

Сравнительный анализ результатов расчета плоских железобетонных плит на продавливание

И.К. Манаенков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: При проектировании плоских железобетонных перекрытий наиболее сложным и ответственным является узел опирания на колонну. Это обуславливается действием больших сосредоточенных усилий и наибольшей плотностью армирования. Ввиду этого актуален вопрос выбора методик расчета, наиболее точно оценивающих несущую способность на продавливание для таких узлов. В статье были проанализированы экспериментальные данные для 73 образцов плоских железобетонных плит без поперечного армирования из 10 различных источников и выполнено сравнение с результатами расчетов несущей способности на продавливание по СП 63.13330.2018, EN 1992 Eurocode 2 и Model Code 2010.

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

Введение

В настоящее время плоские перекрытия являются наиболее часто применяемым конструктивным решением при проектировании зданий гражданского назначения из монолитного железобетона. Это объясняется относительной простотой выполнения строительно-монтажных работ, обеспечением гибкости архитектурно-планировочных решений, удобством прокладки инженерных коммуникаций и др. Ввиду этого важность и актуальность вопроса анализа и выбора методик расчета, наиболее точно описывающих действительную работу таких конструкций, не вызывает сомнений [1].

При проектировании плоских железобетонных перекрытий наиболее сложным и ответственным является узел опирания на колонну. Это обуславливается действием больших сосредоточенных усилий и наибольшей плотностью армирования. Особенности расчета и конструирования таких узлов посвящено большое число экспериментальных и теоретических исследований российских [2-4] и зарубежных ученых [5-7].

Для оценки соответствия результатов расчета экспериментальным данным были проанализированы результаты испытаний на продавливание 73 образцов плит из 10 различных источников и выполнено сравнение со значениями несущей способности, посчитанными по различным нормативным методикам.

Материалы и методы

Методики расчета, предлагаемые в нормативных документах (СП 63.13330.2018; EN 1992 Eurocode 2 и Model Code 2010), достаточно сильно отличаются по расчетным предпосылкам (см. Рис.1) и перечню учитываемых параметров (см. Таблицу № 1).

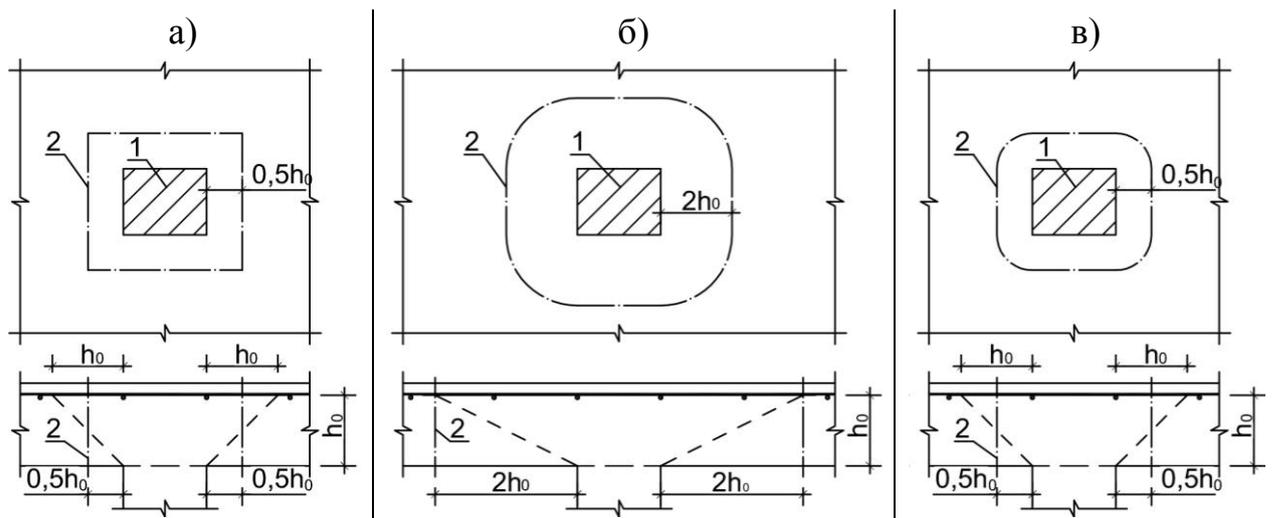


Рис. 1. – Схема расчетного контура продавливания:

а) СП 63.13330.2018, б) EN 1992 Eurocode 2, в) Model Code 2010;

1 – зона приложения нагрузки; 2 – расчетный контур продавливания

На текущем этапе исследования отбирались образцы без поперечного армирования. Конструктивные параметры опытных образцов варьировались в диапазонах: рабочая высота плит $h_0=70...275$ мм; призматическая прочность $R_b=12...125,1$ МПа, коэффициент продольного армирования $\mu=0,005...0,026$. Нужно отметить, что в иностранных экспериментах указана цилиндрическая

прочность бетона на сжатие R_c . Взаимосвязь цилиндрической и призмочной прочностей устанавливалась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012. Также не во всех исследованиях указана прочность бетона на растяжение R_{bt} . Пересчет производился по формуле:

$$R_{bt} = 0,233\sqrt[3]{R_b^2}, \quad (1)$$

Таблица № 1

Конструктивные параметры, учитываемые при расчетах на продавливание

	СП 63.13330.2018	EN 1992 Eurocode 2	Model Code 2010
Расчетное сопротивление бетона растяжению	+	-	-
Расчетное сопротивление бетона сжатию	-	+	+
Наличие поперечного армирования	+	+	+
Наличие продольного армирования	-	+	+
Наличие изгибающих моментов в опорном сечении колонны	+	+	+
Рабочий пролет плиты перекрытия	-	-	+
Размер крупного заполнителя	-	-	+

По результатам обработки экспериментальных данных вычислялись медианные значения отношения результатов расчета к экспериментальным данным $F^m./F^{эк.}$:

$$M_e = \sum_{i=1}^n \frac{F^m./F^{эк.}}{n}, \quad (2)$$

а также среднее отклонение результатов расчета от экспериментальных данных, выраженное в процентах:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F^m./F^{эк.} - 1| \cdot 100\%, \quad (3)$$

Результаты и выводы

Полученные результаты расчета и сравнение с экспериментальными данными приведены в таблицах 2-4.

