

УДК 624.012

Рак Н.А.

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИН ЗАКЛАДНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНА ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ

### ВВЕДЕНИЕ

Местное приложение сжимающей нагрузки на бетонные элементы в основном наблюдается в узлах опирания на них вышележащих элементов. При этом, как правило, на сопрягаемых плоскостях элементов имеются стальные закладные изделия в виде пластин с анкерными стержнями. В этом случае приложение нагрузки на бетон сопрягаемых элементов происходит через стальные пластины.

Наличие стальных пластин закладных изделий, как показывают результаты экспериментальных исследований [1-6], положительно сказывается на несущей способности и контактных деформациях бетона при местном сжатии.

В связи с этим дальнейшее совершенствование методики расчета конструкций при местном сжатии, на наш взгляд, должно проводиться на основе использования расчетной модели бетона, позволяющей учитывать геометрические размеры и физико-механические свойства структурных составляющих бетона, а также расположение площадки приложения нагрузки по отношению к расположению структурных составляющих.

### ПАРАМЕТРЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

Предложенная в работе [7] структурно-механическая модель бетона является трехмерной двухкомпонентной, состоящей из матрицы в виде окаменевшего цементно-песчаного раствора и включений в нее в виде равновеликих шарообразных зерен крупного заполнителя. При этом схема упаковки последних принята регулярной с координационным числом 12, т.е. около каждого из зерен на одинаковом расстоянии от него расположено 12 зерен.

Радиус  $\rho_3$  зерна крупного заполнителя принимается из условия равенства удельной поверхности зерен модели и фактической удельной поверхности крупного заполнителя и определяется по формуле

$$r_3 = \frac{3}{S_{уз} \cdot \rho_3}, \quad (1)$$

где  $S_{уз}$  и  $\rho_3$  — соответственно удельная поверхность и плотность крупного заполнителя.

Половина расстояния между зернами крупного заполнителя  $\delta_m$  принимается исходя из состава бетонной смеси, а также свойств ее составляющих и определяется по формуле

$$\delta_m = \left( \sqrt[3]{\frac{(1 - m_{пз}) \cdot \rho_3}{G_3}} - 1 \right) \cdot r_3, \quad (2)$$

где  $m_{пз}$  — пустотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии,  $G_3$  — расход крупного заполнителя на  $m^3$ .

Тогда расстояние  $l$  между центрами зерен крупного заполнителя определяется по формуле  $l = 2 \cdot (r_3 + \delta_m)$ , а размеры элементарной ячейки модели в направлении осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  пространственной системы координат по формулам  $l_x = l$ ;  $l_y = \sqrt{3} \cdot l/2$ ;  $l_z = \sqrt{2} \cdot l/\sqrt{3}$ .

Физико-механические свойства крупного заполнителя и матрицы характеризуются модулями деформаций  $E_3$  и  $E_m$ , коэффициентами поперечных деформаций  $\mu_3$  и  $\mu_m$ .

Напряженно-деформированное состояние элементов структурно-механической модели бетона при осевом сжатии зависит от величины отношения модулей деформаций  $n_E = E_3/E_m$ , а также от величины приведенной полутолщины прослойки между зернами заполнителя  $\beta = \delta_m/r_3$ . Расчеты показали, что для тяжелого бетона величина параметра  $n_E$  изменяется в пределах от 1 до 8, а параметра  $\beta$  — от 0,05 до 0,7.

Для случая местного действия нагрузки помимо этих параметров на напряженно-деформированное состояние элементов модели будет влиять величина параметра  $\gamma = r_0 / (r_1 + \delta)$  и относительный размер области приложения нагрузки  $\phi = r_1 / r_0$ , где  $r_0$  — размер области приложения нагрузки, а  $r_1$  — размера области распределения нагрузки. На практике параметр  $\gamma$  изменяется в пределах от 4 до 20, а параметр  $\phi$  — в пределах от 1 до 10.

