

DOI: 10.12737/article\_590878faa8b5b4.77635628

*Обернихин Д.В., ассистент  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ, ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО СЕЧЕНИЯ

ObernikhinDmitriy@gmail.com

*Приведены результаты выполненных численных исследований прочности, деформативности и трещиностойкости железобетонных элементов трапециевидного сечения с верхней широкой гранью. Представлены основные характеристики исследуемых железобетонных элементов. В качестве варьируемых факторов были приняты: класс бетона по прочности на сжатие, класс растянутой арматуры и процент армирования рассматриваемого трапециевидного сечения. Для проведения численных исследований применялись ранее разработанные с участием автора алгоритмы и программы расчета. Полученные результаты для удобства выполнения их анализа представлены в форме таблиц и графиков. Выполненные многофакторные исследования позволили выявить ряд закономерностей в деформировании рассматриваемых железобетонных элементов под нагрузкой. Наиболее существенные из них представлены в данной статье.*

**Ключевые слова:** *прочность, деформативность, трещиностойкость, трапециевидное сечение, изгибаемый железобетонный элемент, коэффициент армирования, класс бетона, класс арматуры.*

Проведенные в последние годы исследования железобетонных конструкций позволили включить в новые нормы (СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») и, соответственно, в практику проектирования деформационную расчетную модель нормальных сечений, которая хорошо отражает фактический характер работы железобетона на всех этапах вплоть до его разрушения [1–5, 8, 14, 15]. Это позволяет с единых позиций выполнять расчеты железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и по деформациям.

В предыдущих работах [7, 9, 12, 13] на основе деформационной расчетной модели были разработаны соответствующие методики и алгоритмы расчета прочности, трещиностойкости и деформативности применительно к железобетонным балочным конструкциям трапециевид-

ного сечения. Для апробации основных положений указанных методик были проведены эксперименты на специальных образцах [10, 11], которые показали достаточно хорошее соответствие опытных и расчетных данных.

В связи с ограниченностью факторов, варьируемых в ходе эксперимента [11], выполним численные исследования прочности, трещиностойкости и деформативности изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения в зависимости от деформативно-прочностных свойств бетона и арматуры, а также от площади продольной рабочей арматуры.

В качестве исследуемых приняты балочные элементы трапециевидного сечения пролетом 4,5 м, высотой 400 мм, с шириной верхней и нижней граней, соответственно, 300 и 150 мм. Геометрические размеры рассматриваемых элементов приведены на рис. 1.

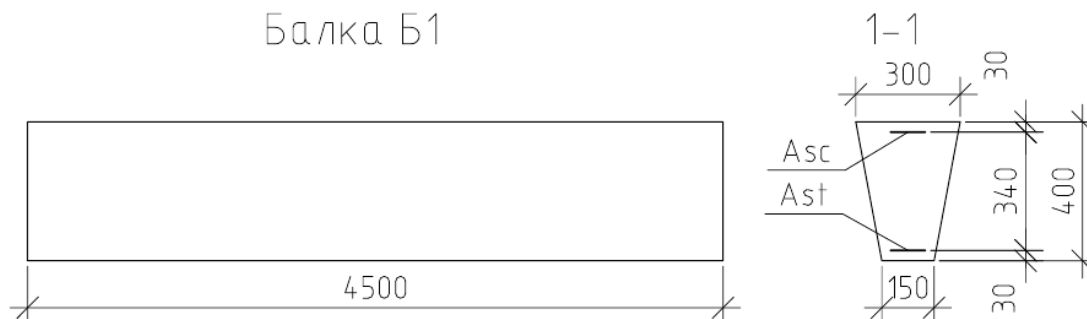


Рис. 1. Геометрические размеры исследуемых железобетонных образцов

В ходе численного эксперимента применяли бетон классов В15, В25 и В40. Рабочая арматура  $A_{st}$  использовалась как с физической пло-

щадкой текучести (классов А400, А500), так и без физической площадки текучести (класса А600). При этом деформативно-прочностные

характеристики арматурных стержней приняты из работы [6]. Одним из важнейших варьируемых параметров являлся процент армирования  $\mu_s$  трапециевидного поперечного сечения, который изменялся в диапазоне от 0,5 до 5 %, с шагом 0,5 %. Расчетная схема исследуемых элементов принята в виде однопролетной шарнирно опертой балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой.

