



## Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: [www.unistroy.spbstu.ru](http://www.unistroy.spbstu.ru)



doi: 10.18720/CUBS.74.1

### Изгибаемые элементы из высокопрочного бетона

#### High-strength concrete bending elements

Д.А. Страхов<sup>1\*</sup>, Л.Н. Синяков<sup>2</sup>, А.Д. Василенко<sup>3</sup>

D. Strahov<sup>1\*</sup>, L. Sinyakov<sup>2</sup>, A. Vasilenko<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Санкт-Петербургский

политехнический

<sup>1-3</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.

университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Petersburg, Russia

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

железобетонные балки;  
несущая способность;  
класс бетона;  
коэффициент армирования;  
стоимость;  
эффективность использования

#### KEYWORDS

reinforced concrete beam;  
load-carrying ability;  
grade of concrete;  
percentage of reinforcement;  
cost;  
utilization efficiency

#### АННОТАЦИЯ

Объектом исследования данной статьи являются железобетонные изгибаемые элементы (балки) с применением бетона повышенной прочности. В первой части работы было рассмотрено влияние повышения класса бетона на несущую способность балок в зависимости от коэффициента армирования. По результатам расчёта было установлено, что при одинаковых размерах поперечного сечения и одиночном армировании только растянутой зоны, наиболее целесообразным является использование высокопрочного бетона в балках с высоким значением коэффициента армирования. При низких процентах армирования прирост несущей способности с изменением класса бетона незначителен. Во второй части работы выполнен расчёт стоимости материалов 1 п.м. конструкции балок и очерчена область использования бетона повышенной прочности применительно к рассматриваемому случаю.

#### ABSTRACT

The object of this article research is the reinforced concrete bending elements (beams) with the use of high-strength concrete. In the first part of the paper, the effect of concrete grade increasing on the load-carrying ability of beams depending on reinforcement percentage was considered. According to the results of the calculation, it was found that with the same sizes of a normal cross-section and single reinforcement of only the tension side, the most expedient is the use of high-strength concrete in beams with high value of reinforcement percentage. At low value of the reinforcement percentage, the increase of a load-carrying ability with change in concrete grade is insignificant. In the second part of the paper, the calculation of a material cost of the 1 linear meter of the beams is executed and the field of the use of high-strength concrete in relation to the considered case is defined.

#### Содержание

### 1. Введение

Согласно ГОСТ 31914-2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества», высокопрочным называется тяжёлый или мелкозернистый бетон классов по прочности на сжатие В60 и выше, приготовленный с применением вяжущего на основе портландцементного клинкера. Данный материал обладает высокими технологическими и эксплуатационными свойствами, благодаря чему получил широкое распространение в инженерной практике при строительстве уникальных и технически сложных объектов [1–7]. Современные разработки в области химизации бетонных смесей позволяют получить высокопрочные бетоны с широким диапазоном свойств, определяющим область его применения. Основными преимуществами данного материала являются высокая прочность, низкая ползучесть и усадка, долговечность, коррозионная стойкость, низкая водо- и газопроницаемость [8–9]. Благодаря использованию в составе бетонной смеси промышленных отходов (доменные шлаки, микрокремнезём, золы), высокопрочный бетон можно считать экологически чистым материалом [10–11]. На современном этапе развития промышленности это является

особенно актуальным, поскольку проблема переработки, утилизации и повторного использования отходов производства стоит наиболее остро [11–14].

Исследованию бетонов повышенной прочности, их свойств, а также методам модификации бетонных смесей посвящено большое количество научных работ. Изучение свойств высокопрочных бетонов в зависимости от вводимых в бетонную смесь модификаторов проводилось в статьях российских и зарубежных учёных [15–22]. В работе [14] описываются опыты по использованию пластиковых отходов в качестве наполнителя в бетонной смеси для высокопрочного бетона. Несмотря на то, что пластиковые добавки ухудшают показатели прочности бетона на сжатие, сопротивление образцов на разрыв существенно возросло. Модифицированию бетонов и исследованию свойств высокопрочных нанобетонов посвящены работы таких учёных, как А.В. Фролов, Л.И. Чумадова, А.В. Черкашин, Л.И. Акимов, С.В. Ключев, А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв, А.Д. Толстой и др [15, 23–26]. Широко изучено применение бетонов повышенной прочности при строительстве в сейсмоопасных и климатически сложных районах, а также в дорожном, мостовом и гидротехническом строительстве [20–22, 27]. Кроме того, свойства высокопрочного бетона позволяют использовать его при возведении взрывоопасных объектов [6–7].

Несмотря на все преимущества, высокопрочный бетон не получил широкого распространения на территории Российской Федерации. До сих пор под сомнение ставится экономическая и технологическая обоснованность замены традиционных бетонов модифицированными. Значительные успехи были достигнуты учёными в изучении эффективности применения бетонов повышенной прочности в сжатых элементах несущего каркаса зданий, результаты некоторых исследований также были реализованы в условиях российского строительства [28–31]. Однако использованию высокопрочного бетона в изгибаемых элементах уделено недостаточно внимания.

Целью данной работы является выяснение эффективности применения бетонов повышенной прочности в несущих изгибаемых элементах (балках), а также определение области использования высокопрочного бетона в рамках конкретной задачи.

В соответствии с поставленной целью задачи исследования заключаются в следующем:

- произвести расчёт несущей способности изгибаемых элементов (балок) при различных значениях коэффициента армирования;
  - проанализировать зависимость несущей способности балок от изменения класса бетона;
  - рассчитать сметную стоимость материалов 1 п.м. балки для различных процентов армирования при повышении класса бетона с В20 до В60;
  - оценить влияние изменения класса бетона на сметную стоимость 1 п.м. конструкции балок.
- Объектом исследования являются железобетонные изгибаемые элементы.

