



УДК 69.07

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.35-42

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Совершенствование методики расчета плит на продавливание

Н.Н. Трекин^{1*}, В.В. Крылов¹, К.Р. Андриян²¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация² АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), Москва, Российская Федерация

* otk@yandex.ru

Ключевые слова: динамическая нагрузка, безбалочная плита, схема разрушения, продавливание

История статьи

Поступила в редакцию: 24.04.2024

Доработана: 30.04.2024

Принята к публикации: 3.05.2024

Для цитирования

Трекин Н.Н., Крылов В.В., Андриян К.Р. Совершенствование методики расчета плит на продавливание // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 2. № 6. С. 35–42.

Аннотация. В статье сформулированы предложения по совершенствованию расчетной методики на продавливание. Методики в действующих нормативных документах по оценке прочности на продавливание основываются в основном на эмпирических зависимостях, полученных на основе многочисленных экспериментальных исследований. Следует отметить, что они дают надежные результаты при соблюдении определенных конструктивных требований (типовые сечения колонн). По линии сопряжения плиты с прямоугольной (квадратной) колонной действуют опорные изгибающие моменты в двух ортогональных направлениях. Величина этих моментов для наиболее распространенных пролетов велика и в упругой постановке превышает пролетные в два раза. Учитывая перераспределение усилий и наиболее вероятное образование трещин в растянутой зоне, можно утверждать, что в эксплуатационной стадии опорные сечения плит имеют сжатую и растянутую зоны. При таком напряженно-деформированном состоянии в расчетной схеме при оценке прочности на продавливание следует исключить растянутую часть боковой поверхности «приведенной» пирамиды, ограниченной нейтральной осью по всем граням. В результате представлены выражения для определения параметров приведенной пирамиды продавливания и значения усилий в бетоне и арматуре в предельной по несущей способности стадии.

Improvement of the Method of Calculating Plates for Punching

Nikolay N. Trekin^{1*}, Vladimir V. Krylov¹, Konstantin R. Andrian²¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation² 2 Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Moscow, Russian Federation

* otk@yandex.ru

Трекин Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 4721-2525, E-mail: otk@yandex.ru

Крылов Владимир Владимирович, аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, E-mail: albet-group@yandex.ru

Андриян Константин Рашидович, аспирант, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт (АО ЦНИИПромзданий)», 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 46/2, E-mail: andriankr@mail.ru

© Трекин Н.Н., Крылов В.В., Андриян К.Р., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: dynamic load, girderless plate, fracture pattern, punching

Article history

Received: 24.04.2024

Revised: 30.04.2024

Accepted: 3.05.2024

For citation

Trekin N.N., Krylov V.V., Andryan K.R. Improvement of the Method of Calculating Plates for Punching. *Reinforced concrete structures*. 2024; 2(6):35-42.

Abstract. The article formulates proposals for improving the calculation methodology for punching. The methods in the current regulatory documents for assessing the tensile strength are based mainly on empirical dependencies obtained on the basis of numerous experimental studies. It should be noted that they give reliable results if certain design requirements are met (typical column sections). Along the interface line of the plate with a rectangular (square) column, supporting bending moments act in two orthogonal directions. The magnitude of these moments for the most common spans is large and, in an elastic setting, exceeds the span by two times. Taking into account the redistribution of forces and the most likely formation of cracks in the stretched zone, it can be argued that in the operational stage, the support sections of the plates have compressed and stretched zones. With such a stress-strain state, in the calculation scheme, when evaluating the tensile strength, the stretched part of the side surface of the “reduced” pyramid, bounded by the neutral axis along all faces, should be excluded. As a result, expressions are presented to determine the parameters of the reduced punching pyramid and the value of forces in concrete and reinforcement at the maximum bearing capacity stage.

ВВЕДЕНИЕ

Методики в действующих нормативных документах по оценке прочности на продавливание основываются в основном на эмпирических зависимостях, полученных на основе многочисленных экспериментальных исследований [1–12]. Следует отметить, что они дают надежные результаты при соблюдении определенных конструктивных требований (типовые сечения колонн).

