

17. Технология и индустриализация армирования железобетонных конструкций. Конструирование // ЕКБ-ФИП. Информационный бюллетень № 87. — М., НИИЖБ Госстроя СССР.
18. DIN 1045-1. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
19. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings. EN 1992-1 (final draft). — CEN, October 2001. — 222 pp.
20. Osanai Y., Watanabe F., Okamoto S. Stress Transfer Mechanism of Socket Base Connections with Precast Concrete Columns // ACI Structural Journal. — 1996. — V. 93, № 3. — P. 266–276.
21. Коровин Н.Н., Голосов В.Н. Экспериментальное определение коэффициента трения на контакте сборного и монолитного бетона // Совершенствование стыков железобетонных конструкций: Сб. ст. — М.: НИИЖБ, 1987. — С. 30–36.
22. Тиммуск Я.М., Эйн Э.Э. Исследование совместной работы стакана фундамента с колонной // Исследования по строительству. Напряжения в бетоне. Испытание конструкций: Сб. ст. — Таллин: Валгус, 1978. — С. 92–103.

УДК 624.012.44

*Рак Н.А., Аль-Арики Н.*

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ПРОЧНОСТЬ ТЯЖЕЛОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ выполненных в различных странах исследований прочности бетона на местное сжатие показал, что в большинстве из них изучались бетоны с кубиковой прочностью на сжатие до 60 МПа. Имеются лишь очень немногочисленные данные для бетонов с более высокой прочностью. В связи с этим нормативные и другие зависимости для расчета прочности бетона при местном сжатии обеспечивают надежность расчета только для бетонов с кубиковой прочностью не выше 60 МПа. Для обоснования их применимости при бетонах более высокой прочности необходимо было выполнить специальные исследования.

При анализе результатов проведенных ранее исследований прочности бетона при местном сжатии было выявлено, что наблюдается систематическое занижение расчетом несущей способности бетонных элементов из тяжелого бетона при размере площадки приложения нагрузки менее 30 мм. Причем с уменьшением размера до 10 мм занижение достигает более 40 %. К сожалению, число имеющихся данных по прочности бетона на местное сжатие при малых размерах площадки приложения нагрузки очень невелико, что не давало достаточных оснований для учета влияния размера площадки нагружения при расчете.

Приложение местной сжимающей нагрузки к бетонным и железобетонным элементам может осуществляться как непосредственно на бетон, так и через стальные пластины. Очевидно, что при действии местной нагрузки через стальные пластины бетон находится в более благоприятном напряженно-деформированном состоянии, чем при действии этой нагрузки непосредственно на бетон. Однако в связи с небольшим количеством экспериментальных данных при расчете элементов при местном сжатии до сих пор не учитывается влияние условий приложения нагрузки.

Для решения перечисленных выше вопросов на кафедре «Железобетонных и каменных конструкций» Белорусской государственной политехнической академии были проведены экспериментальные исследования прочности при местном сжатии бетонов с кубиковой прочностью 90 МПа (I и III серии) и 60 МПа (II серия).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования производились на бетонных призмах размерами 100x100x400 мм и 150x150x600 мм, изготовленных в

НИЛ промышленного и гражданского строительства БГПА. Состав бетонной смеси подбирался по «Рекомендациям по подбору составов высокопрочного бетона», разработанным в БелНИИС под руководством проф. Н.П. Блещика.

При изготовлении призм использовался портландцемент ПЦ 500-Д20 ОАО «Красносельскцемент» с активностью  $R_{II} = 52,3$  МПа. Крупный заполнитель — щебень гранитный Михашевичского камнеобрабатывающего завода с предельной крупностью 20 мм и маркой по дробимости М1400. В качестве мелкого заполнителя использовался кварцевый песок ДСЗ «Волма», соответствующий группе песков I класса средней крупности по ГОСТ 8736-93. Для повышения удобоукладываемости бетонной смеси вводился суперпластификатор С-3 Мозырского завода СЖБ №12.

