

УДК 666.972.16

**Н. М. ЗАЙЧЕНКО<sup>а</sup>, Г. Х. ПАНИЧАРОВ<sup>б</sup>, С. В. ЛАХТАРИНА<sup>а</sup>**<sup>а</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (Украина), <sup>б</sup> Варненски свободен университет «Черноризец Храбър» (Болгария)**КОНСТРУКЦИОННЫЙ ЛЕГКИЙ БЕТОН С ПОВЫШЕННЫМ  
КОЭФФИЦИЕНТОМ КОНСТРУКТИВНОГО КАЧЕСТВА ДЛЯ  
МОНОЛИТНОГО ДОМОСТРОЕНИЯ**

Разработан состав конструкционного легкого бетона с повышенным коэффициентом конструктивного качества (ККК=25), который характеризуется прочностью при сжатии 38 МПа в возрасте 56 суток нормального твердения и средней плотностью в высушенном состоянии 1 520 кг/м<sup>3</sup>. Исследовано влияние предварительного водонасыщения пористого заполнителя (керамзитового гравия) на прочностные характеристики конструкционного легкого бетона, а также сохраняемость подвижности бетонных смесей в течение определенного времени. Бетонная смесь с предварительно насыщенным в воде керамзитовым гравием в процессе выдержки после приготовления имеет ярко выраженную тенденцию к повышению подвижности. Максимальное значение осадки конуса – 20 см, достигается после 60 минут выдержки смеси. Однако при этом происходит снижение прочности бетона как в ранние, так и более поздние сроки твердения в сравнении с составом, в котором использован заполнитель в состоянии естественной влажности. Это обусловлено, вероятней всего, резкой потерей прочности заполнителем в результате размягчения при длительном контакте с водой, что подтверждается характером разрушения образцов.

**конструкционный легкий бетон, коэффициент конструктивного качества, пористый заполнитель, подвижность смеси, суперпластификатор****ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Снижение материалоемкости и уменьшение массы строительных конструкций без потери их несущей способности и других эксплуатационных свойств является одним из основных факторов повышения эффективности строительства. Это особенно актуально для высотного строительства, где одна из основных проблем связана с высокими сжимающими нагрузками, которые передаются от верхних этажей зданий и сооружений нижним, а также высоким давлением на грунты. Большие нагрузки на вертикальные несущие конструкции приводят к увеличению сечений элементов, что отрицательно сказывается на объемно-планировочных решениях зданий. Одновременно возникает необходимость в повышении процента армирования конструкций, что приводит к удорожанию стоимости объекта [1].

Практическим способом решения этой задачи является разработка и применение легких бетонов с повышенными показателями коэффициента конструктивного качества (ККК). В последние десятилетия отмечена тенденция увеличения доли конструкционного легкого бетона прочностью 60–70 МПа в вертикальных несущих элементах высотных зданий, предварительно напряженных сборных плит покрытий и перекрытий, конструкциях мостов и сооружений оффшорной зоны (Норвегия, Голландия, США, Германия, Великобритания, Япония и др.) [1–4]. По оценкам специалистов, применение легкого бетона в 1,5–2,5 раза снижает материальные затраты по сравнению с обычным тяжелым бетоном аналогичного класса прочности. При этом некоторые архитектурные варианты оформления конструктивно реализуемы только при использовании высокопрочного легкого бетона [1].

