

Для цитирования: Иноземцев, А.С. Экономические предпосылки внедрения высокопрочных легких бетонов [Текст] / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Журнал «Научно-технический вестник Поволжья» – Казань: ООО «Научно-технический вестник Поволжья». 2012. №5. С. 198-205.

05.23.05

А.С. Иноземцев, Королев Е.В., д.т.н., проф.,

Научно-образовательный центра по направлению «Нанотехнологии»
ФГБОУ ВПО «Московский Государственный строительный университет»,
Москва, InozemcevAS@mgsu.ru

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ¹

В работе представлено экономическое обоснование внедрения разработанных высокопрочных легких бетонов для производства несущих изделий и конструкций для промышленного и гражданского строительства. Приведен краткий обзор мировой практики по разработке и применению составов прочных легких бетонов. Отражены основные свойства и преимущества предлагаемых энергоэффективных высокопрочных легких бетонов по отношению к тяжелым и легким бетонам. Предложена методика расчета экономической эффективности бетона исходя из возможности снижения общего веса конструкции и увеличения этажности на примере многоэтажного жилого здания. Представлены зависимости изменения экономической эффективности от площади основания здания и его этажности по предложенной методике. Показана возможность оптимизации расхода арматурной стали и бетона при использовании высокопрочного легкого бетона.

¹ Печатается при поддержке гранта Президента МД-6090.2012.8

Дополнительный экономический эффект достигается благодаря меньшим показателям коэффициента теплопроводности, а также уменьшением затрат при эксплуатации здания. Описанные методики расчета экономической эффективности, основанные на учете основных показателей качества научных разработок, позволяет проводить обоснования для внедрения новых строительных материалов, сырьевые компоненты которых имеют узкую специфику использования. Обозначенный подход позволяет сделать вывод о том, что прямой расчет стоимости разработанного материала по себестоимости не обеспечивает объективными данными о перспективности разработки и ее производственной конкурентоспособности.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, экономическая эффективность, энергоэффективный бетон.

Развитие строительных технологий и научные достижения в области строительного материаловедения, направленные на совершенствование и ускорение процессов строительства, невозможно без экономического обоснования [1...3]. Экономические критерии эффективности часто являются основными показателями для новых технологий, при этом показатели качества могут изменяться незначительно. Так, строительные материалы, обладающие универсальными свойствами, но по экономическим показателям нереализуемые в практике, не имеют развития вне лаборатории.

Однако, расчеты экономической эффективности технологии строительных материалов, основанные на стоимости ресурсов и производительности оборудования, не позволяют объективно оценить перспективность практического внедрения научных разработок. Очевидно, что экономическое обоснование необходимо осуществлять для каждого

конкретно случая индивидуально, исходя из области применения и функциональных особенностей и применительно к строительному объекту.

Рассмотрим экономическое обоснование применения бетона, обладающего низкой средней плотностью и высоким показателем предела прочности при сжатии – энергоэффективного наномодифицированного высокопрочного легкого бетона (ВПЛБ) конструкционного назначения [4].

Многокомпонентный состав такого бетона включает цементное вяжущее, минеральную часть, легкий наполнителя, наноразмерный модификатор и добавки [5]. Наполнителем, обеспечивающим низкую плотность бетона, является полые стеклянные или керамические микросферы, получаемые методом плазменного распыления [6] или высокотемпературным факельным сжиганием угля.

В мировой практике [7...13] имеется опыт создания прочных легких бетонов (табл. 1). Однако для таких бетонов характерны низкие показатели удельной прочности при пониженных значения средней плотности.

Таблица 1 – Мировой опыт создания прочных легких бетонов

Год	Страна	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Удельная прочность, МПа	Литература
1999	Кувейт	1520	22	14,4	[7]
2002	Германия	1800	14...25	7,5...15	[8]
2003	Бразилия	1450...1600	40...50	24,5...30,5	[9]
2003	Турция	1800...1860	30...40	16,1...22,2	[10]
2004	Япония	1800...1850	47...54	27,5...30,0	[11]
2007	Россия	1800	46...61	25,5...33,8	[12]
2007	Россия	1600...1650	42...48	25,4...28,7	[13]

Разработанные составы ВПЛБ обладают универсальным сочетанием свойств (высокая прочность и низкая средняя плотность), которое позволяет применять их для изготовления элементов конструкции при строительстве жилых и общественных зданий. При этом изделия из такого

бетона обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими тяжелыми и легкими бетонами (табл. 2 и 3).

