

УДК 691.327.32

**КОНСТРУКЦИОННЫЙ КЕРАМЗИТОБЕТОН В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.
ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ***канд. техн. наук В.В. БОНДАРЬ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлен накопленный общемировой опыт применения конструкционного керамзитобетона, в том числе высокопрочного, при строительстве гражданских и промышленных зданий, гидротехнических и мостовых сооружений, в дорожном строительстве. Отмечены основные преимущества и недостатки, выявленные на протяжении большей части жизненного цикла объектов – начиная со стадии проектирования и заканчивая эксплуатацией. Рассмотрены требования действующих в Республике Беларусь и в мире норм проектирования, касающихся физико-механических, технологических свойств конструкционных керамзитобетонов, их долговечности, отличия от бетонов так называемой нормальной (обычной) плотности. Выполнен анализ перспективных направлений развития керамзитожелезобетона с учетом интенсивного развития строительной химии в части модификации бетонов с целью повышения их коррозионностойкости, удобоукладываемости и прочности на сжатие. Выделены основные вопросы, требующие проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: конструкционный керамзитобетон, высокопрочный, строительство, прочность, деформации, долговечность, применение керамзитобетона, экономическая эффективность.

Введение. В практике современного строительства использование керамзитобетона в несущих, в особенности ограждающих, конструкциях насчитывает более 40 лет. При этом в несущих конструкциях большое распространение получил, прежде всего, высокопрочный керамзитобетон, к которому, согласно современным представлениям [1], может быть отнесен керамзитобетон со следующим соотношением нормируемых величин:

$$\frac{f_{lck}}{\rho_{lr}} \geq 25, \quad (1)$$

где f_{lck} – характеристическая цилиндрическая прочность легкого бетона на сжатие в возрасте 28 суток, Н/мм²; ρ_{lr} – плотность легкого бетона в сухом состоянии, кг/дм³, определена в соответствии с требованиями [2].

Наибольшее распространение конструкционный, высокопрочный керамзитобетон получил в США, Канаде, Великобритании, Германии, а также в бывшем СССР. При этом под конструкционным бетоном следует понимать в соответствии с терминологией [3] бетон, используемый в несущих и ограждающих конструкциях зданий и сооружений и обеспечивающий, главным образом, прочность, жесткость, трещиностойкость несущих конструкций.

В то время как высокопрочный керамзитобетон наиболее широко применяют для изготовления крупноразмерных и большепролетных конструкций, керамзитобетон средней прочности применяют главным образом для монолитных и сборных конструкций многоэтажных зданий гражданского назначения. Как показывают элементарные расчеты, применение конструкционного керамзитобетона позволяет снизить вес крупноразмерных плит покрытий, ферм, балок, пролетных строений мостов и других изделий. Снижение объемного веса конструкционного керамзитобетона по сравнению с обычным бетоном позволяет напрямую существенно улучшить экономические показатели элементов зданий и сооружений за счет укрупнения конструкций, снижения расходов на транспортирование и монтаж.

Помимо жилищного строительства и строительства зданий промышленных предприятий, существует еще одна обширная и перспективная область применения конструкционного керамзитобетона – возведение новых и ремонт существующих теплотрасс. Дело в том, что в настоящее время наиболее распространенной является подземная прокладка трубопроводов в непроходных каналах из лотков, выполненных из железобетона плотностью от 2400 до 2600 кг/м³. Строительство таких теплотрасс требует устройства подвесной теплоизоляции на трубах, что сопровождается значительными материальными затратами. Неудовлетворительной следует признать и долговечность подобных теплотрасс, поскольку продолжительность нормальной их эксплуатации в условиях городского строительства составляет в среднем около пяти – семи лет. Одним из наиболее перспективных путей снижения стоимости прокладки и объема трудозатрат и сокращения сроков строительства является применение в тепловых сетях лотков из конструкционного керамзитобетона, позволяющих полностью отказаться от применения дорогостоящей и трудоемкой подвесной теплоизоляции.