Согласно [5] к конструкционным легким относятся бетоны, производимые с применением легких пористых заполнителей, характеризующиеся пределом прочности при сжатии больше 17,2 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения и средней плотностью не более 1 842 кг/м<sup>3</sup>. При этом



вероятность потери удобоукладываемости смесью в процессе перемешивания, транспортирования и укладки [5]. Предварительное водонасыщение пористых заполнителей положительно отражается также в процессе твердения и набора прочности бетона. Учитывая необходимость достижения высокой прочности легкого бетона, его состав необходимо назначать с низким значением водоцементного отношения, высоким расходом портландцемента и дисперсных минеральных добавок. Перечисленные факторы создают условия для формирования микротонкой капиллярной пористости. В процессе гидратации цемента при отсутствии доступа внешней влаги в тонких капиллярах возникают мениски, обезвоживание которых создает большие внутренние напряжения – развивается аутогенная усадка. Если химическая усадка обусловлена внутренним изменением объема в твердеющей системе, сопровождающимся образованием в структуре гелевых пор (контракция), то аутогенная усадка – это изменение внешнего объема структуры, которое происходит в замкнутых условиях (без потери влаги в окружающую среду, как в случае с влажностной усадкой). В пластичном бетоне она происходит потому, что объем продуктов гидратации цемента меньше, чем объем цемента и воды до гидратации (процесс, называемый химической усадкой). После схватывания цемента в процессе твердения бетона, аутогенная усадка обусловлена «самовысушиванием» бетона, поскольку цемент продолжает потреблять воду для гидратации из пор [16]. Таким образом, медленная влагоотдача предварительно водонасыщенных легких заполнителей в процессе гидратации цемента будет обеспечивать бетону «внутренний уход», снижая при этом деформации, вызванные аутогенной усадкой. Согласно [17] наиболее благоприятное влияние как на деформационные (аутогенная усадка), так и прочностные показатели бетона оказывает частично водонасыщенный (на 50 %) пористый заполнитель, так как при большем водонасыщении увеличивается значение эффективного водоцементного отношения, и снижается прочность бетона.

**Целью работы** является исследование влияния предварительного водонасыщения пористого заполнителя на прочностные характеристики конструкционного легкого бетона, а также сохраняемость подвижности легкобетонных смесей в течение определенного промежутка времени.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

*Характеристика исходных материалов.* В качестве компонентов конструкционного легкого бетона приняты:

- портландцемент (ПЦ) Балаклеевского комбината СЕМ I-42,5 N (активность 525 кгс/см<sup>2</sup>; нормальная густота 26 %);
- гравий керамзитовый (ГК) фракции 10–40 мм (насыпная плотность 380 кг/м<sup>3</sup> – D400; водопоглощение по массе, 24 часа – 39 %; прочность при сдавливании в цилиндре 1,68 МПа – марка по прочности П 75);
- песок кварцевый (ПК) Краснополянского месторождения (модуль крупности 2,0; насыпная плотность 1 458 кг/м<sup>3</sup>);
- смесь золошлаковая молотая (ЗШС) Углегорской ТЭС ( $S_{уд.} = 380 \text{ м}^2/\text{кг}$ );
- микрокремнезем (МК) агломерированный молотый из шламонакопителей Стахановского завода ферросплавов;
- суперпластификатор (СП) полиакрилатный «Dynamon SR-3» (Mapei).

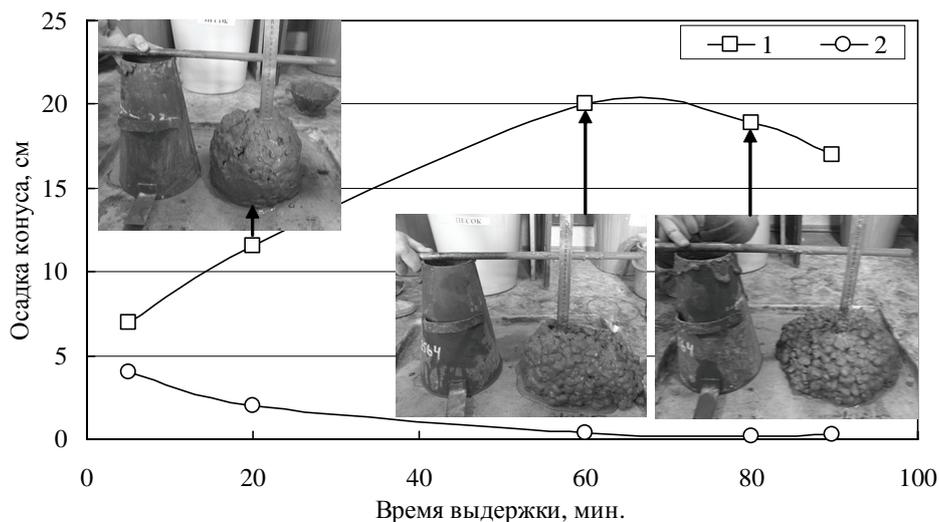
Состав и свойства свежеприготовленной бетонной смеси приведены в табл. 1.

