

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ АВАРИЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С. Р. Меликсетян, П. А. Кайдас, О. О. Коренькова

Меликсетян Сергей Романович, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (934) 888-44-00; e-mail: MeliksetyanSR@mgsu.ru;

Кайдас Павел Анатольевич, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (978) 808-12-26; e-mail: KaydasPA@mgsu.ru;

Коренькова Олеся Олеговна, кандидат биологических наук, доцент кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (499) 183-24-83; e-mail: KorenkovaOO@mgsu.ru

В статье рассматривается конечно-элементное моделирование четырех серий монолитных железобетонных рам с разным расположением арматурных включений. Проводится сравнительный анализ податливости узловых сопряжений на стадиях эксплуатации и аварийного воздействия. Нагрузочные и жесткостные параметры определялись исходя из несущей способности принятых сечений. В качестве характерных точек для изучения приняли приопорную зону ригеля над удаляемой колонной и среднюю колонну. Изучаемые параметры напряженно-деформированного состояния – нормальные напряжения и относительные деформации. Анализ результатов показал, что степень влияния уровня проектной нагрузки, характер моделирования сопряжения узловых элементов и параметры учета податливости узловых сопряжений в значительной степени влияют на параметры динамического деформирования конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, монолитные рамы, сложное напряженно-деформированное состояние, прогрессирующее обрушение, конечно-элементное моделирование.

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF BENDING MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER DYNAMIC EMERGENCY EFFECTS

S. R. Meliksetyan, P. A. Kaydas, O. O. Korenkova

Meliksetyan Sergey Romanovich, Senior Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (934) 888-44-00; e-mail: MeliksetyanSR@mgsu.ru;

Kaydas Pavel Anatolyevich, Senior Lecturer of Industrial and Civil Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (978) 808-12-26; e-mail: KaydasPA@mgsu.ru;

Korenkova Olesya Olegovna, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of Engineering Graphics and Computer Modeling Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (499) 183-24-83; e-mail: KorenkovaOO@mgsu.ru

The article considers finite element modeling of 4 series of monolithic reinforced concrete with different arrangement of reinforcement inclusions. A comparative analysis of the flexibility of nodal junctions is carried out at the stage of operation and at the stage of emergency impact. Load and stiffness parameters were determined based on the bearing capacity of the adopted sections. The support zone of the beam above the removed column and the middle column were taken as characteristic points for study. The parameters of the stress-strain state under study are normal stresses and relative deformations. The analysis of the results showed that the degree of influence of the design load level, the nature of modeling the conjugation of nodal elements and the parameters for taking into account the flexibility of nodal junctions significantly affects the parameters of dynamic deformation of structures.

Keywords: reinforced concrete structures, monolithic frames, complex stress-strain state, progressive collapse, finite element modeling.

Введение

Явление прогрессирующего обрушения остается одной из наиболее серьезных угроз в строительной отрасли, требующей повышенного внимания к проектированию несущих конструкций. Несмотря на существующие нормативные требования, проблема точного прогнозирования поведения железобетонного каркаса при аварийных

воздействиях сохраняет свою актуальность. Особую сложность представляет моделирование деформирования элементов в условиях динамических нагрузок, таких как внезапное удаление опор, что требует учета реальной работы узловых соединений и степени армирования конструкций.

Данному вопросу посвящены многочисленные исследования как отечественных [1–8], так и зарубежных [9–23] авторов, однако вопросы влияния жесткости сопряжений и параметров армирования на устойчивость рамных систем при прогрессирующем обрушении изучены недостаточно. В представленной статье проводится анализ напряженно-деформированного состояния монолитных железобетонных рам с различным процентом армирования в условиях внезапного удаления угловой колонны первого этажа. Рассматриваются два варианта сопряжения элементов: жесткое и податливое, что позволяет оценить их влияние на общую устойчивость конструкции.

Данное исследование направлено на уточнение методик расчета и проектирования железобетонных каркасов, способных сопротивляться прогрессирующему обрушению, что в перспективе может способствовать повышению безопасности зданий и снижению рисков катастрофических последствий.

Метод

В качестве объекта исследования рассмотрены четыре серии монолитных железобетонных рам в масштабе 1:6 от натурной величины, геометрия рамы представлена на рисунке 1. Величина расчетных пролетов принята 900 мм, величина этажей – 500 мм.