Таблица 2 – Преимущества высокопрочных легких бетонов

Показатель	Высокопрочный тяжелый бетон	Легкий бетон	Высокопрочный легкий бетон
Высокая прочность	+	–	+
Низкая средняя плотность	–	+	+
Высокая удельная прочность	+	–	+
Закрытая пористость	+	–	+
Низкое водопоглощение	+	–	+
Низкая теплопроводность	–	+	+
Высокая звукоизоляция	–	+	+

Таблица 3 – Некоторые сравнительные свойства бетонов

Наименование показатель	Значение		
	Тяжелый бетон	Легкий бетон*	ВПЛБ
Средняя плотность, кг/м ³	2300...2500	1100...2000	1300...1500
Предел прочности при сжатии, МПа	30,0...40,0	12,5...30,0	40,0...65,0
Удельная прочность, МПа	13,0...18,0	11,0...15,0	30,0...55,0
Водопоглощение, %	5...10	15...40	менее 2,5
Морозостойкость, цикл	не менее 100	не менее 100	–
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	1,45...1,55	0,30...1,20	менее 0,60
Коэффициент температуропроводности, $\cdot 10^{-7}$ м ² /с	–	–	менее 5,00
Удельная теплоемкость (при $T=25^{\circ}\text{C}$), кДж/кг·К	–	–	0,80...1,15

Примечание: * – легкий бетон конструкционного назначения.

Как видно из табл. 2 и 3 высокопрочный легкий бетон имеет более низкую среднюю плотность, по сравнению с тяжелым бетоном, что позволяет облегчить конструкции на 40%, сохранив конструкционные качества изделия. Кроме того, разработанный бетон обладает меньшей теплопроводностью, обеспечивая дополнительные теплоизоляционные качества. За счет применения полых микросфер в качестве наполнителя

создается плотная структура бетона с низкой пористостью и достигается высокий показатель по морозостойкости, определяющий долговечность материала. Легкие бетоны на пористых заполнителях требуют дополнительной отделки для защиты от эксплуатационных воздействий. В отличие от легких бетонов, которые не обладают высокой удельной прочностью, ВПЛБ могут быть использованы в конструкциях для изготовления несущих элементов здания. Такое повышение показателей качества высокопрочного легкого бетона достигается вследствие модифицирования границы раздела фаз «цементный камень – микросфера» наноразмерным модификатором, который обеспечивает повышение смачиваемости микросфер и повышение прочности контакта.

Исходя из вышесказанного основными показателями качества, обеспечивающие экономическую эффективность внедрения разработанных бетонов, являются:

- низкая средняя плотность, позволяющая уменьшить вес изделий (конструкции, сооружения);
- высокая прочность, обеспечивающая конструкционные качества;
- низкая теплопроводность.

Определение экономической эффективности масштабно можно алгоритмизировать относительно конструкции или сооружения (здания). Расчет, основанный на снижении общей массы изделий из тяжелого бетона, базируется на предположении о снижении нагрузки на основания и фундаменты, что позволяет увеличить этажности строения, а следовательно, дополнительную полезную площадь и как следствие сокращение удельных затрат на строительство единицы площади.

Предположим, что на участке площадью S планируется возвести здание N_6 этажей из тяжелого бетона средней плотностью $\rho_{\text{ср}}^6$. Масса всего здания составит

$$M_{зд}^{\bar{б}} = m_{эт}^{\bar{б}} N_{\bar{б}},$$

где $m_{эт}^{\bar{б}}$ – базовая масса одного этажа в здании при плотности бетона $\rho_{ср}^{\bar{б}}$; индекс «б» означает базовый бетон – тяжелый бетон.

