

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-32-46

Шарафутдинов Л.А., *Дьячук Е.В.

Казанский государственный энергетический университет

*E-mail: evgenyi_00@mail.ru

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭСТАКАДЫ, УСИЛЕННЫХ СТАЛЕФИБРОБЕТОНОМ

Аннотация. В работе рассмотрен перспективный материал, используемый в качестве усиления, сталефибробетон. Он представляет собой композитный материал, обладающий высокой прочностью и устойчивостью к различным воздействиям. Сталефибробетон получил признание благодаря своим улучшенным свойствам, включая повышенную долговечность и повышенную несущую способность.

В статье представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных опор технологической эстакады, усиленных сталефибробетоном. Исследуемый объект представляет собой железобетонную колонну технологической эстакады, выполненную из бетона класса В25. Приведена методика компьютерного моделирования с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР», а также программа численного эксперимента, включающая варьирование ключевых геометрических, физических, статических и повреждающих факторов. Выявлены зависимости между параметрами конструкции и несущей способностью усиленных сталефибробетонных колонн. Показано, что применение сталефибробетона значительно повышает прочность, пластичность и трещиностойкость конструкций, снижает развитие внутренних напряжений и замедляет процесс разрушения. Определены наиболее устойчивые к разрушению образцы, что позволяет рекомендовать использование сталефибробетонных обоев для усиления железобетонных конструкций в условиях изношенности и коррозии основного бетона.

Ключевые слова: сталефибробетон, обойма, численный эксперимент, колонна, разрушение.

Введение. Современное строительство железобетонных конструкций постоянно ищет новые технологии и материалы для улучшения прочности, долговечности и эффективности существующих сооружений [1–4]. Одним из инновационных материалов, привлекающих внимание специалистов в области строительства, является сталефибробетон (СФБ). Сталефибробетон представляет собой композитный материал, обладающий высокой прочностью и устойчивостью к различным воздействиям [5–6].

Целью данного исследования является изучение напряженно-деформированного состояния железобетонных опор технологической эстакады, усиленной сталефибробетоном.

Исследование применения сталефибробетона при строительстве железобетонных конструкций имеет важное практическое значение, поскольку позволяет повысить качество и надежность сооружений, сократить сроки строительства и экономические затраты [7–10]. Анализ эффективности использования сталефибробетона в строительстве может способствовать развитию инновационных подходов в сфере строительной индустрии и повышению устойчивости конструкций к различным воздействиям [11–13]. Особенно важную роль играет введение волокон для модификации бетона [14–16], которое может улучшить механические свойства, способность к деформированию и долговечность бетона [17–

19]. В настоящее время железобетон, армированный стальным волокном, является наиболее широко используемым фибробетоном. Было продемонстрировано, что включение стальных волокон полезно для контроля трещин, придавая этому хрупкому материалу более высокую трещиностойкость [20, 21]. Между тем, сталефибробетон обладает лучшими свойствами по пластичности после пика деформации и усталостной стойкостью [22, 23]. То есть, преимущества использования стальных волокон для модификации бетона в основном проявляются в следующем:

- улучшают пластичность, ударную вязкость, прочность на изгиб и сдвиг при сдвиге цементных материалов [24, 25];
- поглощают энергию, устраняют трещины, передают нагрузку и предотвращают расширение и интеграцию трещин при приложении внешних нагрузок к сталефибробетону [26, 27];
- уменьшают усадку, ползучесть и проницаемость конструкции [20, 28];
- повышают усталостную, ударную взрывостойкость бетона [22, 29];
- снижают внутреннее напряжение за счет его более высокой прочности на растяжение для обеспечения передачи нагрузки [21];

Материалы и методы. Для моделирования образцов применена ранее разработанная и верифицированная методика численного эксперимента в ПК Лира-САПР [30]. При этом бетонная часть моделировалась объёмными конечными элементами типа 236 (физически нелинейный пространственный восьми узловой изопараметрический конечный элемент (КЭ), произвольный гексаэдр). Продольная и поперечная арматура моделировалась стержневыми конечными элементами типа 210. Для бетона использована трёхлинейная диаграмма деформирования, для

арматуры – двухлинейная диаграмма в соответствии с СП 63.13330. 1.СФБ-оболочка моделировалась как однородный композитный материал, то есть с учётом усреднённых механических свойств, соответствующих сталефибробетону с объёмным содержанием фибры 1–3%. В расчётах использовались объёмные физически нелинейные конечные элементы - восьмиузловые изопараметрические гексаэдры, аналогичные по типу тем, что применялись для основного бетона колонны. КЭ-модель базового образца с усилением и без показана на рис.1.

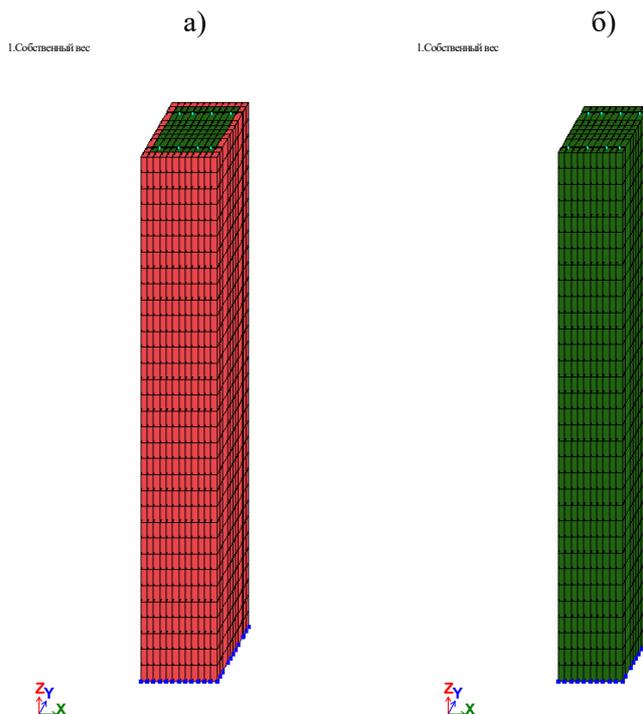


Рис. 1. КЭ-модель базового образца в Лира-САПР:
а) усиленная сталефибробетонной облойкой; б) без усиления

Совместная работа всех компонентов учитывалась следующим образом (Таблица 1):

Таблица 1

Совместная работа компонентов

Компонент	ТИП КЭ	Закон деформирования	Параметры
Бетон (основной и СФБ)	КЭ 236 (объёмный)	Трёхлинейная диаграмма σ - ϵ по СП 63.13330.2018	$R_b = 17\text{--}22$ МПа (В20–В30), $E_b = 30\text{--}32.5$ ГПа, $\epsilon_{b1} = 0.0018\text{--}0.002$, $\epsilon_{b2} = 0.0035$
Стальная фибра (в составе СФБ)	Не моделировалась дискретно	Учёт через модифицированную диаграмму бетона	Повышение прочности на растяжение на 30–50%, увеличение ветви упрочнения, снижение хрупкости
Продольная арматура	КЭ 210 (стержневой)	Двухлинейная диаграмма: упругость + площадка текучести	$R_s = 355\text{--}435$ МПа (А400–А500), $E_s = 200$ ГПа, $\epsilon_{s,y} = 0.00177\text{--}0.00217$
Поперечная арматура	КЭ 210	Аналогично продольной	То же

Совместная работа арматуры и бетона обеспечивалась автоматической связью узлов (без скольжения) между стержневыми и объёмными

элементами. Силовое взаимодействие через сопадающие узлы – стандартная практика в ЛИРА-

САПР. Влияние фибры на сцепление и трещиностойкость учитывалось через повышение характеристик диаграммы растяжения сталефибробетона.

Исследуемый объект (базовый образец) представляет собой железобетонную опору эстакады (рис. 2) из бетона класса В25, армированную продольной и поперечной арматурой. Класс арматуры А400. Диаметр продольной арматуры 28 мм, поперечной – 10 мм. Усиление выполнено из сталефибробетонной обоймы толщиной 40 мм, класс бетона матрицы В30. Процент фибрового армирования по объёму равен – $\mu_{fb} = 2\%$. Эксцентриситет приложения нагрузки – $e = 275$ мм. Базовый образец смоделирован без дефектов (Рис. 2).

Нагружение – статическое, центральное с эксцентриситетом, имитирующее реальные технологические нагрузки на опоры эстакады. Все образцы были рассчитаны на нагрузки от собственного веса и технологические нагрузки, приложенные с эксцентриситетом. Расчет проводился по шаговому методу, величина одного шага принималась 10% от нагрузки разрушения. Минимальное количество итераций – 300, итерационный метод – автоматический. Разрушение образца фиксировалось при достижении максимальной относительной деформации в бетоне колонны, равной 0,0035. Для базового образца максимальная нагрузка составила $P = 1761$ кН.

