

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-34-45

**\*Шарафутдинов Л.А., Маннанов Р.М.**

Казанский государственный энергетический университет

\*E-mail: sh.\_linar@mail.ru

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С УЧЁТОМ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние дефектов и повреждений на напряженно-деформированное состояние, прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок. На основе компьютерного моделирования в программных комплексах ANSYS и Лира-САПП проведён многофакторный численный эксперимент. Рассмотрены следующие факторы влияния: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, скол бетона в сжатой зоне, уменьшение площади арматуры, локальное снижение прочности бетона, наличие нормальных трещин при разных процентах продольного армирования, отслоение лежачих бетонных плит, изменение класса бетона. Верификация компьютерной модели проведена путём сравнения результатов, полученных численно, с данными натурного испытания аналогичных балок.

Для каждого фактора выполнена оценка влияния на прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок. Установлено, что к начальным дефектам в виде нормальных трещин в середине пролёта более чувствительны жёсткость и прочность балок с более низким процентом армирования. Глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне практически не влияет на исследуемые показатели. Изменение прочностных характеристик бетона на глубину 20 мм по периметру сечения (при коррозии бетона) значительно сказывается на нагрузке трещинообразования, при этом прочность и жёсткость уменьшается незначительно.

**Ключевые слова:** численный эксперимент, компьютерное моделирование, несущая способность, повреждение, дефект

**Введение.** Расчет железобетонных конструкций с учетом дефектов и повреждений имеет большую актуальность в инженерной практике при обследовании зданий и сооружений. Дефекты и повреждения могут возникнуть как в процессе эксплуатации конструкций, так и из-за воздействия различных внешних факторов, таких как климатические условия, недостаточное качество материалов и т.д. Проведение расчетов с учетом дефектов и повреждений позволяет определить реальную несущую способность конструкции, учитывая ее состояние. Это позволяет оценить риск аварийных ситуаций, связанных с разрушением конструкций, и принять меры по предотвращению аварий.

В нормативной литературе СП 349.1325800.2017 «Конструкции бетонные и железобетонные. Правила ремонта и усиления» и СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» прописаны требования, что «оценку остаточной несущей способности конструкций следует устанавливать на основании поверочных расчетов, с учетом имеющихся дефектов и повреждений, а также фактических размеров конструкции и характеристик бетона и арматуры, в соответствии с общими правилами по СП 63.13330». Однако, отсутствуют четкие методики и аналитические формулы для оценки несущей способности конструкций с учётом различных дефектов и

повреждений. Имеются лишь приближённые эмпирические коэффициенты, так, например, в СП 349.1325800.2017 при усилении конструкций под нагрузкой выше 65 % расчетного значения несущей способности рекомендуется расчетные характеристики бетона и арматуры усиления умножать на коэффициенты  $\gamma_{br1}=0,9$  и  $\gamma_{sr1}=0,9$  соответственно. В ГОСТ Р 59402-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Проектирование усиления конструкций для пропуска тяжеловесных транспортных средств» приведены «рекомендации по учету дефектов и повреждений железобетонных конструкций пролетных строений мостовых сооружений», однако, учёт большей части дефектов (например, вертикальных трещин, глубокой коррозии, повреждения бетона в виде силовых сколов и т.д.) сводится к необходимости проведения натурных испытаний, либо полного исключения элемента из работы конструкции.

С учётом выше сказанного, исследования, направленные на оценку влияния дефектов и повреждений на напряженно-деформированное состояние, прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок, являются актуальными. Что подтверждается наличием исследований других авторов направленных: на оценку несущей способности железобетонных изгибаемых элементов с начальными трещинами [1–5] и с местной низкой прочностью бетона [6], анализ влияния выявленных дефектов строительства на

усилия в элементах каркаса и на несущую способность монолитных железобетонных конструкций [7], исследование влияния циклов замораживания и оттаивания на несущую способность элементов железобетонных конструкций при внецентренном сжатии [8–12], на влияние коррозионных повреждений на несущую способность железобетонных элементов [13, 14].

Один из методов расчёта конструкций, позволяющий учесть дефекты и повреждения, это метод конечных элементов. Для оценки влияния

дефектов и повреждений на напряженно-деформированное состояние, прочность, трещиностойкость и жёсткость железобетонных балок выбраны два программных комплекса ANSYS и Лира-САПР.

**Методика компьютерного моделирования.** В ПК ANSYS использована ранее разработанная и верифицированная методика [15], КЭ-модель балки представлена в виде шарнирно опёртой балки на рис. 1, в силу симметрии задачи рассмотрена только левая половинка балки.

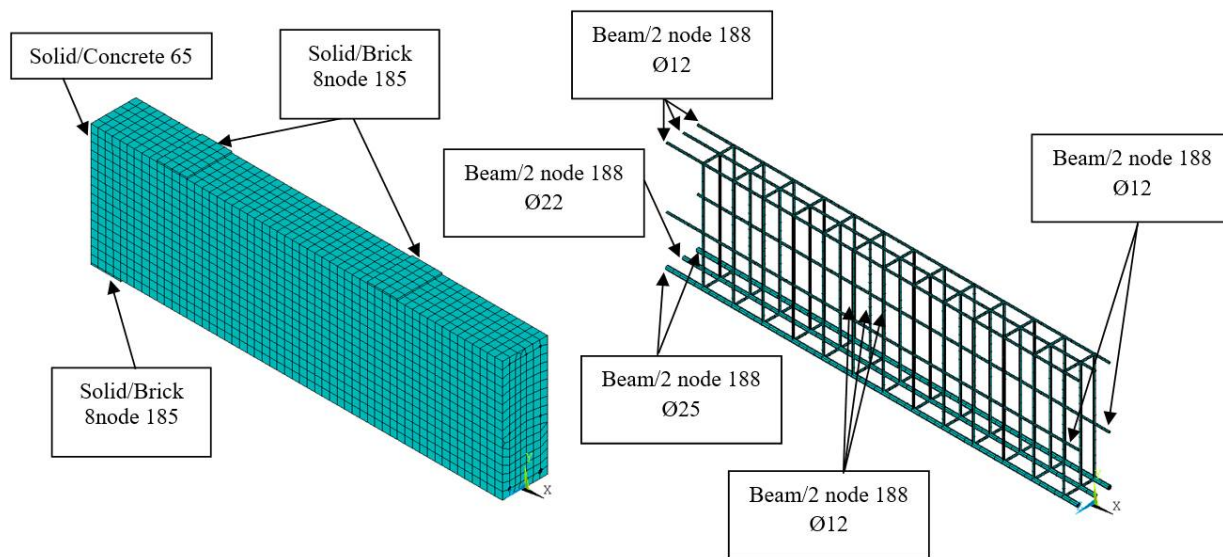


Рис. 1. Базовая модель балки в ПК «ANSYS»

В ПК Лира-САПР бетонная часть изгибаемых элементов моделировалась объёмными конечными элементами типа 231 и 233 (физически нелинейный параллелепипед и прямая треугольная призма). Продольная арматура моделировалась объёмными конечными элементами типа 233. Для поперечной арматуры использовались

стержневые конечные элементы типа 210. Для бетона использована трёхлинейная диаграмма деформирования, для арматуры – двухлинейная диаграмма в соответствии с СП63.13330. КЭ-модель базового образца в Лира-САПР показана на рис. 2.