Все изложенное выше, а также проблемы, которые будут рассмотрены, создают предпосылки для дополнительных исследований керамзитобетона с целью более массового его применения, причем не толь-

ко в отдельных, слабонагруженных или исключительно ограждающих конструкциях, но и для использования в любых несущих конструкциях зданий и сооружений наряду с бетонами нормального объемного веса.

Краткий обзор применения конструкционного керамзитобетона

Первоначально при строительстве зданий и сооружений различного назначения керамзитобетон использовался частично, например, исключительно в перекрытиях либо только в наружных несущих и самонесущих стенах. Такие строительные объекты в своем большинстве носили статус экспериментальных и являлись своего рода пилотными проектами по широкомасштабному внедрению конструкционного керамзитобетона в строительную отрасль. Позднее при более подробном научном изучении физико-механических свойств керамзитобетона его стали применять и в преднапряженных изгибаемых, и в сжатых элементах (колоннах, диафрагмах жесткости и т.п.).

Рассмотрим накопленный опыт использования конструкционного керамзитобетона при строительстве наиболее значимых и по-своему уникальных с точки зрения архитектурно-конструктивного исполнения объектов. При строительстве здания пассажирского терминала международного аэропорта в Миннеаполисе (1962 г.) для возведения складчатой 130-миллиметровой кровли был применен конструкционный керамзитобетон плотностью 1440 кг/м^3 и прочностью 21 МПа. Приблизительно в то же время для возведения оболочки толщиной 150 мм для перекрытия помещения размерами $60 \times 90 \text{ м}$ при строительстве здания аэропорта в Нью-Йорке был применен керамзитобетон прочностью 41 МПа и объемным весом 1850 кг/м^3 .

Особую архитектурную выразительность имеет возведенное в 1960-х годах здание актового зала собраний Иллинойского университета пролетом 120 м (рисунок 1).



Рисунок 1. – Здание актового зала собраний Иллинойского университета

При сооружении купола зала собраний был применен конструкционный керамзитобетон прочностью 33 МПа и объемным весом 1700 кг/м^3 .

Интересная архитектурно-конструктивная идея была воплощена при строительстве 65-этажного комплекса (две башни) «Марина Сити» в Чикаго в 1960–1964 годах. В зданиях все перекрытия выполнены из керамзитобетона плотностью 1660 кг/м^3 и прочностью на сжатие 32 МПа (рисунок 2).

В настоящее время здание «Марина Сити» – многофункциональный комплекс, являющийся местной достопримечательностью и часто используемый в средствах СМИ, кино- и игровой продукции. На момент постройки две башни комплекса являлись самыми высокими железобетонными конструкциями в мире.

Относительно более современным примером применения конструкционного керамзитобетона являются построенные в 2003–2004 годах в Москве несколько 25-этажных жилых домов [4]. При этом керамзитобетон применялся для возведения внутренних несущих и ограждающих конструкций стен. Плотность керамзитобетона составляла около 1400 кг/см^3 , призматическая прочность – 36 МПа.

На данный момент известно около полусотни высотных зданий по всему миру, которые были полностью или частично возведены с применением легкого бетона и, в частности, конструкционного керамзитобетона. Позднее, кроме строительства жилых и общественных зданий, конструкционный керамзитобетон стал использоваться при возведении мостов, а также для монтажа новых или ремонта (реконструкции) существующих непроходных каналов теплотрасс из железобетонных лотков.

Наиболее ярким примером применения конструкционного керамзитобетона в мостостроении является возведенный в 1998 году мост Стольма в Норвегии. Этот мост является самым протяженным в мире многопролетным сегментным мостом с балками коробчатого сечения. Основной пролет моста составляет 301 м. Этот пролет смонтирован из нескольких элементов, наиболее длинным из которых является элемент номинальной длины 184 м, и именно он и изготовлен из конструкционного керамзитобето-

на. Техническим обоснованием для применения керамзитобетона в этом мосту послужила необходимость компенсации существенной разницы между весом конструкций основного пролета и весом конструкций более коротких пролетов моста.



