

Н.Т. ВУ¹, Н.В. ФЕДОРОВА¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия**ВАРИАНТ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К
СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОМУ РЕЖИМУ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

***Аннотация.** Представлено обоснование режимов статико-динамического нагружения эксплуатируемых железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектном воздействии в виде внезапного удаления отдельных несущих элементов. На основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева построены аналитические зависимости для определения параметров диаграммы статико-динамического деформирования бетона при различных режимах статического нагружения и последовательном динамическом догружении. Преимущество полученного уточненного варианта деформирования бетона состоит в том, что он содержит два важных параметра, учитывающих влияния скорости нагружения и уровня статического нагружения на сложное напряженно-деформированное состояние бетона. Численными исследованиями показано, что предельная статико-динамическая прочность бетона при динамическом догружении зависит от уровня начального напряженного состояния при статическом нагружении бетона, с которого производится динамическое догружение до предельного состояния. Проведенным с использованием рассматриваемой модели численным анализом подтверждены также результаты экспериментальных исследований о том, что микротрещинообразование в бетоне при статическом нагружении начинается не с некоторого уровня значения напряжений, а практически с момента начала нагружения бетона. Полученные результаты представляют интерес для решения прикладных задач, связанных с проблемой живучести, защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, в частности при определении критериев прочности бетона при особом напряженном состоянии.*

***Ключевые слова:** железобетон, живучесть, внезапная структурная перестройка, прогрессирующее обрушение, теория пластичности бетона, статико-динамическое нагружение, динамическая прочность, диаграмма деформирования бетона.*

N.T. VU¹, N.V. FEDOROVA¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia**VARIANT OF THE PLASTICITY THEORY FOR CONCRETE IN
RELATION TO THE STATIC-DYNAMIC DEFORMATION REGIME**

***Abstract.** The substantiation of the modes of static-dynamic loading of the operated reinforced concrete frames of multi-storey buildings under the out-of-design impact in the form of sudden removal of individual load-bearing elements is presented. Based on the theory of plasticity of concrete and reinforced concrete by G.A. Geniev, analytical dependences are constructed to determine the parameters of the static-dynamic deformation diagram of concrete under various modes of static loading and sequential dynamic loading. The advantage of the obtained refined variant of concrete deformation is that it contains two important parameters that take into account the influence of the loading speed and the level of static loading on the complex stress-strain state of concrete. Numerical studies have shown that the limiting static-dynamic strength of concrete under dynamic loading depends on the level of the initial stress state under static loading of concrete, from which dynamic loading is carried out to the limit state. The numerical analysis carried out using the model under consideration also confirmed the results of experimental studies that microcracking in concrete under static loading does not begin with a certain stress level, but practically from the moment of the beginning of concrete loading. The results obtained are of interest for solving applied problems related to the problem of survivability, protection of buildings and structures from progressive collapse, in particular when determining the criteria for the strength of concrete under special stress.*

