

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Е. В. Королев, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев**

*Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (г. Москва)*

Новые технические и технологические решения, обоснование эффективности которых основывается только на экономических критериях, с развитием науки и техники становятся недостаточными. Это требует разработки технологических подходов, результаты которых дают продукции технические преимущества, обеспечивающие достижение экономической эффективности их применения. Рациональным подходом, позволяющим комплексно оценить эффективность применения композиционных материалов, является использование методов системного анализа – метода комплексных технико-экономических показателей. В статье предложен подход для обоснования технико-экономической эффективности технологии, заключающийся в оценке стоимости нового технологического решения, позволяющего повысить качество материала. Условием, при котором вариант технологического решения признается эффективным по установленному критерию качества (обобщенный критерий качества), является достижение максимального значения коэффициента эффективности. Представленный подход технико-экономического обоснования внедрения строительных материалов, выполненный на примере высокопрочного легкого фибробетона, показывает возможность комплексной оценки целесообразности использования новых технологических решений. С помощью критериального метода показано, что технология высокопрочного легкого бетона, обладающего уникальным набором свойств, отличается лучшей технико-экономической эффективностью на 24...39 % по сравнению с базовой технологией тяжелого высокопрочного бетона.

**Ключевые слова:** технико-экономическая эффективность; строительные материалы; высокопрочный легкий бетон; обоснование внедрения; комплексная критериальная оценка

**Введение.** С развитием науки и техники новые технические и технологические решения, обоснование эффективности которых базируется только на экономических критериях, становятся недостаточными. Так, стоимостная оценка, выражаемая как разница расходов для получения исключительно экономического эффекта, не позволяет корректно оценить преимущества новых решений, отличающихся по своим ключевым характеристикам.

Одним из примеров таких решений являются высокопрочные легкие бетоны, сочетающие низкую плотность и высокую прочность. Обладая нестандартным сочетанием

ключевых эксплуатационных свойств, затратный метод не позволяет корректно оценить эффективность применения такого материала в строительстве, так как для сравнения выбираются различные по виду (легкие или тяжелые, конструкционные или теплоизоляционные) прототипы. Это требует разработки технологических подходов, результаты которых создают продукции технические преимущества, обеспечивающие достижение экономической эффективности их применения.

Очевидным подходом для технико-экономического обоснования эффективности

применения высокопрочного легкого фибробетона (ВПЛФБ) может быть сравнительный расчет затрат на изготовление конструкций. Рассмотрим такой расчет на примере проекта типовых мостовых конструкций [1], выполненный в сравнении с тяжелым бетоном. При прочих равных условиях (материал

основания и дорожного покрытия, опоры, дорожные балки) для каждого из вариантов отличительными особенностями будут лишь физико-механические свойства материала для изготовления пролетных конструкций.

Расчет выполним при характеристиках мостовых элементов согласно таблице 1.

Таблица 1

**Характеристики элементов мостовых сооружений для устройства опорных конструкций, принятых для расчета технико-экономической эффективности**

| Наименование                         | Габариты, см | Объем, м <sup>3</sup> | Количество, шт. | Общий вес, т |
|--------------------------------------|--------------|-----------------------|-----------------|--------------|
| Стойка С1-3 <sup>с</sup>             | 35×35×500    | 0,61                  | 6               | 1,7          |
| Насадка Н2 <sup>с</sup>              | 380×180×89   | 4,6                   | 1               | 11,5         |
| Фундаментный стакан Ф1 <sup>1с</sup> | 260×110×110  | 2,4                   | 3               | 6,0          |
| Фундаментная плита ФП-4              | 418×54×14    | 2,8                   | 2               | 7,0          |
| Пролетный блок                       | 1150×418×900 | 10,0                  | –               | 25,0         |

В расчете учитываются постоянные вертикальные нагрузки от элементов мостовых конструкций, величины эксплуатационных нагрузок приняты постоянными. Собственный вес опоры рассчитывается с учетом плотности и объема элемента конструкции

$$G_i = V\gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – средняя плотность бетона, которая с учетом армирования для тяжелого бетона равна 2500 кг/м<sup>3</sup>.

На каждую опору моста (за исключением крайних) действует нагрузка двух пролетных блоков, которая тоже определяется исходя из собственного веса. Так, нагрузка мостовой балки на промежуточную опору будет рассчитываться также

$$G_{II} = V\gamma. \quad (2)$$

Статическая нагрузка, действующая на

опору мостовых конструкций и основание, является исходной для расчета эффективности применения ВПЛФБ со средней плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup> для изготовления большепролетных конструкций, балок. При сохранении схемы армирования мостовых балок для расчетов принимается средняя плотность бетона 1500 кг/м<sup>3</sup>.