Рисунок 2. – 65-этажное здание «Марина Сити» в Чикаго

Другими примерами использования керамзитобетона в мостостроении являются мост Сундэй и Рафтсунский мост. В обоих мостах длина главного пролета составляет 298 м.

Накопленный опыт применения конструкционного керамзитобетона при реконструкции и строительстве теплотрасс достаточно подробно изложен в работе [5]. Опытно-промышленное строительство теплотрасс с лотками из керамзитобетона началось в СССР управлением «Куйбышевсельстрой» в 1971 году. В течение отопительного сезона 1971–1972 годов за построенной теплотрассой велось наблюдение, которое показало, что керамзитобетонные лотки без устройства теплоизоляции трубопроводов обеспечивают вполне приемлемые эксплуатационные характеристики теплотрассы. На основании приведенной работы институтом НИИКерамзит для предприятий «Куйбышевсельстрой» были разработаны технические условия на теплотрассы с лотками из керамзитобетона, после чего началось их массовое внедрение. С 1972 года управление полностью перешло на строительство только таких теплотрасс, укладывая в год по 10...20 км. С 1974 года началось строительство теплотрасс с лотками из керамзитобетона предприятиями, в основном входившими в систему Минсельстроя СССР: Облмежколхозстроем (Самарская область), «Саратовсельстроем» и другими.

Керамзитобетонные лотки при строительстве теплотрасс были внедрены более чем в 40 экономических районах СССР (уложено более 400 км теплотрасс). При этом был получен экономический эффект в размере более 2,0 млн долларов США.

В Республике Беларусь в настоящее время керамзитовые заполнители производятся на трех предприятиях: ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль»; Петриковский керамзитовый завод ОАО «Гомельский ДСК»; ЗАО «Лидский керамзитовый завод». Несмотря на достаточно большие объемы выпускаемого керамзита, все предприятия сосредоточились на изготовлении и реализации керамзита и керамзитобетона преимущественно для ограждающих конструкций зданий и сооружений, для утепления и звукоизоляции полов, теплоизоляции трубопроводов, ландшафтного дизайна и т.п., то есть для элемен-

тов и конструкций, которые не являются несущими. Эта тенденция сложилась, прежде всего, в постсоветский период в связи со сложным экономическим положением страны и резким сокращением государственных программ, касавшихся исследований, в том числе, и в строительной науке. При этом в Беларуси, как и на всей территории СССР, развитие конструктивных и высокопрочных легких бетонов связывали, прежде всего, с аглопоритобетоном, с использованием которого в Республике Беларусь было запроектировано и построено немало объектов, в том числе уникальных. Наиболее ярким с точки зрения архитектурно-конструктивного исполнения является здание Комаровского рынка в Минске (год постройки – 1979), главным конструктивным элементом которого является сборно-монолитная тонкостенная оболочка положительной кривизны, перекрывающая павильон с размерами в плане 103×103 м (рисунок 3). Оболочка собиралась из пяти типов плит (по конфигурации в плане). Плиты при пролете 12 м предварительно напряженные, при пролете менее 12 м – с обычным армированием. Угловые зоны оболочки выполнены из монолитного аглопоритобетона.



Рисунок 3. – Комаровский рынок в Минске

После распада СССР накопленный научно-практический опыт в Беларуси опирался, прежде всего, на использование аглопорита, которого в Республике не было, поэтому страна оказалась неготовой к выпуску продукции из сборного керамзитобетона, строительству монолитных зданий с применением керамзитобетона для несущих конструкций. Осуществлять же доставку аглопорита из России или Украины стало экономически неэффективно.

