

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 666.973

### НЕАВТОКЛАВНЫЙ ПОРИЗОВАННЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНОЙ ЗОЛЫ

*В.В. Белов, Т.Р. Баркая, П.В. Куляев**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Баркая Т.Р.,  
Куляев П.В., 2021

**Аннотация.** В работе рассмотрена малоэнергоёмкая технология неавтоклавно поризованного бетона (НЗПБ) на основе топливной золы. После затворения водой и перемешивания в обычном смесителе сырьевая смесь заливается в формы или опалубку, где вспучивается и затем твердеет в нормальных условиях или с небольшой тепловой обработкой. Указано, что использование НЗПБ с такой же средней плотностью, как у обычных легких бетонов на обжиговых заполнителях, для армированных несущих конструкций может быть оправдано близкими значениями общей пористости и связанными с ними показателями упругих и деформативных свойств, а также аналогичными условиями работы арматуры в этих изделиях. Сделан вывод, что НЗПБ, по сравнению с газозолобетонами, выгодно отличаются большей стабильностью свойств при изготовлении, меньшим расходом газообразующих добавок, а по сравнению с обычными легкими бетонами – отсутствием дорогостоящих крупных пористых заполнителей. Определены прочностные и деформативные характеристики НЗПБ как при кратковременных, так и при действующих длительно нагрузках, что является базой для дальнейших исследований применения этого перспективного материала в несущих и ограждающих конструкциях.

**Ключевые слова:** неавтоклавный газобетон, топливная зола в качестве наполнителя, малоэнергоёмкая технология, прочностные характеристики, деформативные характеристики.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-6-18**

Целесообразность применения в несущих конструкциях легкого бетона вместо тяжелого обусловлена снижением нагрузки от собственной массы конструкций, что обеспечивает экономию арматуры и самого бетона. Для крупных инженерных сооружений и многоэтажных зданий переход от тяжелого бетона к конструкционному легкому позволяет уменьшить затраты на возведение фундаментов [1]. При этом снижение плотности бетона для несущих и ограждающих конструкций дает дополнительную теплозащиту внутренних помещений, облегчает условия эксплуатации самих конструкций, что предопределяет актуальность разработки таких материалов [2].

Снизить стоимость легкобетонных конструкций можно, отказавшись от применения дорогостоящих пористых заполнителей и использования при изготовлении таких конструкций эффекта поризации бетонной смеси с получением структуры бетона, характеризующейся наличием большого количества мелких замкнутых пор, что предопределяет высокую водонепроницаемость и морозостойкость. Способы поризации бетонной смеси на основе воздухововлекающих добавок типа СНВ и пенообразователей при их сравнительно небольшом расходе не позволяют существенно уменьшить плотность и материалоемкость конструкций, а при большом количестве добавок дороги (из-за высокой стоимости и дефицитности самих добавок). Кроме того, эти способы отличаются сложностью изготовления бетона.

В настоящее время из-за увеличения стоимости энергоресурсов стали рассматривать в качестве строительных материалов минеральные материалы с высокими теплоизоляционными свойствами. К ним относится неавтоклавный газобетон [3, 4]. Большой интерес вызывает получение ячеистого бетона неавтоклавного твердения, обладающего малой энергоемкостью, безотходностью и экологической чистотой [5]. Однако усадка неавтоклавного газобетона в процессе высыхания может достигать 2–3,5 мм/м. На нее значительно влияют свойства межпоровой перегородки [6], которые во многом определяются микроструктурой, оптимизируемой с помощью тонкодисперсных минеральных добавок, что в итоге оказывает положительное комплексное воздействие на технологию и свойства теплоизоляционных материалов [7]. Например, добавка фосфогипса в составе неавтоклавного ячеистого бетона играет роль не только наполнителя, но и активатора [8]. При этом установлено уменьшение усадки данного материала с увеличением содержания минеральных добавок вместо части цемента [9].

Армирование высокодисперсными базальтовыми волокнами позволяет компенсировать главные недостатки обычного бетона – низкую прочность при растяжении и хрупкость (недостаточную трещиностойкость) [10], а также, что очевидно, снизить усадку. В работе [11] исследованы и проанализированы следующие методы снижения усадки бетона: использование цемента с пониженным тепловыделением, стальных волокон; применение полипропиленовых волокон с предварительным их увлажнением, легкого заполнителя, предварительно насыщаемого водой. Интересно, что в случае с природным легким заполнителем с размером зерен 2–4 мм, предварительно насыщаемым водой, усадка высокопрочного бетона в возрасте 28 сут сократилась примерно на 48 % по сравнению с эталонным бетоном и не изменялась прочность при сжатии [11].