При этом нагрузка на основание, исходя из типового проекта конструкций, будет рассчитываться как сумма нагрузок от элементов пропорционально их количеству:

$$F = G_H + 6G_C + G_{II}/2, \quad (3)$$

где  $G_{II}$  – нагрузка от воздействия пролетного блока;  $G_H$  – нагрузка от блока Н2<sup>с</sup>;  $G_C$  – нагрузка от блоков С1-3<sup>с</sup>. Результаты расчета нагрузок для промежуточных опор мостовых сооружений представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Расчет нагрузок для мостовых конструкций из различных материалов**

| Материал   | Элемент           | Объем, м <sup>3</sup> | Кол-во, шт. | $G$ , кН | $F$ , кН |
|--|-------------------|-----------------------|-------------|----------|----------|
| Тяжелый бетон<br>$\gamma = 2500$ кг/м <sup>3</sup> | С1-3 <sup>с</sup> | 0,61                  | 6           | 91,5     | 914      |
|  | Н2 <sup>с</sup>   | 4,6                   | 1           | 115,0    |          |
|  | Пролетный блок    | 10,0                  | 1           | 250,0    |          |
| ВПЛФБ<br>$\gamma = 1500$ кг/м <sup>3</sup>         | С1-3 <sup>с</sup> | 0,61                  | 6           | 54,9     | 548      |
|  | Н2 <sup>с</sup>   | 4,6                   | 1           | 69       |          |
|  | Пролетный блок    | 10,0                  | 1           | 150,0    |          |

Таким образом, на основания под опорами (Ф1<sup>1с</sup>) при использовании тяжелого бетона

для изготовления пролетных блоков и опор действует суммарная нагрузка 914 кН. При

использовании ВПЛФБ для изготовления указанных элементов мостовых конструкций на основании такая нагрузка будет в 1,66 раз меньше и составит 548 кН.

Снижение нагрузки пролетного блока на опоры и основания за счет снижения средней плотности бетона можно использовать для увеличения длины пролета с последующей

корректировкой типового проекта мостового сооружения по числу опорных конструкций.

Расчеты себестоимости мостовых конструкций, выполненный с условием идентичности технологии производства бетонных элементов, представлены в таблице 3. При этом меньшая средняя плотность ВПЛФБ позволяет уменьшить объем бетона.

Таблица 3

Расчет себестоимости мостовых конструкций

| Материал      | Элемент           | Кол-во, шт. | Объем, м <sup>3</sup> | Стоимость, млн руб. |
|---------------|-------------------|-------------|-----------------------|---------------------|
| Пример 1      |                   |             |                       |                     |
| Тяжелый бетон | C1-3 <sup>c</sup> | 54          | 32,9                  | 0,181               |
|               | H2 <sup>c</sup>   | 9           | 41,4                  | 0,228               |
|               | Ф1 <sup>1c</sup>  | 27          | 64,8                  | 0,356               |
|               | ФП4               | 18          | 50,4                  | 0,277               |
|               | Пролетный блок    | 10          | 100                   | 0,450               |
| ВСЕГО:        |                   |             | 289,5                 | 1,592               |
| Пример 2      |                   |             |                       |                     |
| Тяжелый бетон | C1-3 <sup>c</sup> | 30          | 18,3                  | 0,101               |
|               | H2 <sup>c</sup>   | 5           | 23                    | 0,127               |
|               | Ф1 <sup>1c</sup>  | 15          | 36                    | 0,198               |
|               | ФП4               | 10          | 28                    | 0,154               |
| ВПЛБ          | Пролетный блок    | 6           | 100,2                 | 0,967               |
| ВСЕГО:        |                   |             | 205,5                 | 1,546               |

*Примечание.* Для расчетов принята цена тяжелого бетона В45 – 5500,00 руб./м<sup>3</sup>; высокопрочного легкого фибробетона В45 – 9650,00 руб./м<sup>3</sup>.

Расчеты показывают, что применение ВПЛФБ позволяет снизить материалоемкость строительства мостовых сооружений на 29 % (объем бетона уменьшается с 289,5 до 205,5 м<sup>3</sup>) за счет увеличения длины пролета, при этом себестоимость всей конструкции изменяется лишь на 2,9 %.

Учитывая, что снижение удельного веса бетона позволяет увеличить пролет конструкций при сохранении несущей способности, закономерным конструкционным эффектом является уменьшение количества элементов, используемых для устройства опор мостового сооружения. Снижение количества возводимых опорных конструкций при строительстве закономерно снижает трудоемкость и стоимость работ. Поэтому оценку технико-экономической эффективности необходимо основывать на расчетах стоимости основных монтажных работ по строительству. То есть

показанный подход к эффективности решения оценивается не универсальным критерием, применимым для отдельного типа конструкций или сооружений, а требует детализации в каждом отдельном случае.

