

УДК 624.012.4-183.2, 624.044:539.384

Радайкин О.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: olegxxii@mail.ru

Шарафутдинов Л.А. – студент

E-mail: sh_linar@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости
изгибаемых железобетонных элементов,
усиленных сталефибробетонной «рубашкой»,
на основе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS»**

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы ставилось определение прочности, жёсткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной «рубашкой», на всех этапах нагружения при варьировании наиболее значимых геометрических, физических, кинематических и силовых параметров.

Результаты. Проведён многофакторный численный эксперимент с применением компьютерного моделирования в ПК «ANSYS». Выполнено сравнение полученных результатов с данными физического эксперимента других авторов, что послужило проверкой на адекватность предложенной компьютерной модели. Получены оптимальные значения для процента армирования стальной фиброй и толщины «рубашки».

Выводы. Установлено, что наиболее близки к результатам опытных данных расчеты с введением в ПК «ANSYS» криволинейных диаграмм деформирования бетона, предложенные авторами ранее [1-2] для изгибаемых элементов из обычного железобетона. При этом сталефибробетонная «рубашка» увеличивает несущую способность до 3,9 раза, жесткость до 8,26 раза.

Ключевые слова: усиление, сталефибробетон, изгибаемый элемент, компьютерное моделирование, численный эксперимент.

В ходе эксплуатации зданий и сооружений из железобетона их несущие конструкции подвергаются различного рода воздействиям – агрессии всевозможных сред, силовым нагрузкам, температурным и т.д. Все это приводит к неизбежному накоплению дефектов и повреждений и, как следствие, снижению эксплуатационных свойств конструкций. Кроме того, при реконструкции возможны увеличение нагрузок, изменение их характера действия и длительности. Всё перечисленное во многих случаях вызывает необходимость в усилении железобетонных конструкций, а использование для этих целей наиболее экономичных методов и материалов является актуальной задачей. В этой связи весьма перспективным является применение сталефибробетона (СФБ), имеющего повышенные прочность и трещиностойкость в сравнении с обычным бетоном. Подтверждением эффективности его использования служат настоящие исследования авторов о работе изгибаемых железобетонных элементов, усиленных СФБ «рубашками». Для этого во внимание принят ряд наиболее значимых факторов, влияние которых на работу рассматриваемых элементов оценено в ходе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS» с применением специально разработанной методики, позволяющей проводить нелинейный расчет конструкций на основе полных диаграмм деформирования материалов, включая предложенные в работах [1-2]. Важно также отметить, что нормативная инженерная методика расчёта усиления железобетонных конструкций вышеуказанным способом в литературе, как показал её анализ, отсутствует. Это дополнительно повышает значимость данных научных изысканий, лежащих в русле создания такой методики.

Согласно предложенной методике компьютерного моделирования, работа стальной фибры учитывалась путём осреднения свойств дисперсного армирования и бетонной матрицы – с помощью экспериментальных диаграмм деформирования СФБ [3, 4] (аналитическое описание которых будет предложено в следующих публикациях авторов). В

соответствии с этим бетонная и сталефибробетонная часть изгибаемых элементов моделировалась объёмными конечными элементами типа Solid-65 с критерием прочности Вильяма-Варнаке [5]. Продольная и поперечная арматура – стержневыми конечными элементами типа Beam / 2 node 188 с критерием прочности Мизеса. Грузовые и опорные пластины – объёмными конечными элементами Solid / Brick 8 node 185. Таким образом, КЭ-модель базового образца – усиленного изгибаемого элемента в виде шарнирно опёртой балки – показана на рис. 1 (в силу симметрии задачи рассмотрена только левая половинка балки).

Для моделирования совместной работы «рубашки» и бетона использовались контактные конечные элементы типа Target 170 и Contact 174 с коэффициентом трения 0,95 [3] и характером контакта Bonded («связанный»). Также между опорной площадкой и бетоном образца моделировался контакт с коэффициентом трения 0,45 [СНиП II-22-81] и характером Rough («грубый»).