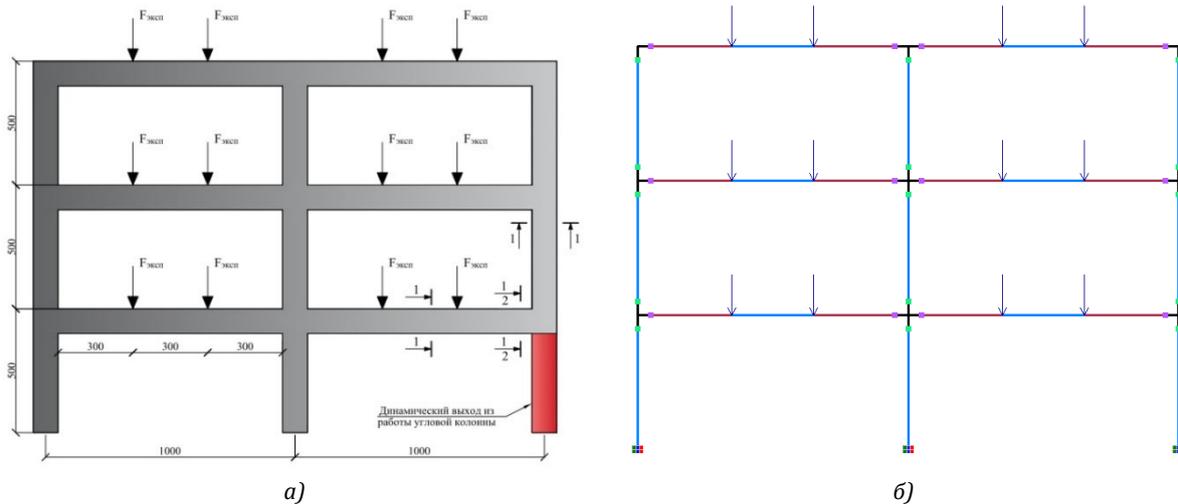


Рис. 1. Объект исследования: а) геометрия; б) конечно-элементная модель (иллюстрация авторов)
 Fig. 1. Object of research: a) geometry; b) finite element model (illustration by the authors)

Для обозначения рам приняли следующие условные обозначения:

- С1 – сечение колонн и ригелей 100 × 100 мм, армирование принято одинаковое для всех несущих элементов, класс и диаметр арматуры 4Ø8A500C (расположение арматурных включений симметричное, рис. 2а), класс бетона В25;
- С2 – сечение колонн и ригелей 100 × 100 мм, армирование колонны симметричное, состоит из 4Ø8A500C (рис. 2а), армирование ригеля комбинированное, в пролетной зоне симметричное

из 4Ø8A500C (рис. 2а), в приопорной зоне несимметричное, в сжатой области сечения 2Ø8A500C, в растянутой – 4Ø8A500C (принятое армирование создает эффект «переармированного сечения», рис. 2б), класс бетона В25;

- Ж – жесткие узлы сопряжения несущих элементов рамы;
- П – податливые узлы сопряжения несущих элементов рамы.

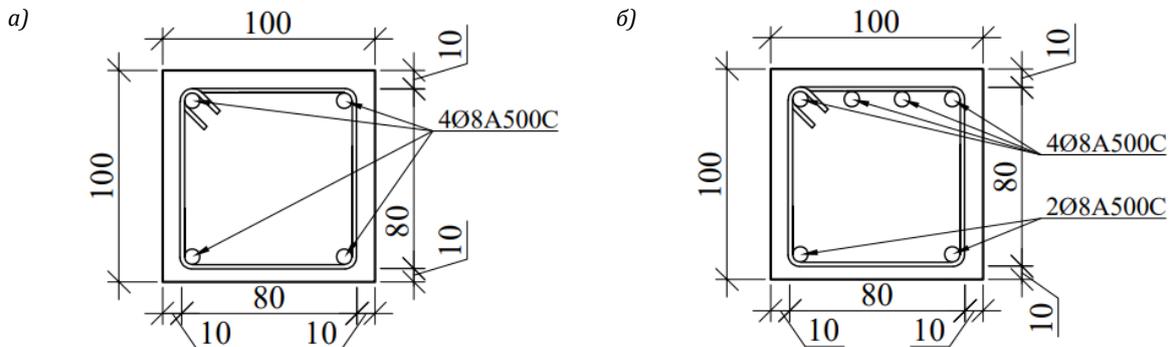


Рис. 2. Сечение элементов: а) колонна б) приопорная зона ригеля (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Cross section of the elements: a) column b) bolt support zone (illustration by the authors)

Исходя из условных обозначений, примем: первая серия рам – С1_П, вторая серия рам – С1_Ж, третья серия рам – С2_П, четвертая серия рам – С2_Ж.

