

Работа железобетонных плит при продавливании

Альзурфи Мохаммед Кадхим Аллави, А.Н. Леонова, А.А. Хорошев

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Аннотация: В данной статье приведены результаты зарубежных и отечественных исследований работы железобетонных плит при продавливании колонной. Рассмотрены параметры, влияющие на прочность сдвига соединений колонн и плит. Рассмотрено влияние прочности бетона, расположения арматуры, коэффициента армирования, формы и размеров колонны. Описаны различные типы усиления железобетонных плит в зоне продавливания.

Ключевые слова: плита перекрытия, колонна, продавливание, сдвиг, изгиб, бетон, подольная арматура, поперечная арматура, нагельное действие.

В узле сопряжения плоской железобетонной плиты с колонной возникают поперечные силы и моменты, являющиеся причиной продавливания плиты колонной. Такое разрушение сопровождается образованием сначала кольцевых, а затем радиальных трещин (рис. 1, а) [1] из-за отрицательных изгибающих моментов в соответствующем направлении. После значительного увеличения нагрузки вокруг нагруженного участка на некотором расстоянии от колонны в плите образуются тангенциальные трещины. Примерно в то же время внутри плиты вблизи колонны начинают образовываться трещины продавливания. Они распространяются под углом от 25 до 35 градусов по толщине плиты, начиная от зоны смешанного режима (изгиба и сдвига) в верхней части плиты к зоне сжатия в нижней части плиты. Вокруг колонны формируется поверхность разрушения в виде пирамиды продавливания (рис.1, б) [1].

При формировании напряженного состояния в плите вокруг колонны свой вклад вносят несбалансированные изгибающие моменты из-за неодинаковых пролетов плиты, а также горизонтальные ветровые или сейсмические воздействия. Основные и особые сочетания перечисленных нагрузок вызывают образование вблизи периметра колонны внутренних

усилий в виде изгибающих моментов и поперечных сил. Это сложное напряженное состояние уравнивается совокупностью напряжений в продольной арматуре плиты при изгибе, прочности бетона на сдвиг и арматуры на сдвиг в непосредственной близости от колонны.



Рис. 1 – Образование пирамиды продавливания в плите [1]

Рассмотрим параметры, влияющие на прочность при продавливании соединений перекрытий с колоннами.

Модели и теоретические методы расчета плит на продавливание обычно задаются в виде эмпирических уравнений, основанных на наблюдаемых режимах разрушения от изгиба или сдвига. Адекватность и точность модели зависит от количества учитываемых параметров. К параметрам, влияющим на несущую способность плиты в зоне продавливания относятся: прочность бетона, прочность арматуры и

коэффициент армирования, расположение арматуры, форма и размер колонны.

Прочность бетона

В зарубежной литературе представлены данные исследований по определению зависимости между прочностью на сжатие R_b и прочностью на сдвиг. В работе [2] впервые доказано, что прочность на сдвиг зависит не от R_b , а от $\sqrt{R_b}$. Получено эмпирическое уравнение:

$$V_n = \frac{1,25 \left(1 - 0,075 \frac{d}{h} \right) \sqrt{R_b}}{1 + \frac{0,44 b_0 d \sqrt{R_b}}{V_{flex}}} b_0 d, [2] \quad (1)$$

где V_n – предельная номинальная прочность на продавливание;

d – размер сечения колонны;

h – толщина плиты;

b_0 – длина периметра критического сечения;

V_{flex} – прочность плиты на сдвиг при изгибном продавливании в соответствии с уравнением (2).

$$V_{flex} = 8M_b \left(\frac{L}{S-d} - 0,172 \right), [2] \quad (2)$$

где L – сторона квадратной плиты;

S – пролет плиты (между опорами);

d – длина стороны квадратного сечения колонны;

M_b – радиальный момент в плите.