И только в 2010–2012 годах научно-исследовательским предприятием РУП «Институт БелНИИС» под руководством профессора Н.П. Блещика были проведены обширные исследования технических характеристик керамзитовых заполнителей, выпускаемых предприятиями Республики Беларусь, с целью определения рациональных областей их применения. В процессе исследований были разработаны составы конструкционного керамзитобетона прочностью до 60 МПа. Исследования также показали, что для конструкционного керамзитобетона необходимо использовать преимущественно керамзитовый гравий фракции 5...20 мм и маркой по прочности от П100 до П400 в соответствии с требованиями стандарта [6], выпускаемый только двумя из трех предприятий Республики Беларусь – Петриковский керамзитовый завод ОАО «Гомельский ДСК» и ЗАО «Лидский керамзитовый завод».

Помимо вышеуказанных исследований с 2012 года в Белорусско-Российском университете под руководством профессора С.Д. Семенюка ведется изучение физико-механических свойств керамзитобетона, изготовленного с использованием керамзита, произведенного на ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль», Петриковский керамзитовый завод ОАО «Гомельский ДСК». Прочность керамзитобетона в исследованиях соответствует классам в диапазоне от LC8/9 до LC25/28 [7]. Цель исследований – уточнение прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона с последующим техническим и экономическим обоснованием расширения области применения керамзитобетона.

Определение базовых прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона

В соответствии с современными представлениями [8; 9] легкий бетон, в частности керамзитобетон, используемый для изготовления элементов несущих конструкций, должен отвечать требованиям по минимальной плотности и прочности: плотность должна составлять от 1300 до 1800 кг/м³, прочность на осевое сжатие – не менее 15 МПа.

На территории Республики Беларусь требования к прочностным и деформационным характеристикам легких бетонов изложены в трех действующих документах [10–12]. При этом если в двух первых ТНПА

параметрический ряд легких бетонов по классам по прочности на сжатие отличается от такового для бетонов нормальной плотности, то в последнем документе [12] отличий нет (таблица 1).

Таблица 1. – Классификация легких бетонов по прочности на сжатие в соответствии с требованиями норм, действующих на территории Республики Беларусь

Класс по прочности на сжатие в соответствии с нормами ТКП EN 1992-1-1-2009* [10]	Класс по прочности на сжатие в соответствии с нормами СТБ EN 206-2016 [11]	Класс по прочности на сжатие в соответствии с нормами СНиП 2.03.01-84* [12]
–	–	B2,5
–	–	B3,5
–	–	B5
–	–	B7,5
–	LC8/9	B10
–	–	B12,5
LC12/13	LC12/13	B15
LC16/18	LC16/18	B20
LC20/22	LC20/22	B25
LC25/28	LC25/28	B30
LC30/33	LC30/33	B35
LC35/38	LC35/38	B40
LC40/44	LC40/44	–
LC45/50	LC45/50	–
LC50/55	LC50/55	–
LC55/60	LC55/60	–
LC60/66	LC60/66	–
LC70/77	LC70/77	–
LC80/88	LC80/88	–

Из таблицы видно, что классификационный ряд, приведенный в нормах [10], подтверждает утверждения авторов работ [8; 9] и указывает на то, что к конструкционному легкому бетону можно отнести бетон, соответствующий по своей характеристике прочности как минимум классу LC12/13.

В соответствии с нормами [10] для разных классов плотности существуют различия в расчетных значениях плотности для неармированного легкого бетона и легкого железобетона. Эти различия приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Классы плотности и соответствующие им расчетные значения плотности легкого бетона согласно нормам ТКП EN 1992-1-1-2009* [10]

Класс плотности		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Плотность, кг/м ³		801...1000	1001...1200	1201...1400	1401...1600	1601...1800	1801...2000
Плотность, кг/м ³	неармированного бетона	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	железобетона	1150	1350	1550	1750	1950	2150

К конструкционным легким бетонам большинством норм предъявляются по сути те же требования, что и к бетонам нормальной плотности.