Для контроля физико-механических характеристик бетона были изготовлены контрольные образцы — неармированные бетонные призмы соответствующего размера и кубы размером 100x100x100 мм. Кубиковая прочность бетона I и III серий составила 83,5–96,5 МПа, а II серии — 62,0–72,0 МПа.

Испытания призм производились в испытательном цехе Отраслевой НИЛ строительных конструкций БГПА на прессе мощностью 5000 кН.

При испытании образцов I и II серий нагрузка на образцы прикладывалась на бетон через штампы, имеющие размеры 10x10, 20x20, 40x40, 60x60 мм для призм размерами 100x100x400 мм, а также 15x15, 30x30, 60x60, 90x90 мм для призм 150x150x600 мм. Отношение площади призмы к площади приложения нагрузки изменялось для каждого размера призм в широком диапазоне (от 2,777 до 100).

При испытании образцов III серии нагрузка на образцы прикладывалась через штампы, опирающиеся на стальные пластины толщиной 6 и 12 мм. При этом штампы имели размеры 40x40, 60x60 мм для призм размерами 100x100x400 мм, а также 60x60, 90x90 мм для призм 150x150x600 мм. Таким образом, отношение площади призмы к площади приложения нагрузки на пластину принято на двух уровнях — 2,777 и 6,25.

При испытании с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм измерялись перемещения штампа относительно нагружаемой поверхности, а также условной равномерно деформируемой плоскости образца, расположенной от нагружаемого торца на расстоянии, равном поперечному размеру призмы. С помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм измерялись продольные деформации

*Аль-Арики Набиль. Аспирант каф. железобетонных и каменных конструкций Белорусского национального технического университета.*

*Беларусь, БНТУ, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.*

Таблица 1 – Основные результаты испытаний высокопрочного бетона при местном сжатии.

Шифр образца	$R$ , МПа	$D_{loc}$ , см	$N_{obs}$ , кН	$N_1$ , кН	$N_1/N_{obs}$	$p$	$N_2$ , кН	$N_2/N_{obs}$	
90П15-0-1,5(1)	89.0	1.5	162	113.6	0.701	13.97	167.5	1.034	
90П15-0-1,5(2)			180		0.631	15.69		0.931	
90П15-0-1,5(3)			162		0.701	13.97		1.034	
90П15-0-3(1)	83.5	3.0	316	217.8	0.689	14.37	318.4	1.008	
90П15-0-3(2)			280		0.778	12.35		1.137	
90П15-0-3(3)			290		0.751	12.91		1.098	
90П15-0-6(1)	85.0	6.0	552	441.0	0.799	11.37	636.5	1.153	
90П15-0-6(2)			680		0.648	16.10		0.936	
90П15-0-6(3)			558		0.790	11.59		1.141	
90П15-0-9(1)	92.5	9.0	840	699.7	0.833	8.41	1013.9	1.207	
90П15-0-9(2)			1020		0.686	14.71		0.994	
90П15-0-9(3)			1020		0.686	14.71		0.994	
90П10-0-1,0(1)	87.5	1.0	82.4	50.0	0.606	16.42	73.6	0.893	
90П10-0-1,0(2)			78.8		0.634			15.63	0.934
90П10-0-2,0(1)	96.5	2.0	180	106.6	0.592	17.11	157.3	0.874	
90П10-0-2,0(2)			162		0.658			15.05	0.971
90П10-0-4,0(1)	87.5	4.0	290	199.7	0.689	14.54	289.7	0.999	
90П10-0-4,0(2)			304		0.657			15.68	0.953
90П10-0-6,0(1)	90.5	6.0	480	306.4	0.638	17.51	442.4	0.921	
90П10-0-6,0(2)			400		0.766			11.13	1.106
60П15-0-1,5(1)	70.0	1.5	156	96.9	0.621	16.11	141.7	0.908	
60П15-0-1,5(2)			140		0.692			14.31	1.012
60П15-0-3(1)	72.0	3.0	274	197.3	0.720	13.77	285.7	1.043	
60П15-0-3(2)			260		0.759			12.91	1.099
60П15-0-3(3)			274		0.720			13.77	1.043
60П15-0-6(1)	62.0	6.0	490	357.7	0.730	14.22	496.1	1.012	
60П15-0-6(2)			480		0.745			13.77	1.033
60П15-0-9(1)	66.0	9.0	892	559,3	0.627	20.34	758.7	0.851	
60П15-0-9(2)			718		0.779			12.72	1.057
60П10-0-1,0(1)	69.0	1.0	60	42.6	0.710	13.90	62.3	1.038	
60П10-0-1,0(2)			70		0.609			16.45	0.890
60П10-0-1,0(3)			80		0.533			19.00	0.779
60П10-0-2(1)	68.5	2.0	136	84.9	0.624	16.45	122.5	0.901	
60П10-0-2(1)			130		0.653			15.59	0.942
60П10-0-4(1)	62.0	4.0	240	159,0	0.662	16.51	220.5	0.844	
60П10-0-4(2)			200		0.795			12.40	1.215
60П10-0-4(3)			190		0.837			11.37	1.347
60П10-0-6(1)	62.0	6.0	281	238.4	0.849	10.53	319.7	1.214	
60П10-0-6(2)			350		0.681			17.62	0.934

