

А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹, М.Д. АНТОНОВ¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

ДИНАМИКА БЕЗБАЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ ПЛИТ ПРОДАВЛИВАНИЕМ

Аннотация. Рассмотрен подход к оценке динамических эффектов для железобетонных каркасов сооружений с безбалочными перекрытиями при комбинированных запроектных воздействиях. Первичные воздействия предполагают превышение эксплуатационных нагрузок, которое вызывает повреждения узла соединения плиты и колонны от продавливания до наступления вторичного запроектного воздействия. Вторичные запроектные воздействия включают рассмотрение удаления из расчетной схемы любой из колонн за конечный промежуток времени. Анализ динамических эффектов выполнен на основе двух подходов: первый основан на энергетическом методе Г.А. Гениева и предполагает квазистатическую оценку напряженно-деформированного состояния поврежденной системы; второй – анализ переходного динамического процесса с учетом физической и геометрической нелинейности. Предложен приближенный подход к моделированию повреждений железобетонной плиты от продавливания и рассмотрены дальнейшие перспективы его совершенствования. Установлена степень опасности запроектных воздействий для предварительно поврежденных продавливанием конструкций, а также влияние этих повреждений на живучесть каркасов при запроектных воздействиях. Рассмотрен пример оценки живучести на модели каркаса подземного паркинга при наличии повреждений от продавливания для одного из узлов соединения плиты и колонны.

Ключевые слова: живучесть, запроектное воздействие, безбалочный каркас, продавливание, динамический анализ, прогрессирующее разрушение, численное моделирование, железобетонные конструкции.

A.V. ALEKSEYTSSEV¹, M.D. ANTONOV¹

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

DYNAMICS OF REINFORCED CONCRETE NON-BEAM FRAMES IN CASE OF DAMAGE TO SLABS PUNCHING

Abstract. An approach to the assessment of dynamic effects for reinforced concrete non-beam frames of structures under combined emergency actions is considered. Primary impacts imply an excess of operational loads, which causes damage to the slab-column junction from punching to the onset of a secondary impacts. Secondary impacts include considering the removal of any column from the design model over a finite time. The analysis of dynamic effects based on two approaches: the first is based on the energy method of G.A. Geniev and assumes a quasi-static assessment of the stress-strain state of the damaged system; the second is the analysis of the transient dynamic process taking into account physical and geometric nonlinearity. An approximate approach to modeling the damage of a reinforced concrete slab from punching is proposed and further prospects for its improvement are considered. The degree of danger at emergency impacts for structures pre-damaged by punching, as well as the influence of these damages on the survivability of frames under these effects, has been established. An example of assessing survivability on a model of an underground parking frame in the presence of damage from punching for one of the column-slab joints is considered.