В случае приложения местной нагрузки на бетон через стальную пластину, помимо перечисленных выше параметров, дополнительно появляется геометрический размер (толщина) пластины. Физико-механические свойства материала пластины (сталь) характеризуются модулем упругости  $E_{ст}$  и коэффициентом поперечных деформаций  $\mu_{ст}$ . В типовых железобетонных конструкциях толщина пластины закладного изделия, как правило, не превышает 12 мм. С целью оценки влияния толщины пластины и сопоставления с данными экспериментальных исследований [5, 6] было принято два уровня толщины пластины — 6 и 12 мм.

На основе перечисленных параметров расчетной модели бетона с использованием пакета программ конечно-элементного анализа NASTRAN FOR WINDOWS была разработана конечно-элементная модель бетона, по которой впоследствии выполнялись расчеты при различных условиях приложения силовых воздействий.

Размеры структуры модели определялись по приведенным выше формулам для следующих данных о составе бетона: пустотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии  $m_{пз} = 0,3084$ ; расход крупного заполнителя  $G_3 = 920 \text{ кг/м}^3$ ; удельная поверхность крупного заполнителя  $S_2 = 0,385 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; плотность крупного заполнителя  $\rho_3 \approx 2600 \text{ кг/м}^3$ . Тогда радиус  $r_3$  зерна крупного заполнителя составил 3 мм; а половина расстояния между зернами крупного заполнителя  $\delta_m = 0,75 \text{ мм}$ .

В качестве примера на рис. 1 показана конечно-элементная модель бетонного куба размером  $105,0 \times 105,0 \times 106,07 \text{ мм}$  с расположенной на верхнем торце стальной пластиной толщиной 12 мм. Конечно-элементная модель центрально загружена по нижней и верхней плоскости жесткими штампами размерами  $52,5 \times 52,5 \text{ мм}$ , передающими нагрузку на стальную пластину.

В силу симметрии приложения нагрузки для уменьшения размерности задачи смоделирована 1/16 часть куба и соответствующая ей 1/8 часть пластины. Смоделированная часть куба получена его разделением тремя плоскостями симметрии. Действие на смоделированную часть куба каждой из 3 примыкающих к ней его частей заменено наложением в плоскостях разреза связей на перемещения в направлении, перпендикулярно этим плоскостям.

Смоделированная часть пластины получена разрезом пластины по двум вертикальным плоскостям симметрии. Действие на смоделированную часть пластины каждой из 2 примыкающих к ней ее частей заменено наложением в плоскостях разреза связей на перемещения в направлении, перпендикулярно этим плоскостям.

Приложение нагрузки осуществлялось заданием по плоскости приложения жесткого штампа на пластину постоянного по его площади перемещения, равного 0,059 мм при толщине пластины 6 мм и 0,065 мм при толщине пластины 12 мм, что соответствует средней относительной деформации образца (в области между штампами), примерно равной 1‰.

Расчеты выполнялись при трех размерах площади приложения нагрузки — 22,5 мм, 52,5 мм и 105 мм.

При расчете, кроме картин распределения главных сжимающих и растягивающих напряжений, определялись величины реакций в связях по нижнему торцу модели и величина их равнодействующей, а также ее положение в системе координат модели. Кроме того, для моделей со стальными пластинами дополнительно определялись те же параметры для сечения, расположенного по низу пластины.

Следует отметить, что деформирование модели производилось не приложением нагрузки, а путем задания постоянного перемещения узлов верхнего торца модели, расположенных в пределах условного жесткого штампа. Поэтому величина нагрузки, приложенной к модели, заранее известна не была и могла быть получена только в результате расчета. В связи с этим дополнительно производилось определение возникших при деформировании модели усилий в узлах верхнего торца, получивших заданное перемещение. После чего определялась величина их равнодействующей и ее положение в системе координат модели.