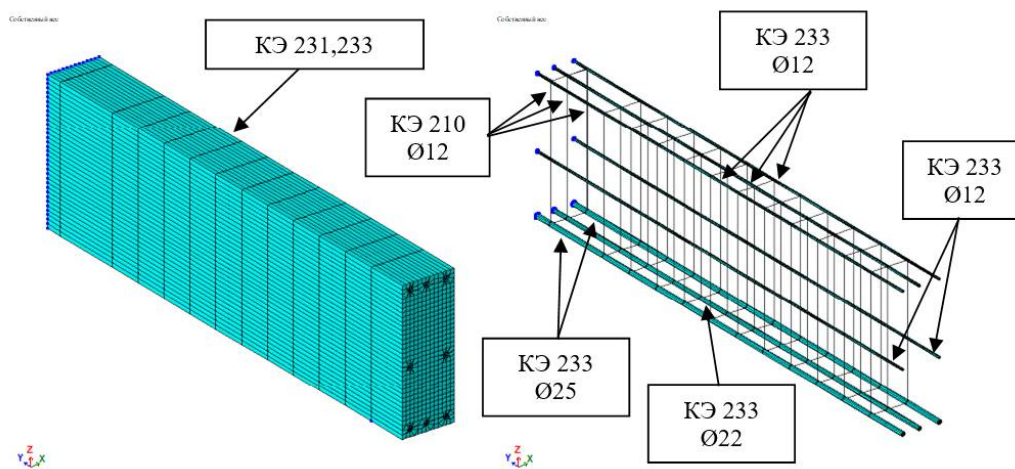


Рис. 2. Базовая модель балки в ПК Лира-САПР

Связь между арматурой и бетоном смоделирована стержневым конечным элементом типа 295, 296. Для учёта сцепления арматуры и

бетона использована экспериментальная диаграмма, полученная по исследованиям других авторов [16].

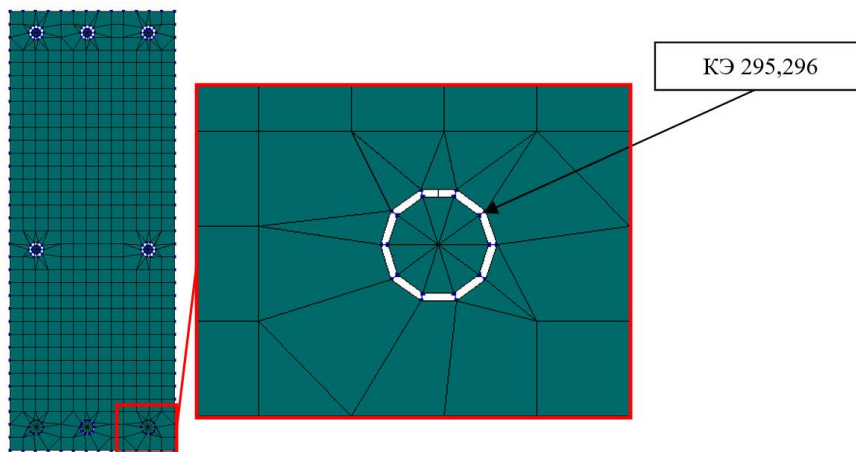


Рис. 3. Моделирование сцепления арматуры и бетона

Верификация компьютерной модели в ПК Лира-САПР выполнена путём сравнения результатов численного и физического [17] экспериментов для балки марки Б-3. На рис. 4 приведены

графики зависимости прогиба от нагрузки для образца, которые получены численно по предложенной методике моделирования и экспериментально.

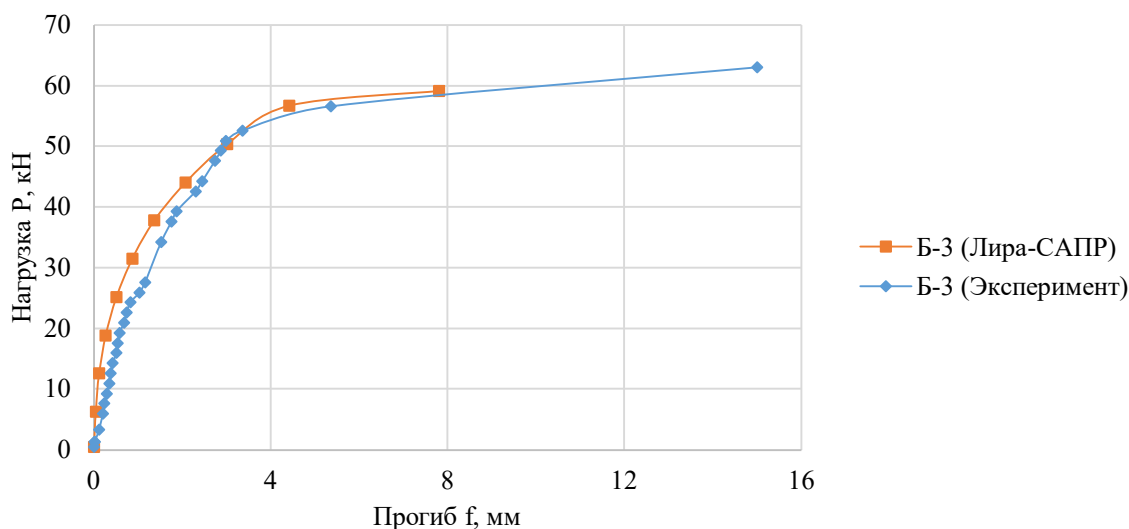


Рис. 4. Сравнение графиков «прогиб-нагрузка» для калибровочной балки

Так, нагрузка появления первой трещины для калибровочной балки составила  $P_{crс} = 8,5$  кН, что на 7 % больше полученной экспериментальным путем,  $P_{crс,exp} = 7,93$  кН. Разрушающая нагрузка составила  $P_{ult} = 62,5$  кН, что на 1 % меньше полученной по результатам опыта,  $P_{ult,exp} = 63,3$  кН. Жёсткость балки, полученная в Лире-САПР, при уровне нагрузки условно принятой за  $0,7P_{ult}$  составила 2,07 мм, что на 10 % меньше полученной по экспериментальным данным (2,3 мм).