Развитие прочности пластифицированного цементного камня, изготовленного с дозировкой суперпластификатора С-3 в интервале от 1,0 до 0,25 % от массы цемента при постоянном значении В/Ц, свидетельствует о том, что прочность пластифицированного цементного камня может быть как выше, так и ниже, чем у контрольного состава [12]. Существует технология, не допускающая усадочных деформаций при получении газобетонных стеновых камней на основе отходов дробления бетона по литьевым технологиям средней плотностью 650–750 кг/м<sup>3</sup> с оптимальной структурой [13]. В процессе высыхания газобетона неавтоклавного твердения усадка может достигать величины 2,0–3,5 мм/м [14]. Дальнейшее удешевление таких конструкций возможно за счет использования в составе бетона отходов местной промышленности и прежде всего зол ТЭС. Газозобетоны по эксплуатационным показателям не уступают кирпичу и керамзитобетону, а в некоторых случаях по морозостойкости и теплозащите превосходят

их. Себестоимость производства газозолобетонных изделий (по сравнению с легкобетонными) на 50 % ниже. В условиях повышения цен на энергоносители эффективность газозолобетона будет возрастать по сравнению с бетоном на заполнителях, требующих высокотемпературной обработки [15]. Имеется определенный опыт получения армированных конструкций на основе газозолобетона [16].

Однако использованию неавтоклавных ячеистых бетонов плотностью 900–1200 кг/м<sup>3</sup> вместо шлако- и керамзитобетона плотностью 1600–1800 кг/м<sup>3</sup> препятствует недостаточность нормативной базы. До настоящего времени отсутствуют показатели длительной деформативности, данные о динамике прочностных и теплофизических показателей, сведения о поведении в изделиях из этих бетонов стальной арматуры и др. Во многих случаях это делает невозможным применение неавтоклавных ячеистых бетонов вместо бетонов на обжиговых заполнителях и в целом резко ограничивает область использования первых для несущих железобетонных конструкций [13]. Выход из этого положения видится в получении нового материала – неавтоклавного зольного поризованного бетона (НЗПБ) плотностью 1600–1700 кг/м<sup>3</sup> на основе газобетонной технологии, но с меньшим количеством газообразующих добавок. Использование НЗПБ такой же средней плотности, как у обычных легких бетонов на обжиговых заполнителях для армированных несущих конструкций, может быть оправдано близкими значениями общей пористости и связанными с ними показателями упругих и деформативных свойств, а также аналогичными условиями работы арматуры в этих изделиях. В то же время НЗПБ, по сравнению с газозолобетонами, будут выгодно отличаться большей стабильностью свойств при изготовлении, меньшим расходом газообразующих добавок, а по сравнению с обычными легкими бетонами – отсутствием дорогостоящих крупных пористых заполнителей.

При получении НЗПБ в качестве кремнеземистого компонента использовался отход местной промышленности – зола гидроудаления Тверской ТЭЦ-4. Насыпная плотность золы ТЭЦ-4 колеблется от 700 до 1300 кг/м<sup>3</sup>, удельная поверхность – от 800 до 1200 см<sup>2</sup>/г. Истинная плотность зерен составляет от 2,02 до 2,5 г/см<sup>3</sup>. Зола ТЭЦ-4, согласно классификации, относится к мелкозернистой. По содержанию СаО и MgO, а также SO<sub>3</sub> зола отвечает требованиям стандартов. Вследствие несоответствия золы ТЭЦ-4 нормативным требованиям по удельной поверхности потребовались специальные меры для ее подготовки с целью применения в качестве зольного заполнителя при изготовлении ячеистого бетона. Другим кремнеземистым компонентом являлся песок для строительных работ по ГОСТ 8735.

В качестве щелочной добавки использовали негашеную известь с массовой долей оксида кальция в химическом составе не менее 85 %. Кроме того, во все замесы для увеличения пластичности смеси при литьевом способе формования в воду затворения вводилась добавка суперпластификатора СП-1 в постоянном количестве 1,5 % от массы цемента. Воду затворения перед формованием образцов подогревали до температуры 60–65 °С.

В качестве газообразователя в работе применялась алюминиевая пудра марки ПАП-2.

Для подбора оптимального состава НЗПБ был использован нелинейный трехфакторный планированный эксперимент типа В-D<sub>13</sub>. Переменные факторы: массовая доля золы в смеси золы и песка ( $Z / (Z + П)$ ), количество добавки газообразователя – алюминиевой пудры по отношению к массе цемента А и водоцементное отношение В/Ц, – варьировались в пределах:  $Z / (Z + П) = 0–0,6$ ;  $A = 0,07–0,11 \%$ ;  $В/Ц = 0,57–0,69$ . Отношение массы цемента к массе заполнителей (золы и песка) было постоянным и равным 1:2,3.