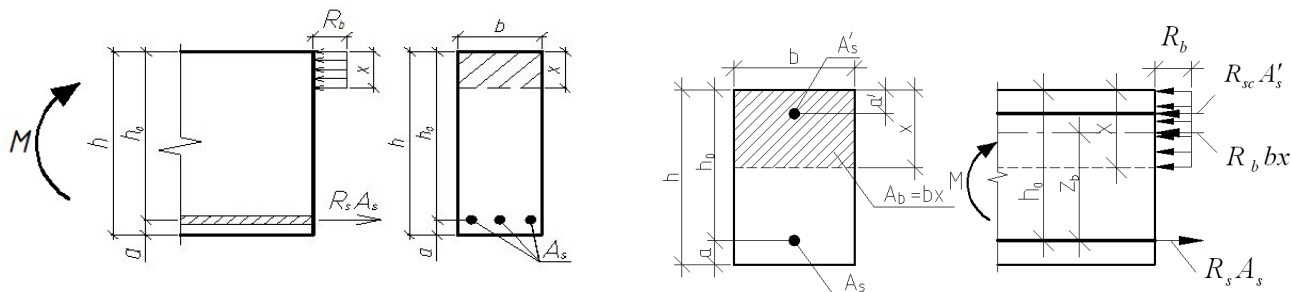
## 2. Методы

### Основные положения расчёта железобетонных элементов

В настоящее время в России расчёт железобетонных конструкций и элементов производится по методике, изложенной в СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003».

Согласно п. 5.2.1 СП 63.13330.2012, расчёт бетонных и железобетонных элементов по прочности производят:

- по нормальным сечениям (при действии изгибающих моментов и продольных сил) – по нелинейной деформации модели. Для простых типов железобетонных конструкций (прямоугольного, таврового и двутаврового сечений с арматурой, расположенной у верхней и нижней граней сечения) допускается выполнять расчёт по предельным усилиям.



**Рисунок 1. Расчётная схема для изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения с одиночной и двойной арматурой**

Расчёт изгибаемых элементов прямоугольного сечения производится по схемам, представленным на рисунке 1. Основными параметрами в расчёте являются:

- $R_b$  – расчётное сопротивление бетона сжатию;
- $R_s$  – расчётное сопротивление арматуры растяжению;

- $RR_{ssss}$  – расчётное сопротивление арматуры сжатию;
- $x$  – высота сжатой зоны бетона;
- $A_s$  – площадь поперечного сечения растянутой арматуры;

### Выбор критерия оценки эффективности применения высокопрочного бетона

Критериями оценки эффективности применения высокопрочного бетона в изгибаемых элементах (балках) были выбраны увеличение несущей способности (предельного изгибающего момента  $M_u$ ) при повышении класса бетона и конечная стоимость одного погонного метра конструкции.

Стоимость 1 п.м. балки рассчитывалась исходя из сметной стоимости материалов без учёта НДС по ТССЦ-2001 в г. Санкт-Петербурге. Сборник содержит отпускные и сметные цены на основные ресурсы, применяемые в строительстве, по состоянию на ноябрь 2018 г [32].

## 3. Результаты и обсуждение

### Расчёт несущей способности балки при разных коэффициентах армирования ( $\mu \approx 0,5\%$ и $\mu \approx 2,0\%$ )

В первой части работы был произведён расчёт по прочности железобетонных балок, имеющих разные коэффициенты армирования, и проанализирована зависимость несущей способности конструкции от повышения класса бетона.

Балки имеют одинаковые размеры поперечного сечения ( $b = 30$  см,  $h = 60$  см,  $h_0 = 55$  см), арматура принята класса А400 с расчётным сопротивлением  $R_s = 355$  Мпа. Армирование первой балки выполнено 4 одиночными стержнями арматуры  $\varnothing 16$  мм,  $A_s = 8,04$  см<sup>2</sup>. Коэффициент армирования балки составляет  $\mu \approx 0,5\%$ . Вторая балка имеет коэффициент армирования  $\mu \approx 2,0\%$ . В растянутой зоне балки расположено 4 стержня  $\varnothing 32$  мм,  $A_s = 32,17$  см<sup>2</sup>. Сведения о конструкции балок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры и армирование балок

Размеры балки, м			Коэф. армирования $\mu$ , %		Класс арматуры	$R_s$ , Мпа
$b$	$h$	$a$	$\mu \approx 0,5\%$	$\mu \approx 2,0\%$		
0,3	0,6	0,05			А400	355
	$A_s$ расч., см <sup>2</sup>		8,25	33,00		
	$A_s$ факт. ( $A_s$ ), см <sup>2</sup>		8,04	32,17		

где

- $h_0$  – полезная (рабочая) высота сечения балки;
- $a$  – расстояние от центра растянутой арматуры до края балки;
- $A_s$  расч. – расчётная площадь поперечного сечения арматуры;
- $A_s$  фак. – фактическая площадь поперечного сечения арматуры, определяемая из сортамента;

Расчёт балок производился по схемам, представленным на рисунке 1.

Исходя из уравнения проекций на продольную ось балки, имеем:

$$A_s R_s = \gamma_{b1} R_b b x, \quad (1)$$

где  $\gamma_{b1}$  – коэффициент, учитывающий характер нагрузки.  $\gamma_{b1} = 1,0$  при непродолжительном (кратковременном) действии нагрузки;  $\gamma_{b1} = 0,9$  при продолжительном (длительном) действии нагрузки. В расчетах принято  $\gamma_{b1} = 1,0$ .