Погрешность результатов для трещинообразования, прочности и жёсткости лежит в пределах 10 %. Таким образом, полученные данные подтверждают работоспособность предложенной методики, поэтому она была применена для дальнейших исследований.

**Основная часть.** При составлении программы численного эксперимента для изучения

были выбраны наиболее значимые параметры, влияющие на прочность, трещиностойкость и жёсткость изгибаемых элементов. Рассмотрены следующие факторы влияния: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, скол бетона в сжатой зоне, уменьшение площади арматуры, локальное снижение прочности бетона, наличие нормальных трещин при разных процентах продольного армирования, отслоение лещадок бетона, изменение класса бетона. Их наименование и диапазон изменения приведены в табл. 1, программа численных исследований – в табл. 2 (всего рассмотрена 30 балок).

Геометрические параметры, схема нагружения и армирование базовой балки показано на рис. 5.

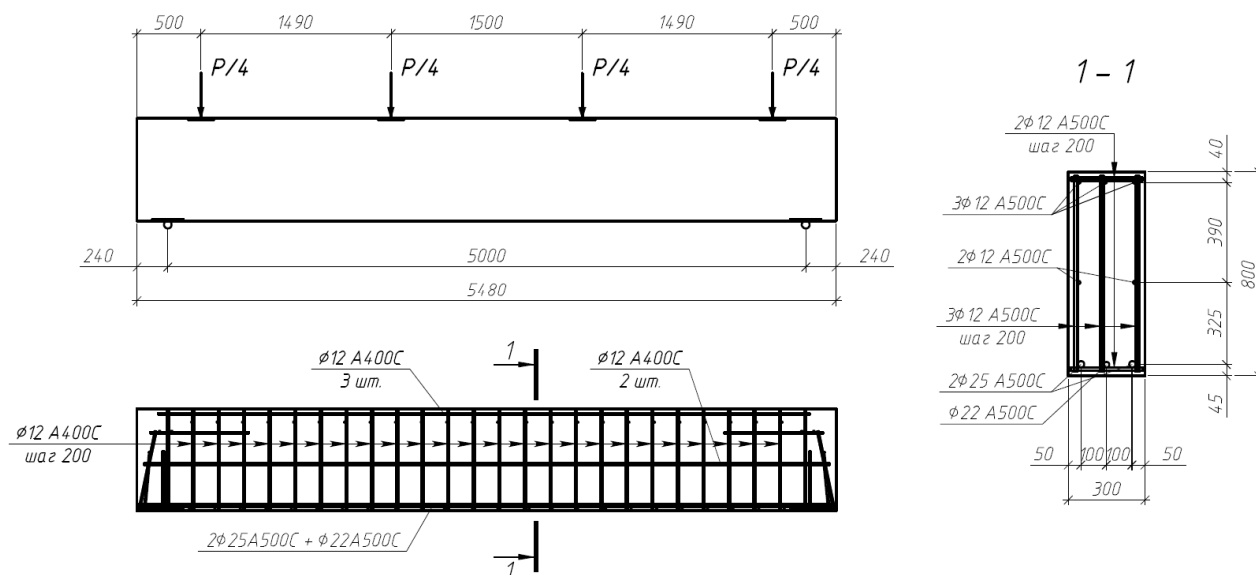


Рис. 5. Геометрические параметры и схема нагружения балки

Таблица 1

## Интервалы варьирования для исследуемых факторов влияния

№ п/п	Фактор	Балка	Базовый образец
Факторы дефектов и повреждений			
1.	Глубина разрушения бетона в растянутой зоне в середине пролёта (длиной 200мм вдоль балки) а, мм	0; 20; 80	0
2.	Длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне в середине пролёта (глубиной до 50мм) l, мм	0; 200; 400; 1000	0
3.	Скол бетона в сжатой зоне в балки различной глубины и ширины в середине пролёта (длиной 600 мм вдоль балки) Г×Ш, мм	без скола; 50×70; 50×300	без скола
4.	Уменьшение площади арматуры при коррозии, % от площади арматуры	0; 10; 20; 30; 40	0
5.	Локальное снижение прочности бетона на глубину 20 мм по периметру сечения балки при коррозии бетона	без коррозии; B15; B20; B25	без коррозии
6.	Положение нормальной начальной трещины длиной 0,8h <sub>0</sub>	без трещины; трещина в середине пролёта; трещина в 1/4 части балки	без трещины
7.	Отслоение лещадок бетона на глубину 50 мм	без отслоения; отслоение с одной боковой стороны на длину не более 1 метра; отслоение с двух боковых сторон на длину 1,7 метра	без отслоения
8.	Коэффициент армирования рабочей арматуры, μ <sub>s</sub> %, и наличие нормальной начальной трещины длиной 0,8h <sub>0</sub> в середине пролёта	0,1 % без трещины; 0,1 % с трещиной; 0,34 % без трещины; 0,34 % с трещиной; 1,66 % без трещины; 1,66 % с трещиной	0,1 %; 0,34 %; 1,66 %
Физические факторы			
9.	Класс бетона В, МПа	B15; B20; B22.5; B25; B30	B30
Программный комплекс			
10.	Программный комплекс	Лира-САПР, ANSYS	Лира-САПР

Таблица 2

## Программа численного исследования

Серия	Параметры								
	а, мм	l, мм	Г×Ш, мм×мм	Коррозия арматуры, %	Коррозия бетона	Трещина	Отслоение лещадок бе- тона	$\mu_s$ , %	В, МПа
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б-1	0	0	без*	0	без	без	без	0,5	В30
Б-2	20	0	без	0	без	без	без	0,5	В30
Б-3	80	0	без	0	без	без	без	0,5	В30
Б-4	0	200	без	0	без	без	без	0,5	В30
Б-5	0	400	без	0	без	без	без	0,5	В30
Б-6	0	1000	без	0	без	без	без	0,5	В30
Б-7	0	0	50x70	0	без	без	без	0,5	В30
Б-8	0	0	50x300	0	без	без	без	0,5	В30
Б-9	0	0	без	10	без	без	без	0,5	В30
Б-10	0	0	без	20	без	без	без	0,5	В30
Б-11	0	0	без	30	без	без	без	0,5	В30
Б-12	0	0	без	40	без	без	без	0,5	В30
Б-13	0	0	без	0	В25	без	без	0,5	В30
Б-14	0	0	без	0	В20	без	без	0,5	В30
Б-15	0	0	без	0	В15	без	без	0,5	В30
Б-16	0	0	без	0	В5	без	без	0,5	В30
Б-17	0	0	без	0	без	1/4*	без	0,5	В30
Б-18	0	0	без	0	без	1/2*	без	0,5	В30
Б-19	0	0	без	0	без	без	1*	0,5	В30
Б-20	0	0	без	0	без	без	2*	0,5	В30
Б-21	0	0	без	0	без	без	без	0,1	В30
Б-22	0	0	без	0	без	без	без	0,34	В30
Б-23	0	0	без	0	без	без	без	1,66	В30
Б-24	0	0	без	0	без	1/2	без	0,1	В30
Б-25	0	0	без	0	без	1/2	без	0,34	В30
Б-26	0	0	без	0	без	1/2	без	1,66	В30
Б-27	0	0	без	0	без	без	без	0,5	В25
Б-28	0	0	без	0	без	без	без	0,5	В22.5
Б-29	0	0	без	0	без	без	без	0,5	В20
Б-30	0	0	без	0	без	без	без	0,5	В15