В российских и зарубежных нормах методика расчета прочности плит на продавливание основывается на экспериментальных данных и формулы носят полуэмпирический характер. В качестве расчетной модели принимается «тело продавливания» [3], находящееся внутри бетона плиты

вокруг колонны. По боковой поверхности этого тела происходит разрушение бетона от его растяжения (среза). Расчетное сечение перпендикулярно плоскости плиты. Расстояние от него до граней колонны варьируется в зависимости от норм.

В Российском СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции рассматривают расчетное поперечное сечение на расстоянии $0,5h_0$ от грани колонны, где h_0 – рабочая высота сечения плиты. Соотношение длин сторон сечения колонны при этом не учитывается.

В нормах США (Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary. USA. 2005) указанное расстояние составляет $1,5h_0$, при этом поправочный коэффициент может понижать эту величину при неквадратном сечении колонны (если соотношение сторон более двух). Тем самым результаты расчетов приближаются к данным эксперимента.

В Eurocode 2 Design of concrete structures: BS EN 1992-1-1 and BS EN 1992.1-2. 2004 из периметра расчетного контура предлагается вычитать часть его вдоль длинной стороны колонны.

Как показано в работах [4, 5], в случае неквадратной формы сечения колонны расчеты по российским нормам завышают прочность плит при продавливании, в то же время применение европейских норм ее занижает. Нормы США ACI-318 содержат более гибкий подход к задаче, учитывая неквадратное сечение колонны.

Вычислительный эксперимент по определению прочности плиты на продавливание с помощью программного комплекса Лира-САПР описан в работе [6]. Проанализированы расчетные модели и методики расчета плит на продавливание по нормам России, США и Европы. Отмечаются существенные отличия в подходах к определению критического контура. Сделан вывод, что вопрос продавливания плиты колонной требует дополнительного изучения.

Армирование при изгибе и сжатии

Прочность арматуры при изгибе, структура и расположение арматуры, а также количество арматуры при сжатии влияют на прочность к сдвигу. Это объясняется следующим образом.

Прочность наклонных сечений и коэффициент изгибного армирования

Исследования, проведенные за рубежом указывают на связь сдвиговой прочности плит с эффектом изгиба. Ицхаки [7] испытал 14 моделей соединения плит с колоннами и предположил, что прочность на сдвиг пропорциональна прочности арматуры на изгиб и размеру колонны. Мо [2] обнаружил следующее соотношение:

$$\frac{V_n}{V_0} + C' \frac{V_n}{V_{flex}} = 1, \quad (3)$$

где V_n – номинальная прочность на сдвиг при продавливании;

C' – константа между 0 и 1;

V_0 – фиктивное исходное значение силы сдвига, $V_0 = A' b_0 d \sqrt{f'_c}$;

A' – константа;

b_0 – длина периметра критического сечения;

d – рабочая толщина плиты;

V_{flex} – вертикальная сила при продавливании с учетом изгиба.

Из рис. 2 видно, что если $\frac{V_n}{V_{flex}} = 1$, то $\frac{V_n}{V_0} \rightarrow Const$. Это означает, что

если плита рассчитана по несущей способности на изгиб ($V_n = V_{flex}$), то V_n можно рассчитать по формуле

$$V_0 = A' b_0 d \sqrt{f'_c},$$

и это значение не зависит от коэффициента жесткости при изгибе.

Когда продольная арматура плиты пересекает наклонную трещину сдвига, то в ней возникает нагельное действие (dowel action), то есть арматурный стержень работает на срез аналогично нагелю в соединении двух деталей. Нагельное действие возникает также сетке при изгибе, когда жесткие части плиты (за пределами трещин сдвига) вращаются вокруг колонны.

