

Н.Н. ТРЕКИН<sup>1</sup>, Д.Ю. САРКИСОВ<sup>2</sup>, В.В. КРЫЛОВ<sup>1</sup>, Е.Б. ЕВСТАФЬЕВА<sup>3</sup>, К.Р. АНДРЯН<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия

<sup>3</sup>ООО «Научно-проектное бюро «Конструктивные решения»», г. Москва, Россия

<sup>4</sup>АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ПРОДАВЛИВАНИЕ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

*Аннотация.* Современные нормы проектирования развитых стран имеют существенные различия в расчетных положениях по определению несущей способности монолитных железобетонных плит на продавливание и не учитывают полностью особенности конструктивных решений и условий эксплуатации. Имеющиеся расчетные положения разработаны для статического режима нагружения конструкций. Напряженно-деформированное состояние плит на продавливание при динамической нагрузке в настоящее время мало изучено, и как следствие, отсутствуют методики определения несущей способности плит на продавливание при динамическом нагружении. В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований несущей способности плит при статическом и динамическом нагружении. Описана методика экспериментальных исследований и конструкции опытных образцов, оборудование для проведения силовых испытаний, представлены результаты исследований на продавливание фрагментов сопряжения плоских железобетонных монолитных плит с колонной при динамическом и статическом нагружении. Представлено сравнение разрушающей нагрузки для образцов, испытанных при динамическом нагружении с разрушающей нагрузкой для образцов, испытанных на статическую нагрузку. Определены факторы, влияющие на прочность плит при продавливании при динамическом нагружении. Разработаны предложения по совершенствованию методики расчёта прочности плоских железобетонных плит при продавливании на статическую и динамическую нагрузку.

*Ключевые слова:* динамическая нагрузка, безбалочная плита, прочность на продавливание, метод конечных элементов.

N.N. TREKIN<sup>1</sup>, D.Y. SARKISOV<sup>2</sup>, V.V. KRYLOV<sup>1</sup>, E.B. EVSTAFIEVA<sup>3</sup>, K.R. ANDRIAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>LLC «Scientific Design Bureau «Constructive Solutions», Moscow, Russia

<sup>4</sup>JSC «Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy», Moscow, Russia

## STRENGTH OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLABS FOR PUNCHING UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING

*Abstract.* Modern design standards of developed countries have significant differences in the design provisions for determining the bearing capacity of monolithic reinforced concrete slabs for punching and do not fully take into account the features of design solutions and operating conditions. The available design positions are designed for the static loading mode of structures. The stress-strain state of plates for punching under dynamic load is currently little studied, and as a result, there are no methods for determining the bearing capacity of plates for punching under dynamic loading. The article

*presents the results of experimental and theoretical studies of the bearing capacity of plates under static and dynamic loads. The methodology of experimental studies and the design of prototypes, equipment for conducting power tests are described, the results of studies on the penetration of fragments of the interface of flat reinforced concrete monolithic slabs with a column under dynamic and static loading are presented. A comparison of the destructive load for samples tested under dynamic loading with the destructive load for samples tested under static load is presented. The factors affecting the strength of the plates during punching under dynamic loading are determined. Proposals have been developed to improve the methodology for calculating the strength of flat reinforced concrete slabs when pushing through static and dynamic loads.*