Примечание: без\* – балка без скола бетона, без коррозии бетона, без трещин, без отслоения лещадок; 1/2\* – трещина в середине пролёта; 1/4\* – трещина в 1/4 пролёта балки; 1\* – отслоение с одной боковой стороны на длину не более 1 метра, 2\* – отслоение с двух боковых сторон на длину 1,7 метра.

В ходе компьютерного эксперимента все балки разрушились по нормальному сечению. В табл. 3 показаны основные результаты численного исследования. В качестве контрольных показателей были приняты: нагрузка трещинообразования ( $P_{cr,b}$ ); напряжения в растянутой арматуре ( $\sigma_{s,max}$ ), напряжения в сжатом бетоне ( $\sigma_{b,max}$ ), деформации в сжатой части бетона ( $\epsilon_b$ ), прогиб при нагрузке трещинообразования; прогиб при нагрузке условно принятой  $0,7P_{ult}$ ; нагрузка разрушения ( $P_{ult}$ ). Также для каждой балки получен график «прогиб-нагрузка» и показан на рис. 6 – 10.

Сравнение результатов расчёта для базовой балки Б-1 в ПК ANSYS с данными, полученными по предложенной методике в ПК Лири-САПР, показали практически одинаковые результаты для разрушающей нагрузки и прогибов. Разница разрушающей нагрузки лежит в пределах 3 %. Жёсткость балки на протяжении всего нагружения отличается незначительно, что видно из рис. 6. При уровне нагрузки, условно принятой за  $0,7P_{ult}$ , разница прогибов лежит в пределах 1 %. Значения нагрузки трещинообразования отличаются, так нагрузка появления первой трещины в ПК ANSYS составила  $P_{cr,b}=146,5$  кН, что на 15 % больше полученной в ПК Лири-САПР,  $P_{cr,b}=125,4$  кН.

Таблица 3

Результаты численного исследования

Серия	$P_{cr,b}$					$0,7P_{ult}$	$P_{ult}$ , кН
	$P$ , кН	$\sigma_{s,max}$ МПа	$\sigma_{b,max}$ МПа	$\epsilon_b$	$f$ , мм	$f$ , мм	
Б-1 (Лири-САПР)	125,4	17,36	-2,8112	0,000088816	0,94	12,54	1080,7
Б-1 (ANSYS)	147,5	17,64	-3,73	0,0000856	0,764	12,1	1052,8
Б-2	показатели не определялись, т.к.					12,66	1074,2
Б-3	образцы с начальным повреждением в растянутой зоне бетона					12,63	1055,6
Б-4	показатели не определялись, т.к.					12,66	1074,2
Б-5	образцы с начальным повреждением в растянутой зоне бетона					12,64	1072,0
Б-6	образцы с начальным повреждением в растянутой зоне бетона					12,61	1071,2
Б-7	123,2	17,16	-3,531	0,0000869	0,86	12,30	1036,0
Б-8	112,0	19,6	-3,18	0,000226	0,625	8,8	797,6
Б-9	124,4	18,6	-3,012	0,0000954	0,6264	12,46	1057,5
Б-10	116,5	17,16	-2,652	0,00008372	0,54808	13,36	1018,1
Б-11	113,1	17,069	-2,5856	0,000081507	0,53732	11,85	924,6
Б-12	107,5	16,416	-2,4096	0,000075936	0,51456	12,5	916,1
Б-13	122,1	17,985	-2,6487	0,000088835	0,58424	12,36	1038,6
Б-14	112,0	17	-2,51	0,0000843	0,553	12,56	1034,5
Б-15	100,8	15,75	-2,358	0,00007902	0,5202	12,54	1003,2
Б-16	61,6	11,385	-1,705	0,0000572	0,37455	11,92	938,3
Б-17	показатели не определялись, т.к.					12,21	1043,8
Б-18	образцы с начальной трещиной					8,87	851,9
Б-19	122,1	19,184	-3,3027	0,000097337	0,61803	12,44	1041,3
Б-20	113,1	15,857	-2,7775	0,000087668	0,57772	12,34	1016,9
Б-21	89,6	14,88	-2,072	0,00006512	0,4368	10,46	631,7
Б-22	105,3	16,074	-2,4158	0,000076234	0,50666	12,47	837,0
Б-23	219,2	22,275	-3,8475	0,000129735	0,85995	10,00	1517,4
Б-24	показатели не определялись, т.к.					5,93	408,5
Б-25	образцы с начальной трещиной					9,73	707,4
Б-26	образцы с начальной трещиной					7,77	1316,2
Б-27	113,1	17,574	-2,5856	0,000088577	0,58176	12,86	1014,3
Б-28	99,7	16,821	-2,314	0,00008277	0,54379	13,33	988,6
Б-29	88,5	15,326	-2,0619	0,000077262	0,51113	11,54	872,0
Б-30	65,0	14,326	-1,5718	0,0010788	0,4495	9,09	649,0

Примечание:  $P_{cr,b}$  – нагрузка появления трещин в бетоне,  $P_{ult}$  – нагрузка разрушения бетона.



