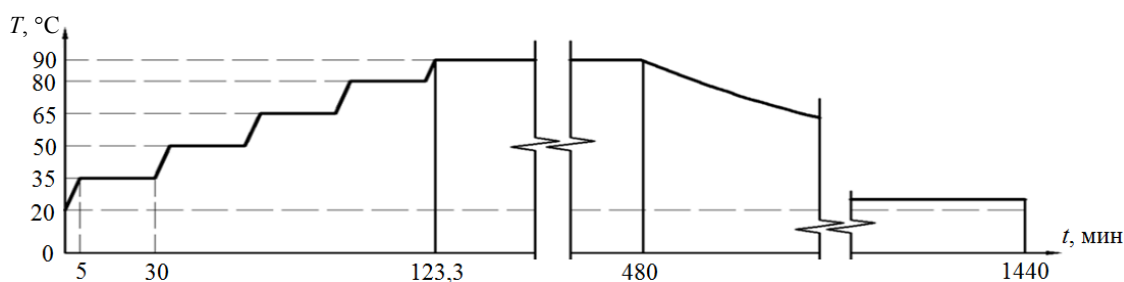


Рис. 9. График тепловлажностной обработки

Fig. 9. Heat and moisture treatment schedule



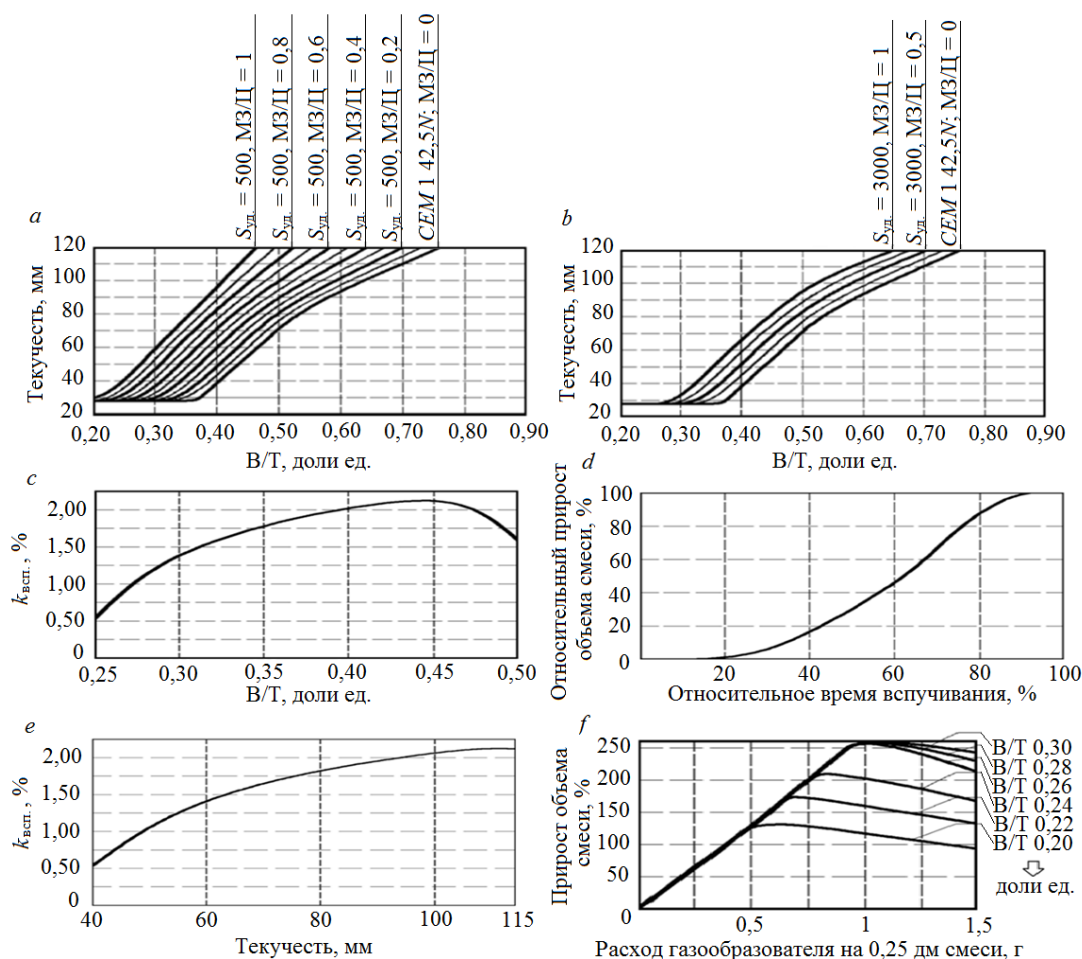


Рис. 10. а – зависимость текучести газобетонных смесей на гранитном микрозаполнителе ( $S_{уд} = 500 \text{ см}^2/\text{г}$ ) от В/Т; б – то же текучести газобетонных смесей на гранитном микрозаполнителе ( $S_{уд} = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) от В/Т; в – то же коэффициента вспучивания от В/Т (для составов с МЗ/Ц = 1 и удельной поверхностью МЗ =  $500 \text{ см}^2/\text{г}$ ); д – графическое отражение динамики вспучивания газобетонной смеси во времени; е – зависимость коэффициента вспучивания от текучести смеси; ф – зависимость прироста объема газобетонной смеси от расхода газообразователя при вибровспучивании (для смесей с МЗ/Ц = 1 и удельной поверхностью микрозаполнителя, равной  $500 \text{ см}^2/\text{г}$ )

Fig. 10. a – dependence of the fluidity of aerated concrete mixtures on granite micro-filler ( $S_{sp} = 500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) on B/T; b – the same for fluidity of aerated concrete mixtures on granite micro-filler ( $S_{sp} = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) on B/T; c – the same for swelling coefficient on B/T (for compositions with M3/C = 1 and specific surface area of M3 =  $500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ); d – graphical representation of the dynamics of swelling of aerated concrete mixture over time; e – dependence of the swelling coefficient on the fluidity of the mixture; f – dependence of the increase in the volume of aerated concrete mixture on the consumption of a gas-forming agent during vibration swelling (for mixtures with M3/C = 1 and specific surface area of micro-filler equal to  $500 \text{ cm}^2/\text{g}$ )

Особый вариант использования теплоизоляционного газобетона марок по плотности D100–D200 представляет его применение в сочетании с технологией возведения стеновых конструкций зданий методом 3D-бетонирования [8] (рис. 11).