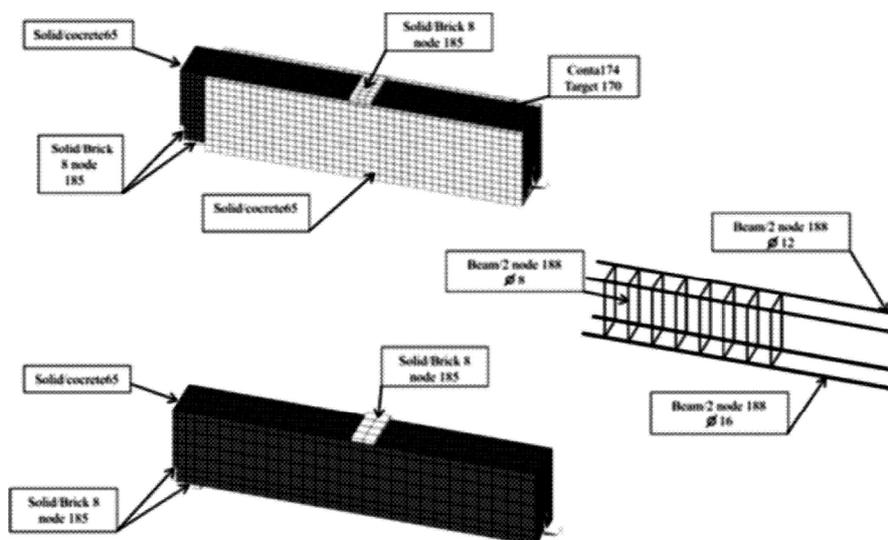


Рис. 1. Конечно-элементная модель железобетонной шарнирно опёртой балки, усиленной сталефибробетонной «рубашкой» (показана левая половинка симметричной балки)

Оценка достоверности методики моделирования выполнена путем сравнения результатов численного и физического [3] экспериментов для трех образцов-балок:

- тестовой № 1 – железобетонной без усиления;
- тестовой № 2 – бетонной с усилением СФБ «рубашкой»;
- базовой – железобетонной с усилением СФБ «рубашкой».

При этом предыстория нагружения усиленных балок не учитывалась с тем допущением, что до момента усиления они не были подвержены каким-либо воздействиям.

Далее для краткости под экспериментом будем подразумевать данные физических исследований из работы других авторов [3], а под численным экспериментом – собственные результаты компьютерного моделирования с учётом варьирования различных факторов влияния.

Геометрические параметры, схемы армирования и приложения нагрузок для рассматриваемых балок представлены на рис. 2. Класс бетона их изготовления принят В25 (С20/25), класс арматуры – А400.

На рис. 3 приведены графики зависимости прогиба от нагрузки для всех трёх образцов, полученных численно по предложенной методике моделирования и экспериментально [3]. На опытных кривых наблюдаются два характерных участка работы армированных образцов-балок, описываемых соответственно восходящими и ниспадающими ветвями графиков (для балки без усиления ниспадающая ветвь отсутствует). При этом ниспадающие ветви численным путём получить не удалось и хорошее совпадение теоретических и экспериментальных кривых наблюдается только до стадии возникновения трещин (в связи с этим методика моделирования требует усовершенствования, этому будут посвящены последующие публикации авторов) Тем не

менее, как показано ниже, это не повлияло на совпадение конечных результатов при оценке прочности и трещиностойкости балок.