Keywords: reinforced concrete, survivability, sudden column removal, progressive collapse, plasticity theory of concrete, static-dynamic loading, dynamic strength, concrete deformation diagram.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белостоцкий А.М., Карпенко Н.И., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Карпенко С.Н., Петров А.Н., Кайтуков Т.Б., Харитонов В.А. О методах расчета напряженно-деформированного состояния и на устойчивость к прогрессирующему обрушению пространственных плитно-оболочечных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности, трещинообразования и приобретаемой анизотропии // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. № 14(2). С. 30-47. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47>
2. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // *MATEC Web of Conferences*. 2018. No. 251. doi:10.1051/MATECCONF/201825102047.
3. Серпик И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 10. С. 49–51.
4. Tamrazyan A.G., Fedorov V.S., Kharun M. The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 675. No. 1.
5. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
6. Scalerandi M., Bentahar M., Mechri C. Conditioning and elastic nonlinearity in concrete: Separation of damping and phase contributions // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 161. Pp. 208-220. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.035.
7. Kayondo M., Combrinck R., Boshoff W.P. State-of-the-art review on plastic cracking of concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. No. 225. Pp. 886 - 899. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.197.
8. Tošić N., Aidarov S., de la Fuente A. Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13 (22). P. 5098. doi:10.3390/MA13225098. URL:<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/22/5098/htm> (date of application: 3.07.2022).
9. Hung C.C., Hu F.Y. Behavior of high-strength concrete slender columns strengthened with steel fibers under concentric axial loading // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 175. Pp. 422–433. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.201.
10. Филоненко-Бородич М.М. Об условиях прочности материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию // *Инж. сборник*. 1954. № 19. С. 36–48.
11. Баландин П.П. К вопросу о гипотезах прочности // *Вестник инженеров и техников*. 1937. № 1.
12. Гвоздев А.А., Карпенко Н.И. Работа железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1965. № 2.
13. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций в условиях действия низких отрицательных температур // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2018. Т. 714. № 6. С. 5–17.
14. Feng W., Liu F., Yang F., Li L., Jing L. Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 165. Pp. 675–687. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.073.
15. Zhang H., Wang B., Xie A., Qi Y. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. No. 152. Pp.154–167. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.177.
16. Lu D., Wang G., Du X., Wang Y. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. No. 103. Pp. 124–137. doi:10.1016/J.IJIMPENG.2017.01.011.
17. Ren J., Dang F., Wang H., Xue Y., Fang J. Enhancement Mechanism of the Dynamic Strength of Concrete Based on the Energy Principle // *Materials*. 2018. No. 11. doi:10.3390/MA11081274. URL:<https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1274/htm> (date of application: 3.07.2022).
18. Fu Q., Xu W., He J., Su L., Song H., Niu D. Dynamic strength criteria for basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete // *Composites Communications*. 2021. No. 28. doi:10.1016/J.COCO.2021.100983.
19. Федорова Н.В., Медянкин М.Д., Бушова О.Б. Экспериментальное определение параметров статико-динамического деформирования бетона при режимном нагружении // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 3. С. 72–81.
20. Федорова Н.В., Медянкин М.Д., Бушова О.Б. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 1. С. 4–11.
21. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental determination of the parameters of the static-dynamic deformation of concrete under loading modal // *Building and reconstruction*. 2020. No. 89(3). Pp. 72–81.

doi:10.33979/2073-7416-2020-89-3-72-81. URL:<https://construction.elpub.ru/jour/article/view/286> (date of application:3.04.2021).

22. Гениев Г.А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18–19.

23. Федорова Н.В., Колчунов В.И., Чемодуров В.Т., Кореньков П.А. Определение параметров динамического догружения в арматуре растянутого железобетонного элемента // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 235–241.

24. Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2014. 208 с.

25. Fedorova N.V., Vu N.T., Piushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 896(1). doi:10.1088/1757-899X/896/1/012040. URL:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/896/1/012040> (date of application: 8.12.2020).

REFERENCES

1. Belostotskii A.M., Karpenko N.I., Akimov P.A., Sidorov V.N., Karpenko S.N., Petrov A.N., Kaitukov T.B., Kharitonov V.A. O metodakh rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i na ustoichivost' k progressiruyushchemu obrusheniyu prostranstvennykh plitnoobolocheknykh zhelezobetonnykh konstruksii s uchetom fizicheskoi nelineinosti, treshchinoobrazovaniya i priobretaemoi anizotropii [On methods for calculating the stress-strain state and resistance to progressive collapse of spatial slab-shell reinforced concrete structures, taking into account physical nonlinearity, cracking and acquired anisotropy] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14. No. 2. Pp. 30-47. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47> (rus).

2. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. doi:10.1051/MATECCONF/201825102047.

3. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseitsev A.V., Lagutina A.A. Analiz v geometricheski, fizicheski i konstruktivno nelineinoy postanovke dinamicheskogo povedeniya ploskikh ram pri zaproektnykh vozdeistviyakh // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2012. No. 10. Pp. 49–51. (rus)

4. Tamrazyan A.G., Fedorov V.S., Kharun M. The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 675. No.1. Pp. 012004.

5. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroizdat Publ., 1974. (rus).

6. Scalerandi M., Bentahar M., Mechri C. Conditioning and elastic nonlinearity in concrete: Separation of damping and phase contributions // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 161. Pp. 208-220. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.035.

7. Kayondo M., Combrinck R., Boshoff W.P. State-of-the-art review on plastic cracking of concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 225. Pp. 886-899. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.197.

8. Tošić N., Aidarov S., de la Fuente A. Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete. Materials. 2020. Vol. 13. P. 5098. doi:10.3390/MA13225098. URL:<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/22/5098/htm> (date of application: 3.07.2022).

9. Hung C.C., Hu F.Y. Behavior of high-strength concrete slender columns strengthened with steel fibers under concentric axial loading // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 175. Pp. 422–433. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.201.