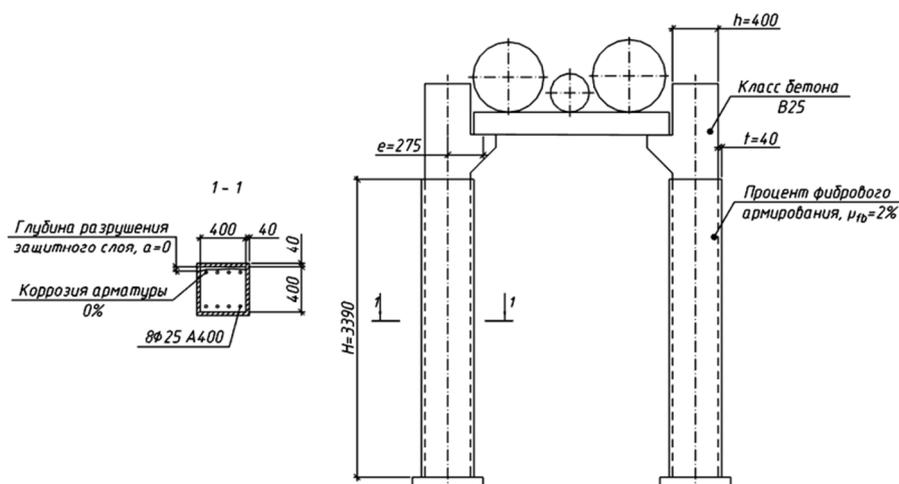


Рис. 2. Геометрические размеры одноярусной колонны, усиленной оболочкой из сталефибробетона

Основная часть. Программа численного эксперимента представлена в таблице 2 и 3. В качестве варьируемых факторов приняты: глубина разрушения защитного слоя бетона, коррозия арматура, класс бетона колонны, класс арматуры,

процент фибрового армирования, эксцентриситет приложения технологической нагрузки, ширина сечения колонны, толщина рубашки усиления, высота колонны, количество и диаметр рабочей арматуры.

Таблица 2

Интервалы варьирования для исследуемых факторов влияния

№ п/п	Фактор	Колонна	Базовый образец
<i>Факторы повреждения</i>			
1.	Глубина разрушения защитного слоя бетона a , мм	40; 30; 20; 10; 0	0
2.	Коррозия арматуры, %	40; 30; 20; 10; 0	0
3.	Класс бетона колонны В, МПа	В20; В25; В30	В25
<i>Физические факторы</i>			
4.	Класс арматуры А, МПа	А400, А500	А400
5.	Процент фибрового армирования μ_{fb} , %	1, 2, 3	2
<i>Статические факторы</i>			
6.	Эксцентриситет e , мм	275; 375; 475	275
<i>Геометрические факторы</i>			
7.	Ширина сечения колонны h , мм	300, 400, 500	400
8.	Толщина рубашки t , мм	30, 40, 50	40
9.	Высота колонны H , м	2,39 м, 3,39 м, 4,39 м	3,39 м
10.	Количество и диаметр рабочей арматуры, шт., мм	8Ø25, 8Ø28, 8Ø32	8Ø28

Таблица 3

Программа численного эксперимента

Серия	Параметры									
	a , мм	B , МПа	A , МПа	μ_{fb} , %	e , мм	t , мм	h , мм	H , м	$8x\varnothing$, мм	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
К-1	0	B25	A400	–	275	–	400	3,39	8Ø28	–
КУ-1	0	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-2	10	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-3	20	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-4	30	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-5	40	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-6	0	B20	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-7	0	B30	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-8	0	B25	A500	2	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-9	0	B25	A400	1	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-10	0	B20	A400	3	275	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-11	0	B30	A400	2	375	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-12	0	B25	A500	2	475	40	400	3,39	8Ø28	0
КУ-13	0	B25	A400	2	275	30	400	3,39	8Ø28	0
КУ-14	0	B25	A400	2	275	50	400	3,39	8Ø28	0
КУ-15	0	B25	A400	2	275	40	300	3,39	8Ø28	0
КУ-16	0	B25	A400	2	275	40	500	3,39	8Ø28	0
КУ-17	0	B25	A400	2	275	40	400	2,39	8Ø28	0
КУ-18	0	B25	A400	2	275	40	400	4,39	8Ø28	0
КУ-19	0	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø25	0
КУ-20	0	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø32	0
КУ-21	0	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	10
КУ-22	0	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	20
КУ-23	0	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø28	30
КУ-24	0	B25	A400	2	275	40	400	3,39	8Ø38	40

В ходе компьютерного эксперимента все колонны разрушились по нормальному сечению. В таблице 4 показаны основные результаты численного исследования. В качестве контрольных показателей были приняты: напряжение в сжатой зоне бетона σ_b , относительная деформация в сжатой зоне бетона ε_b , напряжение в сжатой арматуре σ'_s , напряжение в растянутой арматуре σ_s , напряжение в сжатой зоне сталефибробетона σ_{fb} , напряжение в растянутой зоне СФБ σ_{fbt} , относительная деформация в растянутой зоне обоймы ε_{fbt} . Также для каждого образца построены графики «напряжения в сжатой зоне бетона-нагрузка» (рис. 3–13).

На рисунке 3 представлено сравнение усиленной колонны (КУ-1) и неусиленной колонны (К-1) по напряжениям в сжатой зоне бетона. Образец КУ-1 показывает значительно большую несущую способность (на 25 %) по сравнению с К-1 как при предельной, так и при условной эксплуатационной нагрузке (принята равной $0,7P_{ult}$). При этом напряжения и деформации в бетоне у образца КУ-1 меньше, что указывает на более

равномерное распределение нагрузки. Дополнительно у КУ-1 наблюдаются меньшие напряжения в растянутой арматуре и большее использование сжатой арматуры, что говорит о более эффективной работе конструкции в целом. На рисунке 3 выделены 3 характерные стадии работы конструкции: упругая, пластическая и стадия разрушения. Переход конструкции между стадиями ярко выражен переломом кривой на графике (рис. 3).

Как видно из рисунка 3 – разрушение в базовом образце (К-1) при достижении нагрузки $P = 1568$ кН происходит более интенсивно в сравнении с усиленной колонной. Напряжение в сжатой и растянутой зоне арматуры при одинаковых нагрузках отличается на 15–20 МПа, что говорит о большей прочности железобетонной колонны, усиленной сталефибробетоном, в целом.

При использовании класса бетона В20 у образца КУ-6 несущая способность снизилась на 0,77 % (с 2210 кН до 2193 кН). Снижение связано с пониженной прочностью исходного бетона, но эффект компенсировался работой сталефибробетонной обоймы. При увеличении класса бетона

до В30 происходит линейный рост несущей способности. Высокий класс бетона позволил лучше распределить нагрузку между бетоном и стале-

фибробетонной обоймой. Снижение класса бетона (В20) незначительно влияет на прочность благодаря работе сталефибробетонной обоймы, но при этом требует учета в расчетах.