При этом масса этажа $m_{эт}^{\bar{б}}$ при известной плотности будет зависеть от геометрических характеристик

$$m_{эт}^{\bar{б}} = S \bar{\delta} \rho_{ср}^{\bar{б}},$$

где S – площадь этажа, выполненная из бетона, рассчитанная как

$$S = 2ah + 2bh + ab,$$

где a, b, h – соответственно длинна, ширина и высота этажа.

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^z \alpha_i \delta_i,$$

где $\bar{\delta}$ – приведенная толщина каркаса, δ_i – толщина i -го изделия из бетона, используемого при строительстве здания, α_i – коэффициента значимости для i -й толщины.

Масса одного этажа из бетона новой плотности равна

$$m_{эт}^{\bar{н}} = S \bar{\delta} \rho_{ср}^{\bar{н}},$$

где индекс «н» означает новый бетон – высокопрочный наномодифицированный легкий бетон.

Кроме того, меньшая средняя плотность бетона по теплофизическим показателям позволяет дополнительно сократить толщину ограждающих конструкций (трехслойная панель) для обеспечения требуемого значения по сопротивлению теплопередаче (для Москвы $R_T=4,5 \text{ м}^{20}\text{С/Вт}$). В этом случае уменьшенная толщина δ_i стеновой панели, за счет снижения толщины бетона, позволяет сократить общую массу этажа:

$$\delta_{сп} = \delta_{сп0} \frac{\lambda_{б}}{\lambda_{н}},$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности.

Однако строительные нормы и правила, ограничивающие минимальную толщину слоя бетона, позволяют сократить толщину бетона в конструкции на величину k :

$$\delta'_{\text{сп}} = k\delta_{\text{сп}0}.$$

При этом должно выполняться условие:

$$\delta_{\text{сп}} \geq \delta'_{\text{сп}}.$$

Таким образом, при проектировании здания из высокопрочного легкого бетона плотностью 1400 кг/м^3 достигается увеличение площади этажей здания на 44%, то есть из тяжелого бетона ($\rho_{\text{сп}}^{\text{б}}=2400 \text{ кг/м}^3$) при прочих равных условиях возможно построить объект в 1,71 раза меньше по суммарной площади этажей.

Увеличение суммарной площади этажей здания приводит к сокращению себестоимости квадратного метра, а, следовательно, при равной цене за единицу площади достигается большая рентабельность строительства.

Кроме того, лучшие теплофизические свойства ВПЛБ, позволяют экономить на теплоизоляционных работах. Высокопрочный легкий бетон, имея коэффициент теплопроводности почти в 2 раза меньше чем у тяжелого бетона, обеспечивает сокращение затрат на утеплитель на 94%. Наибольший экономический эффект при этом достигается при использовании ВПЛБ при устройстве как перекрытий, так и ограждающих панелей.

Пример расчета экономической эффективности применения высокопрочных легких бетонов представлен в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты расчета экономической эффективности при использовании ВПЛБ в качестве конструкционного и ограждающего материала

№ п/п	Показатель	Значение	
		Тяжелый бетон	ВПЛБ
Начальные условия			
1	Тип здания	Каркасно-панельный	
2	Площадь основания, кв.м.	1000	
3	Базовая этажность здания	16	–
4	Класс прочности бетона	В40	
5	Средняя плотность бетона, кг/м ³	2400	1400
6	Стоимость 1 м ³ бетона, руб.	4500	8500*
7	Стоимость 1 м ² возведенного объекта, руб.	50 000	
Расчетные данные			
7	Масса конструкций из бетона, Мт	13,2	
8	Коэффициент изменения плотности	1,714	
9	Объем бетона, ·10 ³ м ³	5,53	9,48
10	Общая площадь этажей, ·10 ³ м ²	16	28
11	Затраты на материалы, млн. руб.	18,21	80,58
12	Затраты на возведение 1 м ² здания**, тыс. руб.	1,14	2,94
13	Затраты на теплоизоляционные работы, млн. руб.	4,02	3,61
14	Экономия на теплоизоляционных работах, %	13,45	
15	Совокупный доход от продажи здания, млн.руб.	610	1100
16	Экономический эффект, %	44,50	

Примечание: * – стоимость 1 м³ высокопрочного легкого бетона при стоимости алюмосиликатных микросфер 11,75 руб./кг; ** – стоимость общестроительных работ принята за 200% от стоимости материалов, стоимость 1 м² земли – 90 тыс. руб.