**Таблица 1** – Состав и свойства свежеприготовленной бетонной смеси

№	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>							Свойства бетонной смеси		
	ПЦ	МК	ЗШС	ПК	ГК	СП, л	В, л	В/В	средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	начальная подвижность, см
1	576	101	80	221	318	6,7	218*	0,33**	1 521	7,0
2	576	101	80	221	318	6,7	257	0,38	1 580	4,2

**Примечания:** \* – расход воды затворения без учета количества воды, содержащейся в порах заполнителя; \*\* – водовязущее отношение (В/(ПЦ+МК)) без учета количества воды, содержащейся в порах заполнителя.

*Результаты экспериментов и обсуждение.* Бетонная смесь с предварительно насыщенным в воде керамзитовым гравием (состав № 1) в процессе выдержки после приготовления имеет ярко выраженную тенденцию к повышению подвижности (рис. 1). Максимальное значение осадки конуса – 20 см, достигается после 60 минут выдержки смеси, в дальнейшем происходит незначительное снижение, в то



**Рисунок 1** – Изменение подвижности бетонных смесей в процессе выдержки после приготовления: 1, 2 – составы бетонных смесей (табл. 1).

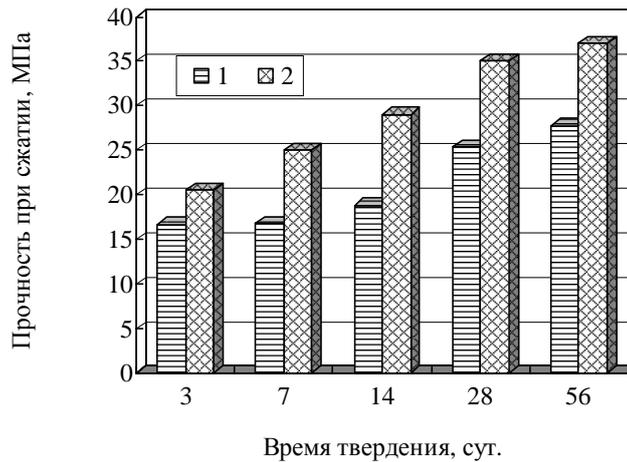
же время в пределах 90 минут бетонная смесь сохраняет показатели подвижности, соответствующие марке по удобоукладываемости П4. Нарастание значений подвижности смеси обусловлено двумя факторами. Во-первых, предварительно водонасыщенный (до 100 %) пористый заполнитель не поглощает из смеси воду затворения, а, скорее, отдает воду из наиболее крупных пор и капилляров, повышая при этом водоцементное отношение смеси. С другой стороны, увеличение подвижности связано с особенностями действия применяемого в эксперименте полиакрилатного суперпластификатора. Известно, что обязательным условием пластификации бетонных смесей является адсорбция молекул суперпластификатора на частицах цемента и продуктах его гидратации для создания электростерического барьера отталкивания. С ростом количества новообразований в процессе гидратации портландцемента увеличивается количество адсорбированного полимера на их поверхности, что и обеспечивает повышение подвижности смеси.