В работах [13–20] представлены основные результаты комплекса экспериментальных исследований фрагментов сопряжения монолитных железобетонных плит с колоннами на продавливание при статическом и динамическом нагружениях. В результате получены величины разрушающих нагрузок, деформации бетона и арматуры, схемы разрушения для различных режимов нагружения.

Экспериментально-теоретическими исследованиями, выполненными в данной работе, установлено, что угол наклона пирамиды продавливания при центральном приложении нагрузки зависит от вида воздействия: при динамическом нагружении составил 50–52°, при статическом нагружении — 39–45°. Схема разрушения при высокоскоростном нагружении по характеру аналогична разрушению при статическом нагружении.

Снижение несущей способности перекрытия на продавливание при времени нагружения от нуля до разрушения 3,22 мс, по сравнению со статическим приложением нагрузки, в среднем составило 15 %.

При разрушении по схеме продавливания напряжения в нижней растянутой арматуре и сжатом бетоне плиты перекрытия в границах, очерченных гранью пирамиды, не достигают предельных. При выбранном проценте армирования напряжения растяжения в арматуре достигали: при динамическом нагружении — $0,7R_s$; при статическом нагружении — $0,9R_s$, максимальные напряжения сжатия в бетоне при статическом и динамическом нагружениях составили $0,65R_b$.

Nikolai N. Trekin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-code: 4721-2525, E-mail: otk@yandex.ru

Vladimir V. Krylov, Graduate student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, E-mail: albet-group@yandex.ru

Konstantin R. Andryan, Graduate student, Joint Stock Company “Central Research and Design Experimental Institute (JSC Tsniipromzdaniy)”, Dmitrovskoe sh., 46/2, Moscow, 127238, Russian Federation, E-mail: andryankr@mail.ru

МЕТОДЫ

Для описания напряженно-деформированного состояния сопряжения колонны с монолитным перекрытием были приняты следующие предпосылки:

- разрушение сопряжения происходит от продавливания по поверхности усеченной пирамиды;
- по граням пирамиды продавливания действуют перерезывающие силы и изгибающие моменты, воспринимаемые сжатым бетоном в усеченной части пирамиды и растянутой арматурой перекрытия в пределах контура основания пирамиды;
- прочность продавливания в предельной стадии обеспечивается сопротивлением срезу бетона сжатой части пирамиды;
- сопротивление срезу возрастает с учетом бокового обжатия.

Сумма проекций всех сил на вертикальную ось или несущая способность сопряжения при продавливании определяется как:

$$N = Q_{bx1} + Q_{bx2} + Q_{by1} + Q_{by2}, \quad (1)$$

где Q_{bi} — усилие по вертикальной оси, воспринимаемое бетоном по поверхности пирамиды продавливания для i -й грани пирамиды продавливания.

Усилие, воспринимаемое бетоном по поверхности пирамиды продавливания при симметричном узлом сопряжении, определяется по формуле:

$$Q_{bi} = k_1 \sigma_{sh} k_2 A_{redi} \sin \varphi, \quad (2)$$

где σ_{sh} — максимальные касательные напряжения по поверхности пирамиды продавливания, определяются по формуле (4);

k_1 — коэффициент полноты эпюры распределения касательных напряжений (при распределении напряжений по параболе $k_1 \cong 0,66$);

k_2 — коэффициент, учитывающий повышение прочности на срез при наличии бокового обжатия;

A_{redi} — площадь боковой поверхности i -й грани приведенной пирамиды продавливания;

φ — угол наклона грани пирамиды к плоскости перекрытия.

При центральном нагружении усилие продавливания будет иметь вид:

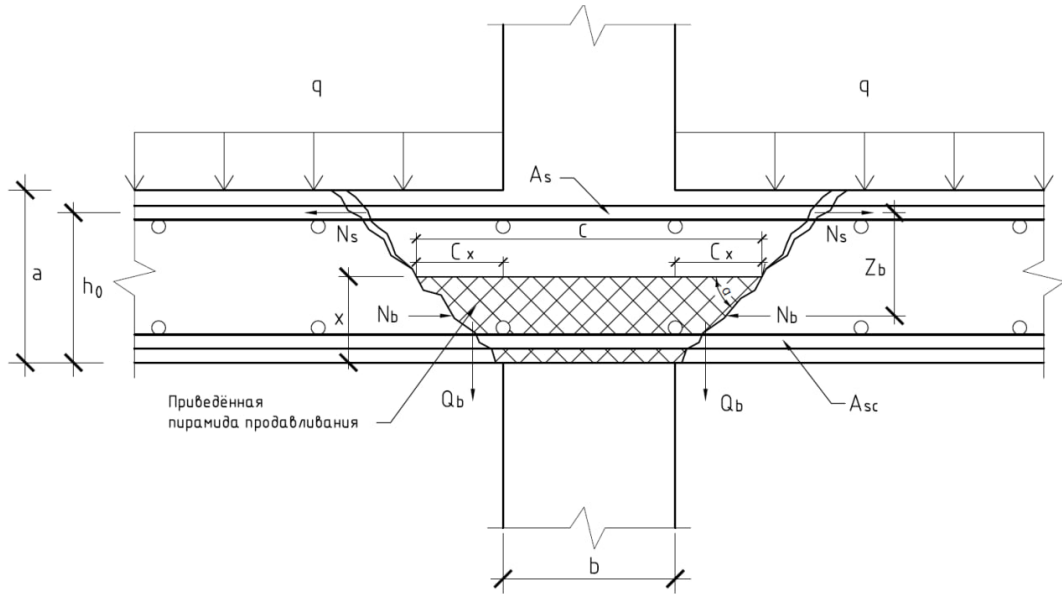
$$N = 4Q_{bi}. \quad (3)$$

Максимальные касательные напряжения будут равны сопротивлению срезу, которое можно определить из известного выражения:

$$R_{sh} = \sigma_{sh} = 0,75 \sqrt{R_b R_{bt}}, \quad (4)$$

где R_b и R_{bt} — призмная прочность бетона и прочность бетона при растяжении.

В соответствии с принятыми предпосылками определены геометрические параметры «приведенной» пирамиды продавливания, образованной по поверхности пирамиды продавливания в границах высоты сжатой зоны (рис.).



Расчетная схема к определению несущей способности узла сопряжения колонны с перекрытием при продавливании
Calculation scheme for determining the bearing capacity of the coupling node of a column with an overlap during punching

Размер нижнего основания i -й грани приведенной пирамиды продавливания определяется по формуле:

$$c_i = b + 2x_i \cos \alpha / \sin \alpha, \quad (5)$$

где x_i — высота сжатой зоны i -й грани;

α — угол продавливания.

Высота i -й грани боковой поверхности приведенной пирамиды продавливания определяется по формуле:

$$h_{red,i} = x_i / \sin \alpha. \quad (6)$$

Площадь грани пирамиды продавливания:

$$A_{b,red,i} = \frac{b+c_i}{2} h_{red,i} = \frac{1}{2} \left(2b + 2x_i \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \frac{x_i}{\sin \alpha} = \left(b + \frac{x_i \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \frac{x_i}{\sin \alpha}, \quad (7)$$

где b — ширина колонны.

Площадь боковой поверхности приведенной пирамиды продавливания:

$$A_{b,red} = \sum_{i=1}^n A_{b,red,i} = \left(b + \frac{x_1 \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \frac{x_1}{\sin \alpha} + \dots + \left(b + \frac{x_n \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \frac{x_n}{\sin \alpha}. \quad (8)$$

Усилие в бетоне сжатой зоны:

$$N_{b,i} = \sigma_b \cdot \frac{1}{2} \left(b + x_i \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) x_i. \quad (9)$$

Усилие в сжатой арматуре i -й грани:

$$N_{sc,i} = \sigma_{sc,i} \cdot A'_s, \quad (10)$$

где A'_s — площадь сжатой арматуры;

σ_{sc} — напряжение в сжатой арматуре, равное:

$$\sigma_{sc,i} = E_s \cdot \sigma_{b,i} / (E_b \cdot \nu) = \alpha \cdot \sigma_{b,i} / \nu, \quad (11)$$

где E_s — модуль упругости арматуры;

α есть отношение $\frac{E_s}{E_b}$.