Как видно из табл. 4, описанный подход к расчету экономической целесообразности внедрения высокопрочных легких бетонов при строительстве многоэтажных зданий, свидетельствует, что разработанные

бетоны при заданных условиях обеспечивают экономический эффект более 55%.

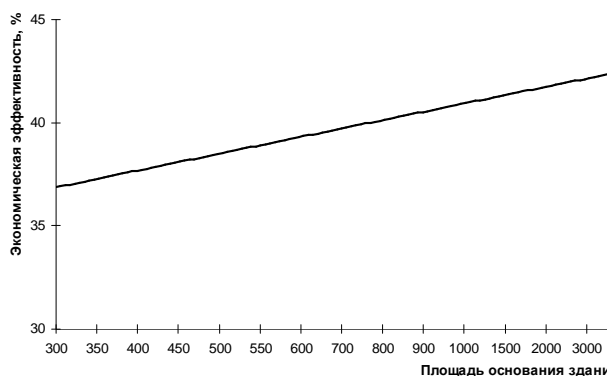


Рис.1 – Влияния площади основания здания на экономическую эффективность применения ВПЛБ

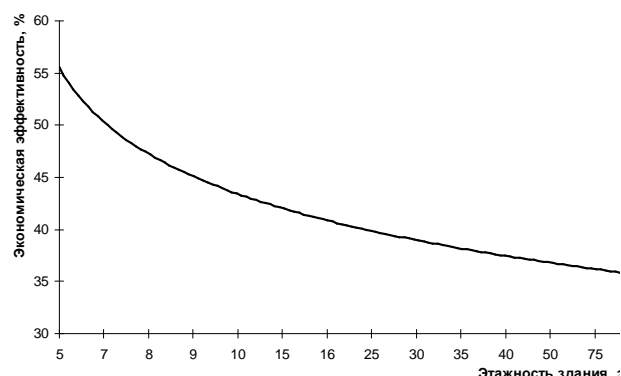


Рис. 2 – Влияние этажности здания на экономическую эффективность применения ВПЛБ

На рис. 1 и 2 представлены зависимости изменения экономического эффекта от площади основания здания и его этажности по предложенной методике. Увеличение площади здания приводит к увеличению рентабельности, что связано с сокращением общестроительных расходов на единицу площади. Увеличение этажности в свою очередь приводит к снижению экономического эффекта, так как увеличиваются расходы на строительно-монтажные работы. При этом на каждом из графиков видно, что экономическая эффективность вне зависимости от этажности и площади здания составляет не менее 35%.

Однако приведенный выше пример расчета экономической эффективности внедрения высокопрочных легких бетонов не учитывает уменьшение накладных расходов, связанных с сокращением удельного веса конструкций. Очевидно, стоимость транспортных и монтажных работ более легких материалов меньше, что обеспечивает дополнительный экономический эффект.

Существует подход [14], учитывающий использование бетонов повышенной прочности при проектировании сборных и монолитных железобетонных конструкций. Авторами указанной работы предлагается оптимизация расходов арматурной стали и бетона с повышенными физико-механическими характеристиками.