Таблица № 2

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными из
АНГЛОЯЗЫЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Ссылка	Шифр образца	Габариты штампа, мм	h_0 , мм	R_c , МПа	R_{bt} , МПа	μ	$F^{ЭК}$, кН	$F^{СП}$, кН ($F^{СП}/F^{ЭК}$)	F^E , кН ($F^E/F^{ЭК}$)	F^M , кН ($F^M/F^{ЭК}$)
[8]	HSC0	D=250	200	90,3	4,10	0,008	965,0	1159,2 (1,20)	873,5 (0,91)	639,2 (0,66)
	HSC1	D=250	200	91,3	4,40	0,008	1021,0	1244,1 (1,22)	876,7 (0,86)	606,1 (0,59)
	HSC2	D=250	194	85,7	4,20	0,009	889,0	1136,5 (1,28)	828,2 (0,93)	616,6 (0,69)
	HSC4	D=250	200	91,6	4,40	0,012	1041,0	1244,1 (1,20)	991,6 (0,95)	796,8 (0,77)
	HSC6	D=250	200	108,8	4,95	0,006	960,0	1399,6 (1,46)	835,8 (0,87)	519,1 (0,54)
	HSC9	D=250	200	84,1	4,20	0,003	565,0	1187,5 (2,10)	628,5 (1,11)	426,7 (0,76)
[9]	S2,1	D=250	200	24,2	1,82	0,008	603,0	514,6 (0,85)	563,1 (0,93)	532,3 (0,88)
	S2,2	D=250	200	22,9	1,75	0,008	600,0	495,2 (0,83)	552,9 (0,92)	518,2 (0,86)
	S2,3	D=250	200	25,4	1,88	0,003	489,0	530,6 (1,09)	421,7 (0,86)	348,8 (0,71)
	S2,4	D=250	200	24,2	1,82	0,003	444,0	513,8 (1,16)	414,9 (0,93)	368,8 (0,83)
[10]	1	D=150	98	88,0	4,30	0,006	224,0	328,1 (1,46)	237,1 (1,06)	152,8 (0,68)
	2	D=150	98	56,0	3,18	0,006	212,0	242,7 (1,14)	204,0 (0,96)	127,1 (0,60)
	3	D=150	98	27,0	1,95	0,006	169,0	149,3 (0,88)	159,9 (0,95)	104,9 (0,62)
	4	D=150	98	58,0	3,25	0,006	233,0	248,5 (1,07)	206,4 (0,89)	118,2 (0,51)
	6	D=150	98	102,0	4,74	0,006	233,0	362,0 (1,55)	249,1 (1,07)	158,7 (0,68)
	21	D=150	98	42,0	2,62	0,013	286,0	200,4 (0,70)	238,9 (0,84)	178,1 (0,62)
	22	D=150	98	84,0	4,17	0,013	405,0	318,1 (0,79)	301,0 (0,74)	204,6 (0,51)
	23	D=150	100	84,0	4,17	0,009	341,0	327,2 (0,96)	273,3 (0,80)	186,2 (0,55)
	25	D=150	100	33,0	2,23	0,012	244,0	175,5 (0,72)	225,4 (0,92)	156,4 (0,64)
	26	D=150	100	38,0	2,45	0,012	294,0	192,8 (0,66)	236,3 (0,80)	172,7 (0,59)
	27	D=150	100	38,0	2,45	0,012	294,0	192,8 (0,66)	236,3 (0,80)	172,7 (0,59)
[11]	HS1	150x150	95	67,0	3,58	0,005	178,0	333,6 (1,87)	208,8 (1,17)	161,9 (0,91)
	HS2	150x150	95	70,0	3,69	0,008	249,0	343,5 (1,38)	252,9 (1,02)	194,2 (0,78)
	HS3	150x150	95	69,0	3,65	0,015	356,0	340,2 (0,96)	305,3 (0,86)	224,3 (0,63)
	HS4	150x150	90	66,0	3,55	0,025	418,0	306,5 (0,73)	309,2 (0,74)	232,4 (0,56)
	HS5	150x150	125	68,0	3,62	0,006	365,0	497,5 (1,36)	336,3 (0,92)	255,3 (0,70)
	HS6	150x150	120	70,0	3,69	0,009	489,0	478,1 (0,98)	365,5 (0,75)	247,5 (0,51)
	HS7	150x150	95	74,0	3,83	0,012	356,0	356,4 (1,00)	290,1 (0,81)	197,8 (0,56)
	HS8	150x150	120	69,0	3,65	0,011	436,0	473,5 (1,09)	387,8 (0,89)	310,8 (0,71)
	HS9	150x150	120	74,0	3,83	0,016	543,0	496,1 (0,91)	448,7 (0,83)	351,7 (0,65)
	HS10	150x150	120	80,0	4,03	0,023	645,0	522,6 (0,81)	492,4 (0,76)	402,9 (0,62)
	HS11	150x150	70	70,0	3,69	0,009	196,0	227,2 (1,16)	175,8 (0,90)	104,3 (0,53)
	HS12	150x150	70	75,0	3,86	0,015	258,0	237,9 (0,92)	210,4 (0,82)	127,0 (0,49)
	HS13	150x150	70	68,0	3,62	0,020	267,0	222,9 (0,83)	224,3 (0,84)	145,6 (0,55)
	HS14	220x220	95	72,0	3,76	0,015	498,0	450,0 (0,90)	358,0 (0,72)	230,0 (0,46)
	HS15	300x300	95	71,0	3,72	0,015	560,0	559,0 (1,00)	411,3 (0,73)	260,3 (0,46)
NS1	150x150	95	42,0	2,62	0,015	320,0	244,3 (0,76)	258,8 (0,81)	183,7 (0,57)	
NS2	150x150	120	30,0	2,10	0,009	396,0	271,8 (0,69)	275,6 (0,70)	185,6 (0,47)	
[12]	ND65-1-1	200x200	275	64,0	3,80	0,015	2050,0	1985,5 (0,97)	1549,7 (0,76)	1128,6 (0,55)
	ND65-2-1	150x150	200	70,0	3,90	0,017	1200,0	1092,0 (0,91)	967,2 (0,81)	697,6 (0,58)
	ND95-1-1	200x200	275	84,0	4,70	0,025	2250,0	2455,8 (1,09)	1696,8 (0,75)	1218,9 (0,54)
	ND95-1-3	200x200	275	90,0	4,50	0,017	2400,0	2351,3 (0,98)	1916,3 (0,80)	1685,9 (0,70)
	ND95-2-1	150x150	200	88,0	4,60	0,017	1100,0	1288,0 (1,17)	1043,9 (0,95)	832,8 (0,76)
	ND95-2-1D	150x150	200	87,0	4,60	0,026	1300,0	1288,0 (0,99)	1039,9 (0,80)	743,5 (0,57)
	ND95-2-3	150x150	200	90,0	4,70	0,026	1450,0	1316,0 (0,91)	1100,5 (0,76)	893,8 (0,62)
	ND95-2-3D	150x150	200	80,0	4,20	0,026	1250,0	1176,0 (0,94)	1058,2 (0,85)	903,9 (0,72)
	ND95-2-3D+	150x150	200	98,0	4,80	0,026	1450,0	1344,0 (0,93)	1132,2 (0,78)	903,9 (0,62)
ND95-3-1	100x100	88	85,0	4,50	0,018	330,0	297,8 (0,90)	280,0 (0,85)	206,5 (0,63)	
[13]	P1	150x150	115	49,0	2,91	0,013	445,0	354,5 (0,80)	339,2 (0,76)	309,0 (0,69)
	P2	150x150	115	49,0	2,91	0,013	443,0	354,5 (0,80)	339,2 (0,77)	309,7 (0,70)
	P3	150x150	115	49,0	2,91	0,013	421,0	354,5 (0,84)	339,2 (0,81)	317,4 (0,75)
	P4	150x150	115	49,0	2,91	0,013	444,0	354,5 (0,80)	339,2 (0,76)	309,3 (0,70)
	P5	150x150	115	49,0	2,91	0,013	419,0	354,5 (0,85)	339,2 (0,81)	318,2 (0,76)