В то же время раздел 11 норм [10] содержит некоторые дополнительные требования. Для уточнения положений по расчету конструкций из легкого бетона в соответствии с [10], введен ряд поправочных коэффициентов при определении модуля упругости (η_E), предела прочности при растяжении (η_1), коэффициента ползучести (η_2), усадки при высыхании (η_3). Значения указанных поправочных коэффициентов определяются в зависимости от значения плотности бетона (коэффициенты η_E , η_1) либо в зависимости от класса на осевое сжатие (коэффициенты η_2 , η_3).

Похожий подход принят и в американских нормах [13], но в последних учет наличия плотного легкого заполнителя в бетоне производится путем введения единственного поправочного коэффици-

ента λ в качестве множителя к значению $\sqrt{f'_c}$ в зависимостях, предусмотренных самими нормами [13]. При этом величина f'_c – прочность бетона на осевое сжатие (МПа). Значения коэффициента λ установлены нормами [13] в зависимости от вида легкого бетона (таблица 3).

Таблица 3. – Значения поправочного коэффициента λ установленного американскими нормами АСІ 318-14 [13] для легкого бетона

Вид бетона	Легкий бетон любого вида	Мелкозернистый легкий бетон	Легкий бетон с песчаным заполнителем	Крупнозернистый легкий бетон с песчаным заполнителем	Бетон нормальной плотности
Поправочный коэффициент λ	0,75	0,75...0,85*	0,85	0,85...1,0*	1,0
* – значение может определяться методом линейной интерполяции.					

Требования к главной деформационной характеристике легкого бетона – модулю упругости на территории Республики Беларусь предъявляются в двух нормативных документах – ТКП EN 1992-1-1-2009* [10] и СНиП 2.03.01-84* [12]. При этом методики определения модуля упругости в указанных нормах разные. В нормах [10] для легкого бетона среднее значение модуля упругости E_{lcm} следует рассчитывать по формуле:

$$E_{lcm} = \eta_E \cdot E_{cm} = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \cdot 22 \cdot \left[\frac{(f_{cm})}{10} \right]^{0.3}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где η_E – поправочный коэффициент для расчета среднего значения модуля упругости легкого бетона; E_{cm} – значение секущего модуля упругости для бетона нормальной плотности, МПа; ρ – плотность легкого бетона после сушки в печи, определяемая согласно требованиям стандарта [11], кг/м³; f_{cm} – среднее значение цилиндрической прочности бетона на сжатие, МПа.

Из анализа зависимости (2) можно сделать вывод, что значения модуля упругости легкого бетона изначально в значительной степени зависят от плотности ρ и в гораздо меньшей степени – от значения средней прочности на сжатие f_{cm} .

Нормами [12] модуль упругости предписано принимать в соответствии с данными таблицы 18. Аналитических зависимостей для расчета модуля упругости ни для тяжелого бетона, ни для легкого не предусмотрено. При этом не разъяснено, исходя из каких соображений установлены те или иные табличные значения модуля упругости в нормах [12].

Согласно американским нормам [13] модуль упругости легкого бетона в диапазоне плотностей от 1440 до 2560 кг/м³ следует рассчитывать по зависимости

$$E_c = \omega_c^{1.5} \cdot 33 \cdot \sqrt{f'_c}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где ω_c – плотность легкого бетона, Н/мм³; E_c – значение модуля упругости для легкого бетона, МПа; f'_c – значение цилиндрической прочности бетона на сжатие, МПа.

Таким образом, зависимость (3) тоже предусматривает учитывать плотность легкого бетона при определении модуля упругости. Можно сделать вывод, что и в нормах [13] плотность легкого бетона оказывает наиболее значительное влияние на величину модуля упругости.

Приведенные формулы (2) и (3) дают приближенные значения модуля упругости, которые могут варьироваться в достаточно широких пределах. В то же время и нормы [10], и нормы [13] допускают возможность устанавливать значение модуля упругости экспериментальным путем, а затем соответственно использовать эти опытные данные в дальнейших расчетах.