**Результаты и обсуждение.** Рациональным подходом, позволяющим комплексно оценить эффективность применения композиционных материалов, является использование методов системного анализа – метода комплексных технико-экономических показателей.

Используемый подход для обоснования технико-экономической эффективности технологии заключается в оценке стоимости нового технологического решения, позволяющего повысить качество материала [2...8]:

$$k_{ef} = \left| \frac{\delta F}{\delta C} \right|, \quad (4)$$

где  $\delta F$  – относительное изменение качества

материала;  $\delta C$  – относительное изменение цены материала.

Условием, при котором вариант технологического решения признается эффективным по установленному критерию качества (обобщенный критерий качества), является достижение максимального значения коэффициента эффективности  $k_{ef}$ , то есть

$$k_{ef,i} = \max ,$$

где индекс « $i$ » означает вариант технологического решения.

Формализация каждого свойства и групп свойств выполняется в следующем виде:

$$k_i = \frac{I_i}{I_{c,i}}, \quad (5)$$

где  $I_i$  – значение свойства;  $I_{c,i}$  – контрольное или идеальное значение свойства (по существу нормализовано), для группы свойств – вычисление среднего геометрического значения

$$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n k_i} \quad (6)$$

(здесь  $n$  – количество свойств, входящих в группу), а для качества материала – суммирование значений, полученных при вычислении средних геометрических значений групп свойств ( $j = 1, 2, 3 \dots m$ ;  $m$  – количество групп свойств):

$$\begin{aligned} & \alpha_1 \cdot \sqrt[n_1]{\prod_{i=1}^{n_1} k_i} + \alpha_2 \cdot \sqrt[n_2]{\prod_{i=1}^{n_2} k_i} + \alpha_3 \cdot \sqrt[n_3]{\prod_{i=1}^{n_3} k_i} + \dots = \\ & = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} k_i}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\alpha_j$  – коэффициент весомости

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_m = \sum_{j=1}^m \alpha_j = 1.$$

Для выбора значений коэффициентов весомости  $\alpha_j$  для каждой группы свойств используются методы номинальных и предельных значений, метод стоимостных регрессионных зависимостей, экспертный метод или другой.

Таким образом, качество материала оценивается обобщенным критерием вида

$$F = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} k_i}, \quad (8)$$

а его относительное изменение –

$$\delta F = \frac{F_n - F_b}{F_b}, \quad (9)$$

где индексом « $n$ » обозначено качество материала после применения нового технологического решения; индексом « $b$ » – качество базового материала, имеющего наилучшие показатели свойств для рассматриваемой области применения материала;  $F_n$  и  $F_b$  – значения обобщенного критерия качества для нового и базового материала (технологии) соответственно.

Из формулы (5) следуют такие важные выводы:

1) Повышение величины обобщенного критерия качества  $F$  в группе материалов, имеющих сформированную область применения, может быть достигнуто посредством расширения области применения материала, то есть выполнения дополнительных функций. Это следует из представленных ниже соображений.

Рассмотрим два материала, имеющих обобщенные критерии качества  $F_m$  и  $F_{m+1}$ :

$$F_m = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} k_i} \text{ и } F_{m+1} = \sum_{j=1}^{m+1} \alpha_j \cdot \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} k_i}, \quad (10)$$

Условию, характеризующему представленный вывод о повышении эффективности при расширении области применения материала, соответствует

$$\Delta F = F_{m+1} - F_m > 0. \quad (11)$$

Из последних формул следует, что

$$\alpha_{m+1} \sqrt[n_{m+1}]{\prod_{i=1}^{n_{m+1}} k_i} > \sum_{j=1}^m (\alpha_{j,m+1} - \alpha_{j,m}) \cdot \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} k_i}. \quad (12)$$

При условии неизменности величин для групп свойств, обозначенных индексами  $j = 1, \dots, m$ , и при условиях

$$\sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} k_i} > 1 \text{ и } \sum_{j=1}^m \alpha_j = \sum_{j=1}^{m+1} \alpha_j = 1 \quad (13)$$

$$\text{верно } \alpha_{m+1} = \sum_{j=1}^m (\alpha_{j,m+1} - \alpha_{j,m}) \quad (14)$$

$$\text{и } \alpha_{m+1} \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} k_i} > \sum_{j=1}^m (\alpha_{j,m+1} - \alpha_{j,m}). \quad (15)$$

2) При локальном повышении отдельных свойств в группе изменение обобщенного критерия качества незначительно. Отсюда следует, что новое технологическое решение должно обеспечивать повышение величин всех свойств, по которым производится оценка качества материала. Указанное вытекает из следующего.