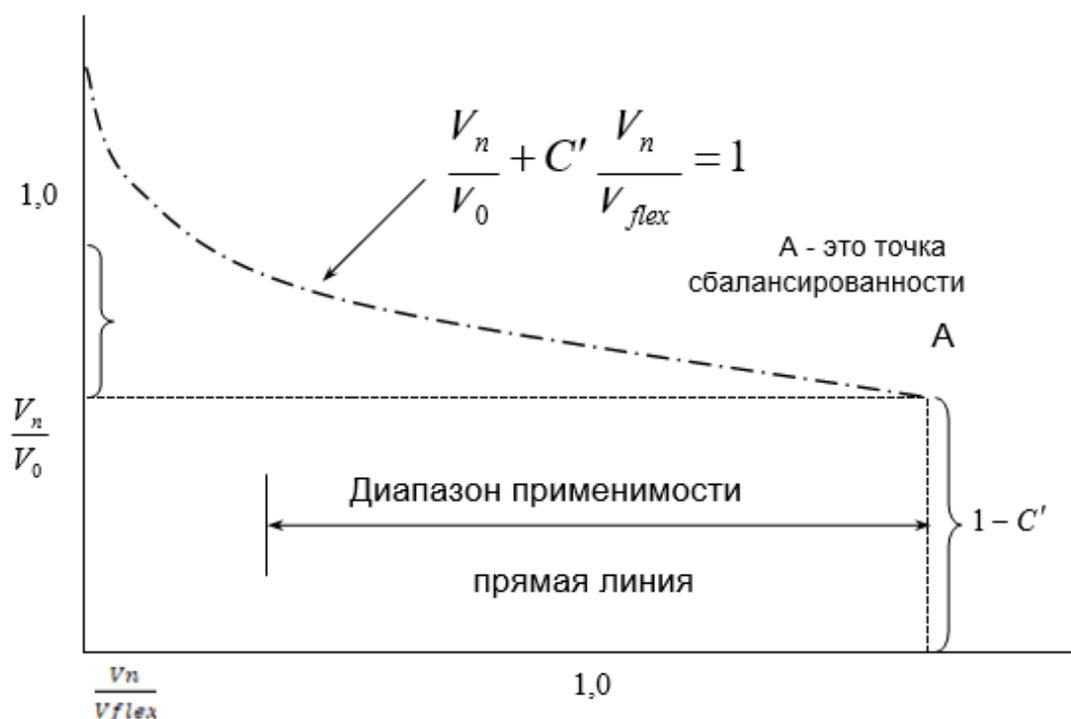


Рис. 2 – Взаимосвязь между прочностью на сдвиг и на изгиб по Мо [2]

Авторы работы [8] установили, что нагельные усилия в арматуре и вертикальные усилия, обусловленные нагельным действием, составляют 35 % прочности на продавливание. Поэтому, по их заключению, сдвиговая прочность плиты при продавливании увеличивается, если увеличивается коэффициент армирования и прочность изгибаемой арматуры. Однако Крисвелл и Хокинс [9], цитируя результаты Мо [2], пришли к выводу, что нагельное действие не имеет значения.

Указанное противоречие заключается в том, что окружающий арматурные стержни бетон обеспечивает сопротивление продавливанию.

Влияние нагельного действия в арматурном стержне тем существеннее, чем толще массив бетона, который его окружает. В плоских плитах, где толщина этого массива ограничена толщиной защитного слоя, эффект нагельного действия снижается.