Таблица 4

Результаты численного исследования

Серия	$0,7P_{ult}$							P_{ult} , кН
	σ_b , МПа	ε_b	σ_s' , МПа	σ_s , МПа	σ_{fb} , МПа	σ_{fbt} , МПа	ε_{fb}	
К-1	-14,3	-0,0016	48,50310	-75,17980	-	-	-	1767
КУ-1	-13,1	-0,00155	43,5073	-71,7846	-19,6	7,08	-0,00168	2210
КУ-2	-14,7	-0,00153	43,4103	-71,2996	-20,3	6,74	-0,00159	2155
КУ-3	-20,1	-0,0016	41,2276	-72,2696	-20,1	8,63	-0,00151	2105
КУ-4	-14,3	-0,00194	38,8025	-72,7546	-19,9	7,98	-0,00145	2060
КУ-5	-14,5	-0,00153	39,7725	-72,7546	-20,1	7,96	-0,00145	1928
КУ-6	-10,4	-0,00151	38,8025	-69,3594	-19	7,92	-0,00117	2193
КУ-7	-15,4	-0,00128	38,3174	-60,6289	-19,8	8,14	-0,00161	2320
КУ-8	-15,1	-0,00151	41,2276	-72,7546	-21,1	8,15	-0,00188	2325
КУ-9	-14,9	-0,00137	40,258	-65,964	-19	8,39	-0,00172	2325
КУ-10	-14,3	-0,00127	38,317	-63,539	-21,4	8,55	-0,00158	2300
КУ-11	-15,1	-0,00142	57,234	-67,904	-20,4	8,59	-0,00182	1767
КУ-12	-14,8	-0,0015	67,904	-67,904	-20,8	9,95	-0,00193	1474
КУ-13	-14,4	-0,00151	40,743	-70,329	-20,9	8,78	-0,00178	2099
КУ-14	-13,6	-0,0012	35,407	-59,174	-19,3	7,06	-0,00157	2371
КУ-15	-13,3	-0,00128	48,503	-74,695	-19,1	8,86	-0,00155	1933
КУ-16	-13,3	-0,0012	33,952	-58,204	-18,7	8,63	-0,0016	2500
КУ-17	-13,9	-0,00126	36,862	-59,659	-19,8	7,89	-0,0016	2235
КУ-18	-14,4	-0,00126	38,454	-59,323	-19,7	8,46	-0,00159	2235
КУ-19	-13,8	-0,0013	40,764	-60,842	-19,7	8,32	-0,0016	2089
КУ-20	-14,7	-0,00146	37,135	-70,557	-20,4	8,27	-0,00183	2572
КУ-21	-14,4	-0,00128	39,351	-64,686	-19,8	8,43	-0,00162	2167
КУ-22	-13,6	-0,00127	40,028	-60,648	-19,7	8,42	-0,00158	2062
КУ-23	-13,2	-0,00127	40,974	-61,113	-19,2	8,03	-0,00158	1950
КУ-24	-12,8	-0,00132	43,197	-61,943	-19,1	8,11	-0,00163	1847

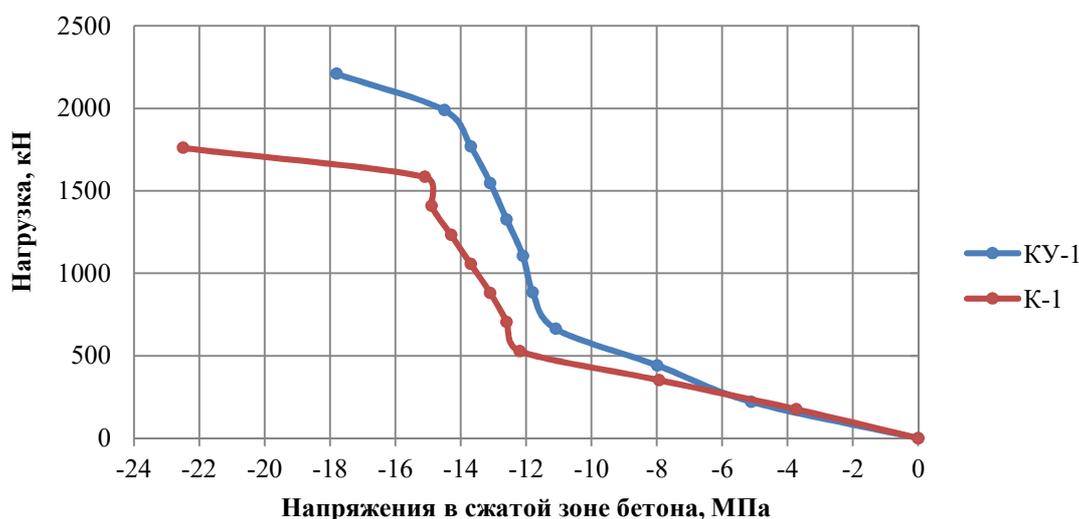
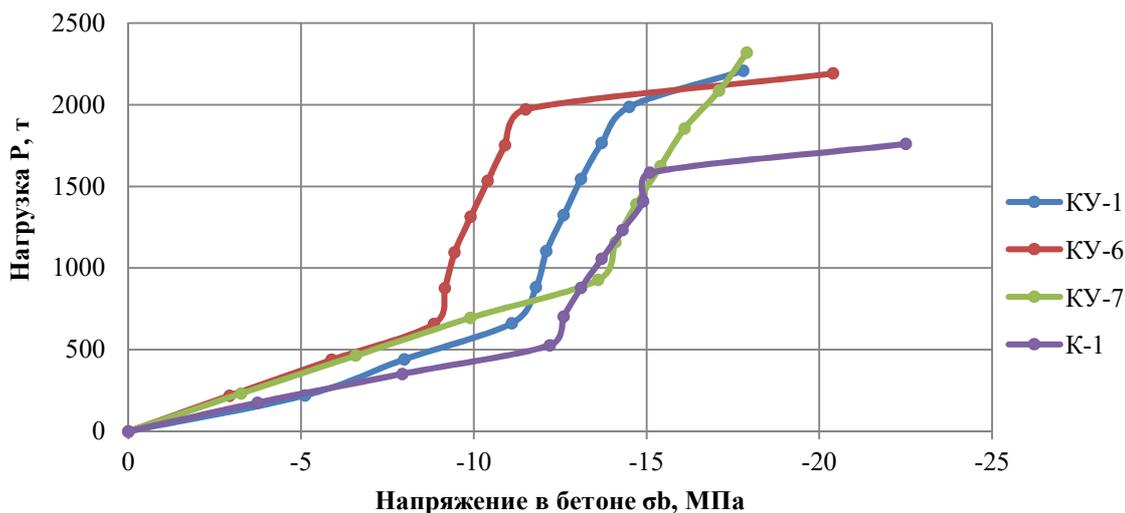
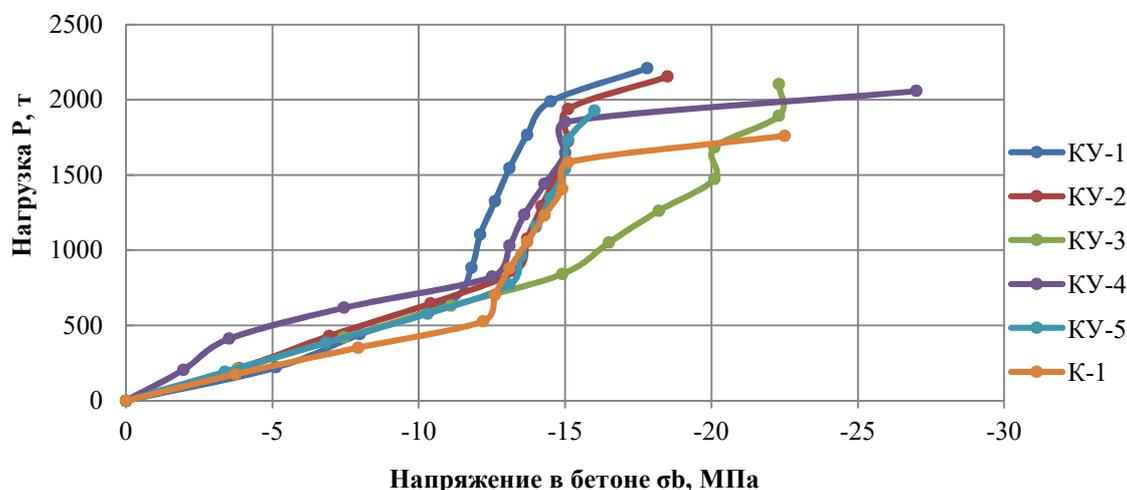


Рис. 3. Напряжение в бетоне в усиленной (КУ-1) и неусиленной (К-1) колонне

Из рис. 5 видно, что образец КУ-1 (усиленная колонна без разрушения защитного слоя) является самым прочным. Увеличение глубины разрушения защитного слоя приводит к постепенному снижению несущей способности (от -2,49 % до -12,76 %). При увеличении глубины

повреждения защитного слоя бетона до 40 мм у образца КУ-5 несущая способность снизилась на 12,76 % (до 1928 кН), напряжения в бетоне составили -14,5 МПа. Очевидно, что максимальное повреждение защитного слоя оказало значительное влияние на прочность колонны.

Рис. 4. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Класс бетона»Рис. 5. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Глубина разрушения защитного слоя бетона»

Из рис. 6 видно, что образцы КУ-1 и КУ-8 демонстрируют линейное возрастание нагрузки до приблизительно -10 МПа. На стадии упругой работы КУ-8 опережает КУ-1: при одинаковых напряжениях в бетоне нагрузка у КУ-8 на 15–20% выше. Один из возможных факторов — повышенная прочность арматуры А500, которая может обеспечивать лучшее сопротивление деформациям.