Рассмотрим обобщенный критерий каче-

ства материала, состоящий из одной группы. Введем коэффициент  $\lambda_i$  ( $\lambda > 1$ ), характеризующий повышение величины отдельного критерия  $k_i$ . Тогда относительное увеличение обобщенного критерия составит

$$\delta F = \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^k \lambda_i} - 1, \quad (16)$$

где  $k$  – количество свойств с повышенными значениями по сравнению с базовым материалом.

Значения относительного изменения качества материала в зависимости от доли свойств, имеющих повышенные значения ( $\lambda > 1$ ), представлены на рисунке 1.

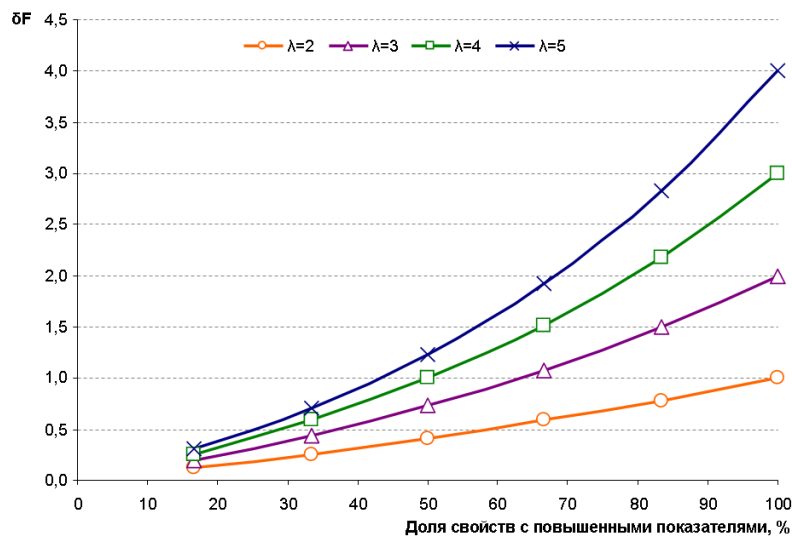


Рис. 1. Зависимость  $\delta F = f(k)$

Из рисунка 1 следует, что существенное изменение качества может быть достигнуто, только если новое технологическое решение обеспечивает повышение величины показателей всех свойств.

При изменении малого количества свойств даже многократно общий эффект незначителен. Так, при повышении показателя свойства в 5 раз ( $\lambda = 5$ ) относительное изменение обобщенного критерия качества составит только 31 %.

Относительная стоимость технологического решения выразится следующим образом:

$$\delta C = \frac{C_n - C_b}{C_b}, \quad (17)$$

где  $C_n$  и  $C_b$  – цена нового и базового материала (технологии) соответственно.

Анализ показывает, что возможны несколько вариантов, при которых для обеспечения адекватности ее применения необходимо внести корректировки.

Вариант № 1. Повышение качества продукции посредством оптимизации технологических режимов производства, контроля качества на всех этапах технологического цикла. Этому варианту соответствуют условия

$$\delta F > F_0, |\delta C| \rightarrow 0, \quad (18)$$

формальное применение которых будет указывать на завышенную эффективность предлагаемого решения, так как

$$\lim_{\delta C \rightarrow 0} \left| \frac{\delta F}{\delta C} \right| = \infty. \quad (19)$$

В этом случае расчет относительного изменения цены материала целесообразно производить по следующей формуле:

$$\delta C = \frac{C_n}{C_b}. \quad (20)$$

В а р и а н т № 2. Замена компонентов материала (например, использование вторичных ресурсов) при сохранении качества. Данному варианту соответствуют условия

$$\delta F \rightarrow 0, |\delta C| > C_0. \quad (21)$$

Эти условия указывают на отсутствие эффективности:

$$\lim_{\delta F \rightarrow 0} \left| \frac{\delta F}{\delta C} \right| = 0. \quad (22)$$

В этом случае расчет относительного изменения качества материала необходимо проводить по следующей формуле:

$$\delta F = \frac{F_n}{F_b}. \quad (23)$$

В а р и а н т № 3. Оценка новых технологических решений или новых технологий. При этом выполняются условия

$$\delta F > 0, |\delta C| > 0. \quad (24)$$

Диапазоны изменения относительной стоимости и относительного изменения качества материала могут быть различны, поэтому рационально производить расчет коэффициента технико-экономической эффективности по формуле

$$k_{ef} = \frac{F_n C_b}{F_b C_n}. \quad (25)$$

Если при расчете величин  $F$  и  $C$  были нормированы по отношению к базовому материалу, то в этом случае коэффициент технико-экономической эффективности

$$k_{ef} = \frac{F'_n}{C'_n}, \quad (26)$$

где  $F'_n$  и  $C'_n$  – нормированные значения обобщенного критерия качества и стоимости ново-