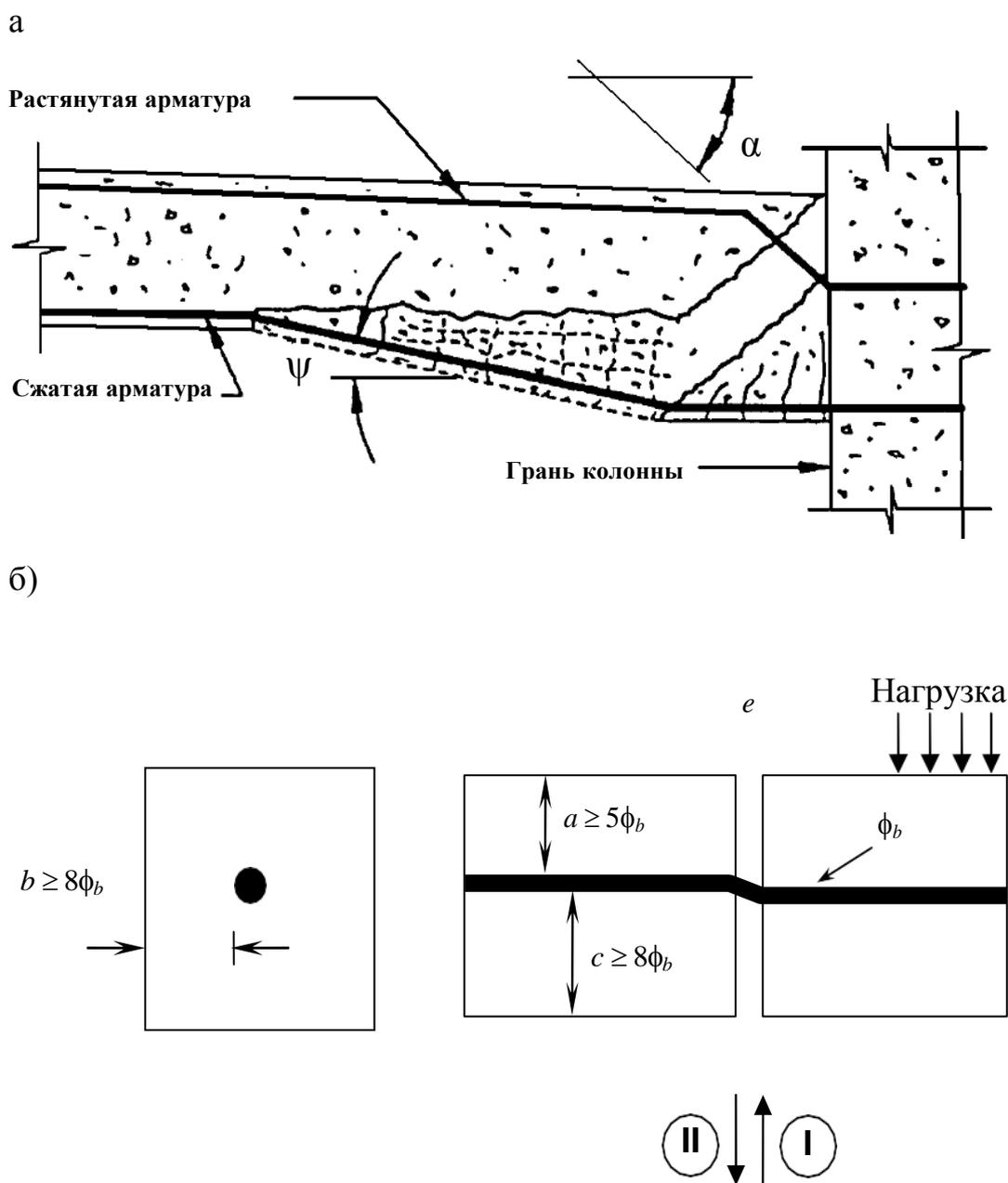
Например, при сдвиговом продавливании на более поздних стадиях перед разрушением образуется трещина сдвига под острым углом к арматуре.

Перекося плоскости трещины снижает эффект нагельного действия в плите (режим I, рис. 3), когда арматурный стержень окружен слоем бетона не более (5–8) диаметров арматуры. При этом наблюдается расслоение бетона, что также снижает прочность на продавливание.

С учетом вышеупомянутого утверждения, из-за небольшого защитного слоя бетона в плитах, раскалывания бетона и отсутствия поперечного армирования уменьшается нагельное действие арматурного стержня (см. рис. 3, а). Однако если защитный слой бетона превышает 8 диаметров арматуры, расслоение бетона маловероятно. По сравнению с ситуацией в балке, толщина бетона вокруг арматуры в плите больше, поэтому через наклонную трещину проходит большее количество стержней. Это, вероятно, приводит к тому, что нагельные силы в арматурных стержнях увеличивают сопротивление сдвигу в плитах более, чем в балках.

