

Определение граничных значений толщины плоских железобетонных перекрытий из условия продавливания

И.К. Манаенков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Узел опирания перекрытия на колонну является одним из наиболее ответственным в зданиях с несущей системой из монолитного железобетона. Это обуславливается большой концентрацией усилий и, как следствие, наиболее густым (в пределах перекрытия) армированием. При проектировании таких конструктивных решений возникает задача первичного задания толщины перекрытия из условий продавливания, еще не имея пространственной расчетной схемы, позволяющей корректно определить изгибающие моменты в узле, работающем на продавливание. В статье получены условия для необходимой и достаточной толщины перекрытий с поперечным армированием и без в зависимости от продавливающей силы F в колонне.

Ключевые слова: несущая способность узла на продавливание, плоское железобетонное перекрытие, статическая нагрузка.

Введение

Узел опирания перекрытия на колонну является одним из наиболее ответственным в зданиях с несущей системой из монолитного железобетона. Это обуславливается большой концентрацией усилий и, как следствие, наиболее густым (в пределах перекрытия) армированием. В процессе проектирования таких конструкций важно назначать корректные параметры элементов и здесь одним из определяющих условий является несущая способность на продавливание. Нужно отметить, что отечественные нормы СП 63.13330.2018 при расчете на продавливание учитывают наименьшее количество параметров по сравнению с европейскими EN 1992 Eurocode 2, Model Code 2010 и американскими ACI 318-19 [1,2]. Исследователями отмечается необходимость учета формы поперечного сечения [3] и соотношения габаритов колонны [4-6], особенностей работы в условиях высоких температур [7] и динамических воздействий [8,9], особенностей работы на продавливание в зоне торцов простенков [10,11], а также уменьшение продавливающего усилия для толстых плит [12,13].

Но, даже если признать несовершенства расчетной методики и необходимость уточнения несущей способности с учетом более широкого перечня факторов, остается вопрос первичного задания габаритов конструктивных элементов (габаритов колонны и толщины перекрытия) [14] и для этих целей методика расчета из СП 63.13330.2018 наиболее удобна ввиду своей простоты. Данная статья посвящена вопросам определения граничных значений толщины плоских железобетонных перекрытий из условия продавливания в зависимости от действующих нагрузок и габаритов колонны.

Материалы и методы

Согласно Российским нормам проектирования общее условие прочности на продавливание при обеспечении несущей способности только по бетону имеет вид:

$$\frac{F}{F_{b,ult}} + \frac{M_x}{M_{bx,ult}} + \frac{M_y}{M_{by,ult}}, \quad (1)$$

где F , M_x и M_y – сосредоточенная сила и изгибающие моменты в направлении осей X и Y соответственно, учитываемые при расчете на продавливание; $F_{b,ult}$, $M_{bx,ult}$ и $M_{by,ult}$ – предельные сосредоточенная сила и изгибающие моменты в направлении осей X и Y соответственно, которые могут быть восприняты бетоном в расчетном поперечном сечении.

Необходимо понимать, что изгибающие моменты ухудшают работу узла на продавливание до определенного предела и их вклад в условия (1) не может превышать $0,5 \frac{F}{F_{b,ult}}$. Это можно трактовать следующим образом: при небольшой величине F , сколь бы велики ни были изгибающие моменты M_x и M_y , разрушение по механизму продавливания произойти не может [15]. При проектировании зданий из монолитного железобетона вследствие жестких узлов сопряжения элементов, обусловленных взаимной перевязкой рабочей

арматуры, в зонах сопряжения колонн с перекрытиями неизбежно будут возникать изгибающие моменты. Но их величину в ряде случаев сложно предсказать при первичном формировании несущей системы и задании габаритов сечений. В этой ситуации, зная величину F , необходимую толщину перекрытия можно получить из условия:

$$F \leq F_{b,ult}, \quad (2)$$

а достаточную толщину перекрытия, принимая в условии (1) максимально возможную величину изгибающих моментов, из условия:

$$1,5F \leq F_{b,ult}. \quad (3)$$

Несущую способность на продавливание возможно повысить посредством установки поперечного армирования. Чаще всего (с учетом обеспечения конструктивных требований) его применяют в плитах при толщине от 200 мм. При этом по положениям СП 63.13330.2018 поперечное армирование может увеличить несущую способность узла не более чем в 2 раза. Таким образом, можем вычислить необходимую толщину перекрытия с поперечным армированием из условия:

$$F \leq 2F_{b,ult}, \quad (4)$$

а достаточную толщину перекрытия с поперечным армированием из условия:

$$1,5F \leq 2F_{b,ult}. \quad (5)$$

Выведем выражение для определения требуемой рабочей высоты сечения h_0 для условий опирания на колонны прямоугольного и круглого сечений (Рис. 1).