Для анализа результатов численных исследований использовали следующие параметры:

$M_u$  – предельный изгибающий момент на этапе исчерпания прочности железобетонного элемента по нормальному сечению;

$M_{crc}$  – изгибающий момент на этапе появления первой нормальной трещины в растянутой зоне железобетонного элемента;

$M_f$  – изгибающий момент, соответствующий появлению в середине пролета предельного прогиба  $f_{max} = 18$  мм (1/250 от величины пролета);

$\gamma_{rise}$  – процент прироста предельного изгибающего момента для  $i$ -того этапа численного эксперимента при увеличении процента армирования на заданную величину ( $\mu_s = 0,5\%$ ), который рассчитывался по формуле

$$\gamma_{rise} = \frac{M_{u,i} - M_{u,i-1}}{M_{u,i-1}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Систематизированные результаты выполненных расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Результаты проведенных численных исследований

№	$\mu_s, \%$	$A_{st}, \text{см}^2$	Арматура класса А400				Арматура класса А500				Арматура класса А600			
			$M_u, \text{кН*М}$	$\gamma_{rise}$	$M_{crc}, \text{кН*М}$	$M_f, \text{кН*М}$	$M_u, \text{кН*М}$	$\gamma_{rise}$	$M_{crc}, \text{кН*М}$	$M_f, \text{кН*М}$	$M_u, \text{кН*М}$	$\gamma_{rise}$	$M_{crc}, \text{кН*М}$	$M_f, \text{кН*М}$
Бетон класса В15														
1	0,5	4,27	69,54	0	13,45	58,40	80,29	0,00	13,45	70,93	96,11	0,00	13,45	74,46
2	1,0	8,53	110,54	58,96	17,05	108,44	131,96	64,35	17,05	114,87	146,09	51,99	17,05	114,89
3	1,5	12,80	150,92	36,53	20,57	138,97	166,64	26,28	20,57	138,97	166,75	14,15	20,57	138,90
4	2,0	17,07	173,97	15,27	24,02	156,18	173,97	4,40	24,02	156,18	173,97	4,33	24,02	156,18
5	2,5	21,33	178,74	2,74	27,37	167,71	178,74	2,74	27,37	167,70	178,74	2,74	27,37	167,71
6	3,0	25,60	182,15	1,91	30,67	175,82	182,15	1,91	30,67	175,82	182,15	1,91	30,67	175,82
7	3,5	29,87	184,70	1,40	33,90	181,62	184,70	1,40	33,90	181,62	184,70	1,40	33,90	181,62
8	4,0	34,13	186,67	1,06	37,05	185,82	186,67	1,06	37,05	185,82	186,67	1,06	37,05	185,83
9	4,5	38,40	188,23	0,84	40,15	-	188,23	0,84	40,15	-	188,23	0,84	40,15	-
10	5,0	42,66	189,49	0,67	43,18	-	189,49	0,67	43,18	-	189,49	0,67	43,18	-
Бетон класса В25														
1	0,5	4,27	75,54	0	15,79	58,40	84,26	0,00	15,79	72,66	106,83	0,00	15,79	78,64
2	1,0	8,53	119,25	57,88	19,57	112,19	144,21	71,16	19,57	127,41	165,21	54,65	19,57	127,42
3	1,5	12,80	161,49	35,42	23,29	156,30	191,38	32,71	23,29	157,58	205,70	24,50	23,29	157,60
4	2,0	17,07	200,73	24,30	26,93	182,58	223,11	16,58	26,93	182,53	223,47	8,64	26,93	182,57
5	2,5	21,33	229,57	14,37	30,50	200,50	231,12	3,59	30,50	200,50	231,12	3,43	30,50	200,19
6	3,0	25,60	236,55	3,04	34,01	213,87	236,55	2,35	34,01	213,87	236,55	2,35	34,01	213,87
7	3,5	29,87	240,68	1,75	37,46	224,07	240,68	1,75	37,46	224,08	240,68	1,75	37,46	224,08
8	4,0	34,13	243,91	1,34	40,84	231,91	243,91	1,34	40,84	231,94	243,91	1,34	40,84	231,94
9	4,5	38,40	246,51	1,07	44,18	238,17	246,51	1,07	44,18	238,17	246,51	1,07	44,18	238,17
10	5,0	42,66	248,63	0,86	47,45	243,10	248,63	0,86	47,45	243,10	248,63	0,86	47,45	243,10
Бетон класса В40														
1	0,5	4,27	84,47	0,00	19,45	85,40	89,31	0,00	22,60	75,56	134,43	0,00	22,60	85,41
2	1,0	8,53	148,71	76,07	23,48	117,50	166,58	86,51	26,84	142,76	209,62	55,94	26,84	148,89
3	1,5	12,80	196,45	32,10	27,45	170,88	230,71	38,50	31,04	179,48	270,69	29,13	31,04	196,72
4	2,0	17,07	233,84	19,03	31,36	220,35	283,01	22,67	35,17	231,78	323,10	19,36	35,17	231,83
5	2,5	21,33	273,59	17,00	35,20	263,35	327,47	15,71	39,24	265,60	367,01	13,59	39,24	265,60
6	3,0	25,60	317,19	15,94	39,00	294,06	373,79	14,14	43,27	294,09	397,45	8,29	43,27	294,11
7	3,5	29,87	356,63	12,43	42,74	318,08	409,25	9,49	47,25	318,00	416,15	4,71	47,25	317,85
8	4,0	34,13	391,56	9,80	46,42	338,30	427,17	4,38	51,17	338,15	427,18	2,65	51,17	338,15
9	4,5	38,40	421,41	7,62	50,06	355,51	434,34	1,68	55,05	355,46	434,34	1,68	55,05	355,46
10	5,0	42,66	440,04	4,42	53,64	370,22	440,24	1,36	58,88	370,27	440,24	1,36	58,88	370,27