Таблица № 3

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными из
русскоязычных источников

Ссылка	Шифр образца	Габариты штампа, мм	h_0 , мм	R_b , МПа	R_{bt} , МПа	μ	$F^{эк}$, кН	$F^{СП}$, кН ($F^{СП}/F^{эк}$)	F^E , кН ($F^E/F^{эк}$)	F^M , кН ($F^M/F^{эк}$)
[14]	ПЛ1Кв	300x300	170	21,6	1,96	0,007	776,0	687,1 (0,89)	466,0 (0,60)	455,3 (0,59)
	ПЛ2Кв	300x300	170	21,8	1,97	0,007	760,0	629,6 (0,83)	467,4 (0,62)	464,4 (0,61)
	ПЛ1У	Угол	170	26,8	2,30	0,007	850,0	677,8 (0,80)	500,7 (0,59)	447,0 (0,53)
	ПЛ2У	Угол	170	27,0	2,40	0,007	720,0	707,3 (0,98)	501,9 (0,70)	504,8 (0,70)
	ПЛ1К	Крест	170	21,1	1,90	0,007	860,0	493,8 (0,57)	429,9 (0,50)	359,8 (0,42)
	ПЛ2К	Крест	170	33,6	2,16	0,007	760,0	561,4 (0,74)	502,0 (0,66)	507,0 (0,67)
[15]	ТБ	200x200	70	36,0	2,70	0,010	270,0	222,8 (0,83)	187,0 (0,69)	172,0 (0,64)
	КБ	200x200	70	28,0	1,60	0,010	240,0	132,0 (0,55)	172,0 (0,72)	161,2 (0,67)
	СФБ0,6	200x200	70	32,2	3,14	0,010	300,0	259,1 (0,86)	180,2 (0,60)	151,2 (0,50)
	СФБ0,8	200x200	70	40,0	3,60	0,010	345,0	297,0 (0,86)	180,5 (0,52)	137,0 (0,40)
	СФБ1,2	200x200	70	42,7	4,26	0,010	370,0	351,5 (0,95)	197,9 (0,53)	150,7 (0,41)
	ВТБ	200x200	70	114,8	4,60	0,010	360,0	379,5 (1,05)	275,2 (0,76)	258,1 (0,72)
	ВСФБ1,2	200x200	70	125,1	6,30	0,010	550,0	519,8 (0,95)	283,2 (0,51)	185,7 (0,34)
[16]	КСП-1	200x200	110	31,6	2,00	0,014	272,0	272,8 (1,00)	323,1 (1,19)	286,0 (1,05)
	КСП-2,5	200x500	110	22,2	1,60	0,014	281,3	323,8 (1,15)	366,3 (1,30)	335,2 (1,19)
	КСП-4	200x800	110	25,6	1,70	0,014	328,4	456,3 (1,39)	466,9 (1,42)	427,1 (1,30)
[17]	C_{h100}^{B15}	100x100	76	12,0	1,22	0,007	105,0	65,3 (0,62)	87,3 (0,83)	75,0 (0,71)
	C_{h120}^{B15}	100x100	96	12,0	1,22	0,005	129,5	91,8 (0,71)	112,7 (0,87)	106,5 (0,82)
	C_{h100}^{B20}	100x100	76	15,0	1,42	0,007	133,2	75,8 (0,57)	94,1 (0,71)	75,7 (0,57)
	C_{h120}^{B20}	100x100	96	15,0	1,42	0,005	160,9	106,7 (0,66)	121,4 (0,75)	108,8 (0,68)