Для колонны прямоугольного сечения условие (2) принимает вид:

$$F \leq R_{bt} h_0 2(a + b + 2h_0), \quad (6)$$

выполним преобразования:

$$h_0^2 + 0,5h_0(a + b) - \frac{F}{4R_{bt}} \geq 0,$$

используя второй метод Герона для нахождения значения квадратного корня, получим:

$$h_0 \geq -\frac{0,5(a+b) + \sqrt{(0,5(a+b))^2 + 4 \frac{F}{4R_{bt}}}}{2} \approx$$

$$\approx 0,5 \left(0,5(a+b) + \frac{F}{R_{bt}(a+b)} \right) - \frac{0,5(a+b)}{2} = \frac{F}{R_{bt}2(a+b)} \quad (7)$$

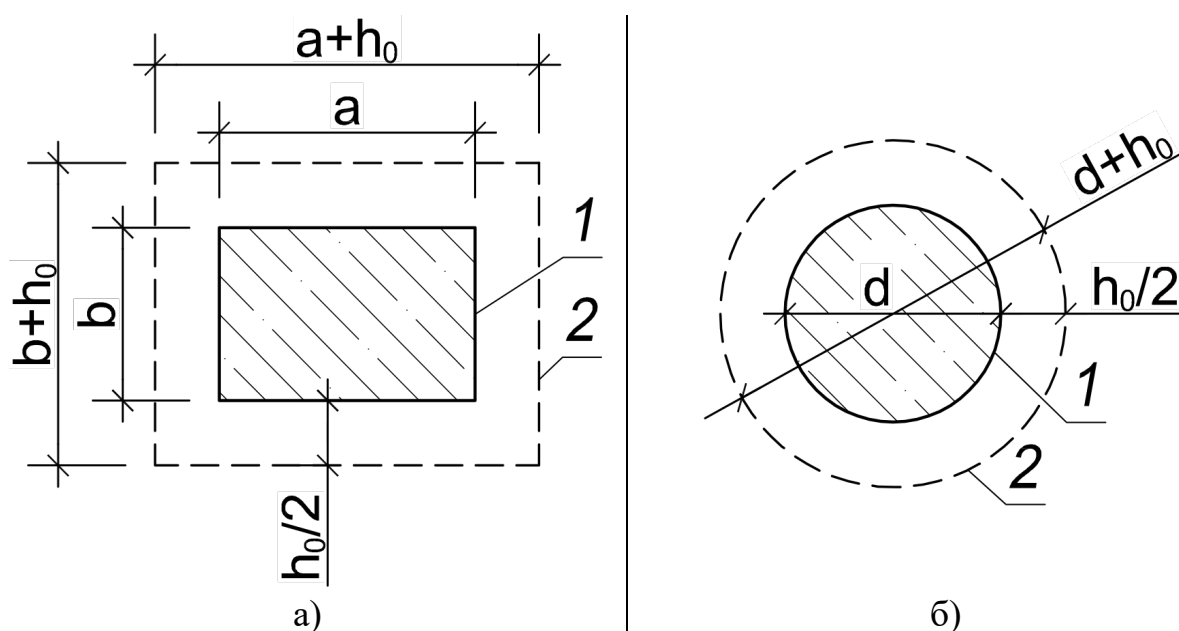


Рис. 1. – Опираение на колонну прямоугольного (а) и круглого (б) сечения: 1 – поперечное сечение колонны; 2 – контур продавливания; а, б – габариты прямоугольной колонны; d – диаметр круглой колонны

Для колонны круглого сечения условие (2) принимает вид:

$$F \leq R_{bt} h_0 \pi (d + h_0), \quad (8)$$

выполним преобразования:

$$h_0^2 + dh_0 - \frac{F}{\pi R_{bt}} \geq 0,$$

используя второй метод Герона для нахождения значения квадратного корня, получим:

$$h_0 \geq -\frac{d + \sqrt{d^2 + 4 \frac{F}{\pi R_{bt}}}}{2} \approx 0,5 \left(d + 2 \frac{F}{R_{bt} \pi d} \right) - 0,5d = \frac{F}{R_{bt} \pi d}. \quad (9)$$

Можем заключить, что выражения (7) и (9) сводятся к аналогичному виду:

$$h_0 \geq \frac{F}{R_{bt}u_{col}}. \quad (10)$$

Таким образом, для рассмотренных случаев выведено условие для минимально необходимой рабочей высоты перекрытия.

Результаты и выводы

Преобразовывая выражения (2)-(5) к виду аналогичному (10), получаем итоговые условия для определения необходимой и достаточной рабочей высоты сечения плиты перекрытия исходя из несущей способности на продавливание, представленные в Таблице № 1.