В качестве метода исследования использовано численное моделирование (с учетом вероятности аварийного воздействия) в конечно-элементном программном комплексе четырех серий рам для нескольких стадий нагружения при $0,6P_{\text{эксп}}$ и $0,95P_{\text{эксп}}$.

Геометрия рамы задавалась стержневыми конечными элементами, тип КЭ приняли для решения физически нелинейной плоской задачи.

Жесткостные характеристики материалов следующие: для бетона – экспоненциальный закон деформирования, для арматуры – кусочно-линейный. Класс арматуры – А500С, класс бетона – В25. Расположение арматурных включений для сечений элементов конструкции было в соответствии с рисунком 2.

В качестве нагрузочных параметров рассматривалась симметрично расположенная пара сосредоточенных сил. Особенность принятого вида нагружения обусловлена характерным распределением внутренних усилий (создание в пролетном участке ригеля зоны чистого изгиба). Величина сосредоточенных сил была определена с учетом несущей способности сечения.

В качестве аварийного воздействия приняли расчет на прогрессирующее обрушение. За элемент удаления – угловую колонну первого этажа.

Временная величина локального выхода из работы элемента – 0,01 сек.

Результаты и обсуждение

Для анализа параметров НДС использованы наиболее характерные сечения конструктивной системы, получившие наибольшие динамические догружения вследствие отказа крайней колонны первого этажа: опорное сечение ригеля, примыкающего к удаляемой колонне (Эл-1), и сечение средней колонны (Эл-2). Расположение указанных сечений показано на рисунках 3 и 4.

В качестве критериев оценки параметров изменения напряженно-деформированного состояния были рассмотрены сжимающие напряжения и относительные деформации в бетоне.

В ходе расчетного анализа было установлено влияние характера разрушения сечения (хрупкое/пластическое) и уровня эксплуатационной нагрузки на параметры НДС наиболее напряженных элементов как на стадии эксплуатации, так и при возникновении аварийного воздействия. Выявлено, что на стадии $0,6P_{\text{эксп}}$ уровень напряжений в бетоне находится в интервале от $0,12R_b$ до $0,27R_b$ для элементов с пластическим характером разрушения, что незначительно отличается от параметров напряженного состояния для элементов с разрушением. Однако при проектной нагрузке, близкой к максимальной $0,95P_{\text{эксп}}$, уровень напряжений возрастает до $0,32R_b$ и $0,75R_b$ соответственно (рис. 3).