Таким образом, высота сжатой зоны бетона равна:

$$x = \frac{A_s R_s}{\gamma_{b1} R_b b}. \quad (2)$$

При нахождении высоты сжатой зоны бетона следует принимать во внимание значение относительной высоты сжатой зоны бетона  $\xi$ . Должно соблюдаться условие:

$$\xi = \mu \cdot \frac{R_s}{R_b} = \frac{x}{h_0} \leq \xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{R_s}{700}}, \quad (3)$$

где  $\xi_R$  – относительная граничная высота сжатой зоны бетона (для арматуры класса А400  $\xi_R = 0,531$ ), при которой одновременно достигаются предельные деформации в растянутой арматуре и сжатой зоне бетона.

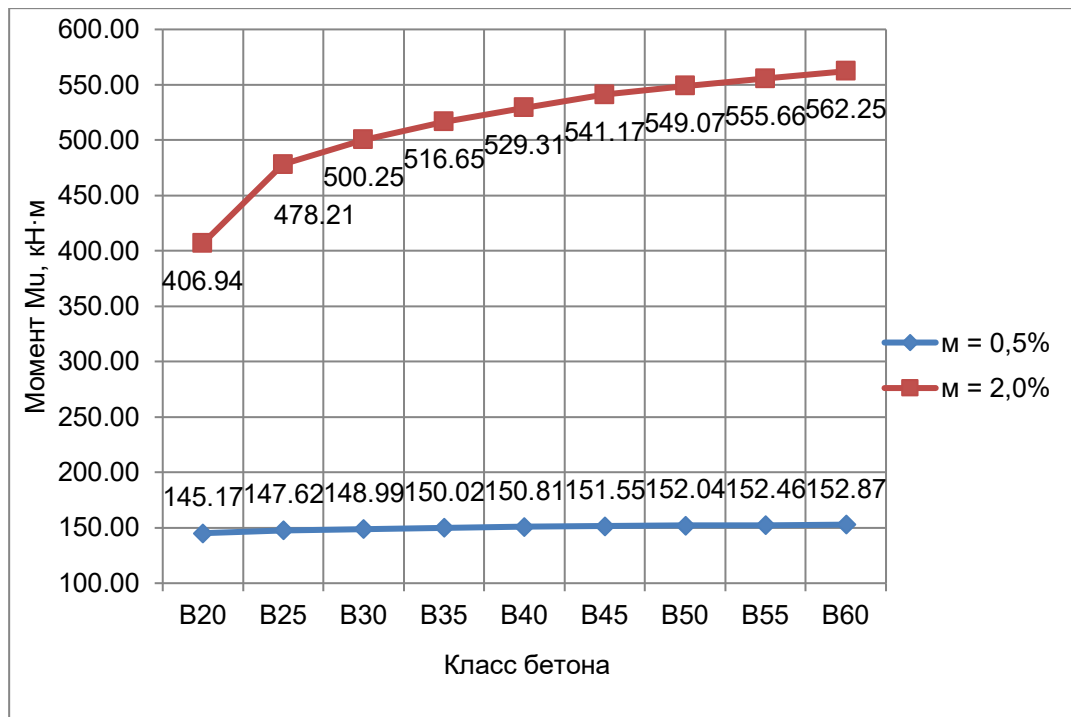
$$h_0 = h - a - \text{рабочая высота сечения, м.}$$

При превышении высотой сжатой зоны бетона  $x$  предельных (граничных) значений, соответствующих  $\xi_R$ , последующие расчёты следует производить, принимая значение  $x$  равным предельному. Для данной конструкции балки предельное значение высоты сжатой зоны составляет 29,19 см.

Далее из уравнения моментов относительно оси арматуры растянутой зоны находят значение предельного изгибающего момента  $M_u$ :

$$M_u = \gamma_{b1} R_b b x \cdot (h_0 - 0,5x). \tag{4}$$

Результаты расчёта балок по прочности представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2. График зависимости предельного момента  $M_u$  от класса бетона при коэффициентах армирования  $\mu = 0,5\%$  и  $\mu = 2,0\%$**

Как видно из графика на рисунке 2, наиболее выражено изменение предельного момента в зависимости от класса бетона при проценте армирования  $\mu \approx 2,0\%$ . Для более детального анализа были рассмотрены случаи изменения класса бетона с B20 до B60 и с B30 до B60. Результаты представлены в таблицах 2, 3.

**Таблица 2. Изменение класса бетона при  $\mu \approx 0,5\%$**

Класс бетона	$M_u$ , кН·м	Разность, кН·м	В % от меньшего
B20	145,17		
B60	152,87	7,69	5,30
B30	148,99		
B60	152,87	3,87	2,60

**Таблица 3. Изменение класса бетона при  $\mu \approx 2,0\%$**

Класс бетона	$M_u$ , кН·м	Разность, кН·м	В % от меньшего
B20	406,94		
B60	562,25	155,31	38,17
B30	500,25		
B60	562,25	62,00	12,39

Анализ приведённых графиков и таблиц позволяет сделать вывод, что при одинаковых размерах поперечного сечения железобетонной балки и одиночном армировании только растянутой зоны при низких процентах армирования повышение класса бетона для увеличения несущей способности балки по нормальным сечениям представляется нецелесообразным.