Keywords: progressive collapse resistance, emergency actions, punching shear, dynamic analysis, column failure, numerical modeling, reinforced concrete structures.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения // Доступ из системы «Техэксперт» <http://docs.cntd.ru/document/551394640> (дата обращения 24.06.2021).
2. Шапиро Г.И., Эйсман Ю.А., Залесов А.С. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения // Доступ из системы «Техэксперт» <https://docs.cntd.ru/document/1200058272> (дата обращения 24.06.2021).
3. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. Москва, АСВ, 2014. 208 с.
4. Тамразян А.Г. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / А.Г. Тамразян, С.Н. Булгаков и др., под общей ред. А.Г. Тамразяна. М.: Изд-во АСВ, 2012. 304 с.
5. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability parameter calculation for framed structural systems // Russian journal of building construction and architecture 2017. №1. С. 6-14.
6. Тамразян А.Г. К анализу узла сопряжения монолитных плит и колонн при продавливании // В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Под редакцией С.И. Меркулова. 2020. С. 101-109.
7. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. Практическая методика расчета железобетонных плит на продавливание по различным схемам // Бетон и железобетон. 2012. №5. С. 10-16.
8. Трекин Н.Н., Крылов В.В. К вопросу о несущей способности железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении на объектах наземной космической инфраструктуры // Научный аспект. 2018. Т. 7. № 4. С. 771-778.
9. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 456 (2018) 012089
10. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. С. 04005.
11. Федорова Н.В., Ильющенко Т.А., Медянкин М.Д., Инсафутдинов А.Р. Особенности динамических догрузений железобетонных элементов конструктивных систем при гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и трещинообразовании // Строительство и реконструкция. 2019. № 2 (82). С. 72-80.
12. Федоров В.С., Меднов Е.А. Влияние исходного напряженно-деформированного состояния и уровня нагружения на возникающий динамический эффект при аварийном разрушении опоры в неразрезных стальных балках // Строительство и реконструкция. 2010. № 6. С. 48.
13. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 2 (102). С. 10214.
14. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. № 3 (103). С. 10306.
15. Kabantsev O.V., Mitrovitch B. Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2018. С. 012002.
16. Бондаренко В.М., Ключева Н.В., Дегтярь А.Н., Андросова Н.Б. Оптимизация живучести конструктивно нелинейных железобетонных рамно-стержневых систем при внезапных структурных изменениях // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. № 4-16. С. 5-10.
17. Тамразян А.Г., Коновалова О.О. Оптимизация проектных параметров опертых по контуру монолитных перекрытий с использованием генетических алгоритмов // В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Под редакцией С.И. Меркулова. 2020. С. 115-122.
18. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // Magazine of Civil Engineering. 2019. № 7 (91). С. 3-15.
19. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Ковалев В.В. Критериальная оценка несущей способности сжато-изогнутых элементов реконструируемого железобетонного каркаса при аварийной расчетной ситуации // Строительство и реконструкция. 2020. № 1 (87). С. 71-80.
20. Колчунов В.И., Прасолов Н.О., Моргунов М.В. К оценке живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельных элементов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. № 4. С. 40-44.
21. Моргунов М.В., Гришин П.А. Устойчивость железобетонных колонн в рамно-стержневых конструкциях при запроектных воздействиях // В книге: Функция, конструкция, среда в архитектуре зданий. Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции: в 2 томах. Институт строительства и архитектуры НИУ МГСУ. 2019. С. 75-76.
22. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the

- influence of a concentrated force at high temperatures *Procedia Engineering* (см. в книгах). 2016. Т. 153. С. 715-720.
23. Федоров В.С., Левитский В.Е., Соловьев И.А. Модель термосилового сопротивления железобетонных элементов стержневых конструкций // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 5(61). С. 47-55.
24. M. Russell J.S. Owen I. Hajirasouliha Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss // *Engineering Structures* 99 (2015) 28–41.
25. Marques M.G., Liberati, E.A. P., Gomes, R.B Punching shear strength model for reinforced concrete flat slabs with openings // *Journal of structural engineering*. 2021. №7 (147). No: 04021090