Долговечность керамзитобетона

Исследований долговечности керамзитобетона в мире известно достаточно мало, и практически нет исследований долговечности керамзитожелезобетона.

Среди всех проанализированных научных литературных источников, а также нормативных документов следует выделить упомянутую выше работу [5], в которой были проведены комплексные исследования долговечности и изучены физико-механические свойства керамзитобетона применительно к условиям эксплуатации теплотрасс при действии повышенных до 150 °С температур и с учетом агрессивного воздействия грунтовых вод. Керамзитобетон при этом применялся при изготовлении конструкций лотков.

По результатам проведенных экспериментальных исследований в работе [5] были сделаны следующие выводы:

1) нагревание образцов до 150 °С в течение первых 24 часов приводит к увеличению прочности керамзитобетона на сжатие на 5...10%, а последующее нагревание в течение 28 суток практически не приводит к каким-либо значительным изменениям этого базового показателя;

2) прочность конструкционного керамзитобетона на растяжение в процессе нагрева снижается. Наибольшее снижение прочности на растяжение в результате нагрева по отношению к прочности на растяжение образцов после пропарки составляет 25%; прочность на растяжение после суточного прогрева бетона при температуре 150 °С составляет 65...70%, а после 28 суток – 70...80% от контрольной (после пропаривания);

3) длительный нагрев приводит к значительному уменьшению модуля упругости керамзитобетона. Нагревание в течение 24 часов приводит к уменьшению модуля упругости на 10...15%, а нагрев в течение 28 суток – на 25...30%.

Уменьшение прочности на растяжение и снижение модуля упругости, как указано в работе [5], можно объяснить возникающими деструктивными процессами в бетоне, вызванными различием коэффициентов температурного расширения заполнителя и цементного камня. С нагревом возрастает дефектность структуры бетона, изменяется контактная зона цементного камня и заполнителя.

Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании конструкций из конструкционного керамзитобетона.

В работе также изучалось агрессивное воздействие на керамзитобетон грунтовых вод. Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о вполне удовлетворительных показателях морозостойкости и водонепроницаемости и их соответствии требованиям действовавших на то время норм.

Изучалось также и влияние на керамзитобетон кислотной, сульфатной, щелочной сред. Степень агрессивности среды на момент исследований была эквивалента среднему химическому воздействию ХА2 по нормам [10] и [11].

Испытания показали, что снижения прочностных характеристик конструкционного керамзитобетона при длительном хранении в средах с допустимой средней степенью агрессивности практически не наблюдалось, что можно объяснить следующим:

- керамзитовый гравий и песок обладают высокой стойкостью в агрессивных средах в силу особенностей их химического состава;

- поры заполнителя служат дополнительно емкостью, которая вмещает в себя кристаллы новообразований в теле бетона, способствуя тем самым снижению кристаллизационного давления, которое вызывает растягивающие напряжения и разрушение бетона.

Таким образом, конструкционный керамзитобетон, применявшийся в лотках теплотрасс, не требует специальных мер защиты, отличных от тех, которые установлены для бетона нормальной плотности. Тем не менее нормами [10] предусмотрено увеличение значений минимального защитного слоя бетона на 5 мм, в то время как в нормах [12] и в нормах [13] никаких дополнительных требований к величине защитного слоя для легкого бетона, в том числе и с применением керамзита, не установлено.

Экономическая эффективность применения конструкционного керамзитобетона

При использовании любого вида легкого бетона в качестве конструкционного в большинстве случаев заявляется о снижении стоимости инвестиционного проекта, улучшенной функциональности здания. Тем не менее расчеты сметной стоимости проекта в случае применения конструкционного легкого бетона всегда необходимы, поскольку удельная стоимость отдельно взятого элемента, изготовленного из легкого бетона, обычно больше, чем удельная стоимость такого же элемента из бетона нормальной плотности. Это подтверждается элементарным расчетом, приведенным в техническом руководстве АСІ 213R-03 [14]. Согласно расчетам, для типовой конструкции мостового сооружения увеличение стоимости при использовании лёгкого бетона вместо бетона нормальной плотности в несущих конструкциях моста составляет до 1%.