Так для арматуры класса А400 при проценте армирования  $\mu \approx 0,5\%$  повышение класса бетона с В30 до В60 приводит к увеличению несущей способности (предельного изгибающего момента) примерно на 3%, а повышение класса бетона с В20 до В60 способствует приросту несущей способности приблизительно на 5%. В этом случае более обоснованным для повышения несущей способности является усиление арматурой сжатой зоны балки.

При значительных процентах армирования ( $\mu \approx 2,0\%$ ) повышение класса бетона более эффективно. Так при изменении класса бетона с В30 на В60 предельный изгибающий момент  $M_u$  возрастает более чем на 12%, а при повышении класса бетона с В20 до В60 – почти на 40%.

#### Оценка экономической эффективности повышения класса бетона

Во второй части исследовательской работы был выполнен расчёт сметной стоимости материалов 1 п.м. балки для различных коэффициентов армирования при изменении класса бетона с В20 до В60. Расчёт производился с учётом сжатой арматуры  $A'_s$  исходя из значений предельного момента  $M_u$ , воспринимаемого балкой из бетона В60. Геометрические характеристики балок приведены в таблице 4, в которой кроме принятых выше обозначений введено  $a'$  – расстояние от центра сжатой арматуры до сжатого края балки.

Таблица 4. Геометрические параметры балок

Размеры балки, м				
$b$	$h$	$a$	$a'$	
0,3	0,6	0,05	0,05	

В балке с двойной арматурой предельный момент равен:

$$M_u = bxR_b(h_0 - 0,5x) + R_{sc}A'_s(h_0 - a'), \quad (5)$$

где

- $R_{sc}$  - расчётное сопротивление арматуры сжатию,  $R_{sc} = R_s$ ;
- $A'_s$  – площадь арматуры сжатой зоны;
- $h_0$  – полезная высота сечения балки,  $h_0 = h - a$ ;
- $x$  – высота сжатой зоны.

В данном случае при необходимости усиления сжатой зоны бетона сжатой арматурой принимается  $\xi = \xi_R$ , а арматура при заданном  $M_u$  определяется по известным формулам:

$$A'_s = \frac{M - A_{0R}bh_0^2R_b}{R_{sc}(h_0 - a')}, \quad (6)$$

$$A_s = \frac{\xi_R R_b bh_0 + R_{sc} A'_s}{R_s}, \quad (7)$$

где  $A_{0R} = \xi_R \cdot (1 - 0,5\xi_R) = 0,390$ .

Результаты расчёта представлены в таблицах 5, 6.

Таблица 5. Стоимость бетона на 1 п.м. балки, руб. [32]

Код ресурса СССЦ	Наименование	Кол-во	Ед. изм.	Масса кг	Цена без НДС, руб.	
					Текущая сметная цена за 1 м <sup>3</sup>	Всего:
Бетон тяжёлый, класс:						
401-0007	В20 (М250)	0,18	м <sup>3</sup>	441,00	3812,93	686,33
401-0217	В60 (М800)	0,18	м <sup>3</sup>	441,00	5429,14	977,25

Стоимость 1 т арматуры класса А-III (А400) по ГОСТ 5781-82 «Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия» была усреднена и составила 38310,13 руб [32].

Вес арматуры на 1 п.м. балки рассчитывался исходя из полученных значений  $A'_s$  и  $A_s$  и плотности стали, равной  $7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> согласно ГОСТ 5781-82.

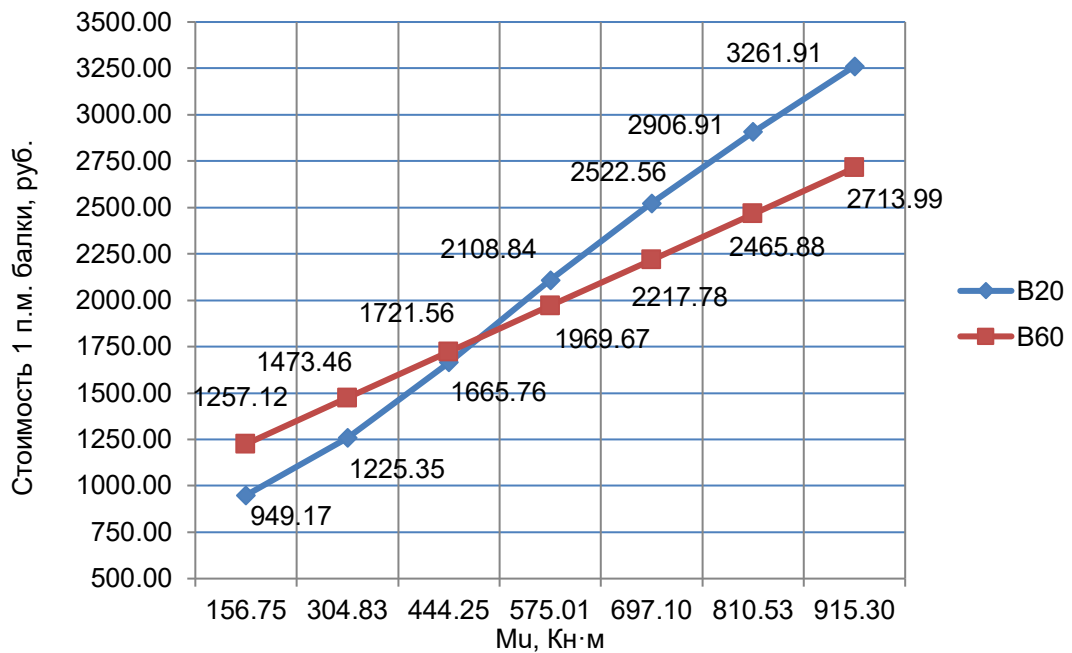
Таблица 6. Стоимость 1 п.м. балки, руб. [32]