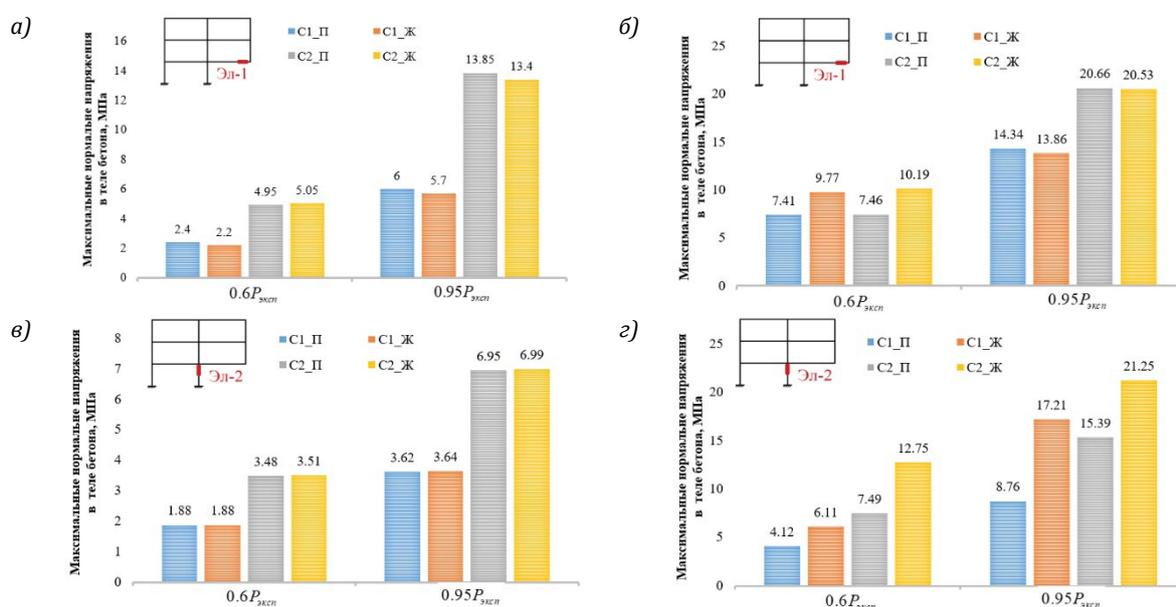


Рис. 3. Максимальные нормальные напряжения в бетоне: а) элемента-1 (стадия эксплуатации); б) элемента-1 (стадия аварийного воздействия); в) элемента-2 (стадия эксплуатации); г) элемента-2 (стадия аварийного воздействия) (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Maximum normal stresses in concrete: a) Element-1 (operation stage); b) Element-1 (emergency impact stage); c) Element-2 (operation stage); d) Element-2 (emergency impact stage) (illustration by the authors)

После возникновения аварийного воздействия при нагружении, равном $0,6P_{\text{эксп}}$, напряжения в бетоне для сечения 1 составляют $0,40R_b$, то есть

происходит догружение более чем в три раза для сечений с учетом работы узлов, а для рамы с жест-

ким характером сопряжения узлов уровень напряжений в бетоне составил $0,6 R_b$, при этом ни в одном из рассмотренных сечений не произошло разрушения сечения. При возникновении аварийного воздействия при проектной нагрузке, равной $0,95 P_{\text{эксп}}$, произошло разрушение сечений С-2, как при жестком, так и при пластическом характере с учетом работы узлов, превысив прочность бетона в 1,12 раза. Рассматривая сечения С-1, наблюдаем пластический характер разрушения с напряженным состоянием бетона на уровне $0,77 R_b$ и $0,74 R_b$ для пластического и жесткого характера работы узлов соответственно.

Изучая напряженное состояние колонны, расположенной в непосредственной близости от удаляемой, при нагружении $0,6 P_{\text{эксп}}$ отмечается в среднем двукратный прирост напряжений в бетоне для элементов с учетом неупругой работы узлов, а для несущей системы с жестким

соединением конструктивных элементов прирост напряжений в бетоне колонны составил от $0,1 R_b$ до $0,33 R_b$ для сечения с пластическим характером разрушения, а для элемента с жесткими узлами приращение лежит в интервале от $0,19 R_b$ до $0,68 R_b$.

При проектной эксплуатационной нагрузке $0,95 P_{\text{эксп}}$ в колонне для всех вариантов сопряжения наблюдается значительное увеличение напряжений в бетоне, превышая прочность на сжатие лишь в случае примыкания к колонне переармированного ригеля, без учета действительной работы узлов.

Анализируя деформативность сечений элементов рассматриваемых конструктивных систем (рис. 4), можно отметить, что на стадии эксплуатации уровень относительных сжимающих деформаций для бетона ригелей находится в интервале от $0,27 \varepsilon_{b0}$ до $0,48 \varepsilon_{b0}$ при проектной эксплуатационной нагрузке $0,60 P_{\text{эксп}}$.