Для удобства обозримости и соответствующего анализа результатов численных исследований на основании данных, приведенных в таблице 1, были построены графики зависимости

предельных изгибающих моментов на этапе исчерпания прочности железобетонных элементов по нормальному сечению  $M_u$  от классов бетона,

арматуры и от процента армирования  $\mu_s$  (рис. 2, 3).

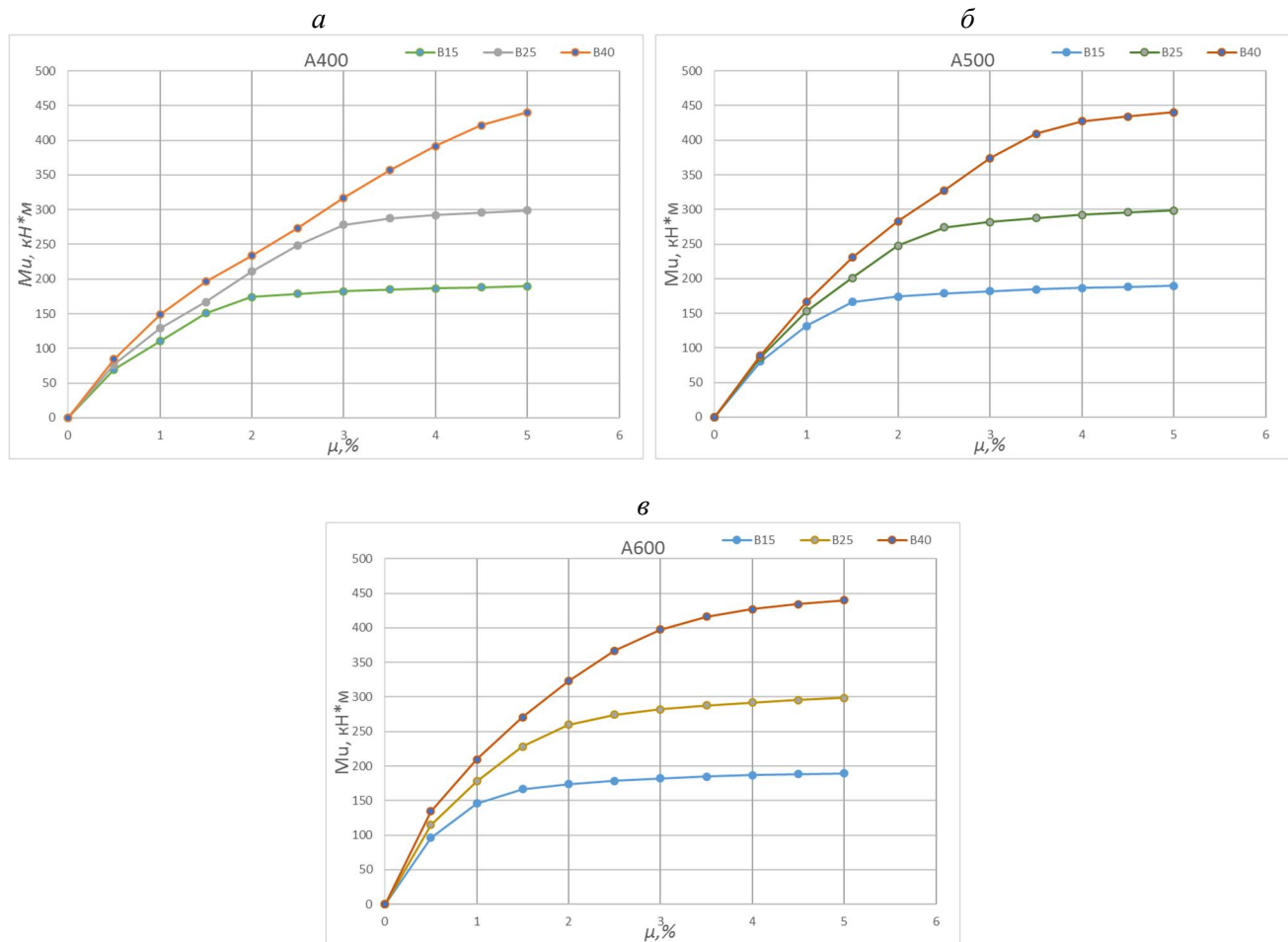


Рис. 2. Графики зависимости предельных изгибающих моментов  $M_u$  от процентов армирования трапециевидных сечений арматуры классов А400 (а), А500 (б), А600 (в) для исследуемых элементов из бетонов классов В15, В25, В40

Анализ данных, приведенных в табл. 1 и на рисунках 2, 3, позволяет сделать следующие выводы:

- для образцов из бетона класса В15 увеличение процента армирования выше 2% не приводит к существенному приросту предельных изгибающих моментов  $M_u$ . При  $\mu_s \geq 1,5\%$  вместо высокопрочной арматуры класса А600 следует использовать арматуру А500, а при  $\mu_s \geq 2\%$  целесообразно перейти на арматуру А400. Это объясняется практически полным отсутствием влияния класса арматуры на предельные изгибающие моменты  $M_u$  при указанных процентах армирования, что хорошо видно на рис. 3, а;

- для элементов, изготовленных из бетона класса В25 и армированных рабочей арматурой класса А400, процент армирования должен быть менее 2,5%, а для арматуры классов А500 и А600 – не выше 2%, т.к. дальнейшее увеличение площади арматуры не приводит к существенному росту величин  $M_u$  (см. рис. 3, б). Поэтому при  $\mu_s \geq 2,5\%$  использование высокопрочной арматуры