Приготовление бетонной смеси осуществлялось следующим образом: в сосуд для перемешивания загружали цемент, предварительно высушенные и просеянные через сито (с размером ячейки 5 мм) золу и песок, воду затворения. Смесь перемешивали с помощью пропеллерной мешалки при 150–200 об/мин в течение 2 мин. Затем определяли плотность непоризованной бетонной смеси, используя мерный сосуд емкостью 1 дм<sup>3</sup>, и текучесть смеси по величине (диаметру) расплыва лепешки с помощью вискозиметра Суттарда. После этого смесь вновь выгружали в сосуд для перемешивания, добавляли расчетное количество алюминиевой суспензии и перемешивали еще 1 мин, а потом заливали в формы кубов с ребром 10 см примерно на 90 % их высоты.

Через 2 ч после заливки смеси в формы (поризация смеси обычно заканчивалась через 30–40 мин) образцы помещали в пропарочную камеру. После твердения образцов в пропарочной камере в течение 8 ч при температуре изотермической выдержки 85 °С производили их распалубку и испытания.

В качестве критериев оптимизации состава НЗПБ определяли среднюю плотность образцов в сухом состоянии, предел прочности на сжатие, коэффициент конструктивного качества ККК, рассчитываемый по формуле

$$ККК = \frac{R_{сж}}{\gamma_0},$$

где  $R_{сж}$  – предел прочности на сжатие, МПа;  $\gamma_0$  – относительная плотность образцов бетона (по отношению к плотности воды), безразмерная величина.

После обработки данных эксперимента были получены коэффициенты математических моделей зависимостей свойств бетонной смеси и бетона от указанных выше факторов вида

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + \\ + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3,$$

где  $x_1 = 3,33(Z / (Z + П) - 0,3)$ ;  $x_2 = 50(A - 0,09)$ ;  $x_3 = 16,7(В/Ц - 0,63)$ .

Коэффициенты математических моделей зависимостей приведены в табл. 1.

Построенные по математическим моделям зависимости плотности образцов НЗПБ в сухом состоянии от факторов состава материала показывают, что увеличение содержания алюминиевой пудры А, доли  $Z / (Z + П)$ , а также В/Ц влияют на снижение плотности образцов в сухом состоянии. В то же время зависимости предела прочности на сжатие и коэффициента конструктивного качества имеют более сложный характер и характеризуются наличием локальных экстремумов.

Таблица 1

Коэффициенты математических моделей зависимостей свойств бетонной смеси  
и зольного поризованного бетона от состава

Показатель	Коэффициент									
	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>33</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>23</sub>
Плотность непоризованной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2204	-28,5	-14,9	-7,5	-58,4	22,0	-109,4	-54,2	8,1	-50,6
Диаметр расплыва по Сутгарду, см	12,9	-4,3	-0,07	1,4	2,1	-1,7	-0,05	-0,5	-2,0	0,4
Плотность образцов бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	1616	-66,1	-97,4	-70,0	22,0	-21,5	-42,5	-49,1	-61,6	-38,1
Прочность образцов бетона, МПа	9,6	0,13	-1,5	-1,5	-0,56	-1,15	-0,59	-0,46	-0,50	-0,54
Коэффициент конструктивного качества	5,91	0,26	-0,65	-0,78	-0,38	-0,71	-0,26	-0,10	-0,13	-0,30

Для определения оптимального состава НЗПБ, соответствующего наибольшим значениям  $R_{сж}$  и ККК, решены задачи оптимизации этих зависимостей. Оптимальные значения переменных факторов, соответствующие максимальному коэффициенту конструктивного качества, составили:  $3 / (3 + П) = 0,465$ ;  $A = 0,084 \%$ ;  $B/Ц = 0,57$ . При этом предел прочности на сжатие НЗПБ в возрасте 28 сут равен 15,2 МПа, плотность в сухом состоянии – 1600 кг/м<sup>3</sup>. По результатам исследований составов НЗПБ было принято решение о возможности использования конструкционного НЗПБ при изготовлении опытных образцов НЗПБ и армированных изделий на его основе.