Если используется пористый заполнитель в состоянии естественной влажности, при значении водовяжущего отношения 0,38 достигается начальная подвижность бетонной смеси лишь 4 см. При этом в процессе выдержки после приготовления смеси наблюдается резкая потеря подвижности – в пределах 90 минут до 0,4 см. Безусловно, это связано с интенсивным поглощением влаги пористым заполнителем.

Относительно прочностных показателей легкого бетона следует отметить следующее. Значения предела прочности при сжатии бетона состава № 2, особенно в ранние сроки твердения, выше, чем бетона состава № 1 (рис. 2). Несмотря на то, что начальное значение водовяжущего отношения бетона состава № 1 на 13 % меньше, чем состава № 2, фактическое значение водовяжущего значения с учетом влаги, содержащейся в порах заполнителя, значительно выше. Этот фактор должен бы положительно проявиться на показателях прочности бетона, испытанного в более поздние сроки твердения, исходя из наличия влаги для протекания реакций гидратации портландцемента и взаимодействия гидроксида кальция с активным кремнеземом пуццолановых добавок. Однако нарастания прочности бетона с водонасыщенным заполнителем практически не наблюдается. Причиной тому является, вероятней всего, резкая потеря прочности заполнителем в результате размягчения при длительном контакте с водой, что подтверждается характером разрушения образцов.

## ВЫВОДЫ

Разработан состав конструкционного легкого бетона с повышенным коэффициентом конструктивного качества ( $KKK = 25$ ), который характеризуется прочностью при сжатии 38 МПа в возрасте 56 суток нормального твердения и средней плотностью в сухом состоянии  $1520 \text{ кг/м}^3$ . Такой бетон может найти эффективное применение в ограждающих конструкциях высотных зданий. В то же время



**Рисунок 2** – Изменение предела прочности при сжатии легкого бетона в процессе твердения в нормальных условиях: 1, 2 – составы бетонных смесей (табл. 1).

показатели подвижности бетонной смеси для монолитного домостроения являются неудовлетворительными. Для достижения более высокой подвижности смеси и обеспечения ее сохранности в течение времени, необходимого для перемешивания, транспортирования и укладки, требуется предварительное водонасыщение пористого заполнителя. Однако при этом происходит снижение прочности как в ранние, так и более поздние сроки твердения. Необходимо в дальнейшем проведение испытаний бетонных смесей и бетонов с частично насыщенным водой заполнителем, а также применение более прочных и водостойких пористых заполнителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звездов, А. И. Высокопрочные легкие бетоны в строительстве и архитектуре [Текст] / А. И. Звездов, В. Р. Фаликман // Деловая слава России. – 2010. – № 4. – С. 106–109.
2. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны [Текст] : [науч. изд-е] / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М. : Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.
3. State-of-the-Art Report on Offshore Concrete Structures for the Arctic [Текст] : ACI 357.1R-91. – (Reapproved 1997). – Reported by ACI Committee 357. – Detroit, Michigan : American Concrete Institute, 1997. – 53 p.
4. Liles, P. High Strength Lightweight Concrete for Use in Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders in Georgia [Текст] / P. Liles, R. B. Holland // HPC Bridge Views. – 2010. – Issue 61, May/June. – P. 1–10.
5. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98) [Текст]. – (Reapproved 2004). – Reported by ACI Committee 211. – Detroit, Michigan : American Concrete Institute, 2004. – 20 p.
6. Фаликман, В. Р. Высокопрочный легкий бетон: технология и свойства [Текст] / В. Р. Фаликман, Ю. В. Сорокин, О. М. Горячев // Бетон и железобетон. – 2005. – № 2. – С. 8–11.
7. Kenneth S. Harmon, PE Engineering properties of structural lightweight concrete [Электронный ресурс] / Kenneth S. Harmon, PE. – Режим доступа : [www.stalite.com/uploads/EngineeringProperties.pdf](http://www.stalite.com/uploads/EngineeringProperties.pdf).
8. Shannag, M. J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures [Текст] / M. J. Shannag // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – P. 658–662.
9. Hela, R. New Generation Cement Concretes. Ideas, Design, Technology and Applications 3 [Текст] / R. Hela, L. Bodnárová. – Brno : Brno University of Technology, 2009. – 174 p.
10. Mechanical properties of lightweight aggregate concrete [Текст]. EuroLightCon – Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete: Document BE96-3942/R23, June 2000 / European Union under the Industrial & Material Technologies Programme – Brite EuRam III. – [S. l. : s. n.], 2000. – 50 p.
11. Bai, Y. Properties of light-weight concrete manufactured with fly ash, furnacebottom ash and Lytag [Текст] / Y. Bai, R. Ibrahim, P. A. M. Basheer // Intern. Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology. Beijing, May 20-21, 2004. – Beijing : [s. n.], 2004. – P. 77–88.
12. Holland, R. B. High Strength Lightweight Concrete Properties of the I-85 Ramp over State Route 34 [Текст] / R. B. Holland, F. L. Kahn // HPC Bridge Views. – 2010. – Issue 61, May/June. – P. 1–10.
13. Sadrekarimi, A. Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete [Текст] / A. Sadrekarimi // J. of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, No 3. – P. 409–417.
14. Hoff, G. C. The use of lightweight fines for the internal curing of concrete [Текст] / G. C. Hoff. – Clinton, Mississippi : [s. n.], 2002. – 44 p.