класса А600 становится нерациональным и её следует заменить на А500, а при  $\mu_s \geq 3\%$  следует использовать арматуру только класса А400;

- для элементов, изготовленных из бетона класса В40, наблюдается аналогичная тенденция (см. рис. 3, в). Поэтому при  $\mu_s \geq 3,5\%$  высокопрочную арматуру класса А600 следует заменить на А500, а при  $\mu_s \geq 4,5\%$  следует использовать арматуру только класса А400;

- использование арматуры класса А500 в балочных элементах трапециевидного сечения, изготовленных из бетонов классов В15, В25 и В40 целесообразно ограничить процентами армирования 1,5%, 2% и 4%, соответственно (см. рис. 2, б);

- анализируя графики, представленные на рис. 2, в, можно сделать вывод о необходимости использования ограничений в процентах армирования рассматриваемых железобетонных элементов при использовании высокопрочной арматуры класса А600 (без предварительного напряжения). В частности, для образцов из бетона класса В15 максимальный процент армиро-

вания следует принять 1,5 %, для бетона класса В25 – 2 % и для В40 – 3 %;

– влияние класса арматуры на деформативность образцов из бетонов классов В15, В25 и В40 становится незначительным, соответственно, при коэффициентах армирования выше 1,0 %, 1,5 % и 2,5 % (см. табл. 1);

– анализ результатов, представленных в табл. 1, позволяет отметить, что на трещиностойкость трапециевидных сечений  $M_{crс}$  существенное влияние оказывают класс бетона и процент армирования, а класс арматуры практически не влияет.