Таблица № 4

Медианные значения и средние отклонения $F^m/F^{эк}$:

	СП 63.13330.2018		EN 1992 Eurocode 2		Model Code 2010	
	M_e	Δ	M_e	Δ	M_e	Δ
Англоязычные источники	1,02	20,6%	0,86	16,0%	0,64	36,0%
Русскоязычные источники	0,85	21,2%	0,75	33,7%	0,68	37,9%

По результатам анализа полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Методика расчета по СП 63.13330.2018 является наиболее простой в применении, но при этом учитывает наименьшее число конструктивных параметров;

2. Наиболее приближенные к единице медианные значения $F^m/F^{эк}$ получены при расчете по СП 63.13330.2018. При этом стоит отметить, что

при расчетах по СП 63.13330.2018 выявлено больше всего образцов с завышенной несущей способностью (завышение до 46%);

3. Иностранные нормы учитывают большее число конструктивных параметров и для большинства образцов дают более низкие значения несущей способности. Также нужно отметить, что наименьшее среднее отклонение значения $F^m/F^{ок}$ получено для англоязычных источников при расчетах по EN 1992 Eurocode 2.

4. При расчетах по Model Code 2010 для большинства образцов получены наименьшие значения несущей способности и наибольшие средние отклонения $F^m/F^{ок}$.

Литература

1. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету плоских железобетонных перекрытий с учетом фактической жесткости сечения // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 87-92.

2. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждении плит продавливанием // Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 23-34.

3. 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

4. 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.

5. Mari A., Cladera A., Oller E., Bairan J.M. A punching shear mechanical model for reinforced concrete flat slabs with and without shear reinforcement. Eng. Struct. 2018. Vol. 166. Pp. 413-426. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.079

6. Donmez A., Bazant Z.P. Size Effect on Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs with and without Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2011. Vol. 114. № 4. Pp. 875-886. URL: doi.org/10.14359/51689719

7. Olmati P., Sagaseta J., Cormie D., Jones A.E.K. Simplified reliability analysis of punching in reinforced concrete flat slab buildings under accidental actions. *Eng. Struct.* 2017. Vol. 130. Pp. 83-89. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.061

8. Hallgren M. Punching shear test on reinforced high strength concrete slabs. Technical report 1994, structural mechanics. Dept. of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 206 p.

9. Tolf P. (1988). Plattjocklekens inverkan pa betongplattors hallfasthet vid genom-stansning. Forsok med cikulara plattor. Bulletin 146, Dept, of Structural Mechanics and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 64 p.