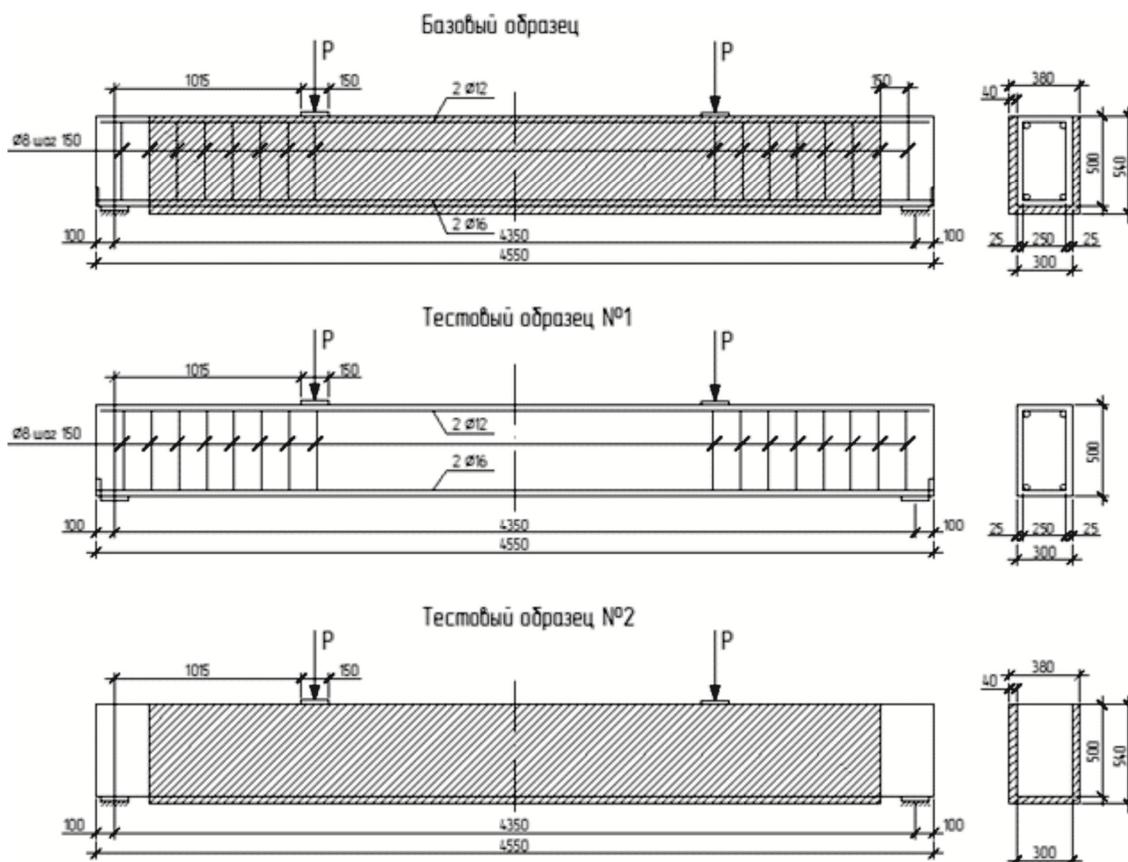


Рис. 2. Геометрические параметры и схема нагружения калибровочных балок

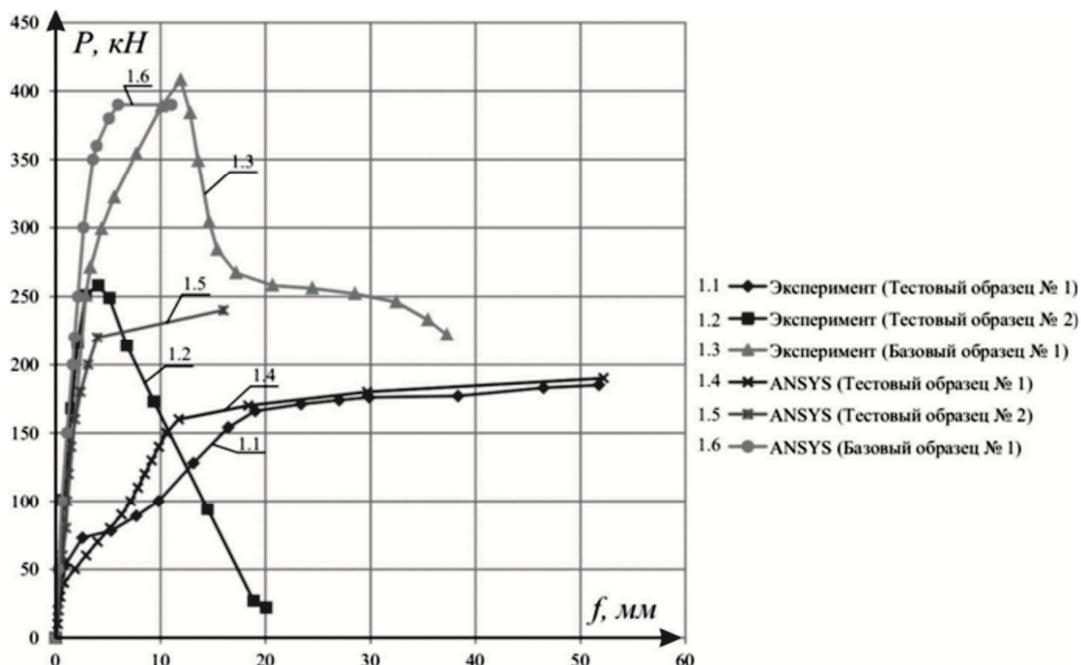


Рис. 3. Сравнение графиков «Прогиб-нагрузка» для трех калибровочных балок

Так, нагрузка появления первой трещины для тестовой балки № 1 составила $P_{cr} = 45$ кН, что на 10 % меньше полученной экспериментальным путем. Разрушающая нагрузка

составила $P_{ult}=190$ кН, что совпадает с результатами опыта. Образование трещины для тестовой балки № 2 произошло при $F_{crc}=230$ кН, по результатам опыта $F_{crc}=250$ кН – расхождение составляет 8 %. Разрушение бетонной тестовой балки № 2 произошло при $F_{ult}=240$ кН, по результатам эксперимента $F_{ult}=258$ кН, что на 6,9 % выше. Нагрузка образования трещины для базовой балки составила $F_{crc}=380$ кН, что на 10 % больше полученной опытным путем. Разрушение железобетонной базовой балки произошло при $F_{ult}=390$ кН, по результатам экспериментальных данных – $F_{ult}=410$ кН. Расхождение составляет 4,8 %.