Указанное увеличение стоимости может быть легко компенсировано снижением общих затрат в денежном выражении за счет ниже следующего:

- снижение нагрузок на фундаменты, основание и колонны из-за применения легкого бетона вместо бетона нормальной плотности даст возможность применить фундаменты меньших размеров с меньшим количеством свай, менее объемными ростверками, потребуется использовать меньшее количество арматурных изделий и арматуры;

- при реконструкции мостовых сооружений появится возможность запроектировать и построить новое, более широкое, чем ранее, дорожное полотно, улучшив тем самым функциональность реконструируемого мостового сооружения;

- при использовании легкого бетона в преднапряженных конструкциях становится возможным изготовить конструктивные элементы большей номинальной длины, либо большего поперечного сечения, без увеличения общей массы.

Перечисленные изменения в конструктивных элементах зданий в ряде случаев могут настолько снизить затраты на складирование, монтаж и транспортировку элементов конструкций, что это снижение будет в несколько раз превышать увеличение стоимости, которое может возникнуть на этапе изготовления легкобетонной конструкции [14].

В техническом руководстве [14] рассмотрена экономическая эффективность конструкций из легкого бетона преимущественно при использовании в мостовых сооружениях. Остается, однако, не до конца выясненным вопрос, какова эффективность использования легких бетонов и, в частности, керамзитобетона в наиболее распространенных монолитных зданиях гражданского и общественного назначения высотой до 20 этажей, при возведении которых нет необходимости в подъеме, транспортировании, складировании большепролетных или массивных элементов конструкций. Вариантное проектирование подобных зданий является важным с точки зрения проверки экономической эффективности применения керамзитобетона, что может дать более конкретный ответ на вопрос о целесообразности применения керамзитобетона в том или ином случае реализации инвестиционного проекта.

Заключение

Преимущества конструкционного керамзитобетона, в особенности высокопрочного, перед бетоном нормальной плотности в ряде случаев неоспоримы и неоднократно перечислены в целом ряде работ [1; 5; 8; 9; 15–18].

Перспективы использования конструкционного керамзитобетона в Республике Беларусь с учетом интенсивного развития строительной индустрии и химии бетона в условиях проводимой государством политики энергетической независимости и ресурсосбережения достаточно обширны.

Тем не менее остаются недостаточно изученными следующие проблемы, требующие проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований:

- 1) долговечность, в том числе коррозионностойкость, в условиях воздействия сильноагрессивных химических сред, воздействия хлоридов, воздействия воздуха и влаги (коррозия, вызываемая карбонизацией бетона);
- 2) поведение конструкционного керамзитобетона прочностью более 30 МПа в условиях сложных напряженно-деформированных состояний, в частности в условиях местного сжатия;
- 3) экономический эффект от применения конструкционного керамзитобетона в любых несущих конструкциях зданий и сооружений (в том числе и из монолитного железобетона), особенно в совмещающих несущую и ограждающую функцию в конструкциях.

