

СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И. А. Терехов, А. В. Ямалов

Терехов Иван Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; тел.: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru;

Ямалов Александр Викторович, аспирант, научный сотрудник отдела научных исследований и разработки конструктивных систем, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, г. Москва, Российская Федерация; тел.: + 7 (495) 482-97-52; e-mail: yamalov@me.com

В процессе эксплуатации зданий вследствие внешних воздействий и внутренних процессов деградации материалов строительных конструкций происходит снижение их несущей способности, рост деформаций, прогибов и кренов как отдельных элементов, так и здания в целом. Расположенные вблизи дефекты, свидетельствующие об ограниченно работоспособном состоянии конструкции, совместно могут более негативно сказаться на ней и в конкретный период времени усугубить ее техническое состояние, например, вызвать переход из ограниченно работоспособного состояния в аварийное. В статье рассмотрено влияние парных дефектов на примере изгибаемого элемента – железобетонной балки.

Ключевые слова: железобетон, несущая способность, дефект, техническое состояние, зона влияния.

COMBINED INFLUENCE OF DEFECTS ON THE LOAD-LOADING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

I. A. Terekhov, A. V. Yamalov

Terekhov Ivan Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Building Structures, Buildings and Structures Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru;

Yamalov Aleksandr Viktorovich, post-graduate student, Researcher of Scientific Research and Development of Structural Systems Department, Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (495) 482-97-52; e-mail: yamalov@me.com.

During the operation of buildings, due to external influences and internal degradation processes of building materials, their bearing capacity decreases, deformations, deflections and tilts of both individual elements and the building as a whole increase. Nearby defects indicating a structure's limited operational status can collectively have a more negative impact on it and, over a specific period of time, worsen its technical condition, for example, causing a transition from a limited operational state to an emergency state. The article examines the effect of paired defects using the example of a bending element - a reinforced concrete beam.

Keywords: reinforced concrete, bearing capacity, defect, technical condition, influence zone.

Введение

Здания проектируются для конкретных условий эксплуатации. Однако возможное изменение этих условий приводит к появлению дефектов, которые влияют на техническое состояние конструкций. Учитывая, что строительство промышленных предприятий в нашей стране наиболее активно проводилось в 30-е годы прошлого века, в послевоенное время, а массовая жилая застройка после 1955 года, то для большого количества эксплуатируемых зданий с железобетонными, преимущественно сборными, конструкциями срок безопасной эксплуатации близок к завершению [1–3].

Срок безопасной эксплуатации характеризуется способностью конструкций и зданий противостоять разрушению и потере устойчивости, то есть истечение возможности их перехода в аварийное техническое состояние [4–6], что может быть обусловлено первичными дефектами, деградацией материала, влиянием окружающей среды и т. д. [7–9].

В АО «ЦНИИПромзданий» была разработана методика определения допускаемых сроков безопасной эксплуатации [10].

В рамках методики возможен учет совместного влияния нескольких близко расположенных дефектов на одной конструкции, совместно влияющих на несущую способность [11].

В статье [12] были рассмотрены вопросы продолжительности периодов безопасной эксплуатации зданий с железобетонными конструкциями. По результатам анализа архивной базы данных, включавшей более 700 отчетов по определению технического состояния зданий, были установлены наиболее часто встречающиеся дефекты в отдельных конструкциях (табл. 1).

Дополнительно было определено количество парных дефектов, которые находятся на ограниченном участке и совместно влияют на несущую способность (табл. 1), что также подтверждает актуальность исследований [13–14]. Наибольшее

количество дефектов, в том числе парных, было выявлено для многопустотных и ребристых плит.

С целью подтверждения границ зоны влияния близко расположенных дефектов на несущую способность был рассмотрен более ответственный изгибаемый элемент – железобетонная балка.