Для изучения прочностных и деформативных свойств НЗПБ оптимального состава было изготовлено 40 кубиков размером 100×100×100 мм и 40 призм размером 400×100×100 мм. Образцы хранились в естественном состоянии при температуре 17–20 °С и влажности воздуха в пределах от 50 до 75 %. Для получения данных о динамике изменения кубиковой и призмной прочности НЗПБ, а также относительной деформации при испытании призм на сжатие в зависимости от времени проводились испытания кубов в возрасте 7, 14, 28, 45, 60, 90, 120, 150 и 200 сут, а испытания призм – в возрасте бетона 28, 90 и 200 сут. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

## Прочностные и деформативные характеристики НЗПБ

Возраст бетона $\tau$ , сут	Прочность кубика $R_{сж}$ , МПа	Призменная прочность $R_b$ , МПа	Модуль упругости $E$ , МПа
7	7,7	–	–
14	11,8	–	–
28	15,2	11,4	$2 \times 10^4$
45	15,5	–	–
60	15,8	–	–
90	15,9	11,9	$2,04 \times 10^4$
120	16,1	–	–
150	16,25	–	–
200	16,4	12,1	$2,05 \times 10^4$

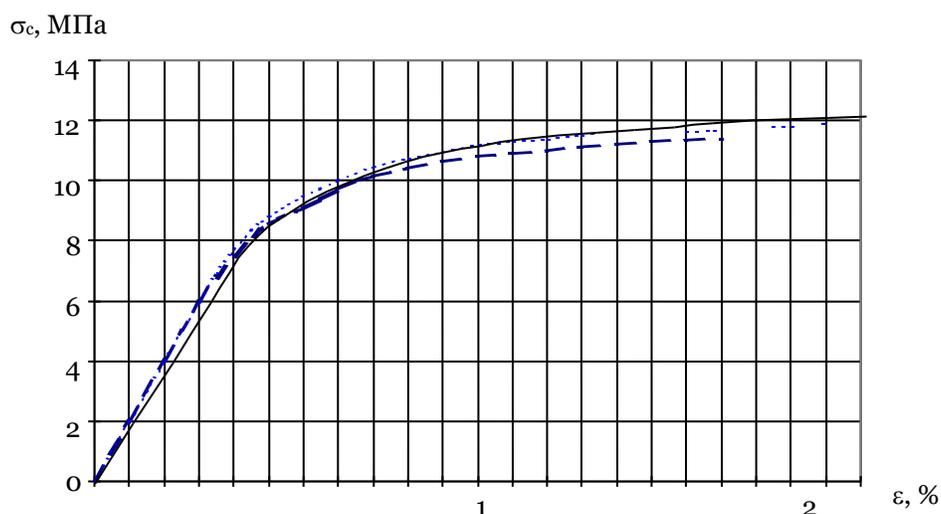


Рис. 1. Развитие относительных деформаций  $\varepsilon$  в бетоне призм при испытаниях на сжатие в различных возрастах:  
 —  $\tau = 28$  сут;    .....  $\tau = 120$  сут;    - - -  $\tau = 220$  сут

При проведении экспериментальных исследований образцов, выполненных из нового материала (т. е. НЗПБ), появилась необходимость в выявлении влияния уровня длительного нагружения на особенности процесса микротрещинообразования.

Известно, что при сжатии бетонных элементов на начальном этапе происходит некоторое уплотнение материала, обусловленное залечиванием микротрещин. При дальнейшем нагружении процесс микротрещинообразования начинает преобладать над уплотнением бетона, в результате чего структура его становится менее однородной, при этом время прохождения ультразвуковой волны увеличивается. Нагрузка, при которой приращение времени прохождения ультразвуковой волны меняет знак, соответствует первой параметрической точке  $R_{10}$ . Этот уровень нагружения определяет начало интенсивного микротрещинообразования [8]. Процесс сопровождается появлением заметных неупругих деформаций ползучести. При достижении уровня второй

параметрической точки –  $R_t$  – процессы микротрещинообразования ускоряются, а деформации ползучести бетона переходят в нелинейную область.

Испытания проводились на стандартных золотонных призмах с размерами  $10 \times 10 \times 40$  см. Было испытано 6 призм.

Испытания проводились по методике из ГОСТ 17624. Для измерения времени распространения ультразвука в бетоне применялся прибор УК-10ПМС и преобразователи с резонансной частотой 60 кГц. Был использован способ сквозного прозвучивания, т. е. ультразвуковые преобразователи устанавливались с противоположных сторон образца. Для обеспечения надежного контакта между бетоном и рабочими поверхностями ультразвуковых преобразователей применялся вязкий материал – жидкое стекло. Результаты ультразвуковых исследований призм приведены в табл. 3, в которой  $N/N_u$  – уровень нагружения при сжатии в долях от разрушающей нагрузки  $N_u$ ;  $\Delta t$  – приращение времени прохождения ультразвуковых волн через испытываемый образец, и на рис. 2.