10. Regan P.E., Al-Hussaini A., Ramdane K-E., Xue H-Y. (1993). Behaviour of High Strength Concrete Slabs. *Concrete 2000. Proc, of Int. Conf., University of Dundee, Scotland, UK, September 7-9, Vol. 1, E & FN Spon, Cambridge, pp. 761-773.*

11. Marzouk H., Hussein A. Experimental Investigation on the Behavior of High-Strength Concrete Slabs. *ACI Structural Journal*. 1991. Vol. 88, No. 6. Pp. 701-713.

12. Tomaszewicz A. (1993). High-Strength Concrete. SP2 — Plates and Shells. Report 2.3. Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs. Report No. STF70 A93082, SINTEF Structures and Concrete, Trondheim, 36 p.

13. Hoang L.C. Punching Shear Tests on RC Slabs with Different Initial Crack Patterns. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14. Pp. 1183-1189. URL: doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.148

14. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натуральный и численный эксперименты. Одесса: ОНМУ, 2011. 119 с.

15. Хвастунов В.Л., Скачков Ю.П., Хвастунов А.В. Связь прочностных и деформационных свойств бетонов и фибробетонов с параметрами продавливания железобетонных плит // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 1 (22). С. 93-100.

16. 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

17. Трекин Н.Н., Саркисов Д.Ю., Крылов В.В., Евстафьева Е.Б., Андриян К.Р. Экспериментальное исследование плит на продавливание при динамическом нагружении // Строительные материалы и изделия. 2021. № 4 (4). С. 41-48.

References

1. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. Nauchnoye obozreniye. 2015. № 8. Pp. 87-92.

2. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Building and Reconstruction. 2021. № 4 (96). Pp. 23-34.

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

4. Tamrazyan A.G., Zvonov Y.N. Industrial and Civil Construction. 2016. № 7. Pp. 24-28.

5. Mari A., Cladera A., Oller E., Bairan J.M. Eng. Struct. 2018. Vol. 166. Pp. 413-426. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.079

6. Donmez A., Bazant Z.P. ACI Structural Journal. 2011. Vol. 114. № 4. Pp. 875-886. URL: doi.org/10.14359/51689719

7. Olmati P., Sagasetta J., Cormie D., Jones A.E.K. Eng. Struct. 2017. Vol. 130. Pp. 83-89. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.061

8. Hallgren M. Punching shear test on reinforced high strength concrete slabs. Technical report 1994, structural mechanics. Dept. of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 206 p.
 9. Tolf P. (1988). Plattjocklekens inverkan på betongplattors hållfasthet vid genom-stansning. Forsök med cirkulära plattor. Bulletin 146, Dept, of Structural Mechanics and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 64 p.
 10. Regan P.E., Al-Hussaini A., Ramdane K-E., Xue H-Y. (1993). Behaviour of High Strength Concrete Slabs. Concrete 2000. Proc, of Int. Conf., University of Dundee, Scotland, UK, September 7-9, Vol. 1, E & FN Spon, Cambridge, pp. 761-773.
 11. Marzouk H., Hussein A. ACI Structural Journal. 1991. Vol. 88, No. 6. Pp. 701-713.
 12. Tomaszewicz A. (1993). High-Strength Concrete. SP2 – Plates and Shells. Report 2.3. Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs. Report No. STF70 A93082, SINTEF Structures and Concrete, Trondheim, 36 p.
 13. Hoang L.C. Punching Shear Tests on RC Slabs with Different Initial Crack Patterns. Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. Pp. 1183-1189. URL: doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.148
 14. Klovanich S.F., Shehovcov V.I. Prodavlivanie zhelezobetonnyh plit. Natural'nyj i chislennyj jeksperimenty. [Punching of reinforced concrete slabs. Natural and numerical experiments] Odessa: ONMU, 2011. 119 p.
 15. Hvastunov V.L., Skachkov Ju.P., Hvastunov A.V. Regional Architecture and Engineering. 2015. № 1 (22). Pp. 93-100.
 16. Filatov V.B., Galyautdinov Z.Sh., Kovalenko M.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6518
 17. Trekin N.N., Sarkisov D.Yu., Krylov V.V., Evstafyeva E.B., Andryan K.R. Construction Materials and Products. 2021. № 4 (4), pp. 41-48.
-