Примечание. Шифр образца 90П15-0-1,5(1) следует читать следующим образом:

90 — проектная кубиковая прочность в МПа; П10 — призма с размером 10х10х40 см;

0 — пластины на торце призмы нет; 1,5 — размер стороны штампа в см;

(1) — образец-близнец № 1

Таблица 2 – Основные результаты испытаний высокопрочного бетона при местном сжатии при приложении нагрузки через стальные пластины.

Шифр образца	$R$ , МПа	$\delta$ , см	$a_{loc}(b_{loc})$ , см	$N_{obs}$ , кН	$\Phi_{obs}$	$\Phi_{med}$	$A_{c,add}^{obs}$ , см <sup>2</sup>	$A_{c,add}^{cal}$ , см <sup>2</sup>	$N_{cal}$ , кН	$\frac{N_{cal}}{N_{obs}}$
90П15-0-6(1)	85,0	0,0	6,0	552	2,255	2,437				
90П15-0-6(2)				680	2,778					
90П15-0-6(3)				558	2,279					
90П15-6-6(1)	89,0	0,6	6,0	720	2,809	3,212	8,4	16,5	777,8	1,080
90П15-6-6(2)				840	3,277		25,2			0,926
90П15-6-6(3)				910	3,550		35,1			0,855
90П15-12-6(1)	89,5	1,2	6,0	920	3,569	3,753	35,8	36,0	920,9	1,001
90П15-12-6(2)				1020	3,957		49,8			0,903
90П15-12-6(3)				962	3,732		41,7			0,957
90П15-0-9(1)	92,5	0,0	9,0	840	1,401	1,602				
90П15-0-9(2)				1020	1,702					
90П15-0-9(3)				1020	1,702					
90П15-6-9(1)	92,5	0,6	9,0	1200	2,002	1,958	25,1	23,5	1187,8	0,990
90П15-6-9(2)				1200	2,002		25,1			0,990
90П15-6-9(3)				1120	1,869		14,3			1,061
90П15-12-9(1)	92,0	1,2	9,0	1310	2,197	2,253	40,9	50,1	1378,0	1,052
90П15-12-9(2)				1360	2,281		47,7			1,013
90П15-12-9(3)				1360	2,281		47,7			1,013
90П10-0-4(1)	87,5	0,0	4,0	290	2,589	2,652				
90П10-0-4(2)				304	2,714					
90П10-6-4(1)	86,5	0,6	4,0	390	3,522	3,595	14,9	11,7	367,9	0,943
90П10-6-4(2)				406	3,667		17,2			0,906
90П10-12-4(1)	86,5	1,2	4,0	480	4,335	4,290	27,9	26,6	470,9	0,981
90П10-12-4(2)				470	4,245		26,5			1,002
90П10-0-6(1)	90,5	0,0	6,0	480	1,842	1,688				
90П10-0-6(2)				400	1,535					
90П10-6-6(1)	90,5	0,6	6,0	598	2,294	2,152	21,5	16,3	560,6	0,937
90П10-6-6(2)				524	2,010		11,3			1,070
90П10-12-6(1)	90,5	1,2	6,0	640	2,455	2,678	27,3	35,7	701,0	1,095
90П10-12-6(2)				756	2,901		43,3			0,927