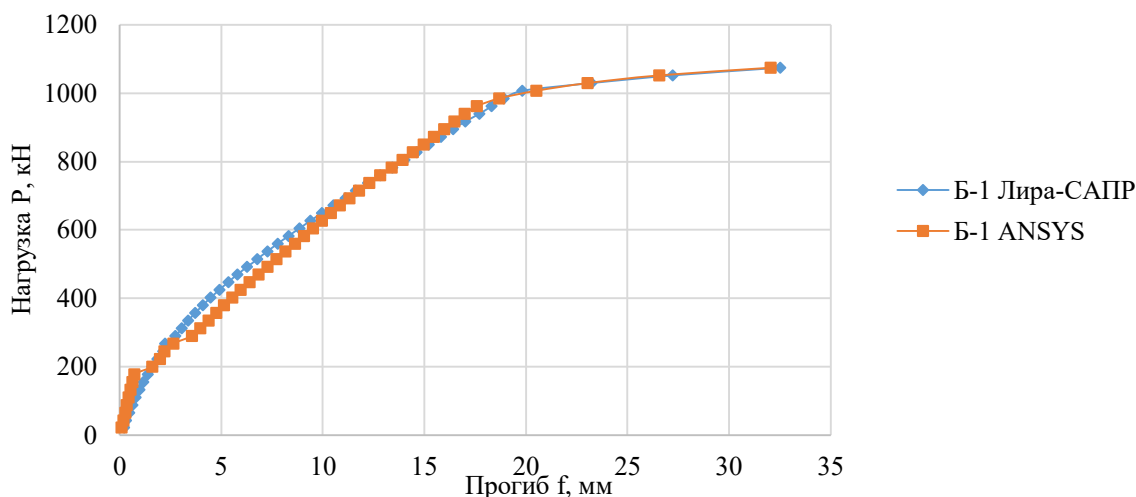


Рис. 6. Сравнение графиков «прогиб-нагрузка» в ПК ЛиРа-САПР и ANSYS

Установлено, что рассмотренные первые два фактора варьирования, а именно: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, практически не влияет на прочность, трещиностойкость и жёсткость балок (рис. 7, а).

Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении 50×70 (что составляет 1,4 % от площади сечения балки) незначительно влияет на

а)

прочность, трещиностойкость и жёсткость балок (рис. 7, б, балка Б-7). Уменьшение показателей в пределах 2–4 %. Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении 50×300 (что составляет 6,3 % от площади сечения балки) уменьшает несущую способность балки на 26 %, трещиностойкость на 10 %, жёсткость при нагрузке  $0,7P_{ult}$  на 33,3 % (рис. 7, б, балка Б-8).

б)

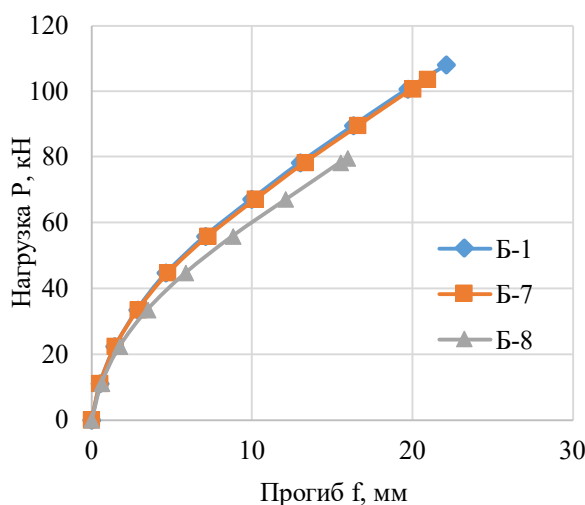
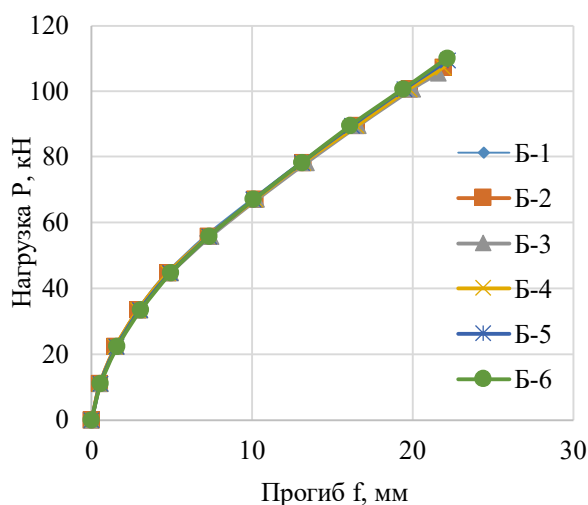


Рис. 7. График «Прогиб-нагрузка» для факторов варьирования:  
 а) глубина (Б-2,3) и длина (Б-4,5,6) разрушения бетона в растянутой зоне;  
 б) скол бетона в сжатой зоне

Уменьшение площади арматуры (при коррозии арматуры) с 0 до 40 % приводит к уменьшению прочности балки на 15 %, трещиностойкость на 14 %. В виду уменьшения нагрузки разрушения для каждой балки жёсткость при нагрузке  $0,7P_{ult}$  практически не изменяется, отслеживается заметное изменение жёсткости при нагрузке больше 30 кН (рис. 8, а).

Изменение прочностных характеристик бетона на глубину 20 мм по периметру сечения (при коррозии бетона) с В30 до В5 уменьшает прочность балки на 13 %, нагрузка трещинообразования уменьшается на 51 %, жесткость при нагрузке  $0,7P_{ult}$  на 8,3 %.

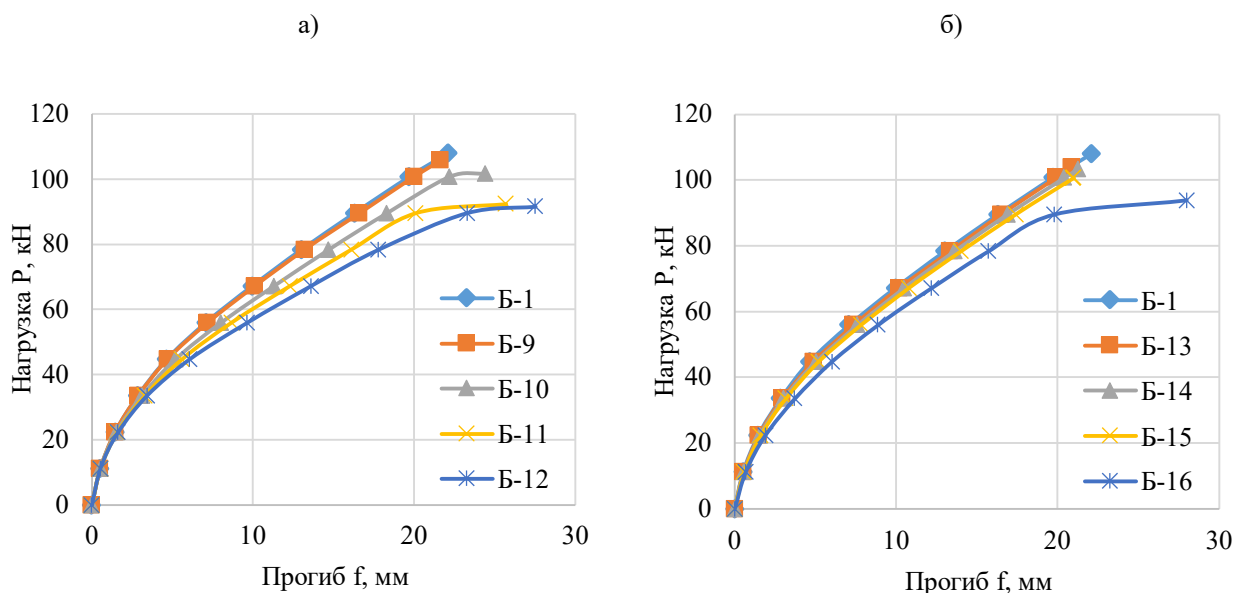


Рис. 8. График «Прогиб-нагрузка» для факторов варьирования:  
а) коррозия арматуры; б) коррозия бетона

Отслоения лещадок бетона на глубину 50 мм уменьшает прочность балки на 6 %, трещиностойкость на 10 %, и практически не сказывается на жёсткости, что видно по рис. 9, а.