10. Filonenko-Borodich M.M. Ob usloviyakh prochnosti materialov, obladayushchikh razlichnym soprotivleniem rastyazheniyu i szhatiyu [On the conditions of strength of materials with different resistance to tension and compression] // Inzh. sbornik. 1954. Vol. 19. Pp. 36–48.

11. Balandin P.P. K voprosu o gipotezakh prochnosti [On the issue of strength hypotheses]// Vestnik inzhenerov i tekhnikov. 1937. (rus)

12. Gvozdev A.A., Karpenko N.I. Rabota zhelezobetona s treshchinami pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Work of reinforced concrete with cracks in a plane stress state]// Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii. 1965. Vol. 2. (rus)

13. Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N., Karpenko S.N., Kadiev D.Z. O postroenii diagrammnogo metoda rascheta sterzhnevnykh zhelezobetonnykh konstruksii v usloviyakh deistviya nizkikh otritsatel'nykh temperatur [On the construction of a diagram method for the calculation of reinforced concrete rod structures under conditions of action of low negative temperatures] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo. 2018. Vol. 714. No. 6. Pp. 5–17. (rus)

14. Feng W., Liu F., Yang F., Li L., Jing L. Experimental study on dynamic split tensile properties of rubber concrete // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 165. Pp. 675–687. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.073.

15. Zhang H., Wang B., Xie A., Qi Y. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 152. Pp. 154–167. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.177.
16. Lu D., Wang G., Du X., Wang Y. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 103. Pp. 124–137. doi:10.1016/J.IJIMPEN7G.2017.01.011.
17. Ren J., Dang F., Wang H., Xue Y., Fang J. Enhancement Mechanism of the Dynamic Strength of Concrete Based on the Energy Principle // *Materials* 2018. Vol. 11. DOI:10.3390/MA11081274. URL:<https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1274/htm> (date of application: 3.07.2022).
18. Fu Q., Xu W., He J., Su L., Song H., Niu D. Dynamic strength criteria for basalt fibre-reinforced coral aggregate concrete // *Composites Communications*. 2021. Vol. 28. doi:10.1016/J.COCO.2021.100983.
19. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Eksperimental'noe opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona pri rezhimnom nagruzhenii [Experimental determination of the parameters of static-dynamic deformation of concrete under regime loading] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 3. Pp. 72–81. (rus)
20. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona [Determination of parameters of static-dynamic deformation of concrete] // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020. No. 1. Pp. 4–11. (rus)
21. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental determination of the parameters of the static-dynamic deformation of concrete under loading modal // *Building and reconstruction*. 2020. Vol 89. No. 3. Pp. 72–81. DOI:10.33979/2073-7416-2020-89-3-72-81. URL:<https://construction.elpub.ru/jour/article/view/286> (date of application: 3.04.2021).
22. Geniev G.A. Metod opredeleniya dinamicheskikh predelov prochnosti betona [Method for determining the dynamic strength of concrete] // *Beton i zhelezobeton*. 1998. No. 1. Pp. 18–19.
23. Fedorova N.V., Kolchuno, V.I., Chemodurov V.T., Koren'kov P.A. Opredelenie parametrov dinamicheskogo dogruzheniya v armature rastyanutogo zhelezobetonnoogo ehlementa [Determination of the parameters of dynamic additional loading in the reinforcement of a tensile reinforced concrete element] // *Izvestiya VUZov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2017. Vol. 4. No. 370. Pp. 235–241. (rus)
24. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproektnykh vozdeystviyakh [Survivability of buildings and structures under beyond design basis impacts]. Moscow: ASV Publ., 2014. (rus)
25. Fedorova N.V., Vu N.T., Piushchenko T.A. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 896. No. 1. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012040. URL:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/896/1/012040> (date of application: 8.12.2020)

Информация об авторах:

Бу Нгок Туен

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры фундаментального образования.
E-mail: ngoctuyennd91@gmail.com

Федорова Наталия Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой архитектурно-строительного проектирования.
E-mail: fenavit@mail.ru

Information about authors:

Vu Ngoc Tuyen

National Research Moscow State Construction University (NRU MGSU), Moscow, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Fundamental Education.
E-mail: ngoctuyennd91@gmail.com

Fedorova Natalia V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
Advisor to RAACS, doctor of technical sciences, professor, head. department of architectural and construction design.
E-mail: fenavit@mail.ru