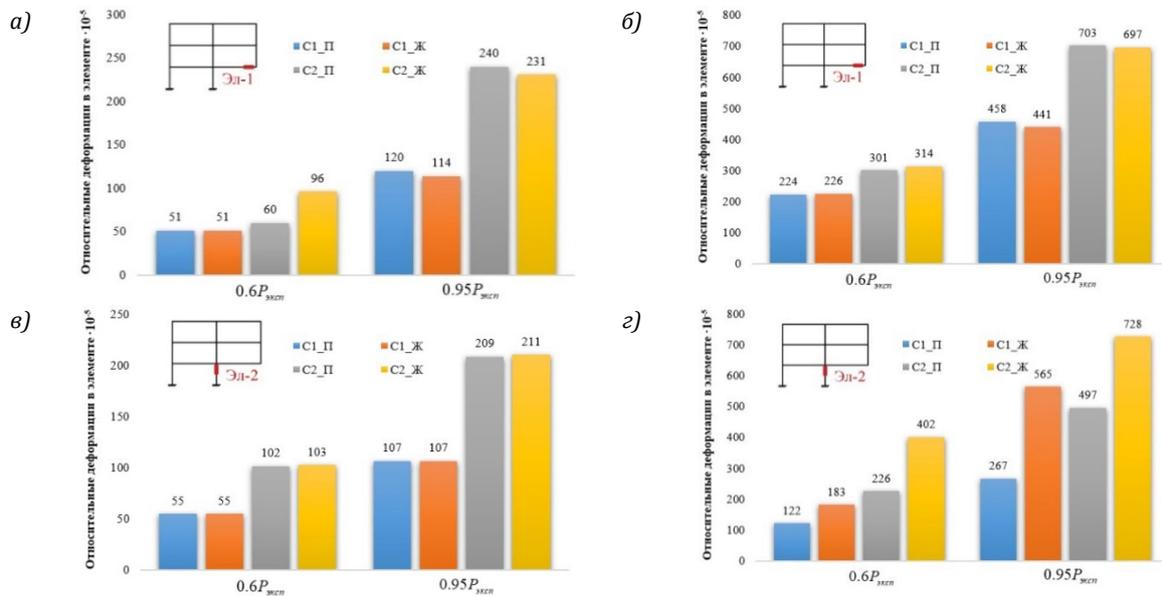


Рис. 4. Относительные деформации в сечении: а) элемента-1 (стадия эксплуатации); б) элемента-1 (стадия аварийного воздействия); в) элемента-2 (стадия эксплуатации); г) элемента-2 (стадия аварийного воздействия) (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Relative deformations in the section: a) Element-1 (operational stage); б) Element-1 (emergency impact stage); в) Element-2 (operational stage); г) Element-2 (emergency impact stage) (illustration by the authors)

Для колонн уровень деформаций в бетоне соответствует величинам от $0,28 \varepsilon_{b0}$ до $0,52 \varepsilon_{b0}$ при проектной эксплуатационной нагрузке – $0,60 P_{\text{эксп}}$.

После аварийного воздействия при величине $0,60 P_{\text{эксп}}$ во всех горизонтальных элементах не был достигнут критерий особого предельного состояния ε_{b2} , уровень деформаций находится в интервале от $0,64 \varepsilon_{b2}$ до $0,89 \varepsilon_{b2}$. Во время возникновения аварийной ситуации при эксплуатационной нагрузке $0,95 P_{\text{эксп}}$ критерий деформативности бетона превышен в 1,3 раза для сечения с пластическим характером разрушения и в два раза для ригелей с хрупким разрушением.

При рассмотрении достижения критериев особого предельного состояния с уровнем $0,60 P_{\text{эксп}}$ в колонне первого этажа отмечается превышение значения предельных деформаций в сечении колонны на 15 % от максимальных при примыкании переармированного ригеля с жестким сопряжением с колонной, в остальных сечениях уровень деформаций находится в пределах от $0,35 \varepsilon_{b2}$ до $0,65 \varepsilon_{b2}$.

Для рассматриваемых рам, в которых аварийное воздействие было приложено при $0,95 P_{\text{эксп}}$, достижение критериев особого предельного состояния установлено для всех сечений кроме того,

в котором предусмотрен упругопластический характер работы узла и пластическое разрушение сечения и находится на уровне $0,76 \varepsilon_{b2}$. Для остальных сечений превышение предельных деформаций составило от 40 до 110 %.