бетона в средней по высоте зоне призмы при базе измерения, равной половине высоты призмы.

Нагружение опытных образцов производилось поэтапно ступенями, с приращением нагрузки на величину, составляющую 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки. После достижения нагрузкой величины, составляющей 60 % от ожидаемой разрушающей, величина приращения нагрузки на этапе нагружения уменьшалась вдвое.

На первых этапах нагружения производилась тщательная центровка образцов по показаниям всех приборов. Центровка производилась путем перемещения призмы по нижней плите пресса и перемещения штампа по верхнему торцу призмы относительно геометрического центра торца. Центровка считалась достигнутой, когда при нагружении штамп совершал поступательное (без поворота) вертикальное перемещение относительно верхнего торца призмы при одновременно малом отклонении в показаниях индикаторов, измеряющих продольные деформации бетона на ее различных гранях. Окончательное положение штампа на верхнем торце призмы измерялось после разрушения образца.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Разрушение большинства образцов I и II серий происходило с образованием в области под штампом так называемого

клина, имеющего вид перевернутой пирамиды, и сопровождалось раскалыванием образца по вертикальным плоскостям с последующим сдвигом клина по одной из его боковых граней. Образовавшаяся пирамида затем извлекалась из разрушенного бетона и ее параметры (высота и наклон граней) измерялись. Бетон по расколовшимся плоскостям осматривался, изучалась его структура, фиксировалось наличие и расположение раковин и т. д.

Основные результаты испытаний образцов I и II серий представлены в таблице 1. Анализ этих результатов, свидетельствует достаточной стабильности полученных на образцах-близнецах величин разрушающей нагрузки в пределах каждой из групп образцов. Наибольшее отклонение частных значений от средней по группе величины разрушающей нагрузки не превышало 14 %.

Следует отметить, что полученная при испытаниях образцов III серии схема разрушения образцов существенно отличалась от схемы разрушения образцов I и II серий. Как показали испытания, в нагруженных через стальные пластины образцах также происходило образование в области под штампом клина, имеющего вид перевернутой пирамиды, однако раскалывания образцов по вертикальным плоскостям не наблюдалось. Это вполне объяснимо, поскольку стальная пластина препятствует расширению бетона в поперечном

направлении в зоне непосредственно примыкающей к пластине. По мере удаления от пластины ее удерживающее влияние снижается, и бетон может свободно расширяться.

Образовавшийся под штампом клин оказывает расклинивающее воздействие на окружающие его боковые части призмы и пытается выдавить их наружу. В результате на боковые части призмы действует поперечное давление от клина и вертикальное давление от участка стальной пластины, расположенного по периметру штампа. Все это вызывает внецентренное сжатие боковых частей и приводит к образованию горизонтальных трещин в месте действия наибольших растягивающих напряжений от него. После образования трещин несущая способность боковых частей истощалась, и все усилие начинало передаваться только на центральный клин. В результате непосредственно после образования этих трещин происходило разрушение образцов. Однако раскалывания образцов по вертикальным плоскостям при этом не происходило, а наблюдался откол боковых частей.