Таблица 1

Количество дефектов в конструкциях

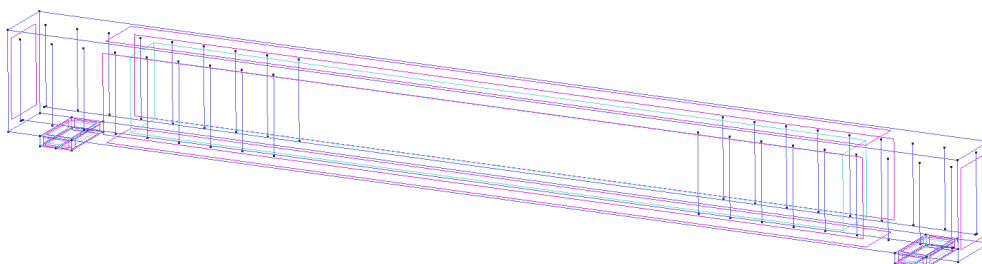
№	Наименование конструкции	Количество отчетов с конструкцией	Общее количество дефектов	Количество парных дефектов
1	2	3	4	5
1	Сборные железобетонные панели, включая бетонные блоки	123	291	32
2	Монолитные железобетонные стены	123	119	6
3	Монолитные железобетонные колонны	25	2	0
4	Сборные железобетонные колонны	146	30	4
5	Сборные железобетонные пустотные плиты	311	405	54
6	Сборные железобетонные ребристые плиты	299	407	57
7	Сборные железобетонные ригели	44	20	3
8	Сборные железобетонные стропильные балки	146	60	5
9	Сборные железобетонные фермы	8	1	0
10	Монолитные безбалочные перекрытия	93	47	4
11	Монолитные балочные перекрытия	21	22	3

Материалы и методы

Для проведения численных исследований была принята балка с расчетным пролетом $l_0 = 2,7$ м, сечением 200×300 мм, арматура $2\emptyset 14$ А500, бетон класса В15, с равномерно распределенной нагрузкой q .

Моделирование балки проводилось в программном комплексе ATENA (рис. 1), который позволяет проводить анализ прочности и деформативности железобетонных конструкций [15–17].

а)



б)

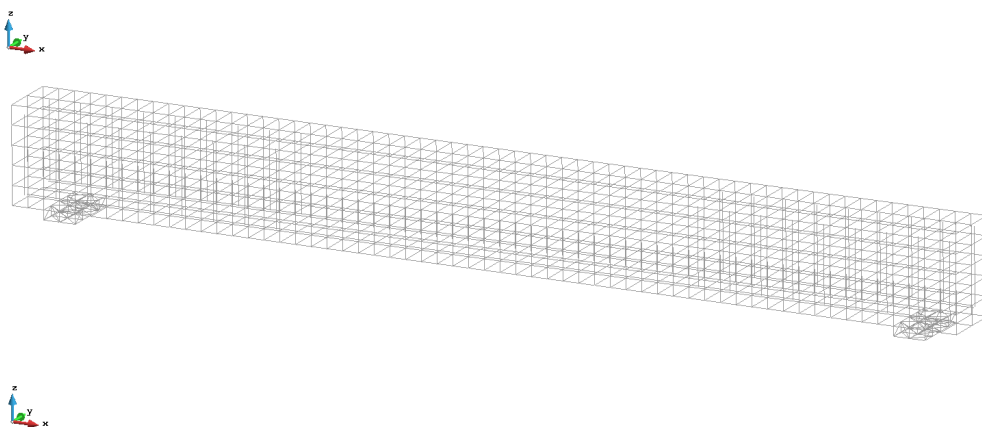


Рис. 1. Модель железобетонной балки в ПК ATENA:
а – геометрическая модель; б – конечно-элементная модель
(иллюстрация автора)

Fig. 1. Model of a reinforced concrete beam in ATENA PC:
а – geometric model; б – finite element model
(illustration by the author)

Бетон моделируется объемными конечными элементами, арматура – стержневыми, а их сцепление – с помощью специальных связей. Модель бетона, заложенная в программном комплексе ATENA, сочетает в себе уравнения теории пластичности (при сжатии) и механики разрушения (при растяжении). Комплекс также позволяет учитывать образование и развитие трещин.