Таким образом, полученные данные подтверждают работоспособность предложенной методики, поэтому она была применена для дальнейших исследований.

При составлении программы численного эксперимента для изучения были выбраны наиболее значимые параметры, влияющие на прочность, трещиностойкость и жесткость изгибаемых элементов. Их наименование и диапазон изменения приведены в табл. 1, программа численных исследований – в табл. 2 и на рис. 4 (всего рассмотрено 20 балок). При этом, как и прежде, предыстория нагружения усиленных балок не учитывалась с тем допущением, что до момента усиления они не были подвержены каким-либо воздействиям.

При учете процента содержания фибр была принята за основу работа [4], в которой рассмотрено влияние процента содержания фибр на прочностные и деформационные характеристики СФБ. По ней построены диаграммы деформирования СФБ при разных процентах армирования и введены в ПК «ANSYS» при расчете.

Таблица 1

Исследуемые параметры

№ п/п	Варьируемые параметры			Количество образцов
	Параметры	Обозначение	Диапазон	
1.	Пролёт, м	l	$3,55 \leq l \leq 5,55$	3
2.	Высота сечения, мм	h	$440 \leq h \leq 640$	3
3.	Толщина рубашки из СФБ, мм	δ	$30 \leq \delta \leq 50$	3
4.	Вид нагрузки	P, q	Сосредоточенная, распределённая	2
5.	Продольная растянутая арматура, %	μ_s	$0 \leq \mu_s \leq 0,6$	3
6.	Продольная сжатая арматура, %	μ_s'	$0 \leq \mu_s' \leq 0,15$	2
7.	Класс бетона по прочности на сжатие, МПа	B	$15 \leq B \leq 45$	3
8.	Диаграмма деформирования для бетона « σ - ε »	-	EN 1992-1-1-2009: - криволинейная; - параболически-прямоугольная; - билинейная; СП 63.13330.2012: - криволинейная (с учётом рекомендаций [1-2]) - двухлинейная; - трехлинейная.	6
9.	Процент фибрового армирования, %	μ_{fb}	$1 \leq \mu_{fb} \leq 3$	3

В результате расчетов были определены несущая способность F_{ult} , прогибы до потери несущей способности, напряжения в стержнях на каждом этапе нагружения. Результаты расчета представлены в табличной (табл. 3) и графической форме (рис. 5).