Усилие в растянутой арматуре i -й грани в пределах нижней грани призмы обрушения:

$$N_{s,i} = \sigma_{s,i} \cdot A_s = \frac{h_0 - x_i}{x_i} \alpha' \cdot \sigma_{b,i} \cdot A_s. \tag{12}$$

Зная высоту сжатой зоны для каждой грани, изгибающий момент относительно центра тяжести растянутой арматуры при известном плече внутренней пары сил i -й грани:

$$z_{\sigma,i} = h_0 - x_i / 3;$$
$$M_{xi(Yi)} = \sigma_{b,i} \cdot \frac{1}{2} \left(b + x_i \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) x_i \left(h_0 - \frac{x_i}{3} \right) + \alpha' \cdot \sigma_{b,i} \cdot A_s. \tag{13}$$

Выражение напряжения сжатия бетона будет иметь вид:

$$\sigma_{b,i} = \frac{M_{xi(Yi)}}{\frac{1}{2} \left(b + x_i \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) x_i \left(h_0 - \frac{x_i}{3} \right) + \alpha' \cdot A_s (h_0 - a')}. \tag{14}$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в предельной стадии:

- относительная высота сжатой зоны при статическом нагружении соответствует $\xi = 0,46$, а при динамическом нагружении — в среднем $\xi = 0,36$;
- уровень напряжений в бетоне сжатой зоны составил $0,62R_b$ при статическом и динамическом нагружениях;
- напряжения в растянутой арматуре при статическом нагружении достигали уровня $0,9R_s$, при динамическом нагружении уровень напряжения составил $0,75 R_s$;
- коэффициенты увеличения прочности бетона на срез k_2 получились близкими к экспериментальным значениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагаемая методика оценки несущей способности узла сопряжения монолитного перекрытия с колонной при разрушении по схеме продавливания была использована для расчета образцов других авторов [1, 21, 22]. Результаты сопоставления теории с опытными данными представлены в таблице.

Результаты расчета экспериментальных образцов известных авторов по предлагаемой методике

Автор	R_b , МПа	A_b , см ²	A_s , см ²	N_{exp} , кН	$K_{2\,exp}$	$K_{2\,theor}$	N_{theor} , кН	$\frac{N_{theor}}{N_{exp}}$, %
Пекин Д.А.	22	2460	11,3	1180	1,84	1,95	1253,1	6,2
Клованич С.Ф.	21,6	1167,3	9,04	776	2,19	2,34	830,75	7,1
Болгов А.Н.	33	380,3	3,14	254	1,71	1,86	276	8,7

The results of the calculation of experimental samples by well-known authors according to the proposed method

Author	R_b , МПа	A_b , см ²	A_s , см ²	N_{exp} , кН	$K_{2\,exp}$	$K_{2\,theor}$	N_{theor} , кН	$\frac{N_{theor}}{N_{exp}}$, %
Pekin D.A.	22	2,460	11,3	1,180	1.84	1.95	1,253.1	6.2
Klovanich S.F.	21.6	1,167.3	9.04	776	2.19	2.34	830.75	7.1
Bolgov A.N.	33	380.3	3.14	254	1.71	1.86	276	8.7

Как видно из таблицы, разработанные рекомендации по совершенствованию методики расчета на продавливание, учитывающие продольную арматуру плит перекрытия и основан-

ные на условии равновесия внутренних и внешних усилий, дают удовлетворительную сходимость экспериментальных и теоретических данных.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ отечественных и зарубежных работ по исследованию несущей способности монолитных железобетонных плит перекрытий на продавливание при статическом нагружении показал недостатки в исследованности объемного напряженно-деформированного состояния сечений при продавливании и отсутствие единого подхода к определению прочности, учитывающего конструктивные особенности монолитных железобетонных плит перекрытий и весь комплекс внутренних усилий, оказывающих сопротивление центральной нагрузке. Недостаточно изученным остается вопрос сопротивления продавливанию монолитных железобетонных плит перекрытий при динамическом нагружении.

2. Проведен комплекс экспериментальных исследований фрагментов сопряжения монолитных железобетонных плит с колоннами на продавливание при статическом и динамическом нагружениях. В результате получены величины разрушающих нагрузок, деформации бетона и арматуры, схемы разрушения для различных режимов нагружения.