При всех расчетах принималось  $E_3 = 90 \text{ ГПа}$ ,  $\mu_3 = 0,2$ ,  $E_m = 30 \text{ ГПа}$  и  $\mu_m = 0,2$ ,  $E_{ст} = 200 \text{ ГПа}$ ,  $\mu_{ст} = 0,3$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты расчета по разработанным конечно-элементным моделям свидетельствуют о весьма высокой неоднородности напряжений в компонентах структуры бетона в зоне приложения местных нагрузок, которое следует учитывать при разработке инженерной методики деформационного расчета железобетонных элементов при местном сжатии. При этом следует принимать во внимание, что основные силовые потоки в бетоне ориентированы по линиям, соединяющим центры зерен крупного заполнителя, а остальная область бетона остается сравнительно менее нагруженной (рис.2).

Сопоставление характера распределения напряжений с полученными ранее в работе /8/ при анализе напряженно-деформированного состояния бетона при местном сжатии, при условии приложения нагрузок непосредственно на бетон, свидетельствует о том, что наличие пластины значительно сглаживает напряженное состояние бетона, находящегося под площадкой нагружения. Причем в особой степени этот эффект проявляется в области бетона, расположенной непосредственно около границы приложения нагрузки (рис. 2).

Анализ полученного при расчете характера распределения вертикальных напряжений по контакту пластины с бетоном (рис. 3) показал, что с увеличением толщины пластины увеличивается размер зоны передачи сжимающих напряжений, расположенной за пределами площади приложения нагрузки.

С учетом того, что при расчете моделей в пределах зоны нагружения прикладывались перемещения, обеспечивающие приблизительно равные относительные деформации, полученные вертикальные реакции  $R$  оказались зависимыми от площади нагружения и толщины пластины. Для обеспечения сопоставимости результатов были вычислены линейные перемещения (осадки)  $\Delta_N$  площади приложения нагрузки для всех моделей при одинаковой величине нагрузки  $N = 60$  кН. Как показали расчеты, основные результаты которых приведены в таблице, осадки  $\Delta_N$  значительно уменьшаются с ростом размеров штампа при одинаковых условиях его опирания, а также уменьшаются при увеличении толщины пластины при одинаковом размере штампов (в случае, когда этот размер меньше размера нагружаемой плоскости элемента). Кроме того, были посчитаны для всех моделей средние, в пределах площадки нагружения, осадки низа пластин  $\Delta'_N$ . Оказалось, что средние осадки  $\Delta'_N$  бетонной плоскости уменьшались с увеличением толщины пластины, что свидетельствует о значительных распределительных свойствах пластин при действии местной сжимающей нагрузки. Причем интенсивность уменьшения осадок увеличивалась с уменьшением относительного размера площади нагружения.

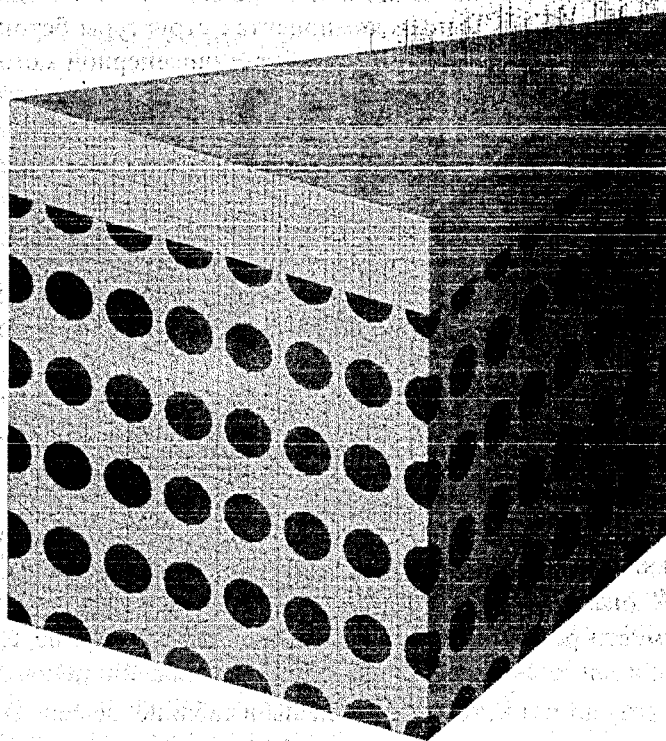
Таблица – Сопоставление результатов расчетов конечно-элементных моделей