Таблица № 1

	Необходимая толщина	Достаточная толщина
Без поперечного армирования:	$h_0 \geq \frac{F}{R_{bt}u_{col}}$	$h_0 \geq \frac{1,5F}{R_{bt}u_{col}}$
С поперечным армированием:	$h_0 \geq \frac{F}{2R_{bt}u_{col}}$	$h_0 \geq \frac{1,5F}{2R_{bt}u_{col}}$

В большинстве случаев класс бетона для плоских железобетонных монолитных перекрытий находится в диапазоне от В25 ($R_{bt}=1,05$ МПа) до В40 ($R_{bt}=1,4$ МПа). Это обуславливается тем, что с ростом класса бетона снижается его подвижность и удобоукладываемость, но при этом несущая способность по изгибающим моментам возрастает слабо. Задавшись расчетным сопротивлением бетона осевому растяжению для предельных состояний первой группы R_{bt} , были построены графики для удобного подбора рабочей высоты плит перекрытия (Рис. 2).

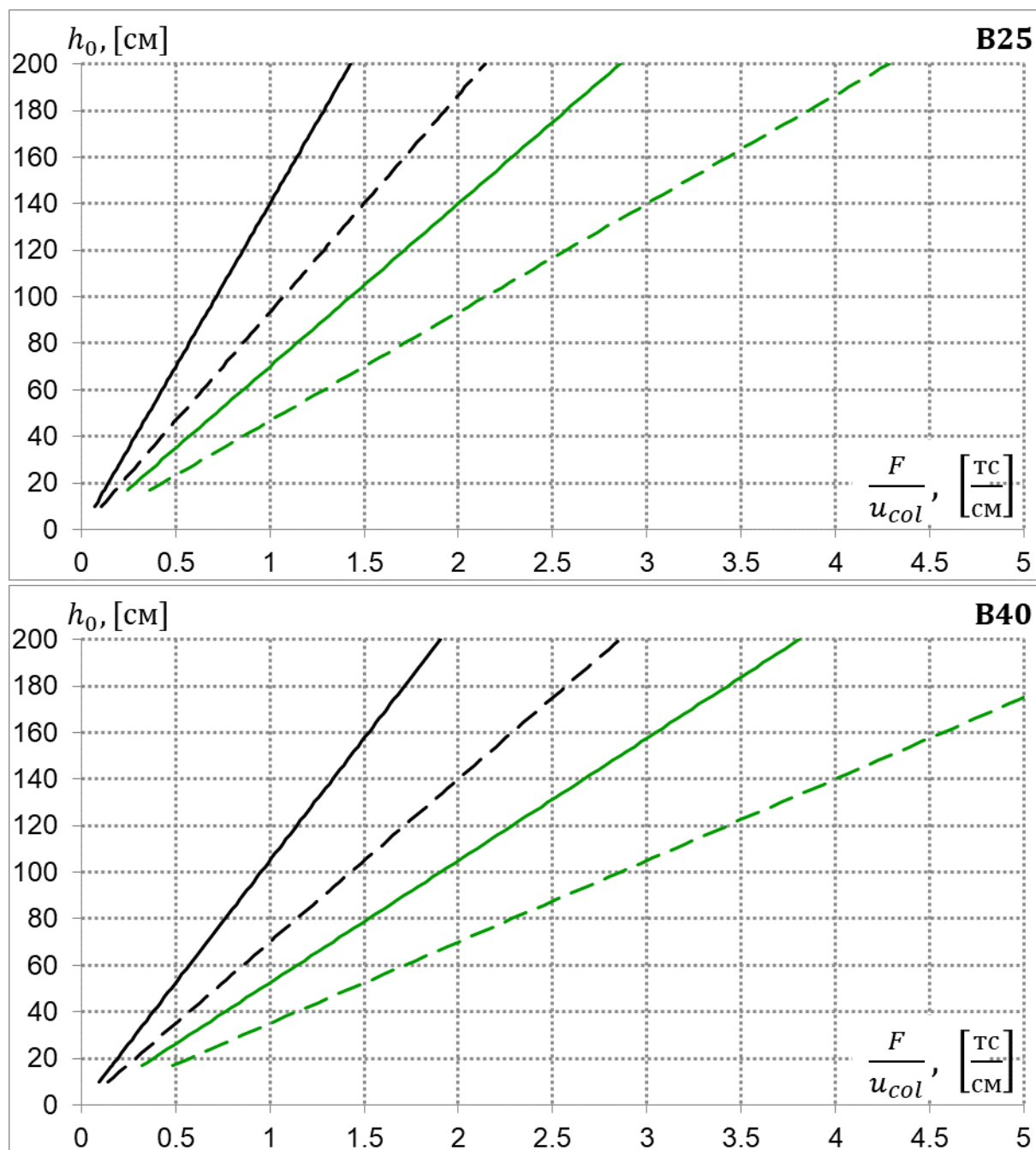


Рис. 2. – Зависимость требуемой рабочей высоты перекрытия h_0 от отношения продавливающей силы к периметру колонны F/u_{col} :