3. Экспериментально-теоретическими исследованиями, выполненными в данной работе, установлено, что угол наклона пирамиды продавливания при центральном приложении нагрузки зависит от вида воздействия: при динамическом нагружении составил $50\text{--}52^\circ$, при статическом нагружении — $39\text{--}45^\circ$. Схема разрушения при высокоскоростном нагружении по характеру аналогична разрушению при статическом нагружении.

4. Снижение несущей способности перекрытия на продавливание при времени нагружения от нуля до разрушения 3,22 мс, по сравнению со статическим приложением нагрузки, в среднем составило 15 %;

5. При разрушении по схеме продавливания напряжения в нижней растянутой арматуре и сжатом бетоне плиты перекрытия в границах, очерченных гранью пирамиды, не достигают предельных. При выбранном проценте армирования напряжения растяжения в арматуре достигали: при динамическом нагружении — $0,7R_s$; при статическом нагружении — $0,9R_s$, максимальные напряжения сжатия в бетоне при статическом и динамическом нагружениях составили $0,65R_b$.

6. Разработаны рекомендации по совершенствованию методики расчета плит при центральном продавливании статической и динамической нагрузкой, основанные на фактической схеме разрушения при наличии двойного продольного армирования в плитах перекрытия, условиях равновесия внутренних и внешних усилий с учетом увеличения прочностных свойств бетона при сложном напряженном состоянии. Результаты расчета, с учетом предложенных рекомендаций, показали хорошую сходимость с результатами экспериментальных данных испытанных образцов и экспериментальных данных других авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты. Одесса : ОНМУ, 2011.
2. Yu J., Luo L.-Z., Fang Q. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 208. No. 110336. Pp. 1–19. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110336
3. Caldentey A.P., Diego Y.G., Fernández F.A., Santos A.P. Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // Engineering Structures. 2021. Vol. 240. No. 112411. Pp. 1–17. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112411
4. Men J., Xiong L., Wang J., Fan G. Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies // Engineering Structures. 2021. Vol. 229. No. 111639. P. 1. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111639.

5. Eladawy M., Hassan M., Benmokrane B., Ferrier E. Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab–column connections reinforced with GFRP bars // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. No. 109978. Pp. 1–15. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109978
6. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 231. No. 111787. Pp. 1–14. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111787
7. 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. No. 106254. Pp. 1–16. ISSN 0143-974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106254
8. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. No. 110125. Pp. 1–13. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110125.
9. 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085
10. Fernández R.M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-Punching Behavior of Flat Slabs // *ACI Structural Journal*. USA, 2013. Vol. 110. Pp. 801–812. URL: <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
11. Melo G.S. Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure. PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990. 214 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/352157118>
12. More R.S., Sawant V.S. Analysis of Flat Slab. July 2015. Vol. 4. Issue 7. ISSN: 2319-7064. URL: https://www.ijsr.net/get_abstract.php
13. Трекин Н.Н., Крылов В.В. К вопросу о несущей способности плит на продавливание при динамическом нагружении на объектах наземной космической инфраструктуры // *Научный аспект*. 2018. Т. 7. № 4. С. 771–776.
14. Крылов В.В. Проверка несущей способности монолитной плиты на продавливание при действии динамической нагрузки // *Научный аспект*. 2019. Т. 3. № 3. С. 320–325.
15. 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. С. 47–53. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-3-47-53
16. Трекин Н.Н., Крылов В.В., Трофимов С.В., Евстафьева Е.Б., Саркисов Д.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. С. 1006–1014.
17. Трекин Н.Н., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б., Андрян К.Р. Экспериментальное исследование прочности плит на продавливание при динамическом нагружении // *Строительные материалы и изделия*. 2021. Т. 4. № 4. С. 41–48.
18. Трекин Н.Н., Саркисов Д.Ю., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б., Андрян К.Р. Несущая способность монолитных железобетонных плит на продавливание при статическом и динамическом нагружении // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 5 (103). С. 67–79.
19. Крылов В.В. Прочность на продавливание при статическом и динамическом нагружениях // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 1.
20. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Шмаков С.Д., Чаганов А.Б., Черепанов А.В. Разработка датчика напряжений твердых тел // *Железобетонные конструкции*. 2024. № 5 (1). С. 45–56. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.45-56
21. Пекин Д. А. Влияние изгиба на механизм продавливания опорной зоны железобетонной плиты // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 10. С. 20–28.
22. Болгов А.Н. Надежность формул СП 52-101–2003 при расчете на продавливание // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 2. С. 41–43.