$M_u$ , кН·м	Класс бетона	$A_s$ , см <sup>2</sup>	$A'_s$ , см <sup>2</sup>	$A_s + A'_s$ , см <sup>2</sup>	$\mu$ , %	$\xi$	Масса арматуры на 1 п.м. балки, т	Сметная стоимость за 1 т арматуры, руб.	Стоимость 1 п.м. балки, руб.
156,75	B20	8,74	-	8,74	0,53	0,164	0,00686	38310,13	949,17
	B60	8,25	-	8,25	0,50	0,054	0,00648		1225,35
304,83	B20	18,98	-	18,98	1,15	0,355	0,01490	38310,13	1257,12
	B60	16,50	-	16,50	1,00	0,108	0,0130		1473,46
444,25	B20	30,47	2,10	32,57	1,97	0,531	0,02557	38310,13	1665,76
	B60	24,75	-	24,75	1,50	0,161	0,0194		1721,56
575,01	B20	37,84	9,46	47,30	2,87	0,531	0,0371	38310,13	2108,84
	B60	33,00	-	33,00	2,00	0,215	0,0259		1969,67
697,10	B20	44,72	16,34	61,06	3,70	0,531	0,0479	38310,13	2522,56
	B60	41,25	-	41,25	2,50	0,269	0,0324		2217,78
810,53	B20	51,11	22,73	73,84	4,48	0,531	0,0580	38310,13	2906,91
	B60	49,50	-	49,50	3,00	0,323	0,0389		2465,88
915,30	B20	57,01	28,64	85,64	5,19	0,531	0,0672	38310,13	3261,91
	B60	57,75	-	57,75	3,50	0,377	0,0453		2713,99

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при одинаковых размерах поперечного сечения, малых процентах армирования и, соответственно, невысокой несущей способности ( $M_u$ ) использование высокопрочного бетона является экономически невыгодным.

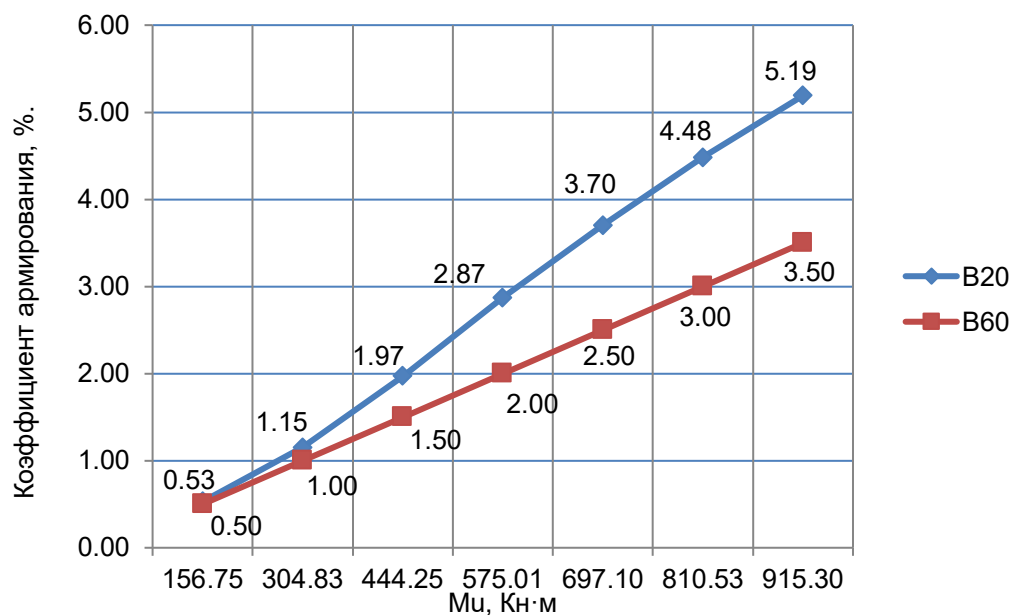
Так при  $\mu \approx 0,5\%$  стоимость материалов для одного погонного метра железобетонной балки ( $b = 30$  см,  $h = 60$  см,  $h_0 = 55$  см, арматура класса А400) при использовании класса бетона В20 оказывается примерно на 30% ниже, чем при классе бетона В60.

При процентах армирования, больших, чем соответствующие граничной относительной высоте сжатой зоны  $\xi_R = 0,531$ , для бетона класса В20 ( $\mu = 1,72\%$ ;  $M_u = 406,94$  кН·м) возникает вопрос о том, что более оправдано с экономической точки зрения: повышение класса бетона (использование высокопрочного бетона) или армирование (усиление) сжатой зоны бетона для предотвращения ее преждевременного разрушения. Так из табл.6 видно, что для восприятия небольших моментов  $M_u \leq 406,94$  кН·м достаточно одиночной арматуры для бетонов класса В20 и В60, а при более высоких моментах для бетона В20 при тех же размерах сечения необходима двойная арматура, в то время как для В60 достаточно одиночной.



**Рисунок 3. График зависимости стоимости 1 п.м. балки от предельного момента  $M_u$  при классах бетона В20 и В60.**

График на рисунке 3 свидетельствует, что с увеличением предельного изгибающего момента  $M_u$  суммарная стоимость материалов для балки из высокопрочного бетона класса В60 становится ниже, чем для балки из обычного бетона. Граничным является значение  $M_u \approx 477$  кН·м: при дальнейшем увеличении момента экономически обосновано использование высокопрочного бетона.