Повышение класса арматуры с А400 до А500 увеличивает несущую способность на 5,2%. Высокая прочность арматуры А500 позволяет ей работать на больших деформациях без потери несущей способности. Максимальная нагрузка образца КУ-8 составила $P = 2325$ кН. Увеличение напряжения в бетоне у образца КУ-8 при достижении значения нагрузки в 1395 кН составляет всего 2% до достижения максимальной нагрузки.

Сравнивая три образца с эксцентриситетом 275 мм, 375 и 475, можно сделать вывод, что максимальная нагрузка составляет $P = 2210$ кН у образца КУ-1. Образцы КУ-11 и КУ-12 более подвержены разрушению, так как нагрузка, приложенная в эксцентриситетом, расположена дальше от самой колонны в этих образцах. Это подтверждается на рис. 7, где график образца КУ-12 находится правее остальных, что говорит о том, что разрушение защитного слоя происходит быстрее. Все образцы демонстрируют линейное возрастание нагрузки до приблизительно -10 МПа. На стадии трещинообразования КУ-1 опережает КУ-11 и КУ-12: при одинаковых напряжениях в бетоне нагрузка у КУ-1 на 40–50% выше. КУ-1 выдерживает на 19,9% больше нагрузки, чем КУ-11, и на 33,3% больше, чем КУ-12.

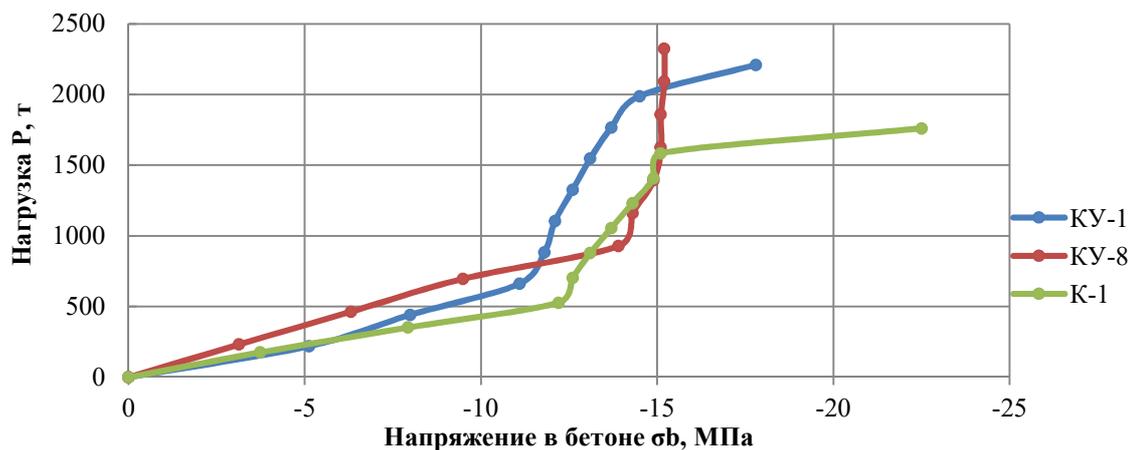


Рис. 6. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Класс арматуры»

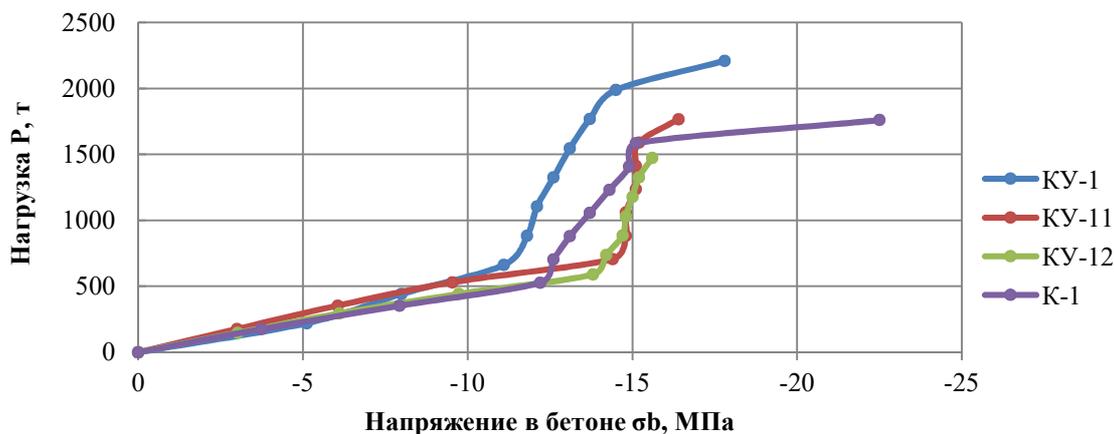


Рис. 7. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Эксцентриситет»

Изменение коэффициента фибрового армирования выполнено путём изменения диаграмм деформирования сталефибробетона. Как показывает график на рис. 8 – образцы КУ-9 и КУ-10 схожи в характеристиках бетона и арматуры. На начальном этапе различий почти нет, так как начальные напряжения в бетоне одинаковы. Образец КУ-1 является самым слабым на разрушение в сравнении с образцами КУ-9 и КУ-10, хотя коэффициент фибрового армирования состав-

ляет $\mu_{fv} = 0,02$, тогда как у двух других образцов 0,01 и 0,03, соответственно. Максимальная нагрузка у образца КУ-1 меньше на 3,9 %, чем у образца КУ-10, и на 4,9 %, чем у образца КУ-9.

Минимальный коэффициент фибрового армирования обеспечивает оптимальное распределение нагрузки между бетоном и сталефибробетоном. Деформации бетона у образца КУ-9 с $\mu_{fv} = 0,01$ минимальны (-0,00137), что указывает на высокую эффективность обоймы.

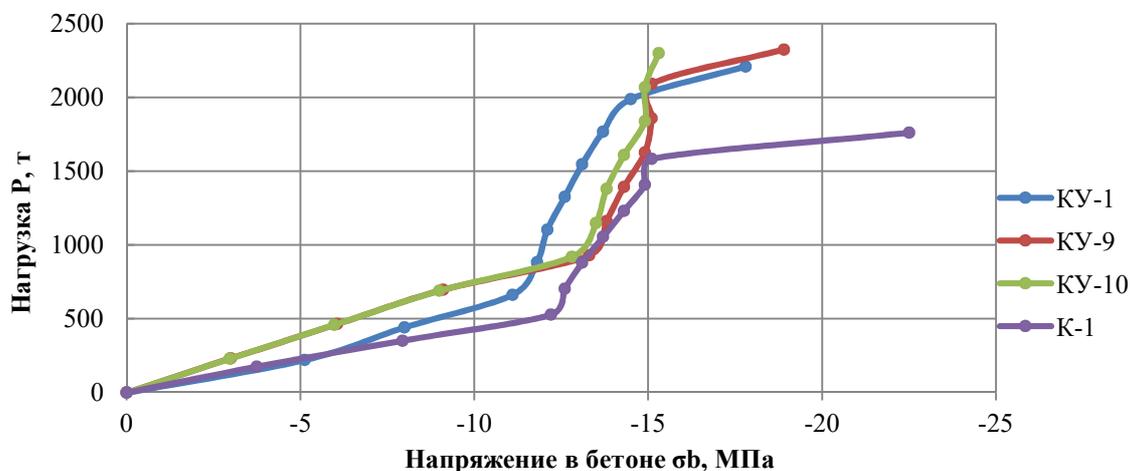


Рис. 8. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Коэффициент фибрового армирования»

Из рис. 9 видно, что наибольшее сопротивление к разрушению имеет образец КУ-14 с толщиной защитного слоя $t = 50$ мм. Данный образец выдерживает большие нагрузки при меньших напряжениях. Далее по убыванию идут образцы КУ-1 и КУ-13 с толщиной рубашки 40 и 30

соответственно. Арматура ведет себя таким же образом: в образце КУ-14 она имеет меньшие деформации.

Максимальная нагрузка образца КУ-14 на 6,8% больше максимальной нагрузки базового усиленного образца КУ-1.