Совместное влияние дефектов рассмотрено на следующих примерах:

- 1) уменьшение сечения арматуры в результате коррозии на 5 % – дефект А (рис. 2) [18, 19];
- 2) уменьшение сечения в сжатой зоне бетона на 5 % – дефект Б (рис. 3).

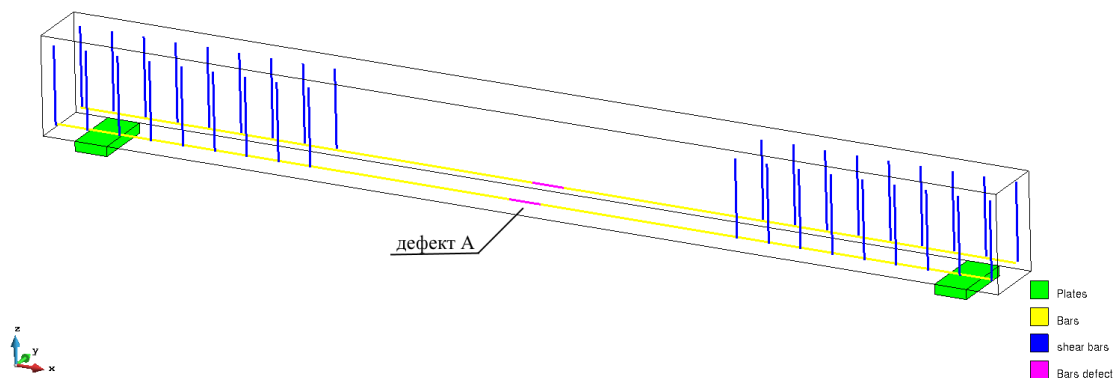


Рис. 2. Моделирование участка арматуры балки с коррозией (иллюстрация автора)
Fig. 2. Modeling of a section of beam reinforcement with corrosion (illustration by the author)

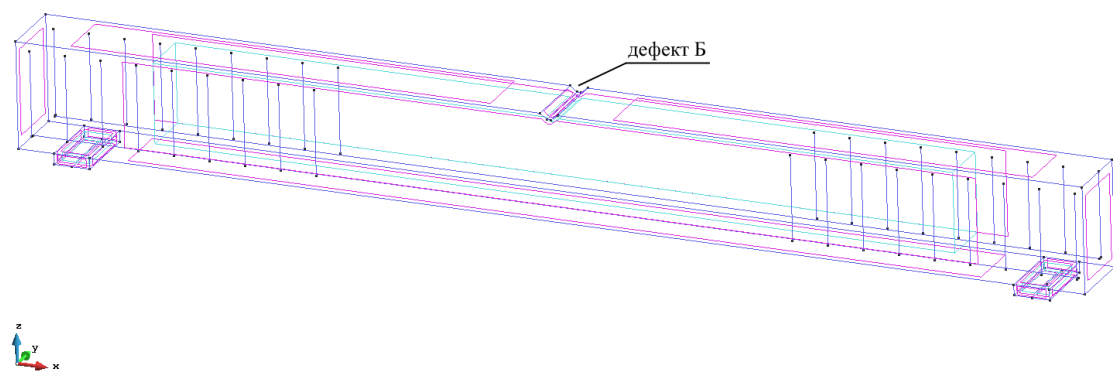


Рис. 3. Моделирование участка с уменьшением сечения в сжатой зоне (иллюстрация автора)
Fig. 3. Modeling of a section with a reduction in cross-section in the compressed zone (illustration by the author)

За несущую способность балки было принято предельное значение эквивалентной сосредоточенной силы, равное $N = q \cdot l_0$, которое определялось исходя из условия достижения в арматуре предела текучести.

Для объемной модели на первоначальном этапе было проведено сравнение предельного значения эквивалентной сосредоточенной силы,

определенной по методу предельных усилий по формулам, представленным в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции», а также по данным, полученным из ПК ATENA. Дефекты были заданы в середине пролета. Схема разрушения балки показана на рисунке 4.