Схема армирования при изгибе

Испытания, проведенные авторами статьи [8], показали, что разрушающие нагрузки могут быть примерно на 20-50 % выше в плитах, армированных ортогональной арматурой, чем в плитах с кольцевыми стержнями.



Режим I: арматура окружена бетонным массивом в колонне.

Режим II: арматура в плите.

Рис. 3 – Нагельное действие арматурного стержня при образовании сдвиговых трещин: а) принципиальная схема процесса продавливания плиты колонной; б) геометрические условия проявления нагельного действия арматурного стержня в соответствии с СЕВ-FIP model code 1990.

Следует отметить, что понятие «нагельное действие» (dowel action) присутствует в зарубежных нормативах, однако не упоминается в СП 63.13330-2018. Авторы работы [10] полагают, что нагельное действие в продольной и поперечной арматуре необходимо учитывать при расчете плит на продавливание. Вместе с тем, следует оценивать возможность смятия бетона под арматурой в зоне продавливания.

В то же время, в исследованиях плит [2] общее количество стали оставалось постоянным, а расстояние варьировалось от равномерного до расположения, при котором 82 % всего количества стали располагалось на расстоянии d от колонны. Оба испытания показали, что концентрация армирования не увеличивает предельную нагрузку на плиту. В некоторых плитах концентрация арматуры даже снижала предельную нагрузку на плиту. Это связано с тем, что концентрация армирования оставляет большой радиальный сектор почти неармированным (см. рис. 4). Из результатов этих испытаний можно сделать вывод, что концентрация армирования вызывает небольшое снижение прочности и снижение пластичности.

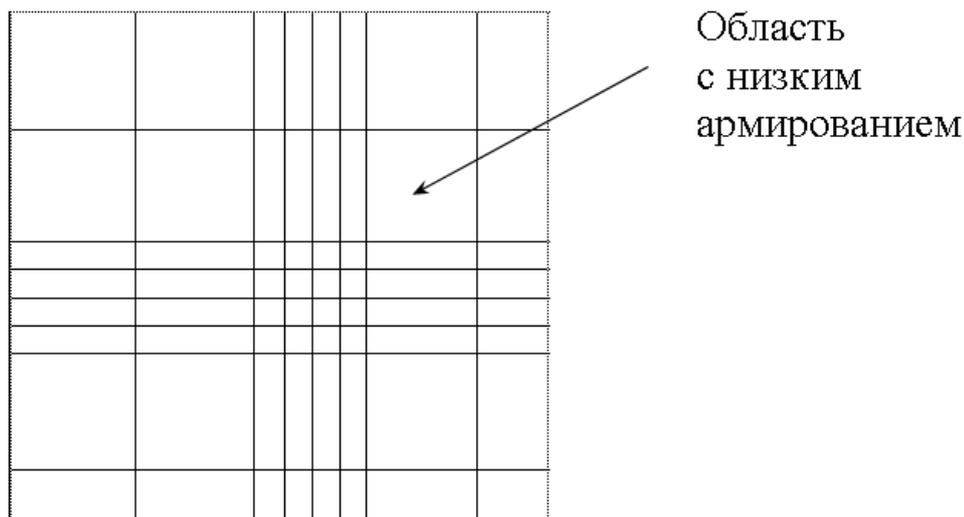


Рис. 4: Концентрация изгибной арматуры

Авторы работы [11] провели аналогичное исследование эффекта добавления дополнительной арматуры по полосе колонны. Они поместили различное количество стальной арматуры над полосой вокруг колонны шириной 450 мм, в результате чего шаг стержней составил 50, 75 и 150 мм. Все плиты не поддавались продавливанию, но было обнаружено, что с уменьшением расстояния между стержнями увеличивается несущая способность, снижается пластичность. Также в плите с шагом стержней 50 мм в центральных стержнях произошел сбой анкерки. Основываясь на этом наблюдении, авторами работ [13] и [2] сделан вывод, что разрушения, полученные при испытаниях плит на продавливание, на самом деле были вызваны нарушением анкерки. Приведенное выше наблюдение может объяснить, почему концентрация арматуры в области колонны не увеличивает несущую способность плиты.