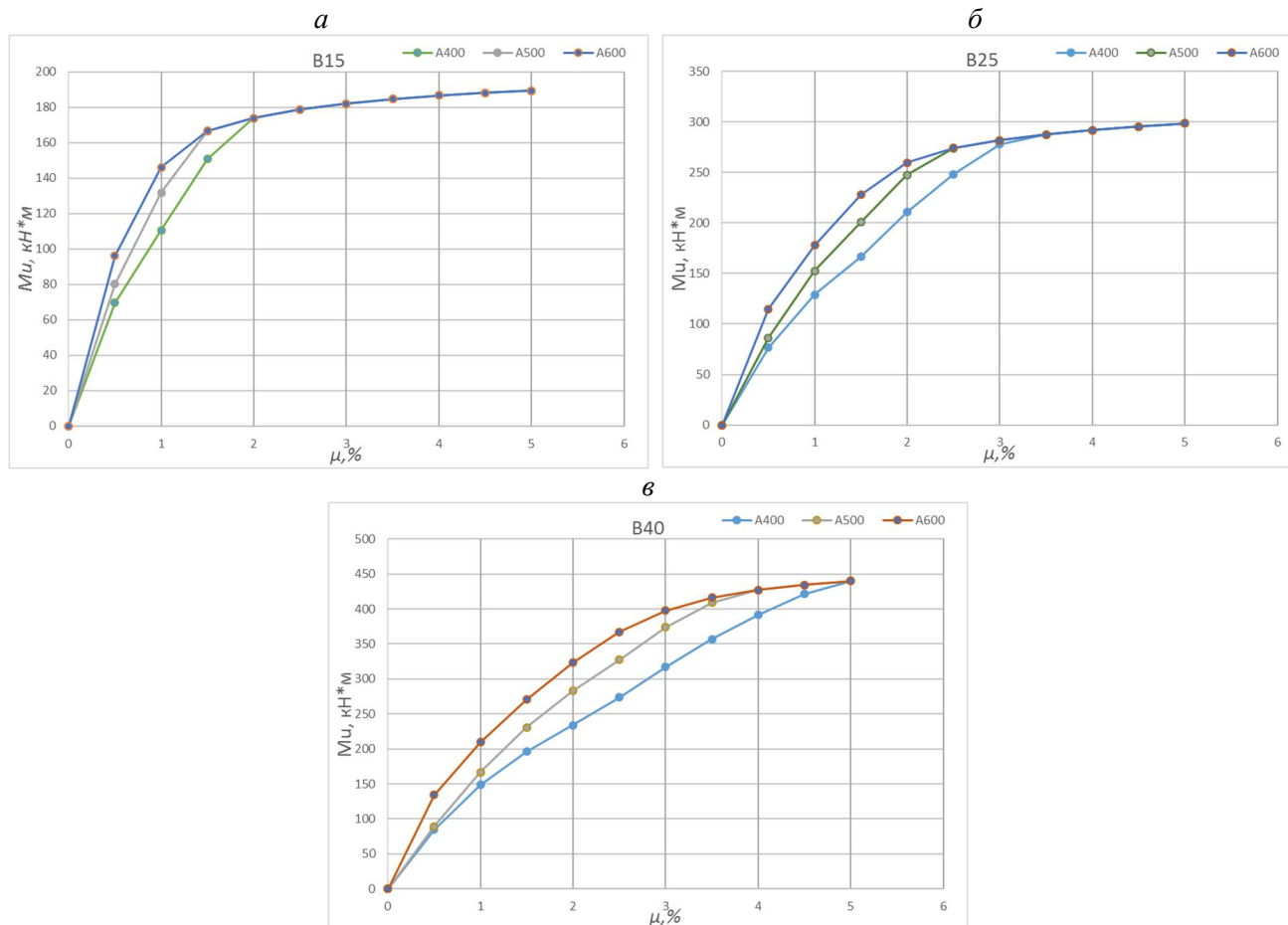


Рис. 3. Графики зависимости предельных изгибающих моментов  $M_u$  от процентов армирования трапециевидных сечений арматурой классов А400, А500, А600 для исследуемых элементов из бетонов классов В15 (а), В25 (б), В40 (в)

Тщательный анализ расчетных данных, представленных в табл. 1, позволил также выявить оптимальные проценты армирования рассматриваемых железобетонных элементов, при которых удовлетворяются требования к ним как по первой группе предельных состояний (по

прочности нормальных сечений  $M_u$ ), так и по второй группе (по трещиностойкости  $M_{crс}$  и по деформациям  $f_{max}$ ). В табл. 2 представлены величины оптимальных и максимальных процентов армирования изгибаемых железобетонных элементов исследуемого трапециевидного сечения.