- — — — необходимая толщина перекрытия без поперечного армирования;
- — — — достаточная толщина перекрытия без поперечного армирования;
- — — — необходимая толщина перекрытия с поперечным армированием;
- — — — достаточная толщина перекрытия с поперечным армированием

Литература

1. 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
2. Манаенков И.К. Сравнительный анализ результатов расчета плоских железобетонных плит на продавливание // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7480
3. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натуральный и численный эксперименты. Одесса: ОНМУ, 2011. 119 с.
4. Филатов В.Б., Галяутдинов З.Ш. Экспериментальное исследование и методика расчета прочности железобетонных плит при продавливании // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. № 4 (45). С. 53-65.
5. Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105, No. 4. Pp. 440 – 450.
6. Sagaseta, J. Punching of flat slabs supported on rectangular columns. Engineering Structures. 2014. No. 77. Pp. 17 – 33.
7. Тамразян А.Г., Звонов Ю.Н. К оценке надежности железобетонных плоских безбалочных плит перекрытий на продавливание при действии сосредоточенной силы в условиях высоких температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 24-28.
8. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждениях плит продавливанием // Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 23-34.
9. Трекин Н.Н., Саркисов Д.Ю., Трофимов С.В., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 8. С. 1006-1014.

10. Зенин С.А., Болгов А.Н., Сокуров А.З., Кудинов О.В. Прочность на продавливание плоских плит перекрытий в зонах опирания на торцы стен // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 35-40

11. Манаенков И.К. Анализ влияния конструктивных параметров узла на концентрацию усилий в зонах опирания плоских железобетонных перекрытий на торцы простенков // Инженерный вестник Дона. 2024. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/10011

12. Коровин Н.Н., Голубев А.Ю. Продавливание толстых железобетонных плит // Бетон и железобетон. 1989. № 11. С. 20–23.

13. Kabantsev O.V., Krylov S.B., Trofimov S.V. Numerical investigation on the punching shear mechanism for reinforced concrete thin and thick slabs. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. No 4. Pp. 91-105.

14. Силантьев А.С. Назначение толщины плоских безбалочных плит перекрытия из условий продавливания // Строительство и реконструкция. 2014. № 6 (56). С. 66-69.

15. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К., Соседов К.Е. Практические методы и примеры расчета железобетонных конструкций из тяжелого бетона по СП 63.13330. М.: ООО «Бумажник», 2017. 496 с.

References

1. Trofimova V.M., Burmistrova A.A., Aksjonov N.B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5469

2. Manaenkov I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 2 (86). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7480

3. Klovanych S.F., Shehovcov V.I. Prodavlivanie zhelezobetonnyh плит. Natural'nyj i chislennyj jeksperimenty. [Punching of reinforced concrete slabs. Natural and numerical experiments] Odessa: ONMU, 2011. 119 p.

4. Filatov V.B., Galjautdinov Z.Sh. Gradostroitel'stvo i arhitektura. 2021. Vol. 11. № 4(45). Pp. 53-65.
5. Muttoni A. ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105, No. 4. Pp. 440 – 450.
6. Sagaseta, J. Engineering Structures. 2014. No. 77. Pp. 17 – 33.
7. Tamrazjan A.G., Zvonov Ju.N. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. № 7. Pp. 24-28.
8. Alekseyev A.V., Antonov M.D. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2021. № 4 (96). Pp. 23-34.
9. Trekin N.N., Sarkisov D.Ju., Trofimov S.V., Krylov V.V., Evstaf'eva E.B. Vestnik MGSU. 2021. Vol. 16. № 8. Pp. 1006-1014.
10. Zenin S.A., Bolgov A.N., Sokurov A.Z., Kudinov O.V. Beton i zhelezobeton. 2022. № 2 (610). Pp. 35-40.
11. Manaenkov I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/10011
12. Korovin N.N., Golubev A.Ju. Beton i zhelezobeton. 1989. № 11. Pp. 20–23.
13. Kabantsev O.V., Krylov S.B., Trofimov S.V. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. No 4. Pp. 91-105.
14. Silant'ev A.S. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2014. № 6(56). Pp. 66-69.
15. Kodysh Je.N., Trekin N.N., Nikitin I.K., Sosedov K.E. Prakticheskie metody i primery rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij iz tjazhelogo betona po SP 63.13330. [Practical methods and examples of calculation of reinforced concrete structures made of heavy concrete according to SP 63.13330] M.: ООО «Bumazhnik», 2017. 496 p.

Дата поступления: 17.04.2025

Дата публикации: 25.05.2025