В этом случае эффективно используются свойства газобетона вспучиваться, то есть увеличиваться в объеме, что обеспечивает равномерное заполнение объемов пазух несъемных опалубок, возводимых по технологии 3D.

Для оценки бокового давления (распора) вспучивающейся газобетонной смеси предложен метод предваряющего контроля его величины с целью последующего учета и определения высоты одновременно укладываемых слоев газобетонной смеси в опалубку. Производственная апробация результатов исследований, реализованная в варианте заводского изготовления стеновых блоков, подтвердила их эффективность.

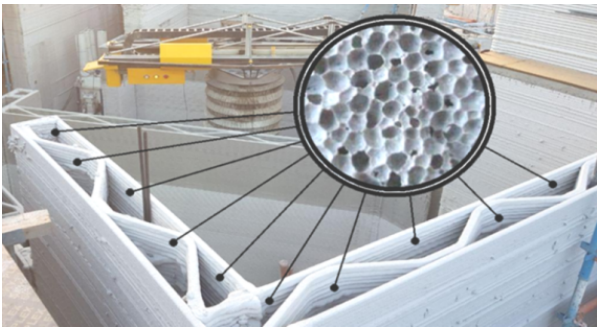


Рис. 11. Стеновая конструкция в варианте несъемной опалубки, возведенная с использованием строительного 3D-принтера и заполняемая газобетонной смесью теплоизоляционного назначения

Fig. 11. Wall structure with non-removable formwork, erected using a construction 3D-printer and filled with aerated concrete mixture thermal insulation purposes

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны научно-практические основы малоэнергоемкой технологии ячеистого газобетона безавтоклавного твердения на гранитоидном микрозаполнителе для сборного и монолитного строительства, включающие экспериментально обоснованные:

– методики расчета состава газобетона по критериям плотности и прочности на сжатие в диапазоне марок D350–D900 и классов B0,5–B7,5 конструкционно-теплоизоляционного назначения, а также D100–D300 (прочность на сжатие 0,04–1,5 МПа) теплоизоляционного назначения во взаимосвязи с дисперсностью применяемого микрозаполнителя из молотого гранитного отсева с удельной поверхностью соответственно:  $S_{уд} \sim 500\text{--}3000 \text{ см}^2/\text{г}$  для конструкционно-теплоизоляционного, и для теплоизоляционного газобетона:  $S_{уд} \sim 30000 \text{ см}^2/\text{г}$  (микрокремнезем) и  $S_{уд} \sim 20000 \text{ см}^2/\text{г}$  (ультрадисперсные фракции гранитного отсева);