Таким образом, решение обозначенных вопросов с учетом возрастающего объема применения керамзита на территории Республики Беларусь позволит в более полной мере использовать керамзитобетон наравне с бетоном нормальной плотности. Кроме того, стоит ожидать более высокой конкурентоспособности предприятий стройиндустрии Беларуси на рынке Евразийского экономического союза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звездов, А.И. Высокопрочные легкие бетоны в строительстве и архитектуре / А.И. Звездов, В.Р. Фаликман // Жилищное строительство. – 2008. – № 7 – С. 2–6.
2. Методы испытаний бетона : СТБ EN 12390-7-2012. Ч. 7. Определение плотности бетона / Госстандарт Респ. Беларусь. – Минск, 2012. – 11 с.
3. Бетоны конструкционные тяжелые : СТБ 1544-2005*. Технические условия. Переиздание / Госстандарт Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – 22 с.
4. Фаликман, В.Р. Высокопрочный легкий бетон: технология и свойства / В.Р. Фаликман, Ю.В. Сорокин, О.М. Горячев // Бетон и железобетон. – М., 2005. – № 2. – С. 8–11.
5. Коммисаренко, Б.С. Керамзитобетон для эффективных ограждающих конструкций : дис...д-ра техн. наук : 05.23.05 / Б.С. Коммисаренко ; СГАСА. – Самара, 2000. – 320 с.
6. Гравий, щебень и песок искусственные пористые. Технические условия : СТБ 1217-2000 / Минстрой-архитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2000. – 10 с.
7. Семенюк, С.Д. Прочностные и деформативные характеристики легких бетонов на основе керамзита заводов Беларуси / С.Д. Семенюк, И.И. Мельянцова, А.Г. Подголин // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16 – С. 54–60.

8. Johannesen, H. Ultimate Compressive Strain and Ductility of LWAC Beams / H. Johannesen, S. Petersen // Master thesis submitted to the faculty of Engineering science and technology of the Norwegian University of Science and Technology. – Trondheim, 2017. – 155 p.
9. Sajedi, F. High-strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone / F. Sajedi, P. Shafiq // Arabian journal for Science and engineering. – 2012. – Vol. 37, Iss. 7. – P. 1885–1893.
10. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций : ТКП EN 1992-1-1-2009*. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Введ. 01.01.2010. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2015. – 205 с.
11. Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие : СТБ EN 206-2016 / Госстандарт Респ. Беларусь. – Минск, 2016. – 98 с.
12. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования ; СНиП 2.03.01-84* / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
13. ACI 318-14. Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318-14 and Commentary (318-14R). – American Concrete Institute, Farmington Hills. Mich., 2014. – 524 p.
14. ACI 213R-03. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. Reported by ACI Committee 213. – American Concrete Institute, Farmington Hills. Mich, 2003. – 38 p.
15. Дорф, В.А. Высокопрочный керамзитобетон (Обзор опыта производства, особенностей технологии и свойств) / В.А. Дорф, В.Г. Довжик ; ЦНИИТЭСтром М-ва промышленности строительных материалов СССР. – М., 1968. – 52 с.
16. Легкие и ячеистые бетоны и конструкции из них : науч. сессия института. Доклады и сообщения / под ред. А.Т. Баранова [и др.]. – НИИЖБ. – М., 1970. – 202 с.
17. Chandra, S. Lightweight aggregate concrete / S. Chandra, I. Berntsson // Construction materials science and technology series. – Norwich, NY 13815, 2002. – 430 p.
18. Ориентлихер, Л.П. XXI век – век легких бетонов / Л.П. Ориентлихер // Технологии бетонов. – МГСУ. – 2007. – № 1. – С. 68–69.

Поступила 11.06.2018

STRUCTURAL EXPANDED CLAY CONCRETE IN A BUILDING INDUSTRY. PRACTICE AND PROSPECTS OF USAGE

V. BONDAR

The article presents the accumulated worldwide experience of using structural expanded clay concrete (including high-strength) in the construction of civil and industrial buildings, hydrotechnical and bridge structures, and in road construction. The main advantages and disadvantages revealed during most of the life cycle of the objects – from the design stage and ending with the operation are noted. The publication also considers the requirements of the design standards in force in the Republic of Belarus and in the world concerning the mechanical and technological properties of expanded clay structural -concrete, the difference from concrete so-called normal density. The analysis of perspective directions of development of expanded clay reinforced concrete is carried out, taking into account the intensive development of construction chemistry in terms of modification of concrete in order to increase their corrosion resistance, workability and compressive strength. In article the main issues that require additional theoretical and experimental research are given.

Keywords: structural expanded clay concrete, high-strength, building industry, strength, deformation, durability, expanded clay concrete usage, economic efficiency.