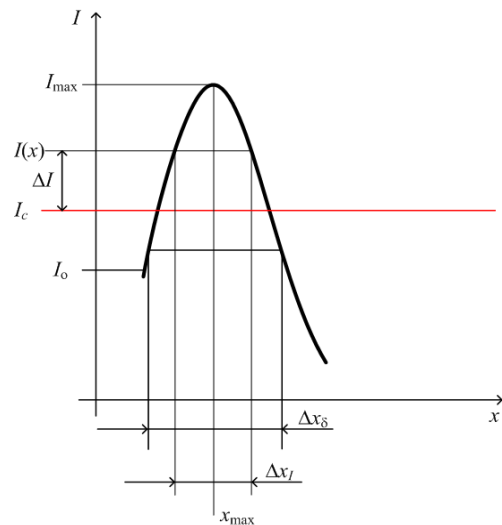
го технологического решения (нового материала) по отношению к базовому материалу.

Далее рассмотрим влияние только рецептурных факторов, предположив, что все факторы, оказывающие влияние на рецептуру материала, являются случайными величинами, вероятность распределения которых подчиняется нормальному распределению Гаусса. Относительная ошибка дозирования компонента составляет  $\delta_i$ . Общая относительная ошибка при дозировании материала составит

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (27)$$

(здесь  $n$  – количество компонентов), а абсолютная ошибка –  $\Delta x_\delta = 2\delta x_{\max}$ .

Предположим также, что концентрационная зависимость свойства  $I$  от содержания компонента  $x$  имеет вид, представленный на рисунке 2. Для получения технико-экономического эффекта необходимо обеспечить повышение величины свойства до  $I(x)$ .



**Рис. 2. Концентрационная зависимость  $I = f(x)$ :**

$I_{\max}$  – максимальная величина свойства  $I$ , достигаемая при концентрации компонента, равной  $x_{\max}$ ;  $I(x)$  – величина свойства  $I$ , достаточная для обеспечения технико-экономического эффекта;  $I_0$  – начальная величина свойства  $I$  до введения рассматриваемого компонента;  $I_c$  – контрольное или идеальное значение свойства;  $\Delta x_\delta$  – абсолютная ошибка, возникающая при дозировании компонентов;  $\Delta x_l$  – абсолютная ошибка, которую можно допустить для обеспечения требуемой величины свойства  $I \geq I(x)$

При этом абсолютная ошибка изменения  $x$  составляет  $\Delta x_I$ , а относительная ошибка –

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_I}{2x_{\max}}. \quad (28)$$

При значении соотношения  $\Delta x_I / \Delta x_\delta = \varepsilon / \delta \geq 1$  случайное варьирование рецептуры материала будет мало влиять на его качество. Результаты анализа соотношений  $(\varepsilon / \delta)_j$  для всех свойств, формирующих качество материала ( $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ), могут быть сведены в коэффициент, характеризующий возможность реализации технического эффекта нового технологического решения:

$$k_t = m \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)_1 \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)_2 \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)_3 \dots \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)_m} = m \sqrt{\prod_{j=1}^m \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)_j}. \quad (29)$$

$$\mathbf{q} = \left( k_{D_p}, k_{\rho_{cp}}, k_R, k_{R_{уд}}, k_{tr}, k_{упр}, k_{xp}, k_W, k_{H_2O}, k_\lambda, k_\alpha, k_c, k_F \right) \quad (31)$$

(здесь  $k_i$  – критериальные функции согласно [9, 10]) на первой стадии, исходя из области применения разрабатываемого материала, состояла из расчета значений функций, характеризующих особенности его технологических, физико-механических и эксплуатационных свойств:

$$K_T = k_\tau; \quad (32)$$

При проведении расчета величины  $k_t$  для соотношений  $(\varepsilon / \delta)_j > 1$  необходимо выполнять условие  $(\varepsilon / \delta)_j = 1$ .

Таким образом, модернизированная методика расчета технико-экономической эффективности нового технологического решения базируется на формуле

$$k_{ef} = k_t \cdot \frac{F'_n}{C'_n}. \quad (30)$$

В качестве примера рассмотрим технологию высокопрочного легкого фибробетона по сравнению с высокопрочным тяжелым бетоном, скаляризация векторного критерия качества которого

$$K_{фм} = \sqrt[6]{k_R k_\rho k_{R_{уд}} k_{tr} k_{упр} k_{xp}}; \quad (33)$$

$$K_{эк} = \sqrt[6]{k_W k_\lambda k_{H_2O} k_F k_\alpha k_c}, \quad (34)$$

и последующей их свертки:

$$F_k = \alpha_1 K_T + \alpha_2 K_{фм} + \alpha_3 K_{эк}. \quad (35)$$

При этом значения весовых коэффициентов  $\alpha_1 \dots \alpha_3$  выбирались также исходя из области применения материала.