**Рисунок 4. График зависимости коэффициента армирования  $\mu$  от предельного момента  $M_u$  при классах бетона В20 и В60.**

Как видно из графика на рисунке 4, процент армирования, соответствующий граничному значению момента  $M_u \approx 477$  кН·м, составляет  $\mu \approx 1,75$  % для балки из бетона В60 и  $\mu \approx 2,3$  % - для балки из бетона В20, т.е. бетон класса В60 выгодно использовать при процентах армирования, превышающих  $\mu = 2,3$  % для бетона В20.

## 1. Заключение

На основании проведенных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. Графики, приведенные на рисунке 2, и данные таблиц 2 и 3 свидетельствуют о том, что при одинаковых размерах поперечного сечения и одиночном армировании только растянутой зоны, наиболее эффективным является применение высокопрочного бетона в балках с высоким значением коэффициента армирования ( $\mu \approx 2,0\%$ ). В рассматриваемом случае прирост несущей способности при замене класса бетона с В30 до В60 составил 12%, с В20 до В60 – почти 40%. При низких процентах армирования ( $\mu \approx 0,5\%$ ) прирост несущей способности с изменением класса бетона незначителен и составляет около 5% при повышении класса бетона с В20 до В60.

2. Проведенное экономическое обоснование свидетельствует о том, что использование высокопрочного бетона в изгибаемых элементах (балках) является нецелесообразным при невысокой несущей способности этих элементов. При значениях предельного изгибающего момента  $M_u \geq 477$  кН·м и значениях коэффициента армирования  $\mu \geq 2,3$  % для балок из бетона В20 экономически обосновано повышение класса бетона до В60. При этом следует иметь в виду, что для бетона В20 при тех же размерах сечения необходима двойная арматура, в то время как для В60 достаточно одиночной.

3. Несмотря на то что приведенные выше численные значения имеют частный характер, т.к. эффективность использования высокопрочного бетона зависит также от размеров балок, соотношения рыночных цен в различных регионах страны и т.д., приведенные рекомендации относительно влияния процентов армирования являются достаточно универсальными.

### Литература

- [1]. Кишиневская Е.В., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Усиление строительных конструкций с использованием постнапряженного железобетона // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3(5). С. 29–32.
- [2]. Милькина А.С., Лесовик В.С. Высокопрочный бетон для эксплуатации в аномальных условиях // МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТУДЕНЧЕСКИЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ – 2017. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 321–326.
- [3]. Nguyen K., Ngo T., Mendis P., Heath D. Performance of high-strength concrete walls exposed to fire // Advances in Structural Engineering. Vol. 21. 2017. Pp. 1173–1182.
- [4]. Wu D., Sofi M., Mendis P. High strength concrete for sustainable construction. International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE-2010). Vol. 1. 2010. Pp. 434–442.
- [5]. Drzymała T., Jackiewicz-Rek W., Gałaj J., Śukys R. Assessment of mechanical properties of high strength concrete (HSC) after exposure to high temperature // Journal of Civil Engineering and Management. Vol. 24. 2018. Pp. 138–144.
- [6]. Goswami, A., Singh, A. and Adhikary, S.D. Blast Resistance of Ultra High Performance Concrete Structures // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol. 7. Pp. 634–639.
- [7]. Yi N.-H., Kim J.-H. J., Han T.-S., Cho Y.-G., Lee J.-H. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete // Construction and Building Materials. Vol. 28. 2012. Pp. 694–707.
- [8]. Benamara D., Mezghiche B., Zohra M.F. The deformability of a high performance Concrete (HPC) // Physics Procedia. 2014. № 55. Pp. 342–347.
- [9]. Alsalman A., Dang C.N., Prinz G. S., Hale W.M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete // Construction and Building Materials. 2017. № 153. Pp. 918–928.
- [10]. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 4(22). С. 16–21.

### References

- [1]. Kishinevskaya E.V., Vatin N.I., Kuznetsov V.D. Usilenie stroitelnykh konstrukcij s ispolzovaniem postnapryazhennogo zhelezobetona. Magazine of Civil Engineering. 2009. No. 3(5). Pp. 29–32. (rus)
- [2]. Milkina A.S., Lesovik V.S. Vysokoprochnyj beton dlya ehkspluatatsii v anomalnykh usloviyah THE INTERNATIONAL STUDENT'S CONSTRUCTION FORUM – 2017. Belgorod: BSTU V.G. Shukhov, 2017. Pp. 321–326. (rus)
- [3]. Nguyen K., Ngo T., Mendis P., Heath D. Performance of high-strength concrete walls exposed to fire. Advances in Structural Engineering. Vol. 21. 2017. Pp. 1173–1182.
- [4]. Wu D., Sofi M., Mendis P. High strength concrete for sustainable construction. International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE-2010). Vol. 1. 2010. Pp. 434–442.
- [5]. Drzymała T., Jackiewicz-Rek W., Gałaj J., Śukys R. Assessment of mechanical properties of high strength concrete (HSC) after exposure to high temperature. Journal of Civil Engineering and Management. Vol. 24. 2018. Pp. 138–144.
- [6]. Goswami, A., Singh, A. and Adhikary, S.D. Blast Resistance of Ultra High Performance Concrete Structures. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol. 7. Pp. 634–639.
- [7]. Yi N.-H., Kim J.-H. J., Han T.-S., Cho Y.-G., Lee J.-H. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete. Construction and Building Materials. Vol. 28. 2012. Pp. 694–707.
- [8]. Benamara D., Mezghiche B., Zohra M.F. The deformability of a high performance Concrete (HPC). Physics Procedia. 2014. No. 55. Pp. 342–347.
- [9]. Alsalman A., Dang C.N., Prinz G. S., Hale W.M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials. 2017. No. 153. Pp. 918–928.
- [10]. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lahtinen P. Use of ashes and ash-and-slag wastes in construction. Magazine of Civil Engineering. 2011. No. 4(22). Pp. 16–21. (rus)
- [11]. Kubissaa W., Simon T., Jaskulskia R., Reitermanc P., Superaa M. Ecological high performance concrete. Procedia Engineering. 2017. No. 172. Pp. 595–603.