Таблица 2

**Рекомендуемые значения оптимальных и максимальных процентов армирования изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения**

Класс бетона	Класс арматуры	$\mu_{опт}$ , %	$\mu_{макс}$ , %
В15	А400	0,5–0,7	2,0
	А500	0,5–0,7	1,5
	А600	0,5–0,7	1,5
В25	А400	1,5	3,0
	А500	1,5	2,5
	А600	1,0–1,5	2,0
В40	А400	2,0–2,5	4,0
	А500	2,0–2,5	4,0
	А600	2,0–2,5	3,0

В заключение уместно отметить, что на основании выполненных численных исследований удалось выявить значения оптимальных и максимальных процентов армирования изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения, которые способствуют их рациональному проектированию с учетом различных классов бетона и арматуры. Аналогичный подход может быть использован для установления оптимальных значений армирования при других величинах пролетов, форм и размеров поперечных сечений изгибаемых железобетонных элементов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. Расчет трещиностойкости железобетонных конструкций по новым нормативным документам // Бетон и железобетон. 2002. № 5. С. 15–19.
2. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
3. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжёлого бетона по прочности, трещиностойкости и по деформациям. М.: Изд-во АСВ, 2011. 352 с.
4. Колмогоров А.Г., Плевков В.С. Расчёт железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам. М.: Изд-во АСВ, 2011. 496 с.
5. Никулин А.И. К построению расчетной модели для определения трещиностойкости железобетонных балок на основе энергетических соотношений // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2004. № 3-4. С. 78–85.
6. Никулин А.И. Универсальная зависимость для аналитического описания диаграмм растяжения арматурной стали // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 157–162.
7. Никулин А.И., Обернихин Д.В. Деформативность изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения с трещинами в растянутой зоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 88–93.
8. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Никулина Ю.А. Прочность изгибаемых железобетонных элементов на основе применения трансформированных диаграмм сжатия бетона // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы VIII Всероссийской (II Международной) конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. С. 161–168.
9. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Рубанов В.Г., Свентиков А.А. Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения на основе применения нелинейной деформационной модели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 58–63.
10. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Экспериментальные исследования прочности, трещиностойкости и деформативности железобетонных балок трапециевидного и прямоугольного поперечных сечений // Инновационная наука. 2016. №8-2. С. 73–77.
11. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Экспериментальные исследования деформативности изгибаемых железобетонных элементов различных поперечных сечений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 4. С. 56–59.
12. Обернихин Д.В., Никулина Ю.А. Расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения на основе применения нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры // Актуальные вопросы науки и техники: Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Вып. 2. Самара: ИЦРОН, 2015. С. 122–124.
13. Обернихин Д.В., Никулина Ю.А. Численные исследования прочности изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного и прямоугольного сечений // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений. Курск: Изд-во Курск. гос. ун-та, 2015. С. 175–183.
14. Смоляго Г.А., Корсунов Н.И., Крючков А.А., Луценко А.Н. Деформативность стержневых железобетонных изгибаемых элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 8. С. 38–39.
15. Тамразян А.Г. Особенности расчета изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения согласно EC2 // Бетон и железобетон. 2012. № 1. С. 19–23.

**Obernikhin D.V.**

#### **NUMERICAL STUDY OF STRENGTH, FRACTURE TOUGHNESS AND DEFORMATIVNOSTI OF STEEL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF TRAPEZOIDAL CROSS-SECTION**

*Shows the results of numerical research strength, deformation resistance and crack-resistance of reinforced concrete elements of trapezoidal cross section with the top broad face. Presents the main characteristics of*

---

*reinforced concrete elements. As varied factors were adopted: the class of concrete for compressive strength class stretched reinforcement and percentage of reinforcement reporting trapezoidal cross-section. To conduct numerical studies were developed with the participation of the author of algorithms and programs for calculation. The results for facilities performing their analysis are presented in the form of tables and graphs. Multi-factor studies performed have identified a number of patterns in deformation of reinforced concrete elements considered under load. The most important of them are presented in this article.*

**Keywords:** *strength, deformability, crack-resistance, trapezoidal cross-section, flexure reinforced concrete element, ratio of reinforcement, concrete class, reinforce class.*

---

**Обернихин Дмитрий Вячеславович**, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: ObernikhinDmitriy@gmail.com