Таблица 2

Несущая способность балок			
Расчетная ситуация	Несущая способность по СП 63.13330.2018, т	Несущая способность из ПК ATENA, т	Разница, %
Балка без дефектов	9,73	10,4	6,44
Балка с дефектом А	8,92	9,33	4,39
Балка с дефектом Б	9,12	10,07	9,43
Балка с дефектами А + Б	8,37	9,0	7,0

Из таблицы 2 видно, что разница не превышает 10 %, которая возникает ввиду применения криволинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры, заложенных в Eurocode 2:

Design of concrete structures. На основании этого можно сделать вывод о корректности принятой модели балки в ПК ATENA.

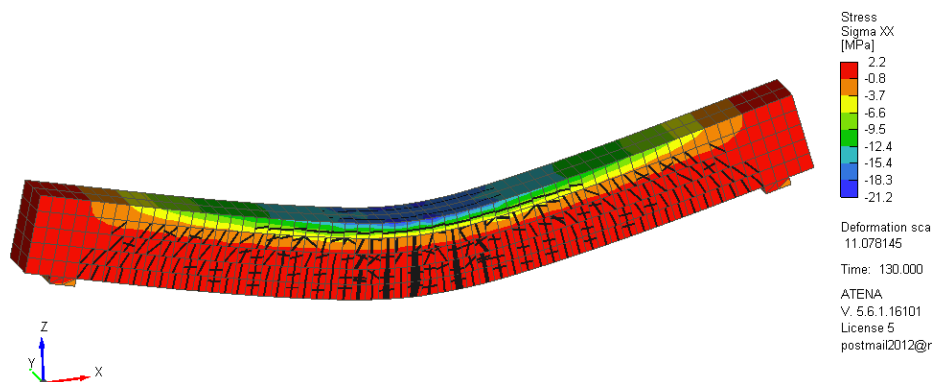


Рис. 4. Схема разрушения балки с парными дефектами в середине пролета (иллюстрация автора)
Fig. 4. Diagram of beam failure with paired defects in the middle of the span (illustration by the author)