Таблица 3

Результаты ультразвуковых исследований призм при нагружении

Образец	$\Delta t$ , мкс, в зависимости от $N/N_u$				
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
П-1	-0,03	-0,04	-0,04	0,11	0,16
П-2	-0,025	-0,045	-0,03	0,12	0,18
П-3	-0,029	-0,038	-0,02	0,05	0,12
П-4	-0,22	-0,026	-0,017	0,03	0,12

Анализ кривых на рис. 2 показывает, что в НЗПБ изменения времени прохождения и скорости при уровнях нагружения, соответствующих появлению параметрических точек, незначительны. Эту особенность деформирования рассматриваемого материала можно объяснить его значительной пористостью.

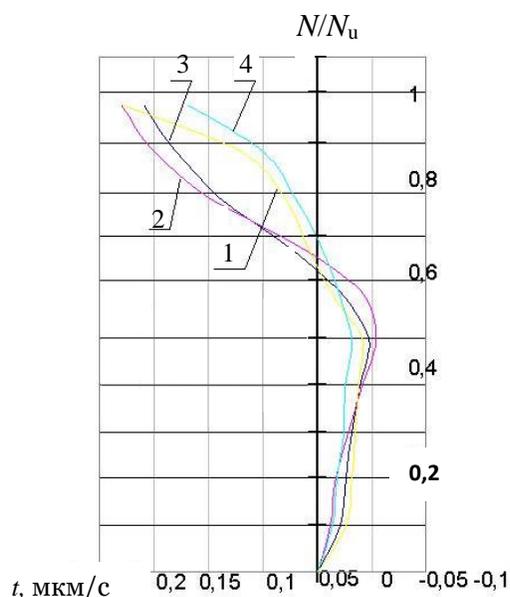


Рис. 2. Зависимость времени прохождения ультразвуковых волн от уровня нагружения: 1 – П-1; 2 – П-2; 3 – П-3; 4 – П-4

Исходя из положения критических точек, следует задавать два уровня нагружения основных образцов – 0,6 и 0,75 от разрушающего усилия. При уровне 0,6 обеспечивается такое состояние бетона, при котором деформации ползучести находятся в линейной области. Уровень нагружения 0,75 должен был обеспечить интенсивное натекание деформаций ползучести, но вместе с тем предполагалось, что нелинейность ползучести, вызванная высоким уровнем напряженного состояния, через некоторое время выдержки вследствие перераспределения напряжений сменится линейным развитием деформаций.

Были также проведены испытания, призванные выявить влияние длительного действия нагрузки. Эти испытания бетонных призм с размерами 10×10×40 см проводили в специальных пружинных установках, разработанных на кафедре конструкций и сооружений Тверского государственного технического университета. Деформации ползучести в бетонных призмах определялись по общепринятой методике путем исключения из суммарных деформаций деформаций усадки незагруженных образцов – «близнецов». Усадочные деформации замерялись на незагруженных призмах, деформации усадки и ползучести – индикаторами часового типа с ценой деления 0,002 мм, установленными с двух противоположных сторон образцов.

На протяжении всего периода испытаний измерялись деформации свободной усадки бетона, а также температура и влажность окружающей среды (рис. 3).

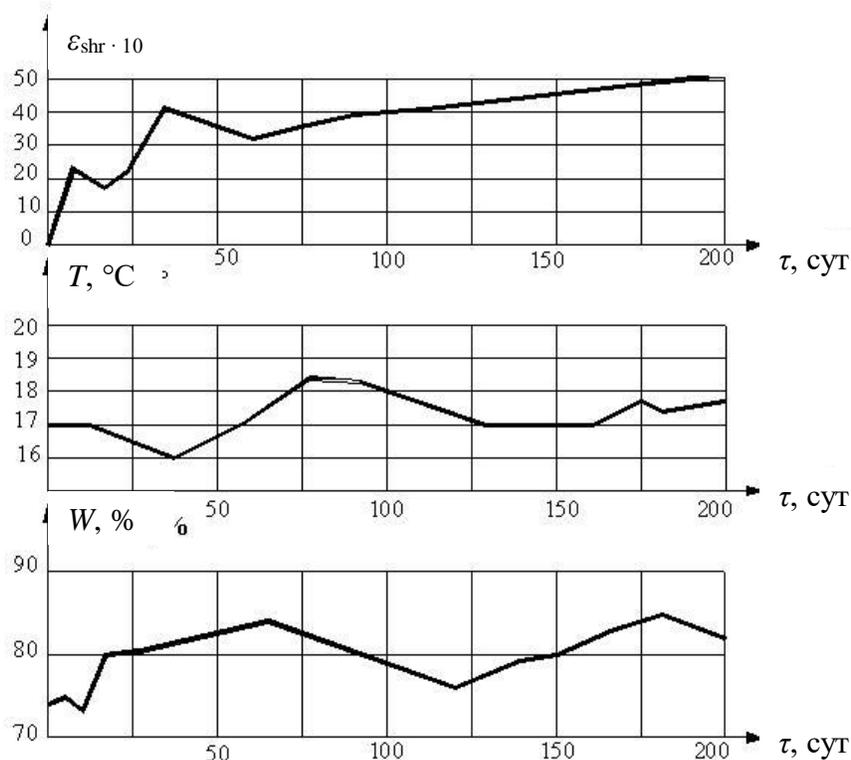


Рис. 3. Изменение во времени деформации свободной усадки бетона  $\epsilon_{shr}$ , температуры  $T$  и относительной влажности воздуха  $W$