REFERENCES

1. SP 385.1325800.2018 Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya // Dostup iz sistemy «Tekhekspert» <http://docs.cntd.ru/document/551394640> (data obrashcheniya 24.06.2021).
2. Shapiro G.I., Eysman YU.A., Zalesov A.S. Rekomendatsii po zashchite monolitnykh zhilykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya // Dostup iz sistemy «Tekhekspert» <https://docs.cntd.ru/document/1200058272> (data obrashcheniya 24.06.2021).
3. Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproyektnykh vozdeystviyakh. Moskva: ASV, 2014. 208 s.
4. Tamrazyan A.G. Snizheniye riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnoho i tekhnogennoho kharaktera / A.G. Tamrazyan, S.N. Bulgakov i dr., pod obshchey red. A.G. Tamrazyana. M.: Izd-vo ASV, 2012. 304 s.
5. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability parameter calculation for framed structural systems // *Russian journal of building construction and architecture* 2017. №1. S. 6-14.
6. Tamrazyan A.G. K analizu uzla sopryazheniya monolitnykh plit i kolonn pri prodavlivanii // V sbor-nike: Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy Mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy. Pod redaktsiyey S.I. Merkulova. 2020. S. 101-109.
7. Karpenko N.I., S.N. Karpenko Prakticheskaya metodika rascheta zhelezobetonnykh plit na prodavlivaniye po razlichnym skhemam // *Beton i zhelezobeton*. 2012. №5. S. 10-16.
8. Trekin N.N., Krylov V.V. K voprosu o nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh plit na prodavlivaniye pri dinamicheskom nagruzhении na ob'yektakh nazemnoy kosmicheskoy infrastruktury // *Nauchnyy aspekt*. 2018. Т. 7. № 4. S. 771-778.
9. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 456 (2018) 012089
10. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // *E3S Web of Conferences*. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. S. 04005
11. Fedorova N.V., Il'yushchenko T.A., Medyankin M.D., Insafutdinov A.R. Osobennosti dinamicheskikh dogruzhений zhelezobetonnykh elementov konstruktivnykh sistem pri gipoteticheskom udalenii odnoy iz nesu-shchikh konstruktsiy i treshchinoobrazovaniy // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. № 2 (82). S. 72-80.
12. Fedorov V.S., Mednov Ye.A. Vliyaniye iskhodnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i urovnya nagruzheniya na vznikayushchiy dinamicheskiy effekt pri avariynom razrushenii opory v nerazreznykh stal'nykh balkakh // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2010. № 6. S. 48.
13. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the in-tegration of the equations of motion // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. № 2 (102). S. 10214.
14. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. № 3 (103). S. 10306.
15. Kabantsev O.V., Mitrovitch B. Justification of the special limit state characteristics for monolithic reinforced concrete bearing systems in the progressive collapse mode // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, 2018. S. 012002.
16. Bondarenko V.M., Klyuyeva N.V., Degtyar' A.N., Androsova N.B. Optimizatsiya zhivuchesti konstruktivno nelineynykh zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevyykh sistem pri vnezapnykh strukturnykh izmeneniyakh // *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport*. 2007. № 4-16. S. 5-10.
17. Tamrazyan A.G., Konovalova O.O. Optimizatsiya proyektnykh parametrov opertykh po konturu monolitnykh perekrytiy s ispol'zovaniyem geneticheskikh algoritmov // V sbornike: Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy Mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy. Pod redaktsiyey S.I. Merku-lova. 2020. S. 115-122.
18. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. № 7 (91). S. 3-15.
19. Savin S.YU., Kolchunov V.I., Kovalev V.V. Kriteri'al'naya otsenka nesushchey sposobnosti szhatykh elementov rekonstruiruyemogo zhelezobetonnoho karkasa pri avariynoy raschetnoy situatsii // *Stroi-tel'stvo*

i rekonstruktsiya. 2020. № 1 (87). S. 71-80.

20. Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Morgunov M.V. K otsenke zhivuchesti zhelezobetonnykh ram pri potere ustoychivosti otdel'nykh elementov // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy. 2007. № 4. S. 40-44.

21. Morgunov M.V., Grishin P.A. Ustoychivost' zhelezobetonnykh kolonn v ramno-sterzhnevyykh konstruktseyakh pri zaproyektnyykh vozdeystviyakh //V knige: Funktsiya, konstruktseyiya, sreda v arkhitekture zdaniy. Sbornik tezisov dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 tomakh. Institut stroitel'stva i arkhi-tektury NIU MGSU. 2019. S. 75-76.

22. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures Procedia Engineering (sm. v knigakh). 2016. T. 153. S. 715-720.

23. Fedorov V.S., Levitskiy V.Ye., Solov'yev I.A. Model' termosilovogo soprotivleniya zhelezobetonnykh elementov sterzhnevyykh konstruktsey // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2015. № 5 (61). S. 47-55.

24. M. Russell, J.S. Owen, I. Hajirasouliha Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss // Engineering Structures 99 (2015) 28–41.

25. Marques M.G., Liberati, E.A. P., Gomes, R.B Punching shear strength model for reinforced concrete flat slabs with openings // Journal of structural engineering. 2021. №7 (147). No: 04021090.

Информация об авторах:

Алексейцев Анатолий Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: aalexw@mail.ru

Антонов Михаил Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,

аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: mishany96969@mail.ru

Information about authors:

Alekseytsev Anatoliy V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: aalexw@mail.ru

Antonov Mikhail D.

Moscow State University of Civil Engineering Moscow, Russia,

postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: mishany96969@mail.ru