REFERENCES

1. Klovianich S.F., Shekhovtsov V.I. *Punching of reinforced concrete slabs. Natural and numerical experiments*. Odessa : ONMU, 2011.
2. Yu J., Luo L.-Z., Fang Q. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subject to perimeter middle column removal scenario. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 208. No. 110336. Pp. 1-19. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110336
3. Caldentey A.P., Diego Y.G., Fernández F.A., Santos A.P. Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 240. No. 112411. Pp. 1-17. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112411
4. Men J., Xiong L., Wang J., Fan G. Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 229. No. 111639. P. 1. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111639.

5. Eladawy M., Hassan M., Benmokrane B., Ferrier E. Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab–column connections reinforced with GFRP bars. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. No. 109978. Pp. 1-15. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109978
6. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subject to combined punching shear and in-plane tensile forces. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 231. No. 111787. Pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111787
7. Yu J.L., Wang Y.C. Modeling 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. No. 106254. Pp. 1-16. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106254
8. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. No. 110125. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110125
9. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fiber reinforced concrete slabs to blast loading. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. Pp. 822-830. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085
10. Fernández R.M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-Punching Behavior of Flat Slabs. *ACI Structural Journal*. 2013. Vol. 110. Pp. 801-812. URL: <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
11. Melo G.S. *Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure*. PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990. 214 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/352157118>
12. More R.S., Sawant V.S. *Analysis of Flat Slab*. July 2015. Vol. 4. Issue 7. URL: https://www.ijsr.net/get_abstract.php
13. Trekin N.N., Krylov V.V. On the issue of the load-bearing capacity of slabs for punching under dynamic loading on ground-based space infrastructure objects. *Scientific aspect*. 2018. Vol. 7. No. 4. Pp. 771-776.
14. Krylov V.V. Testing the load-bearing capacity of a monolithic slab for punching under the action of a dynamic load. *Scientific aspect*. 2019. Vol. 3. No. 3. Pp. 320-325.
15. Krylov V.V., Sarkisov D.Yu., Ergeshov E.T., Evstafieva E.B. A program of experimental studies of the load-bearing capacity of beamless slabs for punching under dynamic loading. design of prototypes. *Construction materials and products*. 2020. Vol. 3. No. 3. Pp. 47-53. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-3-47-53
16. Trekin N.N., Krylov V.V., Trofimov S.V., Evstafieva E.B., Sarkisov D.Yu. Experimental and theoretical study of the punching strength of slabs. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. Pp. 1006-1014.
17. Trekin N.N., Krylov V.V., Evstafieva E.B., Andryan K.R. Experimental study of the punching strength of slabs under dynamic loading. *Construction materials and products*. 2021. Vol. 4. No. 4. Pp. 41-48.
18. Trekin N.N., Sarkisov D.Yu., Krylov V.V., Evstafieva E.B., Andryan K.R. Bearing capacity of monolithic reinforced concrete slabs for punching under static and dynamic loading. *Building and reconstruction*. 2022. No. 5 (103). Pp. 67-79.
19. Krylov V.V. Punching strength under static and dynamic loading. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024. No. 1.
20. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Chaganov A.B., Cherepanov A.V. Development of a Stress Sensor for Solids. *Reinforced concrete structures*. 2024. No. 5(1). Pp. 45-56. DOI:10.22227/2949-1622.2024.1.45-56 (in Russian).
21. Pekin D.A. The influence of bending on the mechanism of pushing through the support zone of a reinforced concrete slab. *Industrial and Civil Construction*. 2019. No. 10. Pp. 20-28.
22. Bolgov A.N. Reliability of formulas SP 52-101–2003 when calculating punching force. *Industrial and civil construction*. 2013. No. 2. Pp. 41-43.