Численные значения этих величин (упругие деформации  $\epsilon_{be}$ , деформации ползучести  $\epsilon_{pl}$  и характеристики ползучести  $\phi_t$  бетона при различных возрастах

нагружения  $\tau_1$ ) для различных уровней и возрастов нагружений и наблюдений приведены ниже:

Возраст бетона в момент нагружения $\tau$ , сут											
55				120				200			
$t-\tau_1$ , сут	$\varepsilon_{\text{де}} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{\text{пл}} \cdot 10^5$	$\varphi_t$	$t-\tau_1$ , сут	$\varepsilon_{\text{де}} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{\text{пл}} \cdot 10^5$	$\varphi_t$	$t-\tau_1$ , сут	$\varepsilon_{\text{де}} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{\text{пл}} \cdot 10^5$	$\varphi_t$
1	75,6	27	0,36	1	71,8	17,2	0,24	1	69,0	10,3	0,15
3		44	0,59	3		28,7	0,40	3		17,3	0,25
5		63	0,83	5		40,2	0,56	5		24,1	0,35
7		74	0,98	7		48,1	0,67	7		30,3	0,44
10		88	1,17	10		60,3	0,84	10		41,4	0,60
20		104	1,38	20		76,82	1,07	20		60,0	0,87
30		120	1,59	30		94,1	1,31	30		81,4	1,18
45		152	1,79	45		109,1	1,52	45		97,9	1,42
60		163	2,00	60		122,7	1,71	60		109,7	1,59
90		179	2,15	90		132,8	1,85	80		118	1,71
120		186	2,24	120		142,1	1,98				
150			2,36								
220			2,46								

Характер кривых на рис. 4 свидетельствует о явно выраженной зависимости значений  $\varphi_t$  от возраста бетона. Однако характер развития во времени характеристик ползучести при загрузении для возраста  $\tau_1 = 50, 120, 200$  сут практически одинаков.

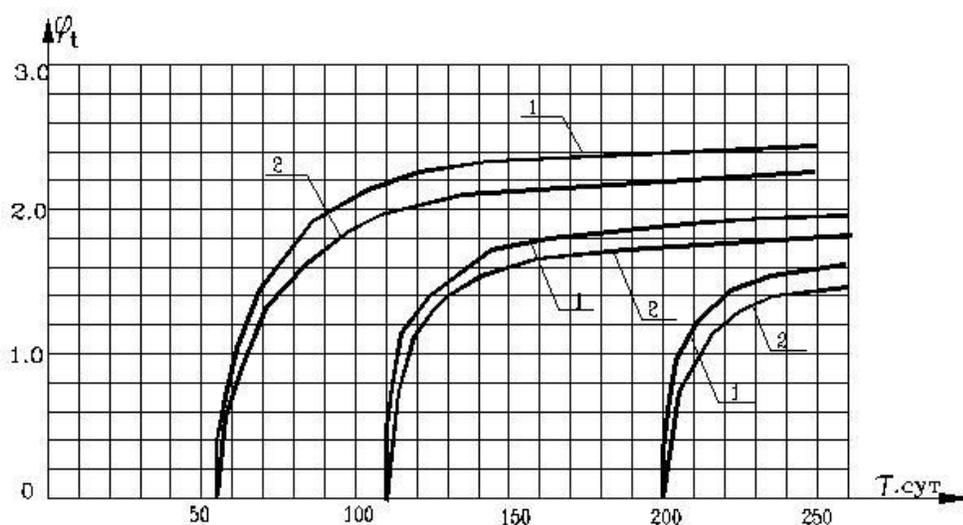


Рис. 4. Изменение во времени характеристик ползучести НЗПБ  $\varphi_t$  в зависимости от возраста  $\tau$  и времени нагружения  $T$ :

1 – уровень нагрузки 75 % от кратковременного разрушающего усилия; 2 – то же, 60 %

Для любого времени наблюдения кривые характеристик ползучести имеют одну особенность, общую для них. Это быстрое (в течение первых суток) натекание деформаций и затем возрастание их по экспоненте с приблизительно одинаковой скоростью. Величина быстронатекающих деформаций ползучести весьма значительна и колеблется в пределах от 30 до 40 % от полных (т. е. предельных) значений для моментов времени, когда затухание становится очевидным.