Таблица 4

Значения эксплуатационных свойств и критериев

| Наименования свойства  | Значения показателя |       | Критерий     | Значение критерия |       |
|--|---------------------|-------|--------------|-------------------|-------|
|  | ВПБ                 | ВПЛФБ |              | ВПБ               | ВПЛФБ |
| Подвижность бетонной смеси, мм   | 250                 | 156   | $k_{Др}$     | 1,67              | 1,04  |
| Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>                                   | 2400                | 1400  | $k_{рсп}$    | 1,00              | 1,71  |
| Прочность при сжатии, МПа  | 83,5                | 60,5  | $k_R$        | 0,94              | 0,98  |
| Удельная прочность, МПа  | 34,8                | 43,2  | $k_{R_{уд}}$ | 1,16              | 1,44  |
| Коэффициент трещиностойкости   | 0,15                | 0,122 | $k_{tr}$     | 1,00              | 0,81  |
| Модуль упругости, ГПа  | 15,0                | 8,2   | $k_{упр}$    | 1,00              | 0,55  |
| Коэффициент Пуассона   | 0,085               | 0,121 | $k_{xp}$     | 1,00              | 1,42  |
| Водопоглощение по массе, %   | 0,06                | 0,017 | $k_W$        | 1,00              | 3,57  |
| Коэффициент водостойкости  | 0,8                 | 0,93  | $k_{H_2O}$   | 1,00              | 1,16  |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)                                 | 1,25                | 0,584 | $k_\lambda$  | 1,00              | 2,14  |
| Коэффициент температуропроводности, $\times 10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с | 1,4                 | 3,77  | $k_\alpha$   | 1,00              | 2,69  |
| Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)                                      | 0,85                | 1,11  | $k_c$        | 1,00              | 1,31  |
| Марка по морозостойкости   | 300                 | 400   | $k_F$        | 3,75              | 5,00  |
| Цена, руб./м <sup>3</sup>  | 8000                | 9750  | –            | –                 | –     |

Для рассматриваемых составов высокопрочного легкого бетона показатели физико-механических свойств являются доминирующими, так как обеспечивают функциональное назначение как конструкционного материала, исходя из этого группа свойств для критерия  $K_{фм}$  принимается с коэффициентом весомости  $\alpha_2 = 0,45$ .

Следующим по значимости является набор эксплуатационных свойств, поэтому значение

коэффициентов весомости для критериальной функции второго уровня  $K_{эк}$  принято  $\alpha_3 = 0,40$ . Технологический критерий  $K_T$  учитывается с коэффициентом весомости  $\alpha_1 = 0,15$ .

С учетом данных таблицы 4 вычислены значения обобщенного критерия качества, относительного изменения стоимости материала, критериев технологической сложности и технико-экономической эффективности, они представлены в таблице 5.

Таблица 5

Значения расчетных показателей технико-экономической эффективности

| Показатель  | Вид бетона |       |
|---|------------|-------|
|   | ВПБ        | ВПЛФБ |
| Критерий качества $F_k$                               | 1,21       | 1,57  |
| Относительное изменение стоимости $\delta C$          | 1,00       | 1,22  |
| Критерий технологической сложности $k_t$              | 1,00       | 1,04  |
| Критерий технико-экономической эффективности $k_{ef}$ | 1,00       | 1,33  |

Таким образом, критерий технико-экономической эффективности для рассмотренного технологического решения по сравнению с тяжелым высокопрочным бетоном характеризуется большими значениями  $F_k = 1,42...1,58$ . С учетом изменения стоимости  $\delta C$  и критерия технологической сложности  $k_t$  для получения высокопрочного легкого фибробетона критерий технико-экономической эффективности составляет  $k_{ef} = 1,24...1,39$ , что указывает на целесообразность их применения.

**Выводы.** Представленный подход технико-экономического обоснования внедрения строительных материалов, выполненный на примере высокопрочного легкого фибробетона, показывает возможность комплексной

оценки целесообразности использования новых технологических решений. Основанный на технических и экономических особенностях непосредственно базового и разработанного материала такой подход является более универсальным для применения без привязки к характеристикам конкретных строительных конструкций, но учитывающий эксплуатационные свойства.