Основные результаты испытаний представлены в таблице 2, в которой также для удобства сопоставления приведены данные по аналогичным образцам без стальных пластин. Анализ результатов испытаний образцов с пластинами, свидетельствует о достаточной стабильности полученных на образцах-близнецах величин разрушающей нагрузки в пределах каждой из групп образцов. Наибольшее отклонение частных значений от средней по группе величины разрушающей нагрузки не превышало 13%.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При анализе результатов было выполнено сопоставление полученных при испытаниях величин разрушающей нагрузки с расчетными величинами, определенными по зависимости (1), которая была получена ранее [1] при статистической обработке большого массива экспериментальных данных и положена в основу методики расчета на местное сжатие проекта СНБ

$$N_1 = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \cdot 9,8 \cdot R_{bt} \cdot A_1, \quad (1)$$

где  $A_2$  — площадь нагружаемой плоскости бетонного образца,  $A_1$  — площадь приложения нагрузки,  $R_{bt}$  — прочность бетона при осевом растяжении.

Анализ результатов сопоставления показывает, что расчет по зависимости (1) существенно (в среднем на 30 %) занижает прочность бетона при местном сжатии. Кроме того, прослеживается, что занижение расчетом прочности наиболее ощутимо для малых размеров площадки приложения нагрузки.

Дополнительно был проведен расчет по формуле (2), общий вид которой получен на основе разработанной в [2] расчетной модели для определения прочности бетона на сжатие

$$N_2 = \left[ R_b + p \cdot \left( \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} - 1 \right) \cdot R_{bt} \right] \cdot A_1, \quad (2)$$

в которой  $R_b$  — призмная прочность бетона,  $p$  — опытный безразмерный параметр.

При этом сначала величина коэффициента  $p$  была определена отдельно для каждого испытанного образца-призмы. Анализ полученных частных значений этого коэффициента свидетельствует о том, что в основном они изменяются в пределах от 11 до 16.

Анализ усредненных по группам образцов-близнецов опытных величин коэффициента  $p$  показал, что наблюдается стабильное его возрастание при уменьшении размеров площади приложения нагрузки. Однако степень этого роста весьма невелика — при уменьшении размера в 6 раз (с 9 до 1,5 см для призм П15 или с 6 до 1 см для призм П10) величина коэффициента  $p$  возросла всего на 15 %.

Кроме того, при одинаковых соотношениях размеров штампа к размеру призмы полученная при испытании призм с размером 10 см величина коэффициента  $p$  на 10-15 % выше, чем для призм с размером 15 см.

Обращает на себя внимание, что при одинаковых размерах штампа и одинаковых размерах призм величины коэффициента  $p$  для образцов I и II серий, различающихся прочностью бетона, оказались практически одинаковыми. Таким образом, влиянием прочности бетона на величину коэффициента  $p$  можно пренебречь.

В первом приближении можно также не учитывать и влияние масштабного фактора (размера штампа и размера призмы) на величину коэффициента  $p$ . Тогда средняя по всем образцам величина этого коэффициента составит  $p = 14,5$  и формула (2) преобразуется к виду

$$N_2 = \left[ R_b + 14,5 \cdot \left( \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} - 1 \right) \cdot R_{bt} \right] \cdot A_1. \quad (3)$$

Рассчитанные по формуле (3) теоретические величины  $N_2$  приведены в предпоследнем столбце таблицы, а в последнем ее столбце приведены отношения этих величин к опытным. Среднее по всем 39 образцам отношение теоретических величин к опытным величинам составило 1,004 при коэффициенте вариации 0,099.

Столь удовлетворительное соответствие зависимости (3) полученным впервые экспериментальным данным о прочности высокопрочного бетона при местном сжатии позволило рекомендовать эту зависимость для использования при проектировании [3].