Для расчета материалоемкости используются следующие формулы:

$$\eta_b = \sqrt{\frac{\mu_0 k_0 - 1}{\eta_s^2 \mu_0 k_0 - \eta_{s0}}};$$
$$\eta_s = \frac{\eta_b \pm \sqrt{\eta_b^2 - 4\mu_0 k_0 + 4\mu_0^2 k_0^2}}{2\mu_0 k_0 \eta_b},$$

где η_b , η_s – материалоемкость (расход материала) для бетона и арматуры соответственно, μ_0 – коэффициент рабочего армирования для исходного сечения, k_0 – коэффициент, учитывающий начальное сопротивление арматуры R_{s0} и бетона R_{b0} , рассчитанный как

$$k_0 = \frac{R_{s0}}{2R_{b0}}.$$

Очевидно, что применение материалов, характеризующихся более высокими показателями прочности, позволяет сократить их расход для изготовления изделия (конструкции). Так, при использовании высокопрочного легкого бетона с классом по прочности М600 и арматурной стали А400 достигается снижение расхода арматуры на 30% (рис. 3).

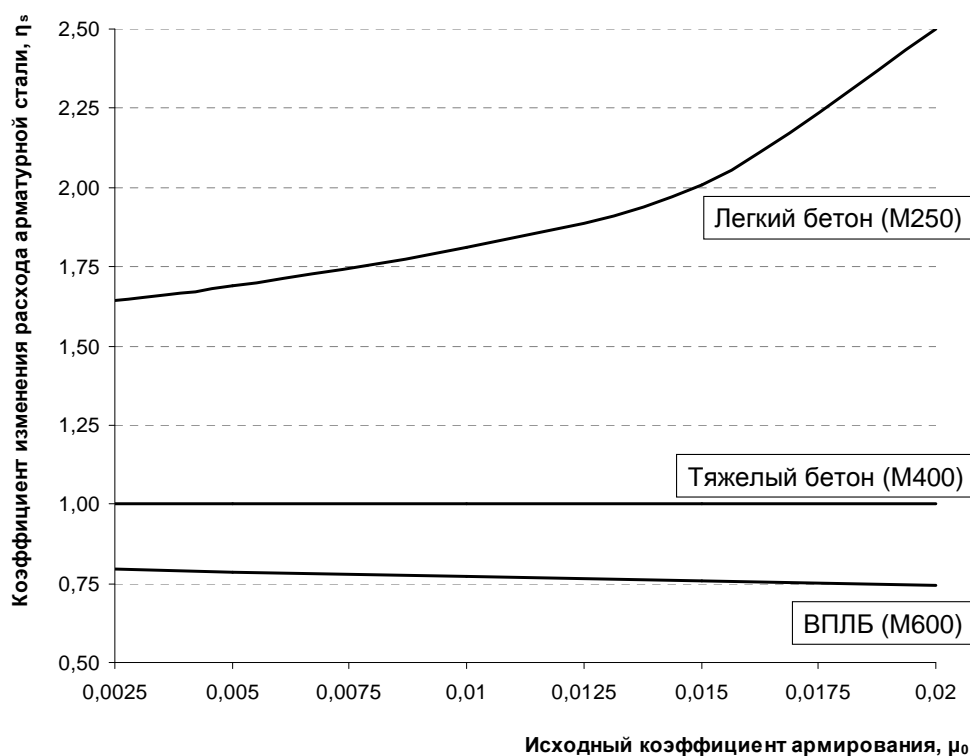


Рис. 3 – Зависимость коэффициента изменения расхода арматурной стали η_s от исходного коэффициента армирования μ_0 при исходном классе бетона М400 для высокопрочного легкого бетона М600 и легкого бетона М250

При этом в изделиях с большим начальным коэффициентом армирования значение коэффициента η_s уменьшается, а значит экономический эффект от снижения стоимости арматуры будет увеличиваться. Сокращение расхода арматуры является дополнительным экономическим фактором, обосновывающим применение разработанных бетонов.

Таким образом, предложенные методики расчета экономической эффективности, основанные на учете основных показателей качества разработки, позволяет проводить обоснования для внедрения новых строительных материалов, сырьевые компоненты которых имеют узкую специфику использования. Обозначенный подход позволяет сделать вывод о том, что прямой расчет стоимости разработанного материала по себестоимости не обеспечивает объективными данными о

перспективности разработки и ее производственной конкурентоспособности.