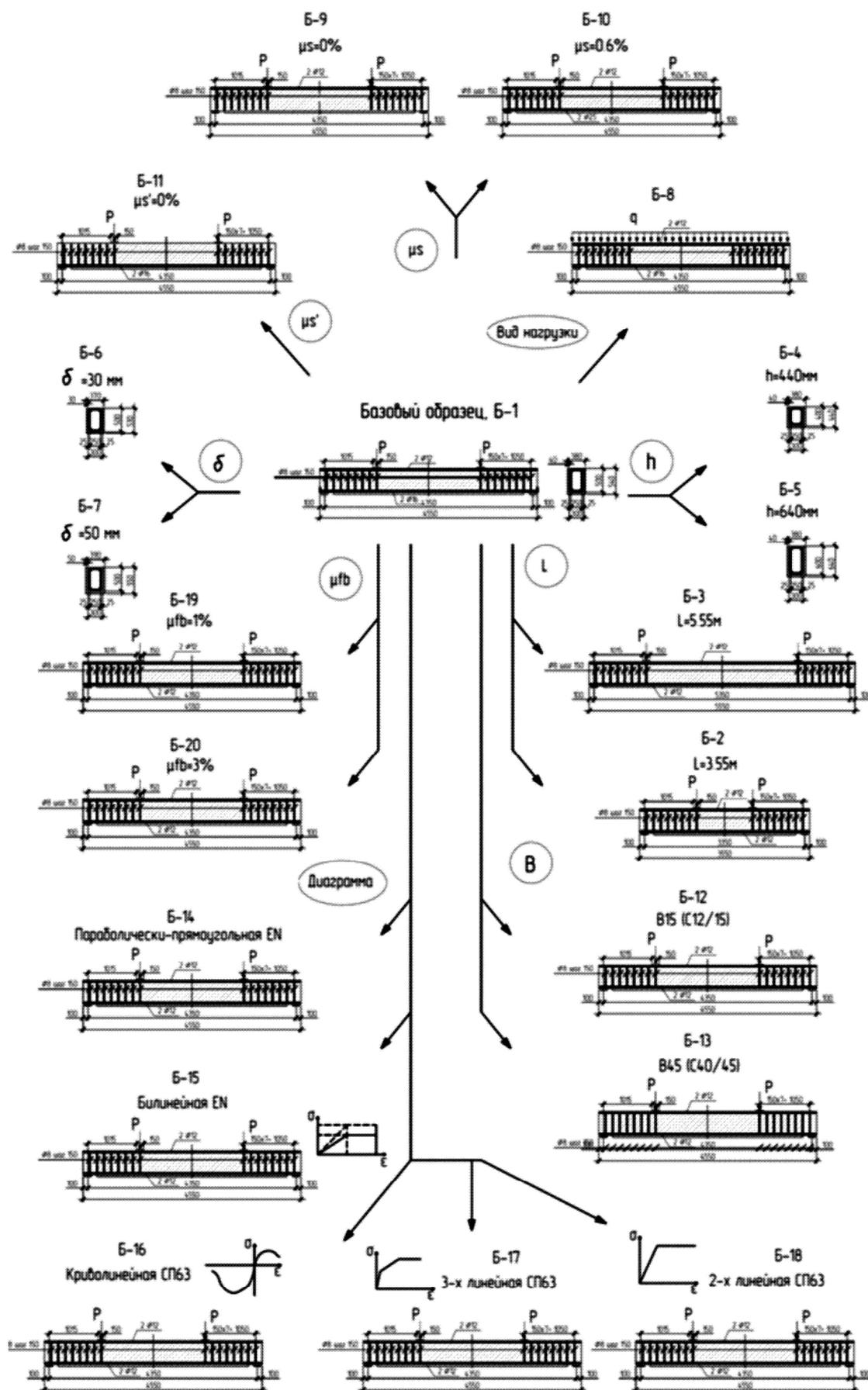


Рис. 4. Информационная схема программы численного эксперимента

Таблица 2

Программа численного исследования

Серия	Факторы								
	l , м	h , м	δ , мм	Нагрузка	μ_s , %	μ'_s , %	B , МПа	Диаграмма	μ_b , %
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Б-1	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	1*	2,5
Б-2	3,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	1	2,5
Б-3	5,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	1	2,5
Б-4	4,55	0,44	40	«Р»	0,2	0,15	B25	1	2,5
Б-5	4,55	0,64	40	«Р»	0,2	0,15	B25	1	2,5
Б-6	4,55	0,54	30	«Р»	0,2	0,15	B25	1	2,5
Б-7	4,55	0,54	50	«Р»	0,2	0,15	B25	1	2,5
Б-8	4,55	0,54	40	«q»	0,2	0,15	B25	1	2,5
Б-9	4,55	0,54	40	«Р»	0	0,15	B25	1	2,5
Б-10	4,55	0,54	40	«Р»	0,6	0,15	B25	1	2,5
Б-11	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0	B25	1	2,5
Б-12	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B15	1	2,5
Б-13	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B45	1	2,5
Б-14	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	2*	2,5
Б-15	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	3*	2,5
Б-16	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	4*	2,5
Б-17	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	5*	2,5
Б-18	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	6*	2,5
Б-19	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	1	1
Б-20	4,55	0,54	40	«Р»	0,2	0,15	B25	1	3

1* – криволинейная; 2* – параболически-прямоугольная диаграмма; 3* – билинейная диаграмма по Еврокоду EN 1992-1-1-2009; 4* – криволинейная (с учётом рекомендаций [1-2]); 5* – трехлинейная; 6* – двухлинейная по СП 63.13330.2012.