15. Subasi, S. The effects of using fly ash on high strength lightweight concrete produced with expanded clay aggregate [Текст] / S. Subasi // Scientific Research and Essay. – 2009. – Vol. 4(4), April. – P. 275–288.
16. Aitcin, P.-C. The Art and Science of High-Performance Concrete [Текст] / P.-C. Aitcin // Mario Collepardi Symp. on Advances in Concrete Science and Technology, 8 October 1997 : Proc. / Ed. P. K. Mehta. – Rome (Italy) : [s. n.], 1997. – P. 107–126.
17. Lura, P. Autogenous and drying shrinkage of high strength lightweight aggregate concrete at early ages; the effect of specimen size [Текст] / P. Lura, K. van Breugel, I. Maruyama // RILEM Proc. PRO 23 «Early Age Cracking in Cementitious Systems – EAC '01», Proc. Int. RILEM Conference / Eds. Kovler ad A. Bentur, RILEM Publications S.A.R.L. – Haifa (Israel), 2001. – P. 79–88.

Получено 20.12.2011

М. М. ЗАЙЧЕНКО <sup>a</sup>, Г. Х. ПАНІЧАРОВ <sup>b</sup>, С. В. ЛАХТАРИНА <sup>a</sup>  
КОНСТРУКЦІЙНИЙ ЛЕГКИЙ БЕТОН З ПІДВИЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ  
КОНСТРУКТИВНОЇ ЯКОСТІ ДЛЯ МОНОЛІТНОГО ДОМОБУДІВНИЦТВА  
<sup>a</sup> Донбаська національна академія будівництва і архітектури (Україна), <sup>b</sup> Варненски  
свободен университет «Черноризец Храбър» (Болгарія)

Розроблено склад конструкційного легкого бетону з підвищеним коефіцієнтом конструктивної якості (ККЯ = 25), що характеризується міцністю при стиску 38 МПа у віці 56 діб нормального тверднення і середньою щільністю у висушеному стані 1 520 кг/м<sup>3</sup>. Досліджено вплив попереднього водонасичення пористого заповнювача (керамзитового гравію) на міцнісні характеристики конструкційного легкого бетону, а також збереження рухливості бетонних сумішей протягом визначеного терміну. Бетонна суміш з попередньо насиченим у воді керамзитовим гравієм в процесі витримування після приготування має яскраво виражену тенденцію до підвищення рухливості. Максимальне значення осадки конусу – 20 см, досягається після 60 хвилин витримування суміші. Однак при цьому відбувається зниження міцності бетону як у ранні, так і більш тривалі терміни тверднення у порівнянні зі складом, в якому використано заповнювач у стані природної вологості. Це обумовлено, більш за все, різкою втратою міцності заповнювачем в результаті розм'якшення при тривалому контакті з водою, що підтверджується характером руйнування зразків.