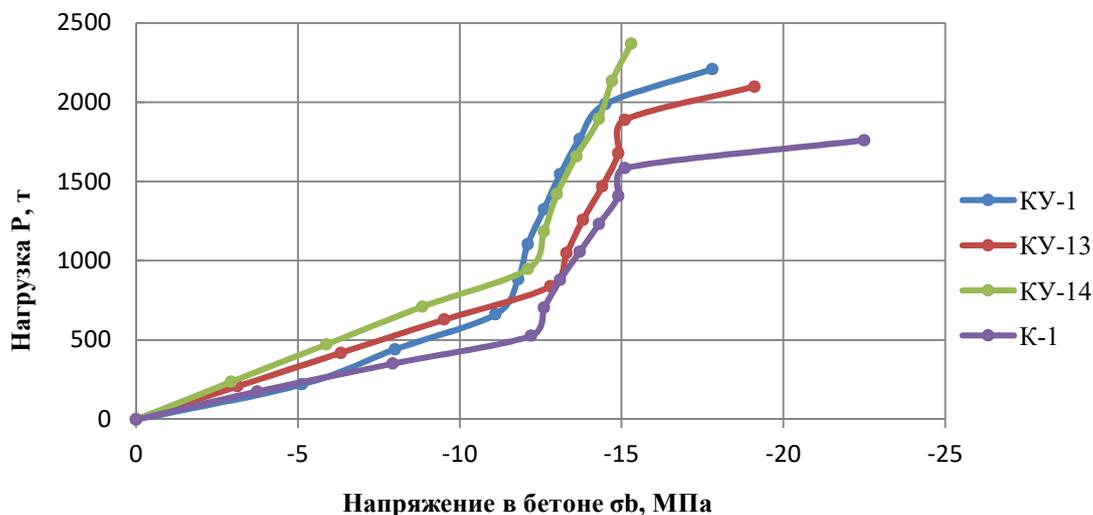


Рис. 9. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Толщина рубашки»

Образец КУ-16 с шириной сечения колонны $h = 500$ мм оказался наиболее прочным на разрушение, а образец КУ-15 с шириной сечения колонны $h = 300$ мм – наименее прочным.

На стадии упругой работы КУ-16 опережает КУ-1 и КУ-15 (рис. 10): при одинаковых напряжениях в бетоне нагрузка у КУ-16 на 20–30 % выше. Это связано с увеличением площади поперечного сечения колонны. На стадии предельной нагрузки КУ-16 выдерживает на 13,1 % больше нагрузки, чем КУ-1, и на 30 % больше, чем КУ-15. Несмотря на меньшие напряжения в бетоне ($-13,3$ МПа), КУ-16 эффективнее распределяет нагрузку благодаря большей жесткости сечения.

Увеличение ширины сечения колонны пропорционально повышает несущую способность.

Сравнивая три образца с высотой колонны 2,39 м, 3,39 м и 4,39 м (рис. 11), можно сделать вывод, что на стадии упругой работы КУ-17 и КУ-18 опережают КУ-1: при одинаковых напряжениях в бетоне нагрузка у КУ-17 и КУ-18 на 10–15 % выше. Это связано с меньшей высотой колонны, что снижает момент изгиба и повышает эффективность работы системы. На стадии предельной нагрузки КУ-17 и КУ-18 выдерживают на 1,1 % больше нагрузки, чем КУ-1. Снижение высоты колонны повышает несущую способность на 1,1 %, но требует учета повышенных напряжений в бетоне.

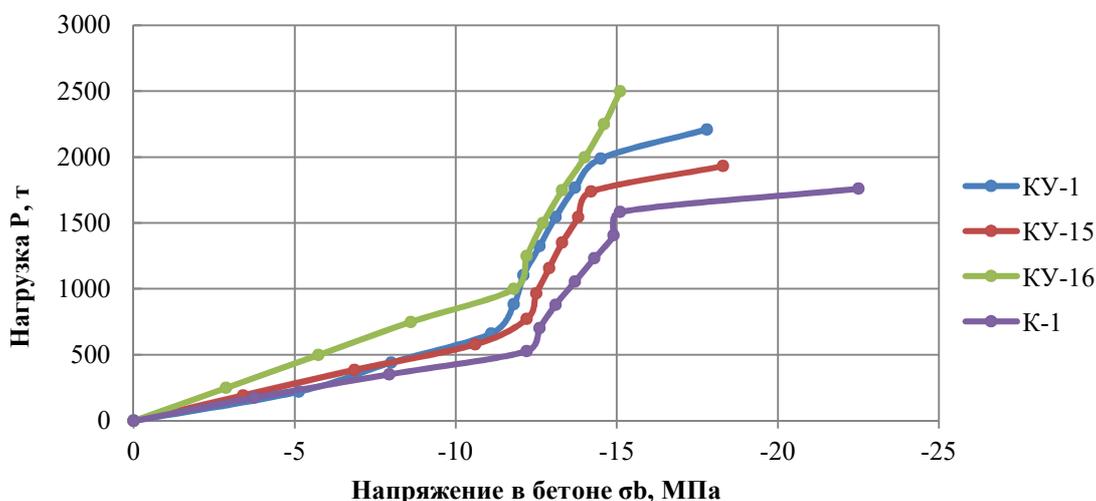


Рис. 10. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Ширина сечения колонны»

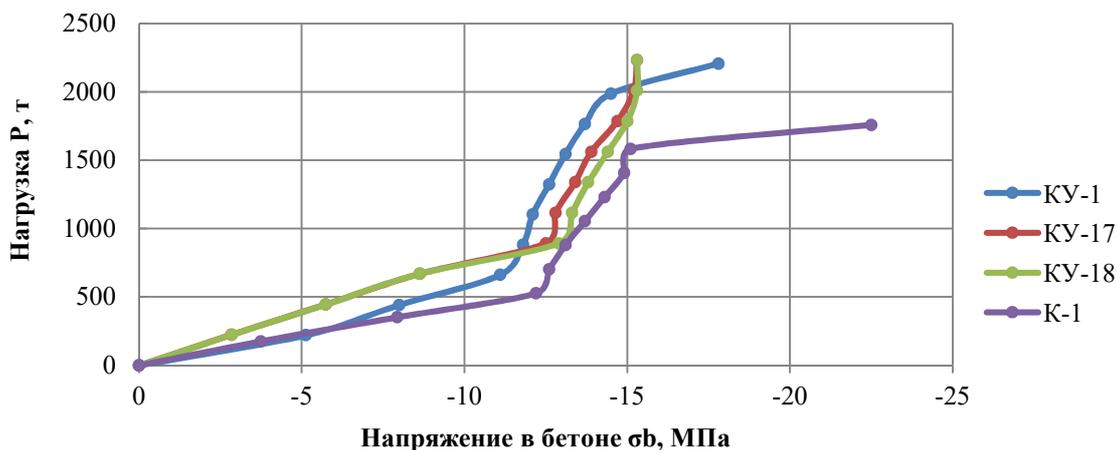


Рис. 11. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Высота колонны»

У образца КУ-19 с диаметром рабочей арматуры $d=25$ мм напряжения в бетоне возросли на 5,3 % (до $-13,8$ МПа), что указывает на повышенную нагрузку на материал при меньшей площади армирования, в сравнении с базовым образцом. Увеличение диаметра арматуры до 32 мм повысило несущую способность на 16,4 %. Исходя из результатов, железобетонная колонна, армированная продольными стержнями с диаметром $d = 32$ мм, является самой прочной. Образец КУ-20 выдерживает максимальную нагрузку $P = 2572$ кН.

Защитный слой также у образца КУ-20 менее подвергается разрушениям, чем образцы КУ-1 и КУ-19 (рис. 12).

Наибольшая максимальная нагрузка у образца КУ-1 $P = 2210$ кН с 0 % процентом коррозии арматуры, что подтверждает тот факт большего разрушения железобетонной колонны с увеличением коррозии арматуры (рис. 13). Образец КУ-24 (40 % коррозии арматуры) опережает остальные образцы только на начальных этапах, но затем его кривая резко снижается. Это связано с потерей прочности арматуры, которая не может компенсировать нагрузку, передаваемую на бетон. Напряжение в бетоне при нагрузке $0,7P_{ult}$ отличается в большей степени у образцов КУ-1 и КУ-24 – 11,1 %. При этом максимальную нагрузку выдерживает образец, не подвергшийся воздействию коррозии арматуры, -1547 кН. Каждые 10 % коррозии снижают предельную прочность на 2–4 %.