При анализе результатов испытаний образцов III серии по полученным разрушающим нагрузкам были для каждого образца определены опытные коэффициенты повышения прочности бетона при местном сжатии

$$\varphi_{loc} = \frac{N_{obs}}{f'_c A_1},$$

где  $N_{obs}$  — разрушающая нагрузка;  $f'_c$  — цилиндрическая (призмная) прочность бетона;  $A_1$  — площадь штампа.

Усредненные по группам образцов величины коэффициента  $\varphi_{loc}$  приведены в таблице 2. Как показал анализ, наличие стальной пластины повысило прочность образцов при толщине пластины 6 мм на 22-36 %, а при толщине 12 мм на 40-62 %. При этом степень увеличения практически не зависит от размеров штампа и их соотношения с размерами образца.

Выявленное испытаниями положительное влияние стальной пластины на прочность высокопрочного бетона на местное сжатие следует учитывать в расчетах.

Полученное при испытаниях напряженно-деформированное состояние образцов свидетельствует о том, что стальные пластины частично распределяют нагрузку от штампа на бетон, расположенный за пределами штампа по его периметру. При этом размер образовавшегося под штампом клина сохраняется таким же, как и в образцах без пластин, т.е. основанием клина является площадка нагружения. Следовательно, несущая способность этого бетона на местное сжатие может быть определена по приведенной выше формуле (3).

Включение в работу бетона, расположенного по периметру штампа в пределах полосы шириной  $d_{add}$ , обеспечиваемое стальной пластиной, следует учитывать добавлением дополнительного слагаемого  $N_{add}$ , определяемого по формуле

$$N_{add} = f'_c A_{c,add},$$

где  $A_{c,add}$  — площадь бетона, расположенного по периметру штампа, определяемая по формуле

$$A_{c,add} = d_{add} (2a_{loc} + 2b_{loc} + 4d_{add}), \quad (4)$$

где  $a_{loc}$  и  $b_{loc}$  — размеры площади приложения нагружения.

Тогда несущая способность образцов при местном сжатии при наличии пластин определяется по формуле

$$N_{loc} = f_{loc} A_1 + N_{add} = \left[ f'_c + 14,5 \cdot f_t \cdot \left( \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} - 1 \right) \right] A_1 + f'_c \cdot A_{c,add} \quad (5)$$

Таким образом, при известных опытных величинах несущей способности, прочностных характеристик бетона и площади загружаемого торца можно для каждого образца определить опытную величину дополнительной площади  $A_{c,add}^{obs}$ . Определенные для каждого образца величины приведенной площади представлены в таблице 2. Затем для каждого образца при известной величине  $A_{c,add}^{obs}$  была определена ширина  $d_{add}$  дополнительной области бетона. Несмотря на наблюдающийся разброс полученных величин  $d_{add}$ , четко прослеживается их примерно пропорциональное возрастание с увеличением толщины пластины. Кроме того, не просматривается какой-либо зависимости величины  $d_{add}$  от размеров штампов, размеров образцов и соотношения этих размеров. В связи с этим, принимаем линейный вид зависимости  $d_{add}$  от толщины пластины  $\delta$  и получаем по результатам обработки всех образцов зависимость  $d_{add} = 1,11\delta$ .

Следует отметить, что для бетонов с кубиковой прочностью 38,5 МПа ранее [4] была получена аналогичная зависимость, но с коэффициентом 1,5. Таким образом, экспериментально установлено некоторое уменьшение коэффициента пропорциональности с ростом прочности бетона.

Объяснение этому явлению следует по нашему мнению искать в условиях контактного взаимодействия стальной пластины и бетона в области дополнительной площади. В пределах штампа пластина перемещается поступательно. За пределами штампа она начинает изгибаться под действием отпора бетона. При этом пластину можно рассматривать как жестко защемленную в сечении по грани штампа. Принимаем условно, что пластина в пределах площади взаимодействия испытывает равномерное давление от бетона, равное цилиндрической (призмной) прочности  $f'_c$ . Тогда при ширине  $d_{add}$  площадки взаимодействия изгибающий момент в пластине единичной ширины в наиболее напряженном сечении, расположенном на грани штампа, равен  $M_{add} = 0,5 f'_c d_{add}^2$ .