Проведенные расчеты показывают, что разработанные составы наномодифицированных высокопрочных легких бетонов, несмотря на высокую стоимость сырьевых компонентов по сравнению с тяжелыми бетонами, имеют высокую перспективу производственного внедрения и способны обеспечить экономическую выгоду при массовом строительстве.

Список литературы

1. *Баженов Ю.М., Королев Е.В.* Оценка технико-экономической эффективности нанотехнологий в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2009. №6. С. 66–67.
2. *Баженов Ю.М., Королев Е.В.* Техничко-экономические основы практической нанотехнологии в строительном материаловедении // *Региональная архитектура и строительство*. 2008. №2(5). С. 3–9.
3. *Королев Е.В.* Основные принципы практической нанотехнологии в строительном материаловедении // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. 2009. №1. С. 66–79.
4. *Иноземцев А.С., Королев Е.В.* Основы разработки наномодифицированных высокопрочных легких бетонов // *Оценка рисков и безопасность в строительстве. Новое качество и надежность строительных материалов и конструкций на основе высоких технологий: сб. научн. тр., Москва, 2012. С. 34–37.*
5. *Альбакасов А.И., Иноземцев А.С., Королев Е.В., Смирнов В.А.* Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. 2011. №6 (16). С.32–43.
6. *Бессмертный В.С., Дюмина П.С., Ляшко А.А.* Энергосберегающая технология получения стеклянных микрошариков методом

- плазменного распыления // Успехи современного естествознания. 2010. №3. С. 105–107.
7. *Jamal Alduaij, Khalid Alshaleh, M Naseer Haque, Khalid Ellaithy.* Lightweight concrete in hot coastal areas // *Cement and Concrete Composites*. 1999. Т. 21. №5–6. С. 453–458.
 8. *Bose A., McBride S. P., Shukla A.* Processing and characterization of a lightweight concrete using cenospheres // *Journal of materials science*. 2002. Т. 37. С. 4217–4225.
 9. *Rossignolo JA, Agnesini MVC, Morais JA.* Properties of highperformance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates // *Cement and Concrete Composites*. 2003. Т. 25. С. 77–82.
 10. *Ergul Yasar, Cengiz Duran Atis, Alaettin Kilic, Hasan Gulsen.* Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash // *Materials Letters*. 2003. Т. 57. С. 2267–2270.
 11. Technical Report Ishikawajimahirima // Evaluation of fatigue durability precast PC slab lightweight high-strength. 2004. Т.44. №.2. С. 83–90.
 12. *Андреанов А.А.* Состав, ползучесть высокопрочного легкого бетона из смесей высокоподвижной и литой консистенции с модификаторами на органоминеральной основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007, 15 с.
 13. Пат. 2355656 С2 РФ, МПК С04В28/02. Бетонная смесь / Пономарев А.Н., Юдович М.И. - Оpubл. 20.05.2009. – 3 с.
 14. *Бедов А.И., Бабков В.В., Габитов А.И.* Использование бетонов и арматуры повышенной прочности в проектировании сборных и монолитных железобетонных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2012. №8. С. 76–84.

A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev
ECONOMIC PREREQUISITES FOR APPLICATIONS OF HIGH-
STRENGTH LIGHTWEIGHT CONCRETE¹

Keywords: high-strength lightweight concrete, economic efficiency, energy efficient concrete

The economic substantiation of usage of high-strength lightweight concrete for industrial and civil construction is presented in the work. Brief review of the world practices in the design and application of lightweight concrete with high strength is given. The primary advantages of the proposed energy efficient high-strength lightweight concretes, together with comparison with traditional concretes are summarized. Both the method of calculation of the economic efficiency based on the possibility to reduce the overall weight of the structure and to increase the buildings' height, and the example of application of this method (taking into account area of the ground and amount of reinforcing steel) are presented. It is shown that amounts of reinforcing steel and concrete can be optimized; in addition, the extra effect caused by low thermal conductivity of the designed lightweight concrete. With the developed calculation methods it is possible to justify the application of specific raw materials during the production of concrete despite the fact that such raw materials are often of high price.