**конструкційний легкий бетон, коефіцієнт конструктивної якості, пористий заповнювач, рухливість суміші, суперпластифікатор**

NICKOLAY ZAICHENKO <sup>a</sup>, GENCHO PANICHAROV <sup>b</sup>, SERGEY LAKHTARINA <sup>a</sup>  
STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH INCREASED COEFFICIENT  
OF THE CONSTRUCTIVE QUALITY FOR MONOLITHIC BUILDING  
CONSTRUCTION

<sup>a</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (Ukraine), <sup>b</sup> Varna Free University (Bulgaria)

The composition of the structural lightweight concrete with increased coefficient of constructive quality (CCQ = 25) which is characterized by the compressive strength 38 MPa at the age of 56 days of normal hardening and the average density in the dried state 1 520 kg/m<sup>3</sup> has been elaborated. The effect of prior water saturation of a porous aggregate (expanded clay gravel) on the strength properties of structural lightweight concrete, as well as keeping the mobility of concrete mixes during some time-period have been investigated. Concrete mix with pre-saturated expanded clay gravel exposed after mixing during some time-period has a pronounced tendency to increase the mobility. The maximum slump value – 20 cm, is reached after 60 minutes of exposing concrete mix. However, decreasing concrete strength at the early and later stages of hardening in comparison with the composition in which the aggregate is used in an air dry state is occurred. This is due likely to a sharp loss of strength due to softening aggregate during prolonged contact with water, as evidenced by the nature of the destruction of the samples.

**structural lightweight concrete, coefficient of the constructive quality, porous aggregate, mix mobility, superplasticizer**

**Зайченко Микола Михайлович** – доктор технічних наук, професор, проректор з навчальної роботи, професор кафедри технологій будівельних матеріалів, виробів та автомобільних доріг Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: високоміцні і надвисокоміцні бетони на основі фізико-хімічно модифікованих дисперсних компонентів бетону.

**Панічаров Генчо Христов** – кандидат технічних наук, викладач архітектурного факультету кафедри будівництва будівель і споруд Варненського Вільного Університету (Болгарія). Наукові інтереси: енергетична ефективність та енергетичний нагляд.

**Лахтарин Сергій Вікторович** – аспірант, асистент кафедри технологій будівельних матеріалів, виробів та автомобільних доріг Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: високоміцні легкі бетони.

**Зайченко Николай Михайлович** – доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, профессор кафедры технологий строительных материалов, изделий и автомобильных дорог Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: высокопрочные и особо высокопрочные бетоны на основе физико-химически модифицированных дисперсных компонентов бетона.

**Паничаров Генчо Христов** – кандидат технических наук, преподаватель архитектурного факультета кафедры строительства зданий и сооружений Варненского Свободного Университета (Болгария). Научные интересы: энергетическая эффективность и энергетический надзор.

**Лахтарин Сергей Викторович** – аспирант, ассистент кафедры технологий строительных материалов, изделий и автомобильных дорог Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: высокопрочные легкие бетоны.

**Nickolay Zaichenko** – DSc (Eng.), Professor; vice-rector for educational work, Professor of the Department of Technologies of Building Materials Technology, Products and Highways, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interest: high-performance and ultra high-strength concretes on the base of physically-chemically modified fillers.

**Gencho Panicharov** – PhD (Eng.), Associate Professor; Department of Construction of Buildings and Structures (Faculty of Architecture), Varna Free University (Bulgaria). Scientific interest: the energy efficiency and energy monitoring.

**Sergey Lakhtarina** – post-graduate student; Department of Technologies of Building Materials Technology, Products and Highways, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interest: light weight aggregate high-strength concretes.