Таблица 3

Результаты численного исследования

Серия	$P_{cr,c,b}$			$P_{cr,c,fb}$			P_{ult}		
	P , кН	σ_s / \max МПа	f , мм	P , кН	σ_s / \max МПа	f , мм	P , кН	σ_s / \max МПа	f , мм
Б-1	140	26,7	0,94	380	472,5	5,1	390	591,7	11,04
Б-2	120	27,5	0,53	340	530	4,16	344	628	13,11
Б-3	130	29,8	1,39	230	333,9	3,33	253	629,2	19,29
Б-4	80	24,96	1,1	320	567,81	13,27	320,9	593,45	18,91
Б-5	200	27,3	0,79	440	529,38	4,06	460	627,46	12,92
Б-6	130	18,43	0,86	230	514,85	1,96	240,8	627,06	7,77
Б-7	130	18,44	0,86	350	610,85	9,47	350	628,63	17,9
Б-8	130	26,8	0,74	430	500,6	7,32	430	591,32	11,72
Б-9	130	-	0,94	250	-	4,56	250,03	-	11,68
Б-10	160	28,28	1,13	440	481,54	7,72	445	626,47	10,6
Б-11	130	28,88	0,9	370	530	4,97	390	628,73	11,71
Б-12	140	30,48	1,12	230	548,4	3,97	230,1	629,8	15,41
Б-13	120	14,57	0,69	450	600,35	4,34	450,9	629,82	18,63
Б-14	140	42,73	1,55	240	382,19	4,24	250,3	629,6	10,83
Б-15	140	589	2,27	-	-	-	140	624,37	4,61
Б-16	120	17,65	0,78	280	352,3	2,9	320,4	611,1	11
Б-17	130	29,54	0,91	230	225,6	2,09	250	590	10
Б-18	140	46,24	1,7	220	515,67	3,4	231,9	628,4	8,45
Б-19	120	17,6	0,79	340	611	8,58	340,9	621	13,04
Б-20	140	27,9	1,01	230	530	2,83	230,7	627,3	10,98

$P_{cr,c,b}$ – нагрузка появления трещин в бетоне, $P_{cr,c,fb}$ – нагрузка появления трещин в СТФ «рубашке»