- [11]. Kubissaa W., Simon T., Jaskulska R., Reiterman P., Superaa M. Ecological high performance concrete // *Procedia Engineering*. 2017. № 172. Pp. 595–603.
- [12]. Grait A.A.H., Kolosova N.B. The using of recycled aggregate concrete. Proceedings of I INTERNATIONAL SCIENTIFIC SPECIALIZED CONFERENCE "INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW OF THE PROBLEMS OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL AND TECHNICAL SCIENCES" 2018. Boston: PROBLEMS OF SCIENCE, 2018. Pp. 21–27.
- [13]. Grait A.A.H., Kolosova N.B. Analysis of technological, ecological and social aspects at the organizations processing for concrete and reinforced wastes // *EUROPEAN SCIENCE*. 2018. № 3(35). Pp. 61–65.
- [14]. Al-Hadithi A.I., Alani M.F.A. Mechanical properties of high performance concrete containing waste plastic as aggregate // *Journal of Engineering*. Vol. 21. 2015. № 8. Pp. 100–115.
- [15]. Фролов А.В., Чумадова Л.И., Черкашин А.В., Акимов Л.И. Экономичность использования и влияние наноразмерных частиц на свойства легких высокопрочных бетонов // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 4(19). С. 51–61.
- [16]. Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г., Комаринский М.В., Смирнов С.И. Модификация литой бетонной смеси воздухововлекающей добавкой // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 4(56). С. 3–10.
- [17]. Anoop K. J., Nivin P. A review on high performance concrete // *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*. Vol. 4. 2015. Pp. 39–46.
- [18]. Bhoir S., Adsul N., Charhate S. Study and analysis of high performance concrete and estimation of concrete strength // *International Journal of Recent Advances in Engineering & Technology (IJRAET)*. Vol. 4. 2016. Pp. 14–18.
- [19]. Choudhary S., Bajaj R., Sharma R.K. Study of high performance concrete // *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*. Vol.1. 2014. No. 5. Pp. 109–113.
- [20]. Канавец У.В., Перфилов В.А., Орешкин Д.В. Морская стационарная платформа с железобетонным основанием гравитационного типа из высокопрочного бетона // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2015. № 9. С. 19–21.
- [21]. Ляхевич Г.Д., Звонник С.А., Ляхевич А.Г., Альаззави. Теоретические аспекты, экспериментальные исследования и эффективность использования высокопрочных бетонов для мостовых конструкций // *Наука и Техника*. 2014. № 5. С. 48–54.
- [22]. Smirnova O. Obtaining the high-performance concrete for railway sleepers in Russia // *Procedia Engineering*. 2017. № 172. Pp. 1039–1043.
- [23]. Ключев С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 8. С. 61–68.
- [24]. Иноземцев А.С., Королёв Е.В. Высокопрочные легкие бетоны – конструкционный бетон нового поколения // *Технология бетонов*. 2014. № 9. С. 40–44.
- [25]. Иноземцев А.С., Королёв Е.В. Экономические предпосылки применения высокопрочных легких бетонов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. № 5. С. 198–205.
- [26]. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2016. № 2(17). С. 174–180.
- [27]. Davari J., Jazayeri M., Adeli M. The feasibility and benefits of using high-strength concrete for construction purposes in earthquake prone areas // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2016. № 8. Pp. 532–546.
- [12]. Grait A.A.H., Kolosova N.B. The using of recycled aggregate concrete. Proceedings of I INTERNATIONAL SCIENTIFIC SPECIALIZED CONFERENCE "INTERNATIONAL SCIENTIFIC REVIEW OF THE PROBLEMS OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL AND TECHNICAL SCIENCES" 2018. Boston: PROBLEMS OF SCIENCE, 2018. Pp. 21–27.
- [13]. Grait A.A.H., Kolosova N.B. Analysis of technological, ecological and social aspects at the organizations processing for concrete and reinforced wastes. *EUROPEAN SCIENCE*. 2018. No. 3(35). Pp. 61–65. (rus)
- [14]. Al-Hadithi A.I., Alani M.F.A. Mechanical properties of high performance concrete containing waste plastic as aggregate. *Journal of Engineering*. Vol. 21. 2015. No. 8. Pp. 100–115.
- [15]. Frolov A.V., Chumadova L.I., Cherkashin A.V., Akimov L.I. The economy of use and the impact of nanoparticles on properties of lightweight high-strength concrete. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 4(19). Pp. 51–61. (rus)
- [16]. Vatin N.I., Barabanshchikov YU.G., Komarinskiy M.V., Smirnov S.I. Modification of the cast concrete mixture by air-entraining agents. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No. 4(56). Pp. 3–10. (rus)
- [17]. Anoop K. J., Nivin P. A review on high performance concrete. *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*. Vol. 4. 2015. Pp. 39–46.
- [18]. Bhoir S., Adsul N., Charhate S. Study and analysis of high performance concrete and estimation of concrete strength. *International Journal of Recent Advances in Engineering & Technology (IJRAET)*. Vol. 4. 2016. Pp. 14–18.
- [19]. Choudhary S., Bajaj R., Sharma R.K. Study of high performance concrete. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*. Vol.1. 2014. No. 5. Pp. 109–113.
- [20]. Kanavets U.V., Perfilov V.A., Oreshkin D.V. Morskaya stacionarnaya platforma s zhelezobetonnym osnovaniem gravitacionnogo tipa iz vysokoprochnogo betona. *Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more*. 2015.No. 9. Pp. 19–21. (rus)
- [21]. Lyahevich G.D., Zvonnik S.A., Lyahevich A.G, Al'azzavi. Teoreticheskie aspekty, ehksperimentalnye issledovaniya i ehffektivnost ispolzovaniya vysokoprochnyh betonov dlya mostovyh konstrukcij. *Nauka i Tekhnika*. 2014. No. 5. Pp. 48–54. (rus)
- [22]. Smirnova O. Obtaining the high-performance concrete for railway sleepers in Russia. *Procedia Engineering*. 2017. No.172. Pp. 1039–1043.
- [23]. Klyuev S.V. High-strength fiber concrete for industrial and civil construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8. Pp. 61–68. (rus)
- [24]. Inozemtsev A.S., Korolyov E.V. Vysokoprochnye legkie betony – konstrukcionnyj beton novogo pokoleniya. *Tekhnologiya betonov*. 2014. No. 9. Pp. 40–44. (rus)
- [25]. Inozemtsev A.S., Korolyov E.V. Economic prerequisites for applications of high-strength lightweight concrete. *Scientific and technical Volga region bulletin*. 2012. No. 5. Pp. 198–205. (rus)
- [26]. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Novikov K.YU. Vysokoprochnye betony na kompozicionnyh vyazhushchih s primeneniem tekhnogennogo syr'ya. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost*. 2016. No. 2(17). Pp. 174–180. (rus)
- [27]. Davari J., Jazayeri M., Adeli M. The feasibility and benefits of using high-strength concrete for construction purposes in earthquake prone areas. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2016. No. 8. Pp. 532–546.
- [28]. Trekin N.N., Kodysch E.H.N. Perspektivy primeneniya vysokoprochnyh betonov v konstrukciyah zdaniy i