Однако Еврокод 2 рекомендует размещать 50 % арматуры при изгибе, необходимой для создания отрицательного момента, в области колонны на расстоянии, равном 0,125 толщины плиты с обеих сторон колонны, поскольку это улучшает характеристики плиты в диапазоне эксплуатационных нагрузок.

Концентрация арматуры увеличивает жесткость плиты, увеличивает нагрузку на арматуру при изгибе и, следовательно, приводит к уменьшению максимальной ширины трещин при тех же условиях нагружения.

Сжатая арматура

В работе Р. Элстнера и Е. Хогнстада [10] показано, что при:

$$\frac{V_n}{V_{flex}} > 1,$$

где V_n , V_{flex} определены, как в уравнении (3), а также в случае малого процента армирования на растяжение, изменение количества арматуры, работающей на сжатие, незначительное влияет на сдвиговую прочность.

Однако когда $\frac{V_n}{V_{flex}} \leq 1$ или процент армирования на растяжение позволяет создать двойное армирование, прочность на сдвиг увеличивается, при увеличении доли сжатой арматуры. Сжатая арматура также увеличивает мембранный эффект после образования трещины при продавливании, что может предотвратить прогрессирующее разрушение конструкции.

Поперечное армирование

Поперечное армирование используется как для повышения прочности, так и для пластичности соединения колонны с плитой. Как правило это стержни, пересекающие наклонные трещины сдвига, чтобы предотвратить их распространение. Стержни следует изготавливать из пластичной стали, их сечение определять расчетом на растяжение. Особое внимание необходимо уделять надежной анкеровке поперечной арматуры в бетоне, чтобы повысить прочность плиты при продавливании.

Выводы

1. Анализ зарубежного и отечественного опыта проектирования показывает, что вопрос продавливания плиты в месте сопряжения с колонной требует дополнительного изучения.

2. В случае неквадратной формы сечения колонны расчеты по российским нормам завышают прочность плит при продавливании, в то же время применение европейских норм ее занижает.

3. Чтобы при образовании трещин при сдвиге имел место эффект нагельного действия арматурных стержней, последние должны быть окружены защитным слоем бетона не менее 8 диаметров.

4. Целесообразно применение профилей из конструкционной стали, [12], установленные на боковых поверхностях колонн и нижней поверхности плиты, которые действуют как оголовки колонн

5. При конструировании узлов плита-колонна следует усиливать анкерровку продольной арматуры, в частности, применять изогнутые стержни, скобы, композитную ленту, химические анкеры [13].

6. В качестве поперечной арматуры рекомендуется применять шпильки, включая срезные шпильки и стержни с головками, такие как в работах авторов [14, 15].

7. Для увеличения площади поверхности среза зоне продавливания устраивают железобетонных вуты и дополнительную набетонку по периметру колонны [16].

Литература

1. Ahmad Mahmoud Abdullah. Analysis of Repaired/Strengthened R.C. Structures Using Composite Materials: Punching Shear. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences. 2010. 272 p.

2. Moe J. Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads. Portland Cement Association. Research and Development Laboratories. Bulletin D47. Skokie. 1961. Pp. 117-124.

3. Филатов В.Б. Силовое сопротивление железобетонных монолитных плоских плит перекрытий при продавливании колоннами прямоугольного сечения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. том 14. № 4(5). С. 1322-1324.

4. Филатов В.Б., Галяутдинов З.Ш., Коваленко М.В. Экспериментальное исследование работы железобетонной плиты перекрытия при продавливании колонной // Инженерный вестник Дона. 2020. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6518

5. Трофимова В.М., Бурмистрова А.А., Аксёнов Н.Б. Анализ методов расчёта безбалочных перекрытий на продавливание // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5469.