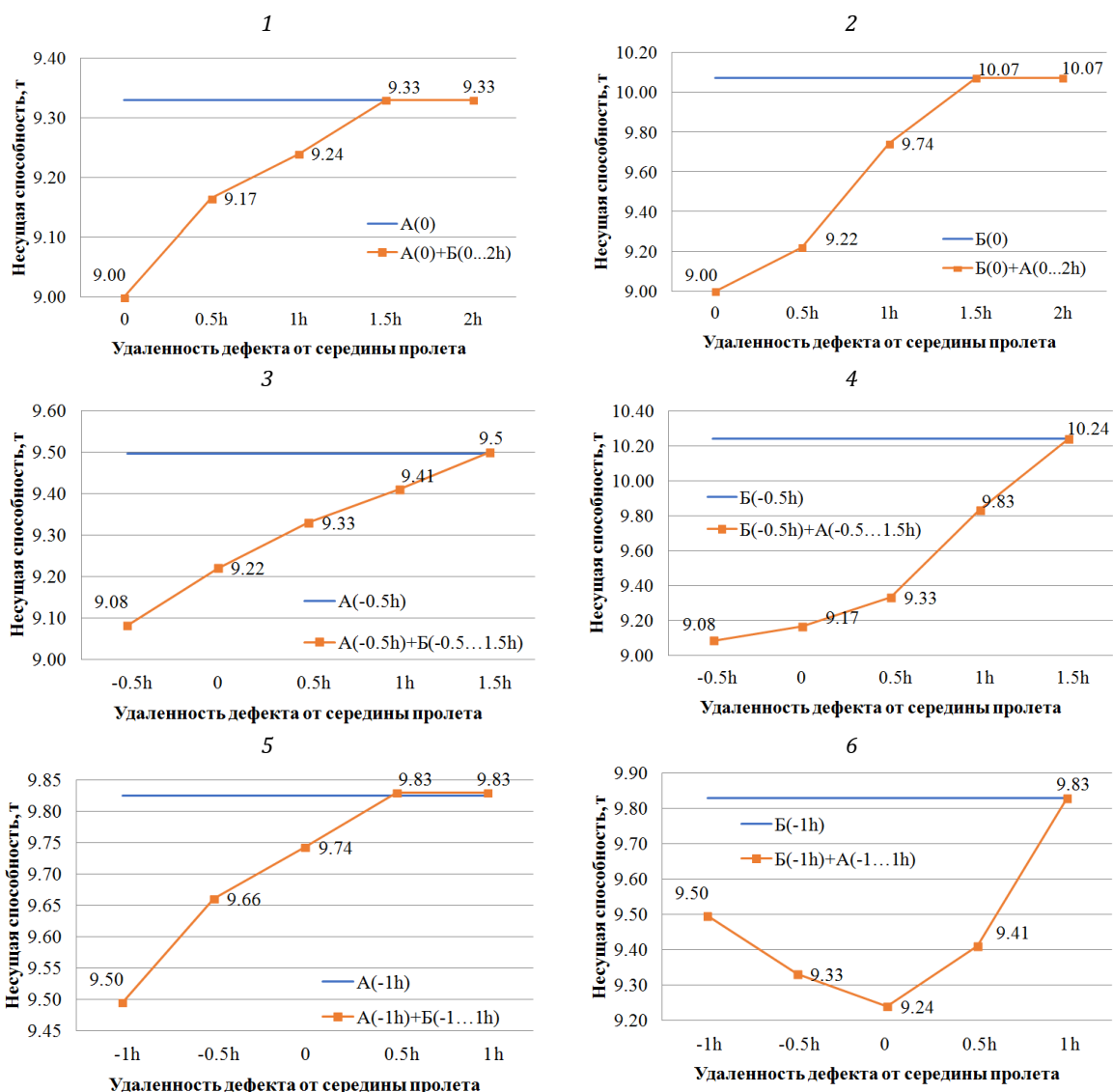


Рис. 5. Несущая способность балки с парным дефектом в зависимости от их удаленности:
1–6 – расчетные ситуации;

A – уменьшение сечения арматуры в результате коррозии на 5 %;
B – уменьшение сечения в сжатой зоне бетона на 5 %

(иллюстрация автора)

Fig. 5. Bearing capacity of a beam with a paired defect depending on their distance:

1–6 – design situations;

A – reduction of the reinforcement cross-section as a result of corrosion by 5 %;
B – reduction of the cross-section in the compressed zone of concrete by 5 %

(illustration by the author)

Результаты

В рамках исследований были рассмотрены следующие расчетные ситуации:

- 1) дефект А в середине пролета, дефект Б на расстоянии $0...2h$;
- 2) дефект Б в середине пролета, дефект А на расстоянии $0...2h$;
- 3) дефект А на расстоянии $-0,5h$ от середины пролета, дефект Б на расстоянии $-0,5...1,5h$;
- 4) дефект Б на расстоянии $-0,5h$ от середины пролета, дефект А на расстоянии $-0,5...1,5h$;
- 5) дефект А на расстоянии $-1,0h$ от середины пролета, дефект Б на расстоянии $-1,0...1,0h$;
- 6) дефект Б на расстоянии $-1,0h$ от середины пролета, дефект А на расстоянии $-1,0...1,0h$.

Графики несущей способности, приведенные на рисунке 5, были построены следующим образом. Сначала определялась несущая способность с одним дефектом, который был зафиксирован (горизонтальная линия на графике). Далее добавлялся

второй дефект, который удалялся на расстояние $2h$ с шагом $0,5h$, и строился график с двумя дефектами. Зоной влияния второго дефекта является расстояние, при котором несущая способность увеличивалась до значений с первым дефектом.

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние оказывают дефекты, расположенные по разные стороны от середины пролета. Зона влияния дефектов в расчетных ситуациях расположена на расстоянии $1,5-2,0h$.

На основании этого для стержневых железобетонных элементов за базовое значение участка суммирования дефектов предлагается принимать двукратное значение наибольшего размера поперечного сечения элемента, а для балок с большой высотой сечения ограничиться расстоянием не более $1,5$ м. Пример определения зоны суммирования дефектов представлен на рисунке 6 [20].