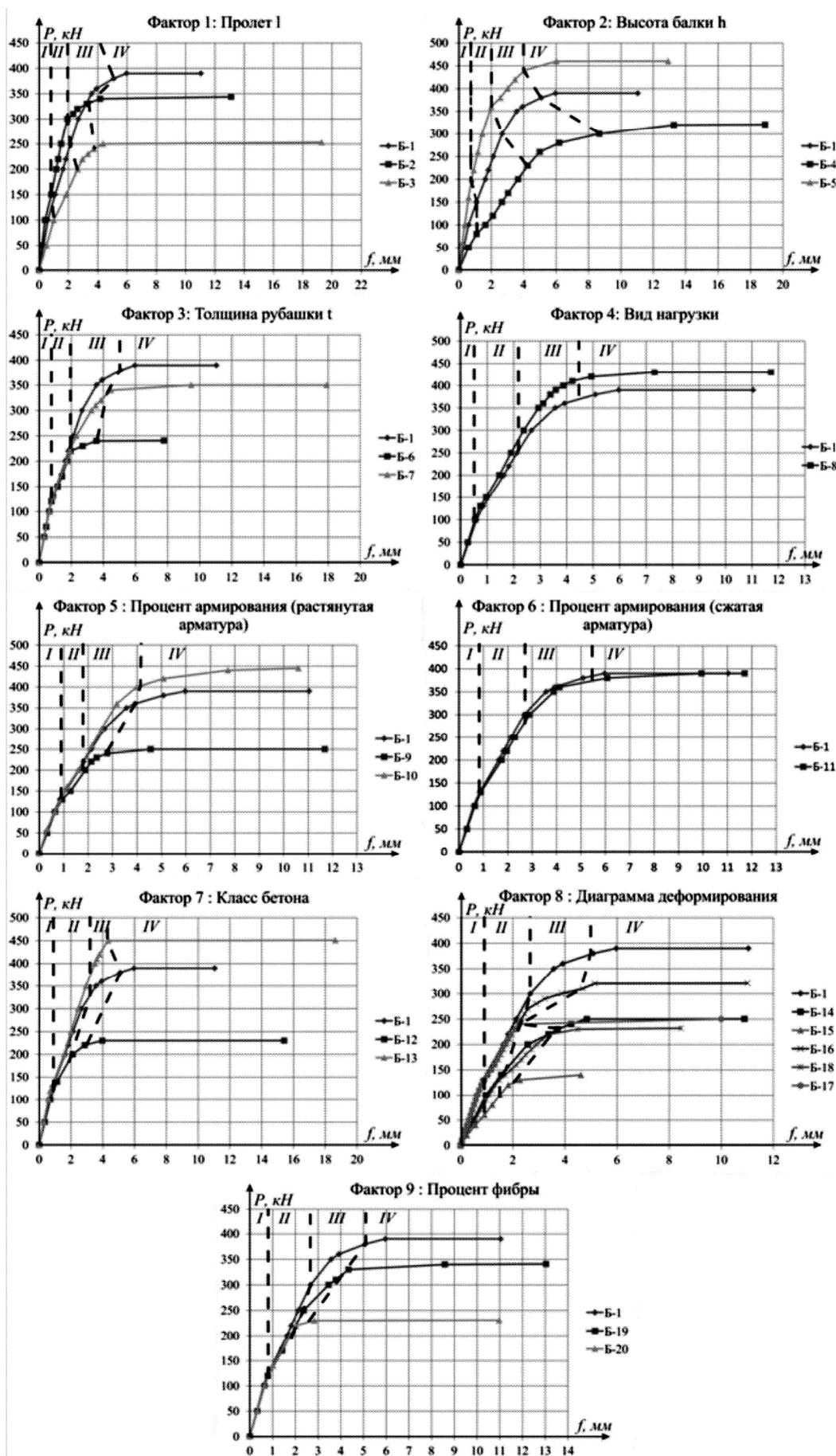


Рис. 5. Сравнение графиков «Прогиб-нагрузка»

Установлено, что для всех рассмотренных балок, за исключением балки Б-15, разрушение произошло по нормальному сечению вследствие достижения продольной арматуры временного сопротивления разрыву, что обусловлено малым процентом армирования. При этом в работе усиленных балок выделены 4 характерные стадии (показаны на рис. 5):

I – упругая работа – линейная зависимость между внешними и внутренними усилиями, заканчивается стадией Ia, при которой эпюра напряжений в растянутой зоне бетона искривляется;

II – неупругая работа – появление и развитие псевдопластических деформаций в бетоне (основной части балки) вследствие микротрещинообразования, дальнейшее накопление повреждений в материале – нарушение линейной зависимости;

III – появление и развитие видимых трещин в СТФ «рубашке»;

IV – стадия разрушения – потеря несущей способности балки при достижении предела текучести арматуры.

Общие выводы

1. Разработана методика компьютерного моделирования в ПК «ANSYS» изгибаемых железобетонных элементов, усиленных стелефибробетонной «рубашкой», с учётом нелинейных свойств бетона и арматуры, развития трещин в бетоне, а также возможного нарушения контакта между СФБ «рубашки» и балкой. Достоверность методики подтверждена сравнением расчётных и экспериментальных данных [3]: отличие разрушающей нагрузки P_{ult} и нагрузки появления первых трещин P_{crc} для тестовых и базовой балок не превысило 10 %. С применением предложенной методики проведён масштабный многофакторный численный эксперимент с учётом варьирования девяти наиболее значимых геометрических, физических, кинематических и силовых факторов.

2. Установлено, что СФБ «рубашка» увеличивает несущую способность до 3,9 раза, жесткость до 8,26 раза.

3. Для рассмотренных в программе численных исследований балок разрушение происходило по нормальным сечениям (за исключением балки Б-15), вследствие достижения продольной арматуры временного сопротивления разрыву, что обусловлено малым процентом армирования.

4. При равномерно распределенной нагрузке несущая способность балок получилась выше на 10,2 % по сравнению с сосредоточенно приложенной нагрузкой.

5. Наиболее близки к результатам опытных данных расчеты с введением в ПК «ANSYS» криволинейных диаграмм деформирования бетона, предложенные авторами ранее [1-2] для изгибаемых элементов из обычного железобетона.

6. Толщина СФБ «рубашки» до уровня нагрузки $P_{crc,b}$ – соответствующего появлению трещин в бетоне балки – не влияет на жесткость конструкции. Оптимальный размер толщины «рубашки» равен 40 мм, при которой прочность балки увеличивается в 1,63 и 1,11 раз в сравнении с толщиной равной 30 и 50 мм соответственно.

7. Оптимальное армирование стальной фибры в «рубашке» составляет 2,5 %, при котором прочность балки увеличивается в 1,15 и 1,7 раз по сравнению с армированием 3 % и 1 % соответственно.

Оптимальные значения процента армирования фиброй и толщины «рубашки» выбраны как экстремум функции $P_{ult}(\mu_{fb})$ и $P_{ult}(\delta)$.