С помощью критериального метода показано, что технология высокопрочного легкого бетона, обладающего уникальным набором свойств, обладает лучшей технико-экономической эффективностью на 24...39 % по сравнению с базовой технологией тяжелого высокопрочного бетона.

*Работа выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0072 о предоставлении субсидий для реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (идентификатор проекта – RFMEFI58318X0072) при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проект сборных железобетонных мостов пролетами до 15 м под железобетонную дорогу нормальной колеи для применения в Северной строительной-климатической зоне. I. Конструкция мостов. Москва: Ленгипротрансмост, 1975. 130 с.
2. Королев Е.В., Чевычелов А.А. Некоторые аспекты формирования системы критериев оценки Нанотехнологии // Сборник научных трудов ИСА по материалам Международной молодежной конференции «Оценка рисков и безопасность в строительстве. Новое качество и надежность строительных материалов и конструкций на основе высоких технологий». Москва: МГСУ, 2013. С. 336–341.



3. Баженов Ю.М., Королев Е. В. Техничко-экономические основы практической нанотехнологии в строительном материаловедении // Региональная архитектура и строительство. 2008. № 2 (5). С. 3–9.
4. Баженов Ю.М., Королев Е.В. Оценка технико-экономической эффективности нанотехнологий в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2009. № 6. С. 66–67.
5. Королев Е.В. Техничко-экономическая эффективность и перспективные строительные материалы // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3. С. 9–14.
6. Королев Е.В., Киселев Д.Г., Альбакасов А.И. Оценка эффективности технологии наномодифицирования серных вяжущих веществ по показателям эксплуатационных свойств // Нанотехнологии в строительстве. 2013. № 3(25). С.60–70.
7. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов / Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.И. Альбакасов, А.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве. 2011. № 6. С. 32–43.
8. Королев Е.В., Чевычелов А.А. Методика оценки экономической целесообразности внедрения нанотехнологии // Нанотехнологии в строительстве. 2012. № 2. С. 25–31.
9. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Technical and economical efficiency for application of nanomodified high-strength lightweight concretes // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040. P. 176–182.
10. Inozemtcev A.S., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D–printing in construction on the example of high–strength lightweight fiber–reinforced concrete // *E3S Web Conf*. 2019. Vol. 97. P. 02010. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf\\_form2018\\_02010.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf_form2018_02010.pdf) (дата обращения 18.09.2019).

#### Информация об авторах

КОРОЛЕВ Евгений Валерьевич – доктор технических наук, профессор, директор НОЦ НТ, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва. Область научных интересов – наноразмерные модификаторы для строительных материалов, высокопрочные легкие бетоны, долговечные дорожные материалы. Автор более 600 опубликованных работ. E-mail: KorolevEV@mgsu.ru.

ИНОЗЕМЦЕВ Александр Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник НОЦ НТ, доцент кафедры строительных материалов и материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва. Область научных интересов – высокопрочные легкие бетоны, 3D-печать в строительстве, эффективные технологии бетона. Автор более 80 опубликованных работ. E-mail: InozemtcevAS@mgsu.ru.

ИНОЗЕМЦЕВ Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник НОЦ НТ, доцент кафедры строительных материалов и материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва. Область научных интересов – долговечные дорожные материалы, самовосстанавливающиеся асфальтобетоны, полимерные дорожные композиты. Автор более 50 опубликованных работ. E-mail: InozemtcevSS@mgsu.ru.

---

UDC 69.003.13:691.32

DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.8

### **COMPREHENSIVE APPROACH TO FEASIBILITY ANALYSIS OF NEW CONSTRUCTION MATERIALS**

***E. V. Korolev, A. S. Inozemtcev, S. S. Inozemtcev***  
*Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)*

Science and technology, new technical and technological solutions are rapidly developing. However, the rationale for the effectiveness is still based only on economic criteria. Therefore, it is necessary to develop the universal approaches to the assessment of economic efficiency of technological solutions. A rational approach to the complex assessment of the effectiveness of

the use of composite materials is the use of system analysis methods – the method of complex technical and economic indicators. The authors propose a feasibility approach in order to justify the effectiveness of technology, which assesses the cost of a new technological solution aimed at improving the quality of the material. The technological solution according to this approach is recognized as effective according to the established quality criterion (generalized quality criterion) if the maximum value of the efficiency coefficient is achieved. The presented approach, tested on high-strength lightweight fiber-reinforced concrete, shows the possibility of a comprehensive assessment of the feasibility of using new technological solutions. Using the criteria method, it has been shown that the technology of high-strength lightweight concrete with a unique set of properties has the best technical and economic efficiency of 24...39 % as compared with the conventional technology of heavy high-strength concrete.