6. Шогенов О.М., Беппаев А.М. Оценка прочности железобетонных плит на продавливание // Инженерный вестник Дона. 2016. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3671

7. Yitzhaki, D. Punching strength of reinforced concrete slabs. *ACI Structural Journal*. 1966. 63(5). Pp. 527-561.

8. Kinnunen, S. and Nylander H. Punching of concrete slabs without shear reinforcement. Sweden Royal Institute of Technology. 1960. No 158. Pp. 38–43.

9. Criswell, M.E. and Hawkins N.W. Shear strength of slabs: Basic principle and their relation to current methods of analysis. *ACI Special Publication*, 1974. 42(2). Pp. 641-676.

10. Elstner, R.C. and Hognestad E. Shearing strength of reinforced concrete slabs. *ACI Proceedings*. 1956. 53(7): Pp. 29-58.

11. Alexander S.D.B. and S.H. Simmonds. Tests of column-flat plate connections. *ACI Structural Journal*. 1992. 89(5). Pp. 495-502.

12. Hawkins N.W. and W.G. Corley. Moment transfer to columns in slabs with shearhead reinforcement. *ACI Special Publication*. 1974. No 42: Pp. 847-880.

13. Pilakoutas K. and Li X. Alternative shear reinforcement for reinforced concrete flat slabs. *Journal of Structural Engineering*. 2003. 129(9). Pp. 1164-1172.

14. Ghali A. An efficient solution to punching of slabs. *Concrete International ACI*. 1989. Vol. 11. Iss 6. Pp. 50-54.

15. Ghali A. and Hammill N. Effectiveness of shear reinforcement in slabs. *ACI Concrete International*. 1992. Vol. 14, Iss 1. Pp. 60-65.

16. Леонова А.Н., Ищук Ю.П., Погодина П.В. Способы усиления плит перекрытия в зоне продавливания // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2020. № 1. С. 339-344.

References

1. Ahmad Mahmoud Abdullah. Analysis of Repaired/Strengthened R.C. Structures Using Composite Materials: Punching Shear. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences. 2010. 272 p.
 2. Moe J. Portland Cement Association. Research and Development Laboratories. Bulletin D47. Skokie. 1961. Pp. 117-124.
 3. Filatov V.B. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk, tom 14, N 4 (5), 2012. Pp. 1322-1324.
 4. Filatov V.B., Galyautdinov Z.Sh., Kovalenko M.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6518.
 5. Trofimova V.M., Burmistrova A.A., Aksyonov N.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5469.
 6. Shogenov O.M., Beppaev A.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3671.
 7. Yitzhaki, D. ACI Structural Journal. 1966. 63(5). Pp. 527-561.
 8. Kinnunen, S. and H. Nylander. Sweden Royal Institute of Technology. 1960. No 158. Pp. 38–43.
 - 9 Criswell, M.E. and Hawkins N.W. ACI Special Publication, 1974. 42(2). Pp. 641-676.
 10. Elstner R.C. and Hognestad E. ACI Proceedings. 1956. 53(7): Pp. 29-58.
 11. Alexander S.D.B. and S.H. Simmonds. ACI Structural Journal. 1992. 89(5). Pp. 495-502.
 12. Hawkins N.W. and W.G. Corley. ACI Special Publication. 1974. No 42: Pp. 847- 880.
-



13. Pilakoutas K. and Li X. Journal of Structural Engineering. 2003. 129(9). Pp. 1164-1172.

14. Ghali A. Concrete International ACI. 1989. Vol. 11. Iss 6. Pp. 50-54.

15. Ghali A. and Hammill N. ACI Concrete International. 1992. Vol. 14, Iss 1. Pp. 60-65.20.

16. Leonova A.N Ishchuk Y.P. Pogodina P.V. Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskiy vestnik) 2020. N 1. p. 339-344.

Дата поступления: 24.12.2023

Дата публикации: 5.03.2024