**Keywords:** *dynamic load, girderless plate, punching strength, finite element method.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 89 – 95.
2. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю., Бугузов Е.А. Оценка степени живучести ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 12. С. 122 – 135.
3. 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.
4. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. «Натурный и численный эксперименты». Одесса: ОНМУ, 2011.
5. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. 2009.
6. Крылов В.В. Проверка несущей способности монолитной железобетонной плиты на продавливание при действии динамической нагрузки // Научный аспект. 2019. Т. 3. № 3. С. 320 – 325.
7. Крылов В.В., Саркисов Д.Ю., Эргешов Э.Т., Евстафьева Е.Б. Программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении. Конструкция опытных образцов // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3.
8. Патент на изобретение № 2726031. Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременной динамической нагрузке.
9. Sarkisov D.Yu., Odnokopylov G.I., Krylov V.V., Annenkov A.O. Numerical and experimental studies of deflections of conventional and strengthened reinforced concrete bendable elements under short-term dynamic loading // INCAS BULLETIN. 2021. Vol. 13. Special Issue. [https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov\\_odnokopylov\\_krylov\\_all\\_vol\\_13\\_special\\_iss.pdf](https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov_odnokopylov_krylov_all_vol_13_special_iss.pdf)
10. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 208. 110336. Pp. 1-19. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110336>
11. Alejandro Pérez Caldentey, Yolanda G. Diego, Freddy Ariñez Fernández, Anastasio P. Santos, Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // Engineering Structures. 2021. Vol. 240, 112411. Pp. 1-17. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112411>
12. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan, Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies // Engineering Structures. 2021. Vol. 229. 111639. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111639>.
13. Mohamed Eladawy, Mohamed Hassan, Brahim Benmokrane, Emmanuel Ferrier, Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab-column connections reinforced with GFRP bars // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. 109978. Pp. 1-15. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109978>
14. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces // Engineering Structures. 2021. Vol. 231. 111787. Pp. 1-14. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111787>
15. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 173. 106254. Pp. 1-16. ISSN 0143-974X. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106254>
16. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading // Engineering Structures. 2020. Vol. 206. 110125. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>.
17. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. Pp. 822-830. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085>

18. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-Punching Behavior of Flat Slabs // *ACI Structural Journal*. USA, 2013. Vol. 110. Pp. 801-812. <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
19. Melo G.S. «Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure» PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990. 214 p. <https://www.researchgate.net/publication/352157118>
20. More R.S., Sawant V.S. Analysis of Flat Slab. July 2015. Vol. 4. Issue 7. ISSN: 2319-7064. [https://www.ijsr.net/get\\_abstract.php](https://www.ijsr.net/get_abstract.php)
21. Петров А.Н. Экспериментальные исследования бетона при нагружении сжатием и срезом // *Бетон и железобетон*. 1965. № 11. С. 34-37.

## REFERENCES

1. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Ocenka parametrov razrushayushhej nagruzki pri udarno-volnovom nagruzhении dlya otvetstvenny`x stroitel`ny`x konstrukcij sooruzhenij neftegazovogo kompleksa // *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2017. T. 328. No. 3. Pp. 89 – 95.
2. Odnokopylov G.I. Sarkisov D.Yu., Butuzov E.A. Ocenka stepeni zhivuchesti otvetstvenny`x stroitel`ny`x konstrukcij pri udarno-volnovom nagruzhении // *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2018. T. 329. No. 12. Pp. 122 – 135.
3. Trekin N.N., Krylov V.V. K voprosu o nesushhej sposobnosti zhelezobetonny`x plit na prodavlivanie pri dinamicheskom nagruzhении na ob`ektax nazemnoj kosmicheskoy infrastruktury // *Nauchny`j aspekt*. 2018. T. 7. No. 4. Pp. 771.
4. Klovanych S.F., Shexovczov V.I. Prodavlvanie zhelezobetonny`x plit. *Naturny`j i chislenny`j e`ksperimenty*». Odessa: ONMU, 2011.
5. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. E`kstremal`ny`e vozdeystviya na sooruzheniya. 2009.
6. Krylov V.V. Proverka nesushhej sposobnosti monolitnoj zhelezobetonnoj plity` na prodavlivanie pri deystvii dinamicheskoy nagruzki // *Nauchny`j aspekt*. 2019. T. 3. No. 3. Pp. 320 – 325.
7. Krylov V.V., Sarkisov D.Yu., E`rgeshov E.T., Evstaf`eva E.B. Programma e`ksperimental`ny`x issledovanij nesushhej sposobnosti bezbalochny`x plit na prodavlivanie pri dinamicheskom nagruzhении. *Konstrukciya opy`tny`x obrazczov // Stroitel`ny`e materialy` i izdeliya*. 2020. T. 3. No. 3.
8. Patent na izobretenie № 2726031. Stend dlya ispy`taniya zhelezobetonny`x e`lementov na prodavlivanie pri kratkovremennoj dinamicheskoj nagruzke.
9. Sarkisov D.Yu. , Odnokopylov G.I., Krylov V.V., Annenkov A.O. Numerical and experimental studies of deflections of conventional and strengthened reinforced concrete bendable elements under short-term dynamic loading // *INCAS BULLETIN*. 2021. Vol. 13. Special Issue. [https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov\\_odnokopylov\\_krylov\\_all\\_vol\\_13\\_special\\_iss.pdf](https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov_odnokopylov_krylov_all_vol_13_special_iss.pdf)
10. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 208. 110336. Pp. 1-19. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110336>
11. Alejandro Pérez Caldentey, Yolanda G. Diego, Freddy Ariñez Fernández, Anastasio P. Santos, Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240, 112411. Pp. 1-17. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112411>
12. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan, Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 229. 111639. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111639>.
13. Mohamed Eladawy, Mohamed Hassan, Brahim Benmokrane, Emmanuel Ferrier, Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab–column connections reinforced with GFRP bars // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. 109978. Pp. 1-15. ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109978>
14. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 231. 111787. Pp. 1-14. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111787>
15. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Vol. 173. 106254. Pp. 1-16. ISSN 0143-974X. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106254>
16. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. 110125. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>.
17. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. Pp. 822-830. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085>
18. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-Punching Behavior of Flat Slabs // *ACI Structural Journal*. USA, 2013. Vol. 110. Pp. 801-812. <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
19. Melo G.S. «Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure» PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990. 214 p. <https://www.researchgate.net/publication/352157118>