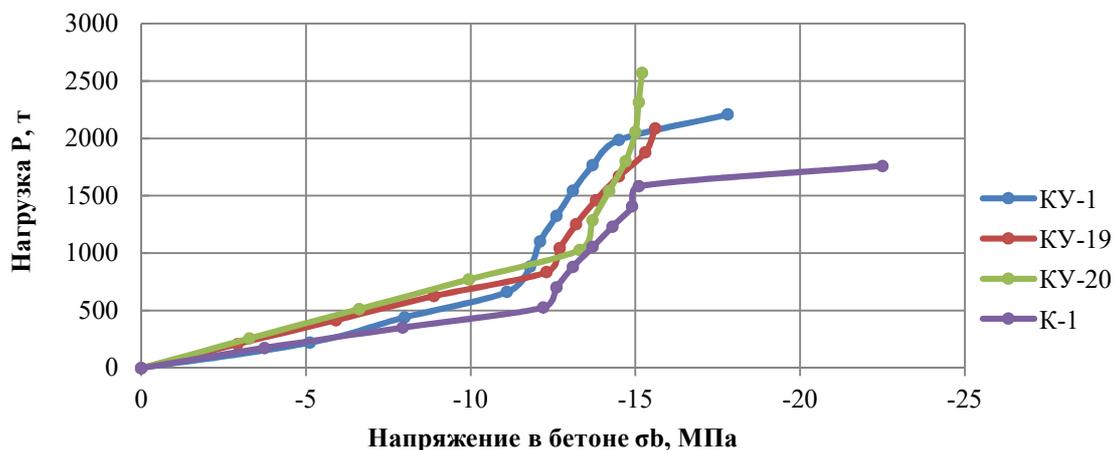
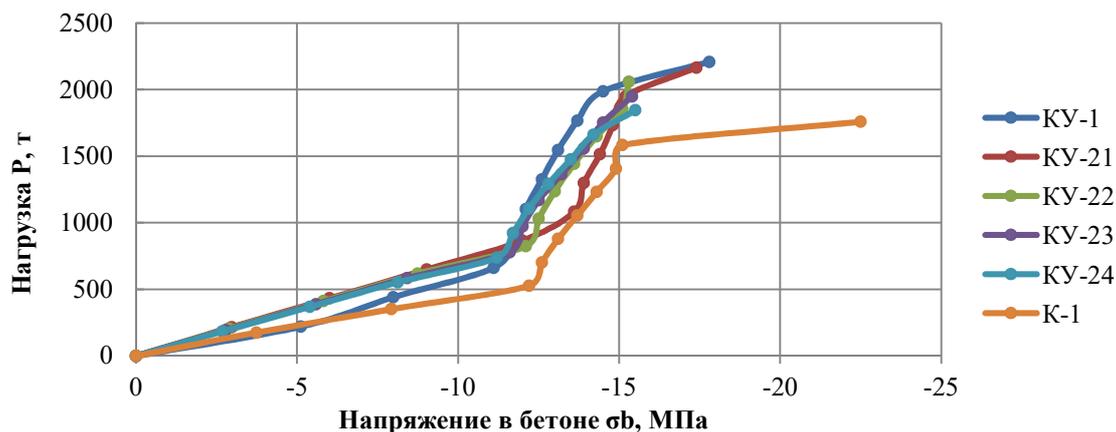


Рис. 12. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Диаметр рабочей арматуры»

На основе результатов численного эксперимента сформулированы практические рекомендации по выбору оптимальных параметров усиления железобетонных колонн сталефибробетонными обоймами. В таблице 5 систематизированы ключевые факторы усиления, их оптимальные значения и соответствующий прирост несущей способности. Анализ показывает, что наибольший эффект достигается при увеличении диаметра продольной арматуры (до 32 мм, +16,4 %)

и минимизации эксцентриситета приложения нагрузки (+33,3 %). Также подтверждена высокая эффективность применения сталефибробетона с объёмным содержанием фибры 1 %, что обеспечивает максимальный прирост прочности (+5,2 %) без риска нарушения гомогенности смеси. Данные рекомендации позволяют проектировщикам целенаправленно выбирать параметры усиления, обеспечивающие наилучшее соотношение «стоимость – эффективность».

Рис. 13. Напряжение в бетоне σ_b при изменении фактора «Коррозия арматуры»

Помимо технической эффективности, важным критерием выбора метода усиления является его экономическая целесообразность. В таблице 6 приведено сравнение стоимости различных методов усиления на единицу прироста несущей способности для типовой колонны сечением 400×400 мм. Расчёт выполнен на основе условных рыночных цен на материалы и работы. Результаты показывают, что сталефибробетонное усиление является наиболее экономически

выгодным решением: его стоимость составляет $\sim 27,1$ руб./кН прироста нагрузки. Это в 2,7 раза дешевле композитного обматывания ($\sim 106,7$ руб./кН), в 2,6 раза дешевле стальной обоймы ($\sim 72,0$ руб./кН) и на 32 % выгоднее традиционной железобетонной рубашки ($\sim 40,0$ руб./кН). Таким образом, применение СФБ-обойм не только повышает прочность и долговечность конструкции, но и позволяет существенно снизить затраты на реконструкцию.

Таблица 5

Оптимальные параметры усиления и их влияние на несущую способность

№	Фактор усиления	Оптимальное значение/направление изменения	Несущая способность	Примечание
1	Процент фибрового армирования	1% ($\mu_{fb} = 0,01$)	+5,2 % (2325 кН против 2210 кН у базового КУ-1)	Дальнейшее увеличение до 3 % снижает эффективность из-за нарушения гомогенности.
2	Диаметр продольной арматуры	32 мм (вместо 28 мм)	+16,4 % (2572 кН против 2210 кН)	Самый значительный прирост прочности среди геометрических факторов армирования.
3	Ширина сечения колонны (h)	500 мм (вместо 400 мм)	+13,1 % (2500 кН против 2210 кН)	Увеличение жесткости сечения эффективно, но требует оптимизации для экономии материалов.
4	Класс бетона колонны	B30 (вместо B25)	+4,98 % (2320 кН против 2210 кН)	Повышение класса бетона улучшает совместную работу с обоймой.
5	Класс арматуры	A500 (вместо A400)	+5,2 % (2325 кН против 2210 кН)	Арматура более высокого класса лучше работает при деформациях.
6	Толщина обоймы (t)	50 мм (вместо 40 мм)	+6,8 % (2371 кН против 2210 кН)	Более толстая обойма лучше перераспределяет нагрузку и снижает напряжения в бетоне.
7	Высота колонны (H)	2.39 м (вместо 3.39 м)	+1,1 % (2235 кН против 2210 кН)	Снижение высоты уменьшает изгибающий момент, но эффект незначителен.
8	Эксцентриситет (e)	Минимизация (275 мм вместо 475 мм)	+33,3% (2210 кН против 1474 кН)	Критически важный фактор. Проектирование должно стремиться к центральному приложению нагрузки.
9	Состояние конструкции	Отсутствие коррозии и разрушения защитного слоя	Базовое значение 2210 кН	Любое повреждение (коррозия, разрушение бетона) линейно снижает прочность. Приоритет – диагностика.

Таблица 6

Сравнительная экономическая эффективность методов усиления

Метод усиления	Основные затраты (на 1 м.п. колонны 400×400 мм)	Общий прирост несу- щей способ- ности (ΔP), кН	Стоимость на единицу при- роста (руб/кН)	Примечание
Сталефибробетон- ная обойма (СФБ)	* Стоимость СФБ (В30, $\mu_{fv} = 0,02$): ~20000 руб/м ³ * Стоимость работ (опалубка, укладка, уплотнение): ~10000 руб/м ³ * Объем на 1 м.п.: 0,4 м ³ Итого: (20000 + 10000) * 0,4 = 12000 руб.	443	~27,1 руб./кН	Самый эконо- мичный вариант в расчете на кН. Требует опа- лубки.
Внешняя стальная обойма (уголки + хомуты)	* Стоимость стали (уголок 100x100x8, пластины): ~100000 руб/т * Стоимость работ (резка, сварка, монтаж, антикоррозия): ~80000 руб/т * Масса на 1 м.п.: ~0,2 т Итого: (100 000 + 80 000) * 0.2 = 36 000 руб.	Ориен- тиро- вочно 500 кН	~72,0 руб./кН	Быстрый монтаж, но высокая мате- риалоемкость и стоимость стали/работ.
Железобетонная обойма (традицион- ная)	* Стоимость бетона (В25): ~5000 руб/м ³ * Стоимость арматуры (сетки/кар- касы): ~80000 руб/т * Стоимость работ (опалубка, армиро- вание, бетонирование): ~15000 руб/м ³ * Объем на 1 м.п. (толщ. 100 мм): 0,8 м ³ , арматура ~0,1 т *Итого: (5000+15000)0,8 + 80000*0,1 = 16 000 + 8 000 = 24000 руб.	Ориен- тиро- вочно 600 кН	~40,0 руб./кН	Требует сложной опалубки и боль- шого объема ра- бот. Надежный, но трудоемкий.
Композитное обма- тывание (УВП)	* Стоимость УВП ленты: ~3000 руб/м ² * Стоимость клея и работ: ~2000 руб/м ² * Площадь на 1 м.п.: 1,6 м ² , 4 слоя Итого: (3000 + 2000) * 1,6 * 4 = 32000 руб.	Ориен- тиро- вочно 300 кН	~106,7 руб./кН	Самый дорогой на кН. Быстрый монтаж, мини- мальное увеличе- ние сечения.