а)

Уменьшение класса бетона с В30 до В15 приводит к уменьшению прочности балки на 40 %, трещиностойкость на 48 %, жёсткости при нагрузке  $0,7P_{ult}$  на 25 %.

б)

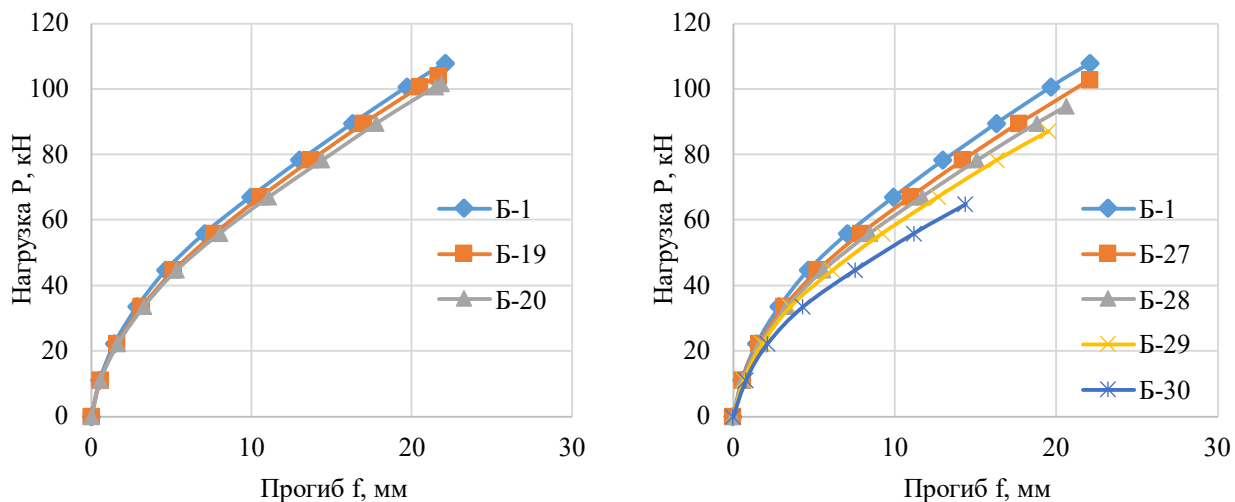


Рис. 9. График «Прогиб-нагрузка» для факторов варьирования:  
а) положение отслоения лещадок бетона на глубину 50 мм; б) класс бетона

Положение начальной нормальной трещины в середине пролёта значительно уменьшает прочность балки (на 21 %), в отличие от случая, когда трещина находится в  $\frac{1}{4}$  части пролёта, при котором уменьшение прочности достигает 3 %. Также значительно уменьшается жёсткость балки при нагрузке  $0,7P_{ult}$  в первом случае (на 33 %) и незначительно во втором (до 1 %) (рис. 10).

Дефект в виде начальной нормальной трещины был смоделирован для балок с разным коэффициентом армирования (от 0,1 % до 1,66 %).

Установлено, что при проценте армирования 0,1 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 35 %, жёсткости при нагрузке  $0,7P_{ult}$  на 50 %. При проценте армирования 0,34 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 15 %, жёсткости при нагрузке  $0,7P_{ult}$  на 25 %. При проценте армирования 0,5 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 21 %, жёсткости при нагрузке  $0,7P_{ult}$  на 33 %. При проценте армирования 1,66 % начальная нормальная трещина снижает прочность на 13 %, жёсткости при



нагрузке  $0,7P_{ult}$  на 30 %. Таким образом, к начальным дефектам в виде трещин более чувствительны жёсткость и прочность балок с более низким процентом армирования (рис. 10).

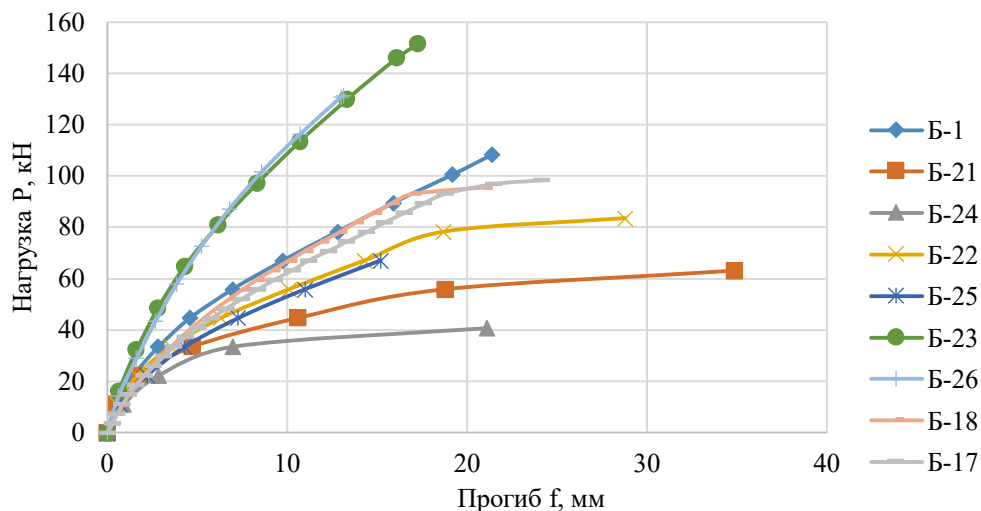


Рис. 10. Сравнение графиков «прогиб-нагрузка» для факторов варьирования коэффициент армирования рабочей арматуры,  $\mu_s\%$ , и наличие нормальной начальной трещины

### Выводы.

1. Разработана методика компьютерного моделирования в ПК ЛИРА-САПР с учётом нелинейных свойств бетона и арматуры, а также наличия начальных дефектов и повреждений. Достоверность методики подтверждена экспериментальными данными. С применением предложенной методики проведён масштабный многофакторный численный эксперимент с учётом варьирования десяти наиболее значимых факторов.

2. Результаты, полученные по предложенной методике, сопоставлены с результатами расчёта в ПК ANSYS. Для нагрузки разрушения и жёсткости получены практически идентичные данные (разница в пределах 3 %). Разница в трещинообразовании в пределах 15 %, что говорит от необходимости доработки компьютерной модели в ПК ANSYS и Лира-САПР.