Таким образом, в результате работы получен новый материал (НЗПБ плотностью 1600–1700 кг/м<sup>3</sup>) на основе газобетонной технологии, но с меньшим количеством газообразующих добавок. Установлено, что данный бетон имеет класс по прочности на сжатие В15 и призмную прочность 11,4 МПа и является достаточно эффективным конструкционным материалом.

При использовании НЗПБ масса конструкции может быть снижена на 40 % по сравнению с элементами из тяжелого бетона. Определены прочностные и деформативные характеристики НЗПБ как при кратковременных, так и при действующих длительно нагрузках, что является базой для дальнейших исследований применения этого перспективного материала в несущих и ограждающих конструкциях.

В дальнейших исследованиях предполагается: 1) усовершенствовать технологию изготовления НЗПБ, в том числе за счет использования активации зольного заполнителя с целью получения более стабильных и высоких качественных показателей материала; 2) изучить новое и нетрадиционное сочетание таких конструктивных материалов, как сравнительно малопрочный НЗПБ с плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup> и высокопрочная арматура; 3) исследовать деформативность, прочность и трещиностойкость сжатых армированных элементов на основе НЗПБ; 4) разработать методику определения напряженно-деформированного состояния сечений конструктивных элементов при осевом и внецентренном сжатии с учетом неупругого состояния бетона, его ползучести и усадки; 5) разработать методику расчета несущей способности конструкций на основе НЗПБ; 6) провести первичные технико-экономические расчеты по эффективности производства и эксплуатации новых несущих и ограждающих конструкций на основе НЗПБ для строительства и реконструкции зданий различного назначения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиненков Ю.В., Ярмаковский В.Н. Легкие бетоны и конструкции из них // *Бетон и железобетон*. 1997. № 5. С. 8–10.
2. Чернышов Е.М., Славчева Г.С., Потамошнева Н.Д., Макеев А.И. Поризованные бетоны для теплоэффективных жилых домов // *Известия вузов. Строительство*. 2002. № 5. С. 22–27.
3. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Шукин Г.Л. Компенсация усадки пенобетона // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 3–6.
4. Свинарев А.В., Глушков А.М., Куприна А.А. Технологическая модель ТМ-25 для производства неавтоклавных фибропенобетонных изделий // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 4–6.
5. Бердов Г.И., Умнова Е.В. Ячеистый шлакопортландцементный бетон на известково-серном затворителе // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 76–78.

6. Логанина В.И. Свойства известковых композитов с силикатосодержащими наполнителями // *Строительные материалы*. 2012. № 3. С. 30–31.
7. Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Сидоров В.В. Микроструктура теплоизоляционных материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков // *Строительные материалы*. 2013. № 8. С. 79–80.
8. Yang Lin, Yan Yun, Hu Zhihua. Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete // *Construction and Building Materials*. Vol. 44. July 2013, pp. 600–606.
9. Piasta Wojciech, Sikora Hubert. Effect of airentrain menton shrinkage of blended cements concretes // *Construction and Building Materials*. № 99 (2015), pp. 298–307.
10. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 34–37.
11. Сайе Д. Способы уменьшения усадочных деформаций высокопрочного бетона // *Цемент и его применение*. 2016. № 5. С. 64–67.
12. Смирнова П.В., Моргун Л.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности управления величиной усадочных деформаций в пенобетонах неавтоклавного твердения // *Строительные материалы*. 2013. № 1. С. 96–97.
13. Ефименко А.З. Неавтоклавный газобетон на песке из отходов дробления бетона // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 13.
14. Якимечко Я.Б. Неавтоклавные газобетоны с полидисперсными наполнителями на основе отходов промышленности // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 24–26.
15. Силаенков Е.С. Перспективы производства и применения изделий из неавтоклавного газозолобетона на Урале // *Бетон и железобетон*. 1996. № 1. С. 2–5.
16. Яхманицкий Г.Я., Несповитая Т.П., Бекишева И.К. Пути совершенствования технологии и оборудования для производства изделий из неавтоклавного ячеистого бетона // *Бетон и железобетон*. 1997. № 2. С. 9–12.
17. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. Прикладная теория ползучести. М.: Стройиздат, 1980. 240 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*БЕЛОВ Владимир Владимирович* – советник РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

*БАРКАЯ Темур Рауфович* – канд. техн. наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

*КУЛЯЕВ Павел Викторович* – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Неавтоклавный поризованный бетон на основе топливной золы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 6–18.