**Keywords:** technical and economic efficiency; building materials; high-strength lightweight concrete; rationale for implementation; complex criterion assessment

#### REFERENCES

1. Proekt sbornykh zhelezobetonnykh mostov proletami do 15 m pod zhelezobetonnyu dorogu normal'noy kolei dlya primeneniya v Severnoy stroitel'no-klimaticheskoy zone. I. Konstruktsiya mostov [The project of prefabricated reinforced concrete bridges with spans up to 15 m under a reinforced concrete road for normal gauges for use in the Northern building and climatic zone. I Bridge Construction], Moscow: Lengiprotransmost, 1975, 130 p.
2. Korolev E.V., Chevychelov A.A. Nekotorye aspekty formirovaniya sistemy kriteriev otsenki Nanotekhnologii [Some aspects of the formation of a system of evaluation criteria for Nanotechnology], *Sbornik nauchnykh trudov ISA po materialam Mezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii "otsenka riskov i bezopasnost' v stroitel'stve. Novoe kachestvo i nadezhnost' stroitel'nykh materialov i konstruktsiy na osnove vysokikh tekhnologiy"* [ISA collection of scientific papers on the materials of the International Youth Conference "Risk Assessment and Safety in Construction. New quality and reliability of high-tech building materials and structures"], Moscow: MGSU, 2013, pp. 336–341.
3. Bazhenov Iu.M., Korolev E.V. Tekhniko-ekonomicheskie osnovy prakticheskoy nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii [Technical and economic foundations of practical nanotechnology in building materials science]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction], 2008. No. 2(5), pp. 3–9.
4. Bazhenov Iu.M., Korolev E.V. Otsenka tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti nanotekhnologiy v stroitel'nom materialovedenii [Assessment of technical and economic efficiency of nanotechnology in building materials science], *Stroitelnye materialy* [Construction materials], 2009, No. 6, pp. 66–67.
5. Korolev E.V. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' i perspektivnye stroitel'nye materialy [Feasibility and promising building materials], *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction], 2013, No. 3, pp. 9–14.
6. Korolev E.V., Kiselev D.G., Al'bakasov A.I. Otsenka effektivnosti tekhnologii nanomodifitsirovaniya sernykh vyazhushchikh veshchestv po pokazatelyam ekspluatatsionnykh svoystv [Evaluation of the effectiveness of the technology of nanomodification of sulfur binders according to performance indicators], *Nanotekhnologii v stroitel'stve* [Nanotechnology in construction], 2013, No. 3(25), pp. 60–70.
7. Korolev E.V., Smirnov V.A., Al'bakasov A.I., Inozemtsev A.S. Nekotorye aspekty proektirovaniya sostavov mnogokomponentnykh kompozitsionnykh materialov [Some aspects of the design of compositions of multicomponent composite materials], *Nanotekhnologii v stroitel'stve* [Nanotechnologies in construction], 2011, No. 6, pp. 32–43.
8. Korolev E.V., Chevychelov A.A. Metodika otsenki ekonomicheskoy tselesoobraznosti vnedreniya nanotekhnologii [Methodology for assessing the economic feasibility of introducing nanotechnology], *Nanotekhnologii v stroitel'stve* [Nanotechnology in construction], 2012, No. 2, pp. 25–31.
9. Inozemcev A.S., Korolev E.V. Technical and economical efficiency for application of nanomodified high-strength lightweight concretes, *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 1040, pp. 176–182.
10. Inozemcev A.S., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete, *E3S Web Conf.*, 2019, Vol. 97, pp. 02010. Available at: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf\\_form2018\\_02010.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf_form2018_02010.pdf)

### Information about the authors

KOROLEV Evgenii Valerevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director of Research and Education Centre of Nanotechnologies, Professor of the Department of Building Materials and Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – nanoscale modifiers for building materials, high-strength lightweight concrete, durable road materials. Author of more than 600 publications. E-mail: KorolevEV@mgsu.ru.

INOZEMCEV Aleksandr Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow of Research and Education Centre of Nanotechnologies, Assistant Professor at the Department of Building Materials and Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – high-strength lightweight concrete, 3D printing in construction, effective concrete technology. Author of more than 80 publications. E-mail: InozemcevAS@mgsu.ru.

INOZEMCEV Sergey Sergeevich – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow of Research and Education Centre of Nanotechnologies, Assistant Professor of the Department of Building Materials and Materials Science at National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – durable road materials, self-healing asphalt concrete, polymer road composites. Author of more than 50 publications. E-mail: InozemcevSS@mgsu.ru.

### Библиографическая ссылка

Королев Е. В., Иноземцев А. С., Иноземцев С. С. Комплексный подход для технико-экономического обоснования внедрения новых строительных материалов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 4(12). – С. 8-18. – DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.8