Заключение

Полученные результаты позволяют отметить, что учет податливости узлов оказывает значительное влияние на оценку критериальных показателей особого предельного состояния, особенно в сечениях с хрупким характером разрушения

в зависимости от уровня эксплуатационной нагрузки. В менее значительной степени учет податливости узловых соединений оказывает влияние на параметры напряженного состояния, не меняя количественный характер амплитудных значений действующих усилий, но показывая различный характер изменения их во времени. Перспективой дальнейших исследований представляется подтверждение полученных данных результатами экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Белостоцкий А. М. Численное моделирование процессов деформирования конструкций, подверженных аварийным воздействиям / А. М. Белостоцкий, А. С. Павлов // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 2 (58). – С. 51–56.
2. Колчунов В. И. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях / В. И. Колчунов, В. В. Тур // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 7. – С. 5–15.
3. Колчунов В. И. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях / В. И. Колчунов, О. Б. Бушова, П. А. Кореньков // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 1 (99). – С. 18–28.
4. Колчунов В. И. Динамические эффекты в статически неопределимых физически и конструктивно нелинейных системах / В. И. Колчунов, Н. В. Федорова, С. Ю. Савин // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 9. – С. 42–51.
5. Колчунов В. И. Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии / В. И. Колчунов, В. Н. Туен, Д. И. Нижегородов // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 10. – С. 1337–1345.
6. Федорова Н. В. Анализ деформирования и трещинообразования многоэтажных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем зданий в предельных и запредельных состояниях / Н. В. Федорова, П. А. Кореньков // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 11. – С. 8–13.
7. Федорова Н. В. Анализ нелинейного статико-динамического деформирования железобетонных рам в запредельных состояниях / Н. В. Федорова, Н. Т. Ву, М. Д. Медянкин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2021. – № 4 (64). – С. 11–24.
8. Федорова Н. В. Критерий прочности плосконапряженного железобетонного элемента при особом воздействии / Н. В. Федорова, В. Н. Туен, И. А. Яковенко // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, № 11. – С. 1513–1522.
9. Newmark N. M. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities / N. M. Newmark, W. J. Hall // Proceedings of the IAEA Panel on Aseismic Design and Testing of Nuclear Facilities. – Токио : Japan Earthquake Engineering Promotion Society, 1969. – P. 90–113.
10. Krauthammer T. Development of progressive collapse analysis procedure and condition assessment for structures / T. Krauthammer, R. L. Hall, S. C. Woodson, J. T. Baylol, J. R. S. Hayes // National workshop on prevention of progressive collapse in Roscmont. IL. – Washington. DC : Multihazard Mitigation Council of the National Institute of Building Sciences, 2003. – 12 p.
11. Lew H. S. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario / H. S. Lew, Y. Bao, F. Sadek, J. A. Main, S. Pujol, A. Mete // Sozen -Boulder: Natl. Inst. Stand. Technol. Tech. – 2011. – Note 1720. – 104 p.
12. Fialko S. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion / S. Fialko, O. Kabantsev, A. Perelmuter // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 102, № 2. – P. 10214–10214.
13. Fei-Fan Feng. Effect of three-dimensional space on progressive collapse resistance of reinforced concrete frames under various column removal scenarios / Fei-Fan Feng, Hyeon-Jong Hwang, Yun Zhou, Jing-Ming Sun, Hu-Zhi Zhang, Jun-Ho Roh, Su-Min Kang, Wei-Jian Yi // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 90.
14. Xu Long. Numerical predictions of progressive collapse in reinforced concrete beam-column sub-assemblages: A focus on 3D multiscale modeling / Xu Long, Percy M. Iyela, YutaiSu, Meklit M. Atlaw, Shao-Bo Kang // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 315.
15. Obaidat Y. T., Abu-Farsakh G. A., Ashteyat A. M. Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading / Y. T. Obaidat, G. A. Abu-Farsakh, A. M. Ashteyat // Constr Build Mater. – 2019. – Vol. 198. – P. 313–322.
16. Ma C. Seismic retrofitting of full-scale RC interior beam-column-slab subassemblies with CFRP wraps / C. Ma, D. Wang, Z. Wang // Compos Struct. – 2017. – Vol. 159. – P. 397–409.
17. El-Ariss B. Benchmark numerical model for progressive collapse analysis of RC beam-column sub-assemblages / B. El-Ariss, S. Elkholly, A. Shehada // Buildings. – 2022. – Vol. 12(2). – P. 122.
18. Li Z.-X. Analytical model on progressive collapse resistance of prestressed precast concrete frame under middle column removal scenario / Z.-X. Li, H. Liu, Y. Shi, Y. Ding, J. Cui // Advances in Structural Engineering. – 2022. – Vol. 25 (7). – P. 1583–1608.
20. Ahmadi R. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage / R. Ahmadi, O. Rashidian, R. Abbasnia, F. Mohajeri Nav, N. Usefi // Shock. Vib. – 2016. – № 1. – P. 17.