С другой стороны, пластина работает упруго до стадии появления в наиболее растянутых фибрах пластины напряжений, равных пределу текучести стали  $f_y$ . Тогда изгибающий момент в пластине единичной ширины при появлении в наиболее растянутых фибрах пластины напряжений, равных пределу текучести стали, равен  $M_y = f_y \delta^2 / 6$ .

Из равенства указанных изгибающих моментов получаем следующую зависимость для определения величины ширины  $d_{add}$

$$d_{add} = \delta \sqrt{\frac{f_y}{3 f'_c}}. \quad (6)$$

При пределе текучести стали пластины, равном 230 МПа, и средней кубиковой прочности бетона образцов 90 МПа по

зависимости (6) получаем  $d_{add} = \delta \sqrt{\frac{230}{3 \cdot 0,8 \cdot 90}} = 1,03\delta$ ,

что практически совпадает с зависимостью, полученной при обработке данных испытаний.

Для бетонов с кубиковой прочностью 38,5 МПа по зависимости (6) определяем  $d_{add} = \delta \sqrt{\frac{230}{3 \cdot 0,8 \cdot 38,5}} = 1,57\delta$ ,

что отвечает экспериментальным данным [4].

С использованием формул (4)-(6) были выполнены расчеты несущей способности всех испытанных образцов при фактической прочности бетона. Определенные расчетом несущие способности образцов приведены в предпоследнем столбце таблицы 2, а в последнем ее столбце приведены отношения этих величин к опытным. Определенное по 20 образцам среднее отношение расчетных величин к опытным величинам оказалось равным 0,985 при коэффициенте вариации 0,067.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены экспериментальные исследования элементов из бетона прочностью 60-95 МПа при местном сжатии. Впервые получены экспериментальные данные о влиянии соотношения размеров площади нагружения и размеров нагружаемой плоскости элементов на напряженно-деформированное состояние элементов из высокопрочного бетона при местном сжатии.
2. Проведены экспериментальные исследования элементов из бетона прочностью 85-95 МПа при местном сжатии через стальные пластины. Впервые получены экспериментальные данные о влиянии толщины пластины, соотношения размеров площади нагружения и размеров нагружаемой плоскости элементов на напряженно-деформированное состояние элементов из высокопрочного бетона при местном сжатии.
3. Разработана методика расчета прочности элементов из высокопрочного бетона при местном сжатии с учетом влияния условий приложения нагрузки, позволяющая с высокой достоверностью учитывать влияние толщины пластины, соотношения размеров площади нагружения и размеров нагружаемой плоскости элементов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рак Н.А. Контактное взаимодействие в задачах расчета железобетонных конструкций // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Материалы IV научно-методического межвузовского семинара. — Гомель, БелГУТ, 1998. — С. 131–139.
2. Рак Н.А., Аль-Арики Н. К расчету прочности бетонных элементов на местное сжатие с учетом масштабного фактора и структуры бетона // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Материалы V научно-методического межвузовского семинара. — Мн.: Редакция журнала «Тыдзень», 2000. — С. 221–226.
3. Рак Н.А., Аль-Арики Н. Исследование прочности высокопрочного бетона при местном сжатии // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VI Международного научно-методического семинара. — Мн.: УП «Технопринт», 2001. — С. 302–308.
4. Рак Н.А. Расчет прочности опорных участков железобетонных конструкций при местном приложении нагрузки с учетом их конструктивных особенностей // Инженерные проблемы современного бетона и железобетона. Материалы Международной конференции. Том 1, часть 2. — Минск, БелНИИС, 1997. — С. 107–114.