3. Установлено, что рассмотренные первые два фактора варьирования, а именно: глубина и длина разрушения защитного слоя бетона в растянутой зоне, практически не влияет на прочность, трещиностойкость и жёсткость балок.

4. Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении  $50 \times 70$  (1,4 % от площади сечения балки) незначительно влияет на прочность, трещиностойкость и жёсткость балок. Скол бетона в сжатой зоне в балки с размерами в сечении  $50 \times 300$  (6,3 % от площади сечения балки) значительно влияет на несущую способность балки (уменьшение на 26 %) и жёсткость (при нагрузке  $0,7P_{ult}$  уменьшение на 33,3 %). Но незначительно на трещиностойкость (изменения в пределах 10 %).

5. Уменьшение площади арматуры (при коррозии арматуры) с 0 до 40 % приводит к уменьшению прочности балки на 15 %, трещиностойкости на 14 %. При этом жёсткость при нагрузке  $0,7P_{ult}$  практически не изменяется.

6. Изменение прочностных характеристик бетона на глубину 20 мм по периметру сечения (при коррозии бетона) с В30 до В5 значительно сказывается на нагрузке трещинообразования, которая уменьшается на 51 %. При этом прочность и жёсткость уменьшается незначительно, на 13 % и 8,3 % соответственно.

7. Наиболее невыгодное положение начальной трещины в середине пролёта, при котором прочность уменьшается на 21 %, жёсткость на 33 %.

8. К начальным дефектам в виде нормальных трещин в середине пролёта более чувствительны жёсткость и прочность балок с более низким процентом армирования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орлова М.А., Гнедина Л.Ю., Ибрагимов А.М. Оценка состояния железобетонных изгибаемых элементов с дефектами и повреждениями Часть 1. Экспериментальные исследования // Жилищное строительство. 2022. № 1-2. С. 28–34. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-28-33.

2. Орлова М.А., Гнедина Л.Ю., Ибрагимов А.М. Оценка состояния железобетонных изгибаемых элементов с дефектами и повреждениями. Часть 2. Метод расчета //

Жилищное строительство. 2022. № 3. С. 3–7. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-3-7.

3. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник ТГАСУ. 2015. №6 (53). С. 98–105.

4. Сафронов В.С., Антипов А.В., Хаустов А.В. Вероятностная оценка несущей способности поврежденной двутавровой железобетонной мостовой балки // Строительная механика и конструкции. 2019. № 3(22). С. 39–51.

5. Айдемиров К.Р., Агапов В.П. Исследование влияния трещин на несущую способность железобетонных плит с помощью вычислительного комплекса ПРИНС // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46, № 4. С. 143–154. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-4-143-154.

6. Тамразян А.Г. Исследование влияния местной низкой прочности бетона на несущую способность изгибаемых железобетонных балок // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 5, № 1. С. 3–14. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.3-14

7. Волков А.С., Дмитренко Е.А., Корсун А.В. Влияние дефектов строительства на несущую способность железобетонных конструкций монолитного каркасного здания // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2(29). С. 45–56.

8. Плюснин М.Г. Влияние циклов замораживания и оттаивания на несущую способность внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2(91). С. 30–35. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-30-35.

9. Hasan M., Okuyama H., Sato Ya., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles // Journal of Advanced Concrete Technology. 2004. Vol. 2 (1). Pp. 89–99. DOI: 10.3151/jact.2.89.

10. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during

the load process // Mechanics of Materials. 2019. Vol. 139 (8). DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103192.

11. Zhang Xuhui, Wand Lei, Zhang Jianren. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack // Cold Regions Science and Technology. 2017. Vol. 142. Pp. 17–24. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.07.004.

12. Попов В.М., Плюснин М.Г., Белов В.В., Хегай О.Н. Влияние армирования изгибаемых железобетонных элементов на их несущую способность в условиях переменного замораживания и оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4(99). С. 32–39. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-32-39.

13. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1, № 1. С. 46–54.

14. Раздобарина, Ю.А. Методика определения величины коррозионных повреждений при расчете железобетонных элементов по несущей способности // Академическая публицистика. 2019. № 6. С. 357–361.

15. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной «рубашкой» на основе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS» // Известия КГАСУ. 2017. №1(39). С. 111–120.

16. Гиздатуллин А.Р. Совместная работа полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях : дис.... канд. тех. наук. Казань, 2018. 190 с.

17. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. Усиление железобетонных балок сталефибробетоном с учетом предыстории нагружения // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 2. С. 57–65. DOI 10.33622/0869-7019.2023.02.57-65

#### Информация об авторах

**Шарафутдинов Линар Альфредович**, кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительство зданий и сооружений. E-mail: sh\_linar@mail.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, Казань, ул. Красносельская, д.51.

**Маннапов Раниль Мансурович**, магистрант кафедры энергообеспечения предприятий, строительство зданий и сооружений. E-mail: ranil.mannarov@yandex.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, Казань, ул. Красносельская, д.51.

Поступила 23.03.2024 г.

© Шарафутдинов Л.А., Маннапов Р.М., 2024

**\*Sharafutdinov L.A., Mannapov R.M.**

Kazan State Energy University

\*E-mail: sh.\_linar@mail.ru

## COMPUTER SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS TAKEN INTO ACCOUNT OF DEFECTS AND DAMAGE

**Abstract.** The article examines the influence of defects and damage on the stress-strain state, strength, crack resistance and rigidity of reinforced concrete beams. Based on computer modeling in the ANSYS and Lira-SAPR software packages, a multifactor numerical experiment was carried out. The following influencing factors are considered: the depth and length of destruction of the protective layer of concrete in the tensile zone, concrete spalling in the compressed zone, a decrease in the area of reinforcement, a local decrease in the strength of concrete, the presence of normal cracks at different percentages of longitudinal reinforcement, delamination of concrete flanges, a change in the class of concrete. The computer model was verified by comparing the results obtained numerically with data from full-scale testing of similar beams. For each factor, the impact on the strength, crack resistance and rigidity of reinforced concrete beams was assessed. It has been established that the rigidity and strength of beams with a lower percentage of reinforcement are more sensitive to initial defects in the form of normal cracks in the middle of the span. The depth and length of destruction of the protective layer of concrete in the tensile zone has practically no effect on the studied parameters. A change in the strength characteristics of concrete to a depth of 20 mm along the perimeter of the section (during concrete corrosion) significantly affects the cracking load, while the strength and rigidity decreases slightly.