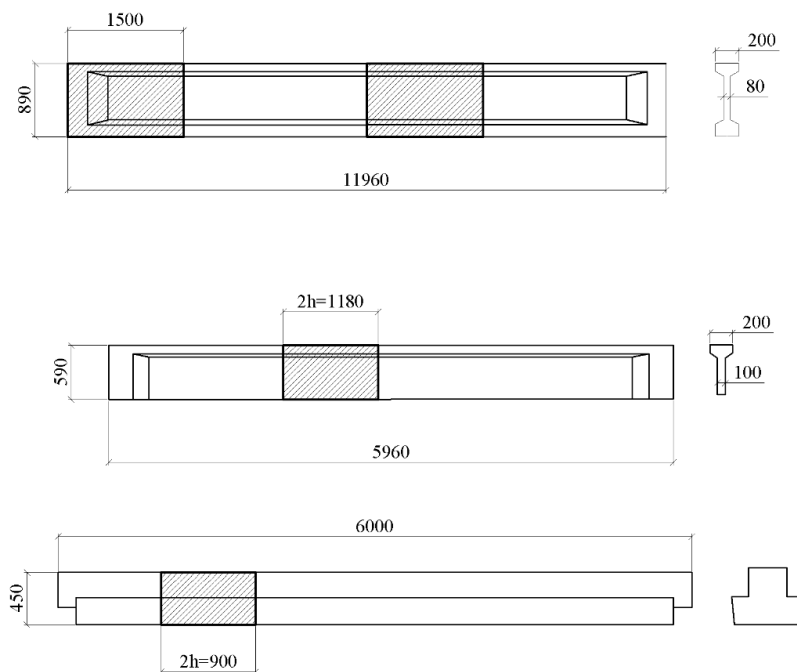


Рис. 6. Пример определения зоны суммирования дефектов в железобетонных ригелях и балках (иллюстрация автора)

Fig. 6. Example of determining the defect summation zone in reinforced concrete beams and girders (illustration by the author)

Заключение

1. Проведенный анализ архивной базы данных АО «ЦНИИПромзданий» подтверждает наличие парных дефектов в железобетонных конструкциях.
2. На примере железобетонной балки с парными дефектами было установлено, что наибольшее влияние оказывают дефекты, расположенные по разные стороны от середины пролета.

Зона влияния дефектов в расчетных ситуациях расположена на расстоянии $1,5-2,0h$.

3. Результаты исследований предлагается использовать в методике определения эксплуатационной безопасности, разработанной АО «ЦНИИПромзданий», с целью определения допускаемых сроков безопасной эксплуатации.

Список литературы

1. Макаров Б. Н. Оценка весомости показателей технического состояния зданий и сооружений / Б. Н. Макаров, Г. П. Тонких // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 1 (99). – С. 67–75. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-99-1-67-75.