20. More R.S., Sawant V.S. Analysis of Flat Slab. July 2015. Vol. 4. Issue 7. ISSN: 2319-7064. [https://www.ijsr.net/get\\_abstract.php](https://www.ijsr.net/get_abstract.php)

21. Petrov A.N. Eksperimental'ny'e issledovaniya betona pri nagruzhении szhatiem i srezom // Beton i zhelezobeton. 1965. No. 11. Pp. 34-37.

**Информация об авторах:**

**Трекин Николай Николаевич**

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

доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: [nik-trekin@yandex.ru](mailto:nik-trekin@yandex.ru)

**Саркисов Дмитрий Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,  
кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: [Milandd@yandex.ru](mailto:Milandd@yandex.ru)

**Крылов Владимир Владимирович**

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

аспирант.

E-mail: [albet-group@yandex.ru](mailto:albet-group@yandex.ru)

**Евстафьева Елизавета Борисовна**

ООО «Научно-проектное бюро «Конструктивные решения»», г. Москва, Россия  
начальник отдела научного сопровождения.

E-mail: [npb-kr@yandex.ru](mailto:npb-kr@yandex.ru)

**Андрян Константин Рашидович**

АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,  
инженер.

E-mail: [andryankr@mail.ru](mailto:andryankr@mail.ru)

**Information about authors:**

**Trekin Nikolai N.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,  
doctor of technical sciences, professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structure.

E-mail: [nik-trekin@yandex.ru](mailto:nik-trekin@yandex.ru)

**Sarkisov Dmitry Yu.**

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,  
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structure

E-mail: [Milandd@yandex.ru](mailto:Milandd@yandex.ru)

**Krylov Vladimir V.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,  
graduate student.

E-mail: [albet-group@yandex.ru](mailto:albet-group@yandex.ru)

**Yvstafieva Elizaveta B.**

LLC «Scientific Design Bureau «Constructive Solutions», Moscow, Russia,  
head of Scientific and Technical Support Department.

E-mail: [ipevstafeva@yandex.ru](mailto:ipevstafeva@yandex.ru)

**Andrian Konstantin R.**

JSC «Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy», Moscow, Russia,  
engineer.

E-mail: [andryankr@mail.ru](mailto:andryankr@mail.ru)