- [28]. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. Перспективы применения высокопрочных бетонов в конструкциях зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 39–43.
- [29]. Корякина Е.Е., Аксенов В.Н. Об эффективности использования высокопрочного бетона в сжатых элементах высотных зданий // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 2–1. С. 23–26.
- [30]. Бедов А.И., Бабков В.В., Габитов А.И., Салов А.С. Использование бетонов и арматуры повышенной прочности в проектировании сборных и монолитных железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 76–84.
- [31]. Мирсаяпов Ил.Т., Фаттахова А.И. Технико-экономическая оценка влияния повышения прочности и выносливости бетона за счет применения высокопрочного бетона на расход материалов в железобетонных каркасах по серии 1.020-1/83 // Известия КГАСУ. 2017. № 4(42). С. 182–188.
- [32]. Ивлева С.В., Малов Э.Ю., Быковская Е.В. ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЙ СБОРНИК СМЕТНЫХ ЦЕН НА МАТЕРИАЛЫ, ИЗДЕЛИЯ И КОНСТРУКЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ. (ТССЦ – 2001). Выпуск № 11(83) ноябрь 2018 года. М.: ООО «РЕАРТ», 2018. 942 с.
- sooruzhenij. VESTNIK MGSU. 2011. No. 2–1. Pp. 39–43. (rus)
- [29]. Koryakina E.E., Aksenov V.N. Ob ehffektivnosti ispolzovaniya vysokoprochnogo betona v szhatyh ehlementah vysotnyh zdaniy. Modern high technologies. 2016. No. 2–1. Pp. 23–26. (rus)
- [30]. Bedov A.I., Babkov V.V., Gabitov A.I., Salov A.S. Ispolzovanie betonov i armatury povyshennoj prochnosti v proektirovanii sbornyh i monolitnyh zhelezobetonnyh konstrukcij. VESTNIK MGSU. 2012. No. 8. Pp. 76–84. (rus)
- [31]. Mirsayapov Il.T., Fattahova A.I. Technical and economic assessment of the concrete's strength and endurance increasing effect due to the high-strength concrete using for the materials consumption in reinforced concrete frames according to the series 1.020-1/83. News of the KSUAE. 2017. No. 4(42). Pp. 182–188. (rus)
- [32]. Ivleva S.V., Malov E.Yu., Bykovskaya E.V. TERRITORIALNYJ SBORNIK SMETNYH TSEN NA MATERIALY, IZDELIYA I KONSTRUKYSII, PRIMENYAEMYE V STROITELSTVE. SANKT-PETERBURG. (TSSC – 2001). Vypusk No. 11(83) November 2018. M.: ООО «REART», 2018. 942 p. (rus)

#### Контактная информация

- 1.\* +79213274671, sdaleks2008@rambler.ru (Страхов Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент)
2. +79213178631, cbyzrjd\_45@mail.ru (Синяков Леонид Николаевич, к.т.н., доцент)
3. +79675232989, anastasia-vasilenko-97@mail.ru

#### Contact information

- 1.\* +79213274671, sdaleks2008@rambler.ru (Strahov Dmitrii, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor)
2. +79213178631, cbyzrjd\_45@mail.ru (Sinyakov Leonid, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor)
3. +79675232989, anastasia-vasilenko-97@mail.ru (Vasilenko Anastasia, Student)

© Страхов Д.А., Синяков Л.Н., Василенко А.Д., 2018