– методики контроля реологических (технологических) свойств газобетонных смесей, обеспечивающих требуемые условия структурообразования газобетона расчетных составов, методику оценки бокового давления смеси при укладке в опалубки (формы), а также методику и прибор для неразрушающего контроля как кинетики роста прочности твердеющего, так и прочности затвердевшего или эксплуатируемого ячеистого бетона, полученного по разработанной или иной технологии;

– режимы технологических переделов, составляющих малоэнергоемкую технологию

ячеистого газобетона безавтоклавного твердения, включающие: подготовку микродисперсного (до  $S_{уд} \leq 6000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) и ультрадисперсного (до  $S_{уд} \sim 20000\text{--}30000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) заполнителя; приготовление и контроль качества смеси расчетных составов; укладку ее в формы или опалубку; период структурообразования при вспучивании газобетона и его твердение в беспрогревном варианте, либо с тепловой обработкой при атмосферном давлении, что позволяет отказаться от энергозатратного, технически сложного и дорогостоящего автоклавного оборудования при изготовлении сборных изделий и обеспечивает возможность использования разработанной технологии в монолитном строительстве, включая устройство тепло- и звукоизоляции заполнением внутренних полостей стеновых конструкций, возведенных по технологии 3D-бетонирования, газобетоном теплоизоляционного назначения марок D100–D300.

2. Экспериментально подтверждено соответствие расчетных характеристик газобетона на гранитоидном микрозаполнителе и ультрадисперсных заполнителях составов, рассчитанных по предложенным методикам, фактическим данным, полученным как в лабораторных условиях, так и в процессе производственной апробации разработанной технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Самуйлов, Ю. Д. Методика определения состава газобетонной смеси требуемой прочности неавтоклавного ячеистого газобетона на микрозаполнителе из диспергированного гранитного отсева / Ю. Д. Самуйлов // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск: Изд. центр БГУ, 2019. Вып. 11. С. 234–252. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-15>.
2. Самуйлов, Ю. Д. Методика определения состава газобетонной смеси требуемой плотности неавтоклавного ячеистого газобетона на микрозаполнителе из диспергированного гранитного отсева / Ю. Д. Самуйлов // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск: Изд. центр БГУ, 2018. Вып. 10. С. 214–232.
3. Самуйлов, Ю. Д. Неавтоклавный газобетон: технология получения, особенности применения в монолитном строительстве, неразрушающий способ контроля прочности на сжатие / Ю. Д. Самуйлов // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск: Изд. центр БГУ, 2016. Вып. 8. С. 225–240.
4. Устройство для определения прочности образца из легкого ячеистого бетона: пат. ВУ 20155 / Ю. Д. Самуйлов. Оpubл. 30.08.2014.
5. Самуйлов, Ю. Д. Результаты апробирования устройства для определения прочности ячеистого бетона неразрушающим методом / Ю. Д. Самуйлов // Наука – образова-