$r_0$ , мм	$\gamma$	$\phi$	$\delta_p$ , мм	$\Delta_R$ , МК	$R$ , Н	$\Delta_N$ , МК	$\Delta'_N$ , МК	$c_1$ , мм	$c_2$ , мм	$c_3$ , мм
22,5	6	4,67	0	53	9634	330	330	6,31	6,31	18,94
			6	59	15888	223	194	6,98	9,04	20,74
			12	65	21305	183	126	7,23	11,90	22,01
52,5	14	2	0	53	27410	116	116	14,58	14,58	20,71
			6	59	37383	95	89	15,96	16,70	22,61
			12	65	44470	88	77	16,33	18,33	23,28
105	28	1	0	53	59318	54	54	24,74	24,74	24,74
			6	59	65058	55	53	25,02	25,15	24,59
			12	65	70135	56	53	25,44	25,18	24,56

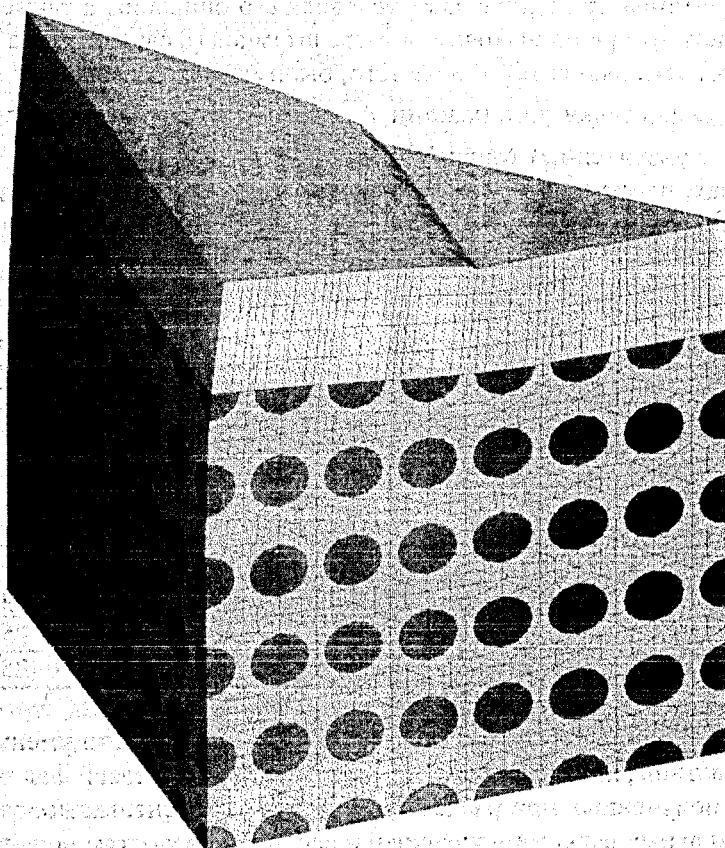
В то же время при нагружении модели по всей ее плоскости уменьшения осадки при увеличении толщины пластины, как и следовало ожидать, не наблюдалось.

На основе полученных при расчетах на конечно-элементных моделях данных были вычислены величины вертикальных реакций по верхней и средней плоскостям испытываемого на концентричное местное сжатие кубического образца, а также определено положение этих реакций. При этом испытываемый на концентричное местное сжатие кубический образец условно разделялся по диагональному сечению на две половины. Каждая из половин в свою очередь может быть составлена как набор из четырех соединенных определенным образом фрагментов, каждый из которых представляет собой рассчитанную методом конечных элементов модель (рис. 1).