2. Купчикова Н. В. Технология реконструкции, санации и капитального ремонта зданий, включая экспертизу геоподосновы, оснований и фундаментов / Н. В. Купчикова. – Астрахань : Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – 105 с. – ISBN 978-5-93026-077-9.
3. Чаганов А. Б. Анализ методов оценки долговечности и сроков службы промышленных зданий / А. Б. Чаганов, Д. С. Муравьева // *Дневник науки*. – 2019. – № 10 (34). – С. 14.
4. The improvement of protection methods from the progressive collapse of one-storey industrial buildings / N. N. Trekin, E. N. Kodysh, N. G. Kelasiev, et al. // *Journal of Physics: Conference Series* : International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019, Moscow, 13–15 ноября 2019 года. – Moscow : Institute of Physics Publishing, 2020. – Vol. 1425. – P. 012050. – DOI 10.1088/1742-6596/1425/1/012050.
5. Петрова И. Ю. Обзор процесса проведения обследования зданий и сооружений. Проблемы и пути решения / И. Ю. Петрова, О. О. Мостовой // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2021. – № 1 (35). – С. 69–75.
6. Савин С. Н. Контроль технического состояния зданий и сооружений по их динамическим характеристикам / С. Н. Савин, Ч. Д. Фан // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2024. – № 1 (47). – С. 20–27. – DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-20-27.
7. Левитский В. Е. Обследование и испытание строительных конструкций зданий и сооружений : учебно-методическое пособие / В. Е. Левитский, И. А. Терехов. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2021. – 132 с.
8. Обследование и восстановление поврежденных конструкций зданий вследствие взрывных и температурных воздействий / К. В. Авдеев, В. В. Бобров, П. В. Скаун и др. // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2023. – № 7. – С. 36–42. – DOI 10.33622/0869-7019.2023.07.36-42.
9. Результаты обследования радиобашни В. Г. Шухова / Э. Н. Кодыш, А. Н. Мамин, В. В. Бобров и др. // *Строительство и реконструкция*. – 2017. – № 6 (74). – С. 43–48.
10. Методика определения эксплуатационной безопасности зданий и их конструкций / Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, И. А. Терехов и др. // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2022. – № 4. – С. 152–159. – DOI 10.22337/2077-9038-2022-4-152-159.
11. Критерии для оценки категории технического состояния железобетонных колонн, ригелей, балок и ферм / В. С. Федоров, Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, И. А. Терехов // *Строительство и реконструкция*. – 2023. – № 3 (107). – С. 58–69. – DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-58-69.
12. Продолжительность периодов безопасной эксплуатации зданий и сооружений с железобетонными конструкциями / И. А. Терехов, Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, С. Д. Шмаков // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2024. – № 4. – С. 20–27. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.04.20-27.
13. Особенности учета эксплуатационных нагрузок при обеспечении механической безопасности конструкций покрытия объекта строительства / Е. В. Гурова, Р. Х. Курамшин, А. А. Короткова и др. // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2024. – № 1 (47). – С. 27–32. – DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-27-32.
14. Opbul E. Practical calculation of flexible members with the use of non-linear deformation model as exemplified by typical girder RGD 4.56-90 / E. Opbul, D. Dmitriev, Ph. Van Phuc // *Architecture and Engineering*. – 2018. – Vol. 3, № 3. – P. 29–41 (eng). – DOI:10.23968/2500-0055-2018-3-3-29-41.
15. Cervenka V. ATENA – A tool for engineering analysis of fracture in concrete / V. Cervenka, Ja. Cervenka, R. Pukl // *Sadhana*. – 2002. – Vol. 27, № 4. – P. 485–492. – DOI 10.1007/bf02706996.
16. Modelling of Shear-critical, Lightly Reinforced Concrete T-beams with Externally Bonded CFRP using ATENA Science / F. H. Njoko, A. Tambusay, A. Jamieson, et al. // *Civil Engineering Dimension*. – 2023. – Vol. 25, № 2. – P. 67–77. – DOI 10.9744/ced.25.2.67-77.
17. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание / Н. Н. Трекин, Д. Ю. Саркисов, С. В. Трофимов и др. // *Вестник МГСУ*. – 2021. – Т. 16, № 8. – С. 1006–1014. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.8.1006-1014.
18. Терехов И. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных плит при коррозии арматуры / И. А. Терехов // *Строительство и реконструкция*. – 2022. – № 6 (104). – С. 128–139. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-128-139.
19. Чаганов А. Б. Определение несущей способности и жесткости ребристых плит с дефектом нарушения сцепления арматуры с бетоном / А. Б. Чаганов // *Бетон и железобетон – взгляд в будущее : научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону*, Москва, 12–16 мая 2014 года : в 7 т. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2014. – Том 1. – С. 397–406.
20. Терехов И. А. Учет суммарного влияния дефектов на техническое состояние железобетонных колонн, ригелей, балок и стропильных конструкций / И. А. Терехов // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 10–14 апреля 2023 года* : в 2 ч. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – Часть 2. – С. 139–143.

© И. А. Терехов, А. В. Ямалов

Ссылка для цитирования:

Терехов И. А., Ямалов А. В. Совместное влияние дефектов на несущую способность железобетонных конструкций // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал* / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 3 (53). С. 5–10.