**NON-AUTOCLAVE POROUS CONCRETE  
BASED ON FUEL ASH**

*V.V. Belov, T.R. Barkaya, P.V. Kulyaev*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The work considers low-energy technology of non-autoclave porous concrete (NAPC) based on fuel ash. After closing with water and mixing in a conventional mixer, the feed mixture is poured into molds or formwork, where it swells and then solidifies under normal conditions or with little heat treatment. It is indicated that the use of NAPC with the same average density as conventional lightweight concrete on firing aggregates for reinforced load-bearing structures can be justified by close values of total porosity and associated elastic and deformative properties, as well as similar working conditions of reinforcement in these products. It is concluded that, in comparison with gas-reinforced concrete, NAPC favorably differ in greater stability of properties during manufacture, lower consumption of gas-forming additives, and in comparison with conventional light concrete – the absence of expensive large porous aggregates. Strength and deformation characteristics of NAPC are determined both at short-term and long-term active loads, which is the basis for further research on the use of this per-special material in bearing and enclosing structures.

**Keywords:** non-autoclave gas concrete, fuel ash as filler, low-energy technology, strength and deformation characteristics.

**REFERENCES**

1. Chinenkov Yu.V., Yarmakovskiy V.N. Light concretes and structures of them. *Beton i Zhelezobeton*. 1997. No. 5, pp. 8–10. (In Russian).
2. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S., Potamoshneva N.D., Makeev A.I. Porous concrete for heat-efficient residential buildings. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo*. 2002. No. 5, pp. 22–27. (In Russian).
3. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Schukin G.L. Foam concrete shrinkage compensation. *Stroitel'nye Materialy*. 2015. No. 3, pp. 3–6. (In Russian).
4. Svinarev A.V., Glushkov A.M., Kuprina A.A. Technological model TM-25 for the production of non-autoclaved fibropene concrete products. *Stroitel'nye Materialy*. 2014. No. 6, pp. 4–6. (In Russian).
5. Berdov G.I., Umnova E.V. Cellular slag-portland cement be-tone on a lime-sulfur gate. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 5, pp. 76–78. (In Russian).
6. Loganina V.I. Properties of lime composites with silicate-containing fillers. *Stroitel'nye Materialy*. 2012. No. 3, pp. 30–31. (In Russian).
7. Selyaev V.P., Neverov V.A., Mashtaev O.G., Sidorov V.V. Microstructure thermal insulation materials on the basis of fine mineral powders. *Stroitel'nye Materialy*. 2013. No. 8, pp. 79–80. (In Russian).

8. Yang Ling, Yang Yong, Hujihua. Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 44. July 2013, pp. 600–606.
9. Piasta Wocciech, Sikora Hubert. Effect of airentrain menton shrinkage of blended cements concretes. *Construction and Building Materials*. No. 99 (2015), pp. 298–307.
10. Saraikina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I. Nanostructure-bath of cement stone with dispersed reinforced basalt in-locna. *Stroitel'nye Materialy*. 2015. No. 2, pp. 34–37. (In Russian).
11. Saye D. Reduction Methods Shrinkage Deformation Concrete. *Cement i Ego Primenenie*. 2016. No. 5, pp. 64–67. (In Russian).
12. Smirnova P.V., Morgun L.V. Theoretical and experimental justification of the possibility of controlling the amount of shrinkage strains in foam concrete of non-autoclave hardening. *Stroitel'nye Materialy*. 2013. No. 1, pp. 96–97. (In Russian).
13. Efimenko A.Z. Non-autoclave gas concrete on sand from concrete crushing waste. *Construction Materials*. 2009. No. 1, p. 13. (In Russian).
14. Yakimechko Y.B. Non-autoclave gas concrete with polydisperse fillers based on industrial waste. *Stroitel'nye Materialy*. 2009. No. 1, pp. 24–26. (In Russian).
15. Silaenkov E.S. Prospects for the production and use of non-nuclear gas concrete products in the Urals. *Beton i Zhelezobeton*. 1996. No. 1, pp. 2–5. (In Russian).
16. Yakhmanitsky G.Ya., Unpowered T.P., Bekisheva I.K. Ways to improve technology and equipment for the production of products from non-autoclaved cellular concrete. *Beton i Zhelezobeton*. 1997. No. 2, pp. 9–12. (In Russian).
17. Prokopovich I.E., Zedgenidze V.A. *Prikladnaya teoriya polzuchesti* [Applied theory of crawl-verse]. Moscow: Stroyizdat. 1980. 240 p.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*BELOV Vladimir Vladimirovich* – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures Production, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

*BARKAYA Temur Raufovich* – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

*KULIAEV Pavel Victorovitch* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Barkaya T.R., Kulyaev P.V. Non-autoclave porous concrete based on fuel ash // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 2 (10), pp. 6–18.