Выводы

1. Сталефибробетон рекомендуется для изготовления конструкций, в которых наиболее эффективно могут быть использованы следующие его технические преимущества по сравнению с традиционным железобетоном: повышенные трещиностойкость, ударная прочность, вязкость разрушения, износостойкость, морозостойкость, сопротивление кавитации; пониженные усадка и ползучесть; возможность использования более эффективных конструктивных решений; снижение трудозатрат на арматурные работы, повышение степени механизации и автоматизации производства железобетонных конструкций; возможность применения новых, более производительных приемов формования армированных конструкций.

2. Разрушение в базовом образце при достижении нагрузки $P = 1761$ кН происходит более

интенсивно в сравнении с усиленной колонной. Напряжение в сжатой и растянутой зоне арматуры при одинаковых нагрузках отличается на 15–20 МПа, что говорит о большей прочности железобетонной колонны, усиленной сталефибробетоном, в целом.

3. У образца КУ-3 глубиной разрушения защитного слоя бетона 20 мм наблюдается большее напряжение в бетоне в течение долгого времени. Это говорит о том, что большая часть нагрузки при разрушении 20 мм сталефибробетона воспринимается бетоном. Увеличение глубины повреждений защитного слоя от 0 до 40 мм привело к линейному снижению несущей способности на 12,76 %. Наиболее значительное снижение (–4,75 %) зафиксировано при глубине 20 мм, что связано с локальной концентрацией напряжений.

4. Оптимальное значение объемного содержания фибры ($\mu=0,01$) обеспечило максимальное повышение прочности на 5,2 % (КУ-9: 2325 кН). Дальнейшее увеличение μ до 0,03 снизило эффективность на 1,1 % (КУ-10: 2300 кН), что связано с нарушением гомогенности матрицы.

5. Наибольшее сопротивление к разрушению среди фактора изменения толщины защитного слоя имеет образец КУ-14 с толщиной защитного слоя $t = 50$ мм. Данный образец выдерживает большие нагрузки при меньших напряжениях. Далее по убыванию идут образцы КУ-1 и КУ-13 с толщиной рубашки 40 и 30 соответственно. Арматура ведет себя таким же образом: в образце КУ-14 она имеет меньшие деформации.

6. Наибольшая максимальная нагрузка у образца КУ-1 $P = 2210$ кН с 0 % процентом коррозии арматуры, что подтверждает тот факт большего разрушения железобетонной колонны с увеличением коррозии арматуры.

7. Увеличение ширины сечения колонны с 300 до 500 мм повышает несущую способность на 13,1%, однако удельная эффективность (прирост прочности на единицу объема материала) снижается. Рекомендуется оптимизация геометрии сечения с учётом экономии материала.

8. На основе приведенных (условных) цен, сталефибробетонное усиление является наиболее экономически эффективным методом, обеспечивая наименьшую стоимость на единицу прироста несущей способности (~27 руб./кН). Оно значительно дешевле композитного обмотывания и стальной обоймы, а также немного выгоднее традиционной железобетонной рубашки, при этом предлагая дополнительные преимущества в виде повышенной прочности и пластичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liew K.M., Akbar A. The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Т. 232. 117232. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117232
2. Batson G. Steel fiber reinforced concrete // *Materials Science and Engineering*. 1976. Т. 25. С. 53–58.
3. Banthia N., Sheng J. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites // *Cement and Concrete Composites*. 1996. Т. 18. №. 4. Pp. 251–269.
4. Rossi P. Ultra-high performance fiber-reinforced concretes // *Concrete international*. 2001. Т. 23. №. 12. Pp. 46–52.
5. Sahmaran M., Yurtseven A., Yaman I. O. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete // *Building and Environment*. 2005. Т. 40. №. 12. Pp. 1672–1677.

6. Nili M., Afroughsabet V. Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete // *International journal of impact engineering*. 2010. Т. 37. №. 8. Pp. 879–886.

7. Spadea S., Farina I., Berardi P.V., Dentale F., Fraternali F. Energy dissipation capacity of concretes reinforced with recycled PET fibers // *Ing. Sismica*. 2014. Т. 31. №. 2. Pp. 61–70.

8. Mastali M., Ghasemi Naghibdehi M., Naghipour M., Rabiee S.M. Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts // *Construction and Building Materials*. 2015. Т. 95. Pp. 296–311.

9. Mohammadi Y., Singh S.P., Kaushik S.K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state // *Construction and Building Materials*. 2008. Т. 22. №. 5. Pp. 956–965.

10. Sanjay M. R., Madhu P., Jawaid M., Senthamaraiannan P., Senthil S., Pradepp S. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Т. 172. Pp. 566–581.

11. Havlikova I., Merta I., Schneemayer A., Vesely V., Simonova H., Korycanska B., Keršner Z. Effect of fibre type in concrete on crack initiation // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Т. 769. Pp. 308–311.

12. Pająk M., Ponikiewski T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers // *Construction and Building materials*. 2013. Т. 47. Pp. 397–408.

13. Mohammadi Y., Singh S.P., Kaushik S.K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state // *Construction and Building Materials*. 2008. Т. 22. №. 5. Pp. 956–965.

14. Spinella N. Shear strength of full-scale steel fibre-reinforced concrete beams without stirrups // *Computers and Concrete*. 2013. Т. 11. №. 5. Pp. 365–382.

15. Katzer J. Steel fibers and steel fiber reinforced concrete in civil engineering // *Pacific Journal of science and technology*. 2006. Т. 7. №. 1. Pp. 53–58.

16. Zhang P., Zhao Y., Liu C., Wang P., Zhang T. Combined effect of nano-SiO₂ particles and steel fibers on flexural properties of concrete composite containing fly ash // *Science and Engineering of Composite Materials*. 2014. Т. 21. №. 4. Pp. 597–605.

17. Amin A., Gilbert R. I. Steel fiber-reinforced concrete beams-part II: strength, ductility, and design // *ACI structural journal*. 2019. Т. 116. №. 2. Pp. 113–123.

18. Lee S., Park Y., Abolmaali A. Investigation of flexural toughness for steel-and-synthetic-fiber-

reinforced concrete pipes // Structures. 2019. Т. 19. Pp. 203–211.

19. Ahmed A.A.M., Jia Y. Effect of using hybrid polypropylene and glass fibre on the mechanical properties and permeability of concrete // Materials. 2019. Т. 12. №. 22. 3786.

20. Lawler J.S., Zampini D., Shah S.P. Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load // Materials Journal. 2002. Т. 99. №. 4. Pp. 379–385.

21. Kaufmann W. Ali Amin, Beck A., Lee M. Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete // Engineering Structures. 2019. Т. 186. Pp. 508–524.

22. Parvez A., Foster S. J. Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams // Journal of Structural Engineering. 2015. Т. 141. №. 4. 04014117.

23. Mansur M.A., Chin M.S., Wee T.H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression // Journal of materials in civil engineering. 1999. Т. 11. №. 1. Pp. 21–29.

24. Mansur M.A., Chin M.S., Wee T.H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression // Journal of materials in civil engineering. 1999. Т. 11. №. 1. Pp. 21–29.

25. He Y., Li Y., Jia J., Xu Q., He K. Effect of seawater dry-wet cycling on the durability of concrete repair materials // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2024. Т. 13. №. 3. Pp. 402–415. DOI: 10.1080/21650373.2023.2279288

26. Islam S.M., Hussain R.R., Morshed M.A.Z. Fiber-reinforced concrete incorporating locally

available natural fibers in normal-and high-strength concrete and a performance analysis with steel fiber-reinforced composite concrete // Journal of composite materials. 2012. Т. 46. №. 1. Pp. 111–122.

27. Abbas Y.M., Iqbal Khan M. Fiber–matrix interactions in fiber-reinforced concrete: A review // Arabian Journal for Science and Engineering. 2016. Т. 41. №. 4. Pp. 1183–1198. DOI: 10.1007/s13369-016-2099-1

28. Serdar M., Baričević A., Rukavina J.M., Pezer M., Bjegović D., Štirmer N. Shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete with recycled tyre polymer fibres // International Journal of Polymer Science. 2015. Т. 2015.