- нию, производству, экономике: материалы 15-й Междуна. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2017. Т. 2. С. 282.
6. О применимости отсева продуктов дробления гранитоидных пород в качестве микрозаполнителя для неавтоклавных ячеистых бетонов / Ю. Д. Самуйлов [и др.] // Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты: сб. Междуна. науч.-техн. ст. (материалы науч.-метод. конф., Минск, 26–27 мая 2015 г.). Минск: БНТУ, 2015. С. 304–309.
  7. Батыновский, Э. И. Влияние тонкости помола микрозаполнителя на свойства неавтоклавного ячеистого газобетона и газобетонной смеси, методика проектирования ячеистых бетонов с пониженной плотностью / Э. И. Батыновский, Ю. Д. Самуйлов // Механика и технология. 2022. № 1. С. 110–122.
  8. Самуйлов, Ю. Д. 3D-бетонирование – составы, методики и свойства смесей / Ю. Д. Самуйлов, В. М. Тrepачко, Э. И. Батыновский // Наука и техника. 2022. Т. 21, № 5 С. 374–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385>.
  9. Самуйлов, Ю. Д. Модернизированная технология производства ячеистого бетона неавтоклавного твердения / Ю. Д. Самуйлов // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: материалы XX Междуна. науч.-метод. семинара (Гродно, 17–19 февр. 2016 г.). Гродно: ГрГУ, 2016. С. 299–302.
  10. Самуйлов, Ю. Д. Конструкционно-теплоизоляционные и теплоизоляционные стеновые материалы из неавтоклавного ячеистого бетона на гранитоидном микрозаполнителе / Ю. Д. Самуйлов // Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты: материалы Междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 28 мая 2021 г.). Минск: БНТУ, 2021. С. 177–188.
- Поступила 08.04.2024  
Подписана к печати 10.06.2024  
Опубликована онлайн 31.07.2024
- REFERENCES
1. Samuilov Yu. D. (2019) Methodology for Determining the Composition of an Aerated Concrete Mixture of the Required Strength of Non-Autoclaved Cellular Aerated Concrete on Micro-Aggregate from Dispersed Granite Screenings. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: sb. nauch. tr.* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. Collection of Scientific Papers]. Minsk, BSU Publishing Center, Iss. 11, 234–252 (in Russian).
  2. Samuilov Yu. D. (2018) Methodology for Determining the Composition of an Aerated Concrete Mixture of the Required Density of Non-Autoclaved Cellular Aerated Concrete on Micro-Aggregate from Dispersed Granite Screenings. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Nauch. Tr.* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. Collection of Scientific Papers]. Minsk, BSU Publishing Center, Iss. 10, 214–232 (in Russian).
  3. Samuilov Yu. D. (2016) Non-Autoclaved Aerated Concrete: Production Technology, Features of Use in Monolithic Construction, Non-Destructive Method of Controlling Compressive Strength. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Nauch. Tr.* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. Collection of Scientific Papers]. Minsk, BSU Publishing Center, Iss. 8, 225–240 (in Russian).
  4. Samuilov Yu. D. (2014) *Device for Determining the Strength of a Lightweight Cellular Concrete Sample*: Patent BY no. 20155 (in Russian).
  5. Samuilov Yu. D. (2017) Results of Testing A Device for Determining the Strength of Cellular Concrete Using a Non-Destructive Method. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 15-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf* [Science for Education, Production, Economics. Materials of the 15th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 282 (in Russian).
  6. Samuilov Yu. D., Krasulina L. V., Opekunov V. V., Batoryanovskii E. I. (2015) On the Applicability of Screening Products of Crushing Granitoid Rocks as a Micro-Aggregate for Non-Autoclaved Cellular Concrete. *Aktual'nye Problemy Innovatsionnoi Podgotovki Inzhenernykh Kadrov pri Perekhode Stroitel'noi Otraski na Evropeiskie Standarty: Sb. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. St. (Materialy Nauch.-Metod. Konf., Minsk, 26–27 Maya 2015 g.)* [Current Problems of Innovative Training of Engineering Personnel during the Transition of the Construction Industry to European Standards. Collection of International Scientific and Technical Articles (Materials of the Scientific and Methodological Conference, Minsk, May 26–27, 2015)]. Minsk, Belarusian National Technical University, 304–309 (in Russian).
  7. Batoryanovskiy E. I., Samuilov Yu. D. (2022) The Influence of Microaggregate Grinding Fineness on the Properties of Non-Autoclaved Cellular Aerated Concrete and Aerated Concrete Mixture, a Method for Designing Cellular Concrete with Reduced Density. *Mekhanika i Tekhnologiya* [Mechanics and Technology], (1), 110–122 (in Russian).
  8. Samuilov Yu. D., Trepachko V. M., Batoryanovskiy E. I. (2022) 3D-Concreting – Compositions, Techniques and Properties of Mixtures. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 21 (5), 374–385. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-5-374-385> (in Russian).
  9. Samuilov Yu. D. (2016) Modernized Technology for the Production of Non-Autoclaved Cellular Concrete. *Perspektivnye Napravleniya Innovatsionnogo Razvitiya Stroitel'stva i Podgotovki Inzhenernykh Kadrov: Materialy XX Mezhdunar. Nauch.-Metod. Seminara (Grodno, 17–19 Fevr. 2016 g.)* [Promising Direction for Innovative Development of Construction and Training of Engineering Personnel. Materials of the XX International Scientific and Methodological Seminar (Grodno, February 17–19, 2016)]. Grodno, State University of Grodno, 299–302 (in Russian).
  10. Samuilov Yu. D. (2021) Structural, Thermal Insulation and Thermal Insulation Wall Materials Made of Non-Autoclaved Cellular Concrete on Granitoid Micro-Aggregate. *Aktual'nye Problemy Innovatsionnoi Podgotovki Inzhenernykh Kadrov pri Perekhode Stroitel'noi Otraski na Evropeiskie Standarty: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* (Minsk, 28 Maya 2021 g.) [Current Problems of Innovative Training of Engineering Personnel during the Transition of the construction Industry to European Standards. Materials of the International Scientific and Technical Conference (Minsk, May 28, 2021)]. Minsk, Belarusian National Technical University, 177–188 (in Russian).

Received: 08.04.2024

Accepted: 10.06.2024

Published online: 31.07.2024