**Keywords:** numerical experiment, computer modeling, load-bearing capacity, damage, defect.

### REFERENCES

1. Orlova M.A., Gnedina L.Y., Ibragimov A.M. Assessment of the condition of reinforced concrete bendable elements with defects and damages. Part 1. Experimental studies. [Ocenka sostoyaniya zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov s defektami i povrezhdeniyami CHast' 1. Eksperimental'nye issledovaniya] Housing construction. 2022. No. 1–2. Pp. 28–34. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-28-33 (rus)
2. Orlova M.A., Gnedina L.Y., Ibragimov A.M. Assessment of the condition of reinforced concrete bending elements with defects and damages. Part 2. Calculation method. [Ocenka sostoyaniya zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov s defektami i povrezhdeniyami. CHast' 2. Metod rascheta]. Housing construction. 2022. No. 3. Pp. 3–7. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-3-3-7 (rus)
3. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Stress-strain state of concrete bending elements with cracks [Eksperimental'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov s treshchinami]. Vestnik of Tomsk state university of architecture and building. 2015. No 6. Pp. 98–105. (rus)
4. Safronov V.S., Antipov A.V., Khaustov A.V. Probabilistic assessment of the bearing capacity of a damaged I-beam reinforced concrete bridge beam [Veroyatnostnaya ocenka nesushchej sposobnosti povrezhdennoj dvutavrovoj zhelezobetonnoj mostovoj balki]. Structural mechanics and structures. 2019. No. 3(22). Pp. 39–51. (rus)
5. Aidemirov K.R., Agapov V.P. Investigation of the carrying capacity of reinforced concrete slabs with cracks after their reinforcement with composite fabrics by the finite element method using the PRINS computer complex [Issledovanie vliyaniya treshchin na nesushchuyu sposobnost' zhelezobetonnyh plit s pomoshch'yu vychislitel'nogo kompleksa PRINS]. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2019. Vol. 46, No. 4. Pp. 143–154. DOI: 10.21822/2073-6185-201 (rus)
6. Tamrazyan A.G. Investigation of the Influence of Local Low Strength Concrete on the Bearing Capacity of Bending Reinforced Concrete Beams [Issledovanie vliyaniya mestnoj nizkoj prochnosti betona na nesushchuyu sposobnost' izgibaemyh zhelezobetonnyh balok]. Reinforced concrete structures. 2024. Vol. 5, No. 1. Pp. 3–14. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.3-14 (rus)
7. Volkov A.S., Dmitrenko E.A., Korsun A.V. The influence of construction defects on bearing capacity of reinforced concrete constructions of a frame monolithic building [Vliyanie defektov stroitel'stva na nesushchuyu sposobnost' zhelezobetonnyh konstrukcij monolitnogo karkasnogo zdaniya]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. № 2(29). Pp. 45–56. (rus)
8. Plyusnin, M.G. The impact of freeze-thaw cycles on the bearing capacity and strength deformation of polymerbetonic beams [Vliyanie ciklov zamorazhivaniya i ottaivaniya na nesushchuyu sposobnost' vnecentrenno szhatyh elementov zhelezobetonnyh konstrukcij]. Bulletin of Civil Engineers. 2022. № 2(91). Pp. 30–35. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-30-35 (rus)
9. Hasan M., Okuyama H., Sato Ya., Ueda T. Stress-strain model of concrete damaged by freezing

and thawing cycles. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004. Vol. 2 (1). Pp. 89–99. DOI: 10.3151/jact.2.89

10. Sun Ming, Xin Dabo, Zou Chaoying. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process. *Mechanics of Materials*. 2019. Vol. 139 (8). DOI: 10.1016/j.mechmat.2019.103192.

11. Zhang Xuhui, Wand Lei, Zhang Jianren. Mechanical behavior and chloride penetration of high strength concrete under freeze-thaw attack. *Cold Regions Science and Technology*. 2017. Vol. 142. Pp. 17–24. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.07.004

12. Popov V.M., Plyusnin M.G., Belov V.V., Hegai O.N. The effect of reinforcement of bent reinforced concrete elements on their bearing capacity in conditions of variable freezing and thawing [Vliyanie armirovaniya izgibaemykh zhelezobetonnnykh elementov na ih nesushchuyu sposobnost' v usloviyah peremennogo zamorazhivaniya i ottaivaniya]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2023. № 4(99). Pp. 32–39. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-32-39 (rus)

13. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Ductility of eccentrically compressed elements of rc frame damaged by corrosion under accidental impacts [Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnnykh vnecentrenno szhatykh elementov karkasov zdaniy pri korrozionnykh povrezhdeniyah v usloviyah osobyykh vozdeystviy]. *Reinforced concrete structures*. 2023. Vol. 1, No. 1. Pp. 46–54. (rus)

14. Razdobarina Yu.A. Methodology for determining the magnitude of corrosion damage in the calculation of reinforced concrete elements by bearing capacity [Metodika opredeleniya velichiny korrozionnykh povrezhdenij pri raschete zhelezobetonnnykh elementov po nesushchej sposobnosti]. *Akademicheskaya publicistika*. 2019. No. 6. Pp. 357–361. (rus)

15. Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. 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" [K ocenke prochnosti, zhestkosti i treshchinostojkosti izgibaemykh zhelezobetonnnykh elementov, usilennykh stalefibrobotonnoj «rubashkoj» na osnove komp'yuternogo modelirovaniya v PK «ANSYS»]. *News of the KSUAE*. 2017. №1(39). Pp. 111–120. (rus)

16. Gizdatullin A.R. Joint the work of polymer composite reinforcement with cement concrete in structures [Sovmestnaya rabota polimerkompozitnoj armatury s cementnym betonom v konstrukciyah : dis. kand. tekhn. nauk]: dis. candidate of technical sciences. *Kazan*. 2018. 190 p. (rus)

17. Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. Strengthening of reinforced concrete beams with steel fiber concrete taking into account the prehistory of loading [Usilenie zhelezobetonnnykh balok stalefibrobotonom s uchedom predystorii nagruzheniya]. *Industrial and Civil Engineering*. 2023. No. 2. Pp. 57–65. DOI 10.33622/0869-7019.2023.02.57-65 (rus)

#### *Information about the authors*

**Sharafutdinov, Linar A.** PhD, Assistant professor. E-mail: sh. linar@mail.ru. Kazan State Energy University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51.

**Mannapov, Ranil M.** Master student. E-mail: ranil.mannapov@yandex.ru. Kazan State Energy University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51.

---

*Received 23.03.2024*

#### **Для цитирования:**

Шарафутдинов Л.А., Маннапов Р.М. Компьютерное моделирование железобетонных балок с учётом дефектов и повреждений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №5. С. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-34-45

#### **For citation:**

Sharafutdinov L.A., Mannapov R.M. Computer simulation of reinforced concrete beams taken into account of defects and damage. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 5. Pp. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-34-45