29. Chorzepa M.G., Masud M., Yaghoobi A., Jiang H. Impact test: multi-scale fiber-reinforced concrete including polypropylene and steel fibers // ACI Structural Journal. 2017. Т. 114. №. 6. Pp. 1429–1444.

30. Дьячук Е.В. К оценке прочности железобетонной колонны усиленной сталефибробетоном // VIII Международный студенческий строительный форум - 2023: Сборник докладов VIII Международного студенческого строительного форума - 2023, Белгород, 28 ноября 2023 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 28–31.

31. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Минстрой России, Стандартинформ, 2019.

Информация об авторах

Дьячук Евгений Вадимович, аспирант направления подготовки «Строительство и архитектура». E-mail: evgenyi_00@mail.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, Казань, ул.Красносельская, д. 51.

Шарафутдинов Линар Альфредович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений». E-mail: sh_linar@mail.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, Казань, ул.Красносельская, д. 51.

Поступила 01.08.2025 г.

© Шарафутдинов Л.А., Дьячук Е.В., 2026

Sharafutdinov L.A., *Dyachuk E.V.

Kazan State Power Engineering University

*E-mail: evgenyi_00@mail.ru

ASSESSMENT OF THE STRESS STATE OF REINFORCED CONCRETE SUPPORTS OF A TECHNOLOGICAL OVERPASS REINFORCED WITH STEEL FIBER CONCRETE

Abstract. The paper considers a promising material used as reinforcement, steel fiber concrete. It is a composite material with high strength and resistance to various influences. Steel fiber concrete has gained recognition for its improved properties, including increased durability and increased load-bearing capacity.

The article presents the results of a study of the stress-strain state of reinforced concrete supports of a technological overpass reinforced with steel-fiber concrete. The object under study is a reinforced concrete

column of a technological overpass made of concrete of class B25. A computer modeling technique using the LIRA-CAD software package is presented, as well as a numerical experiment program that includes varying key geometric, physical, static, and damaging factors. The dependences between the design parameters and the load-bearing capacity of steel-fiber reinforced columns are revealed. It is shown that the use of steel-fiber concrete significantly increases the strength, ductility and crack resistance of structures, reduces the development of internal stresses and slows down the destruction process. The most fracture-resistant samples have been identified, which makes it possible to recommend the use of steel-fiber-reinforced concrete clips to strengthen reinforced concrete structures in conditions of wear and corrosion of the base concrete.

Keywords: steel fiber concrete, cage, numerical experiment, column, destruction.

REFERENCES

- Liew K.M., Akbar A. The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 232. 117232. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117232
- Batson G. Steel fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering*. 1976. Vol. 25. Pp. 53–58.
- Banthia N., Sheng J. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*. 1996. Vol. 18. No. 4. Pp. 251–269.
- Rossi P. Ultra-high performance fiber-reinforced concretes. *Concrete international*. 2001. Vol. 23. No. 12. Pp. 46–52.
- Sahmaran M., Yurtseven A., Yaman I. O. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Building and Environment*. 2005. Vol. 40. No. 12. Pp. 1672–1677.
- Nili M., Afroughsabet V. Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *International journal of impact engineering*. 2010. Vol. 37. No. 8. Pp. 879–886.
- Spadea S., Farina I., Berardi P.V., Dentale F., Fraternali F. Energy dissipation capacity of concretes reinforced with recycled PET fibers. *Ing. Sismica*. 2014. Vol. 31. No. 2. Pp. 61–70.
- Mastali M., Ghasemi Naghibdehi M., Naghipour M., Rabiee S.M. Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 95. Pp. 296–311.
- Mohammadi Y., Singh S.P., Kaushik S.K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. No. 5. Pp. 956–965.
- Sanjay M. R., Madhu P., Jawaid M., Sentharamaikkannan P., Senthil S., Pradepp S. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 172. Pp. 566–581.
- Havlikova I., Merta I., Schneemayer A., Vesely V., Simonova H., Korycanska B., Keršner Z. Effect of fibre type in concrete on crack initiation. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 769. Pp. 308–311.
- Pajak M., Ponikiewski T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building materials*. 2013. Vol. 47. Pp. 397–408.
- Mohammadi Y., Singh S.P., Kaushik S.K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. No. 5. Pp. 956–965.
- Spinella N. Shear strength of full-scale steel fibre-reinforced concrete beams without stirrups. *Computers and Concrete*. 2013. Vol. 11. No. 5. Pp. 365–382.
- Katzer J. Steel fibers and steel fiber reinforced concrete in civil engineering. *Pacific Journal of science and technology*. 2006. Vol. 7. No. 1. Pp. 53–58.
- Zhang P., Zhao Y., Liu C., Wang P., Zhang T. Combined effect of nano-SiO₂ particles and steel fibers on flexural properties of concrete composite containing fly ash. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2014. Vol. 21. No. 4. Pp. 597–605.
- Amin A., Gilbert R. I. Steel fiber-reinforced concrete beams-part II: strength, ductility, and design. *ACI structural journal*. 2019. Vol. 116. No. 2. Pp. 113–123.
- Lee S., Park Y., Abolmaali A. Investigation of flexural toughness for steel-and-synthetic-fiber-reinforced concrete pipes. *Structures*. 2019. Vol. 19. Pp. 203–211.
- Ahmed A.A.M., Jia Y. Effect of using hybrid polypropylene and glass fibre on the mechanical properties and permeability of concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 22. 3786.
- Lawler J.S., Zampini D., Shah S.P. Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load. *Materials Journal*. 2002. Vol. 99. No. 4. Pp. 379–385.
- Kaufmann W. Ali Amin, Beck A., Lee M. Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 186. Pp. 508–524.
- Parvez A., Foster S. J. Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering*. 2015. Vol. 141. No. 4. 04014117.

23. Mansur M.A., Chin M.S., Wee T.H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression. *Journal of materials in civil engineering*. 1999. Vol. 11. No. 1. Pp. 21–29.

24. Mansur M.A., Chin M.S., Wee T.H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression. *Journal of materials in civil engineering*. 1999. Vol. 11. No. 1. Pp. 21–29.

25. He Y., Li Y., Jia J., Xu Q., He K. Effect of seawater dry-wet cycling on the durability of concrete repair materials. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2024. Vol. 13. No. 3. Pp. 402–415. DOI: 10.1080/21650373.2023.2279288

26. Islam S.M., Hussain R.R., Morshed M.A.Z. Fiber-reinforced concrete incorporating locally available natural fibers in normal-and high-strength concrete and a performance analysis with steel fiber-reinforced composite concrete. *Journal of composite materials*. 2012. Vol. 46. No. 1. Pp. 111–122.

27. Abbas Y.M., Iqbal Khan M. Fiber–matrix interactions in fiber-reinforced concrete: A review. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2016. Vol. 41. No. 4. Pp. 1183–1198. DOI: 10.1007/s13369-016-2099-1

28. Serdar M., Baričević A., Rukavina J.M., Pezer M., Bjegović D., Štirmer N. Shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete with recycled tyre polymer fibres. *International Journal of Polymer Science*. 2015. Vol. 2015.

29. Chorzepa M.G., Masud M., Yaghoobi A., Jiang H. Impact test: multi-scale fiber-reinforced concrete including polypropylene and steel fibers. *ACI Structural Journal*. 2017. Vol. 114. No. 6. Pp. 1429–1444.

30. Dyachuk E.V. To assess the strength of a reinforced concrete column reinforced with fiberglass [K ocenke prochnosti zhelezobetonnoj kolonny usilennoj stalefibrobetonom]. VIII International Student Construction Forum - 2023: Collection of reports of the VIII International Student Construction Forum - 2023, Belgorod, November 28, 2023. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. Pp. 28–31. (rus)

31. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures [Betonye i zhelezobetonnye konstrukcii]. The main provisions. Moscow: Ministry of Construction of Russia, Standartinform, 2019. (rus)

Information about the authors

Sharafutdinov, Linar A. PhD. E-mail: sh_linar@mail.ru. Kazan State Power Engineering University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya St., 51.

Dyachuk, Evgeny V. Postgraduate student. E-mail: evgenyi_00@mail.ru. Kazan State Power Engineering University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya St., 51.

Received 01.08.2025

Для цитирования:

Шарафутдинов Л.А., Дьячук Е.В. Оценка напряженного состояния железобетонных опор технологической эстакады, усиленных сталефибробетоном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 3. С. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-32-46

For citation:

Sharafutdinov L.A., Dyachuk E.V. Assessment of the stress state of reinforced concrete supports of a technological overpass reinforced with steel fiber concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 3. Pp. 32–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-32-46