Список библиографических ссылок

1. Карпенко Н. И., Соколов Б. С., Радайкин О. В. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах // Строительство и реконструкция. 2012. № 2. С. 10–16.

2. Карпенко Н. И., Соколов Б. С., Радайкин О. В. Анализ и совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 25–27.
3. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete // Cement and concrete composites. 2010. № 9. P. 731–739.
4. Maroliya M. K. Tensile behavior of reactive powder concrete containing steel fibres and silica fume // Engineering research and development. 2012. № 4. P. 58–61.
5. Vasudevan G., Kothandaraman S., Azhagarsamy S. Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling // Strength of materials. 2013. P. 149–162.
6. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels // Composites. 2014. P. 199–207.
7. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. // Cement and concrete research. 2015. P. 24–34.
8. Симаков В. Д., Никитин Г. П. Компьютерное моделирование оголовка железобетонной колонны в ПК «ANSYS». Казань, 2015. 27 с.
9. Определение диаграммы состояния бетона для расчета в ANSYS // CAE-CUBE.RU: интернет-изд. 2015. URL: <http://cae-cube.ru/opredeleniye-diagrammy-sostoyaniya-betona.html> (дата обращения: 05.01.2017).
10. Определение оптимальных параметров расчета бетона в ANSYS // CAE-CUBE.RU: интернет-изд. 2015. URL: <http://cae-cube.ru/opredeleniye-optimalnykh-parametrov-rascheta-betona.html> (дата обращения: 05.01.2017).

Radaikin O.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: olegxxii@mail.ru

Sharafutdinov L.A. – student

E-mail: sh_linar@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**By evaluating the strength, hardness and fracture toughness
of bent reinforced-concrete elements, strengthened concrete of steel fiber «jacket»
on the basis of computer modeling in PC «ANSYS»**

Abstract

Problem statement. The purpose of the work poses particular strength, hardness and fracture toughness of bent reinforced-concrete elements, strengthened concrete of steel fiber «jacket» at all stages of loading by varying the most important geometrical, physical, kinematic and power parameters.

Results. Conducted multivariate numerical experiment with the use of computer simulation in the PC «ANSYS». A comparison of the results with the experimental data of other authors, which served as a test of the adequacy of the proposed computer model. «Shirt» The optimal values for the percentage of reinforcement steel fiber and thickness.

Conclusions. It was found that the most similar to the results of calculations of the experimental data with the introduction of PC «ANSYS» curved concrete deformation diagrams, proposed earlier by the authors [1-2] for bent elements of conventional concrete. FRCC (fiber reinforced cementitious composites) «jacket» increases the bearing capacity of up to 3,9 times to 8,26 times the stiffness.

Keywords: strengthening, fiber reinforced cementitious composites, bendable elements, computer simulation, numerical experiment.

References

1. Karpenko N. I., Sokolov B. S., Radaykin O. V. To improve the concrete stress-strain diagram for determining the moment of cracking and damaging moment in flexural concrete elements // *Building and reconstruction*. 2012. № 2. P. 10–16.
2. Karpenko N. I., Sokolov B. S., Radaykin O. V. Analysis and improvement of curved concrete deformation diagrams for the calculation of reinforced concrete structures on the deformation model // *Journal of Industrial and Civil Construction*. 2013. № 1. P. 25–27.
3. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete // *Cement and concrete composites*. 2010. № 9. P. 731–739.
4. Maroliya M. K. Tensile behavior of reactive powder concrete containing steel fibres and silica fume // *Engineering research and development*. 2012. № 4. P. 58–61.
5. Vasudevan G., Kothandaraman S., Azhagarsamy S. Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling // *Strength of materials*. Puducherry. 2013. P. 149–162.
6. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels // *Composites*. 2014. P. 199–207.
7. Tiberti G., Minelli F., Plizzari G. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. // *Cement and concrete research*. 2015. P. 24–34.
8. Simakov V. D., Nikitin G. P. Computer modeling tip reinforced concrete columns in the PC «ANSYS». Kazan. 2015. 27 p.
9. Determination of the phase diagram for the concrete calculation in ANSYS // CAE-CUBE.RU: internet-edit. 2015. URL: <http://cae-cube.ru/opredeleniye-diagrammy-sostoyaniya-betona.html> (reference date: 05.01.2017).
10. Determination of the optimal parameters of concrete calculation in ANSYS // CAE-CUBE.RU: internet-edit. 2015. URL: <http://cae-cube.ru/opredeleniye-optimalnykh-parametrov-rascheta-betona.html> (reference date: 05.01.2017).