21. Priti Patel. An experimental study for effectiveness of steel fibre reinforced exterior beam-column joints under cyclic resistance / Priti Patel, Atul Desai, Soumita Bid, Pranav Desai // Construction and Building Materials. – 2024. – 411 p.

22. Noyan M. Experimental Study on the Behavior of RC Beam-Column Joint Retrofitted with Ferrocement Jacket Under Cyclic Loading. Thesis Submitted to Bangladesh University of Engineering and Technology / M. Noyan. – 2014. – 79 p.

23. Karayannis C. G. Effectiveness of RC beam-column connection repair using epoxy resin injections / C. G. Karayannis, C. E. Chalioris, K. K. Siderisn // J. Earthq Eng. – 1998. – № 2 (2). – 217 p.

© С. Р. Меликестян, П. А. Кайдас, О. О. Коренькова

Ссылка для цитирования:

Меликестян С. Р., Кайдас П. А., Коренькова О. О. Прочность и деформативность изгибаемых монолитных железобетонных элементов при динамических аварийных воздействиях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 2 (52). С. 11–16.

УДК 628.004.67: 621.397

DOI 10.52684/2312-3702-2025-52-2-16-20

**ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО СПОСОБА
БЕСТРАНШЕЙНОГО РЕМОНТА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СЕТЕЙ
ДЛЯ УСЛОВИЙ КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

О. А. Продоус, Дунлян Ван

Продоус Олег Александрович, доктор технических наук, профессор, независимый эксперт по водоснабжению и канализации, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: + 7 (921)967-27-25; e-mail: pro@enco.su;

Ван Дунлян, аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: + 7 (906)-240-61-28; e-mail: wangdongliang@yandex.ru

Цель работы – обосновать гидравлический выбор предпочтительного способа бестраншейного ремонта канализационных сетей для условий Китайской Народной Республики на основе анализа значений изменяющихся характеристик гидравлического потенциала используемых полимерных материалов. Методы исследований использованы в зависимости от гидравлического расчета, учитывают значения высотного и шагового параметров шероховатости рабочей поверхности полимерных материалов. Предложено при выборе способа бестраншейного ремонта трубопроводов инженерных сетей учитывать характеристики шероховатости труб из полимерных материалов, влияющие на потери напора в трубах, обеспечивающие повышение их наружной способности. Результаты обсуждения – доказано на конкретном примере, что шероховатость внутренних стенок труб из полимерных материалов влияет на их пропускную способность и, как следствие, на выбор способа бестраншейного ремонта канализационной сети, обеспечивающей транспортирование возрастающего объема сточных вод. Разработаны и обоснованы гидравлические критерии оценки выбранного способа бестраншейного ремонта канализационных сетей для условий Китайской Народной Республики.

Ключевые слова: канализационные сети, бестраншейный ремонт, шероховатость труб, критерии оценки способа ремонта.

**HYDRAULIC JUSTIFICATION FOR CHOOSING THE PREFERRED METHOD OF TRENCHLESS REPAIR
OF SEWAGE NETWORKS FOR THE CONDITIONS OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA**

O. A. Prodous, Dongliang Wang

Prodous Oleg Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Independent Expert on Water Supply and Sewerage, Saint Petersburg, Russian Federation, phone: + 7 (921) 967-27-25; e-mail: pro@enco.su;

Wang Dongliang, postgraduate student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation, phone: + 7 (906) 240-61-28; e-mail: wangdongliang@yandex.ru

The purpose of the work is to substantiate the hydraulic selection of the preferred method of trenchless repair of sewer networks for the conditions of the People's Republic of China based on the analysis of the values of changing characteristics of the hydraulic potential of the polymeric materials used. Research methods – dependencies for hydraulic calculation are used, taking into account the values of the height and step parameters of the roughness of the working surface of polymeric materials. It is proposed to take into account the roughness characteristics of polymer pipes affecting pressure losses in pipes, ensuring an increase in their external capacity, when choosing a method