а



б

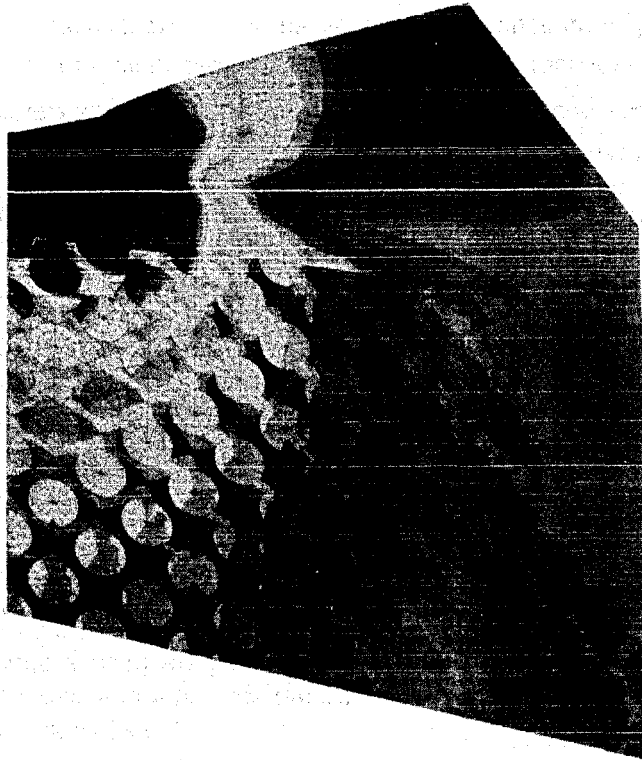


(а) — схема наложения связей и обозначение несилowych перемещений узлов под штампом;  
(б) — модель в деформированном состоянии;

**Рисунок 1** — Общий вид 1/16 модели бетонного куба со стальной пластиной  $\delta_p = 12$  мм при  $r_0 = 52,5$  мм:

V: Main  
L: Dis -65.033e-3 Al=3/14  
C: Stamp 3/14

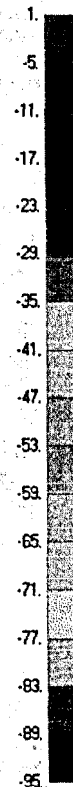
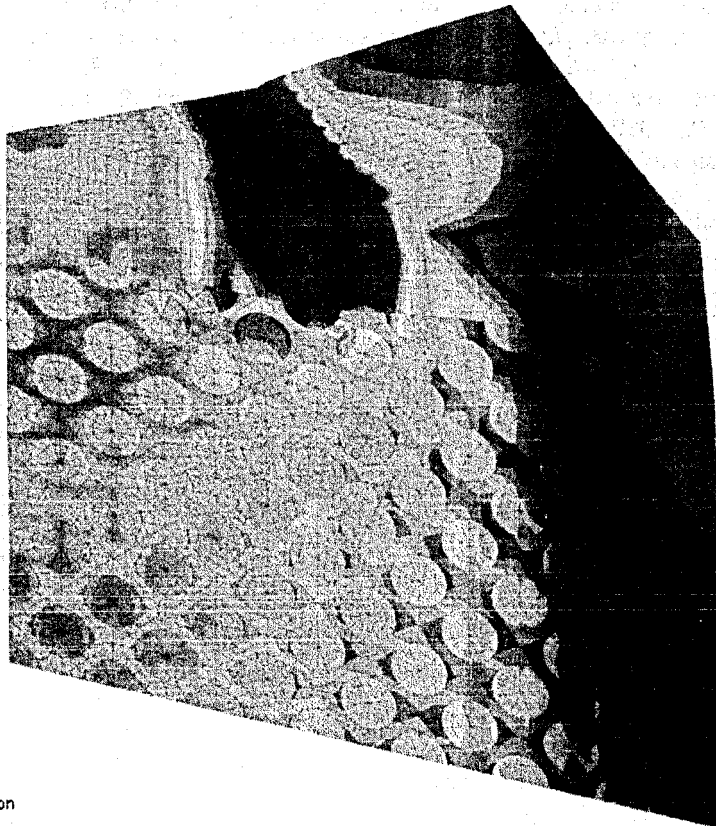
а



Output Set: 3/14 NASTRAN IterSol  
Deformed(0.0656). Total Translation  
Contour: Solid Min Prin Stress

V: Main  
L: Dis -65.033e-3 Al=7/14  
C: Stamp 7/14

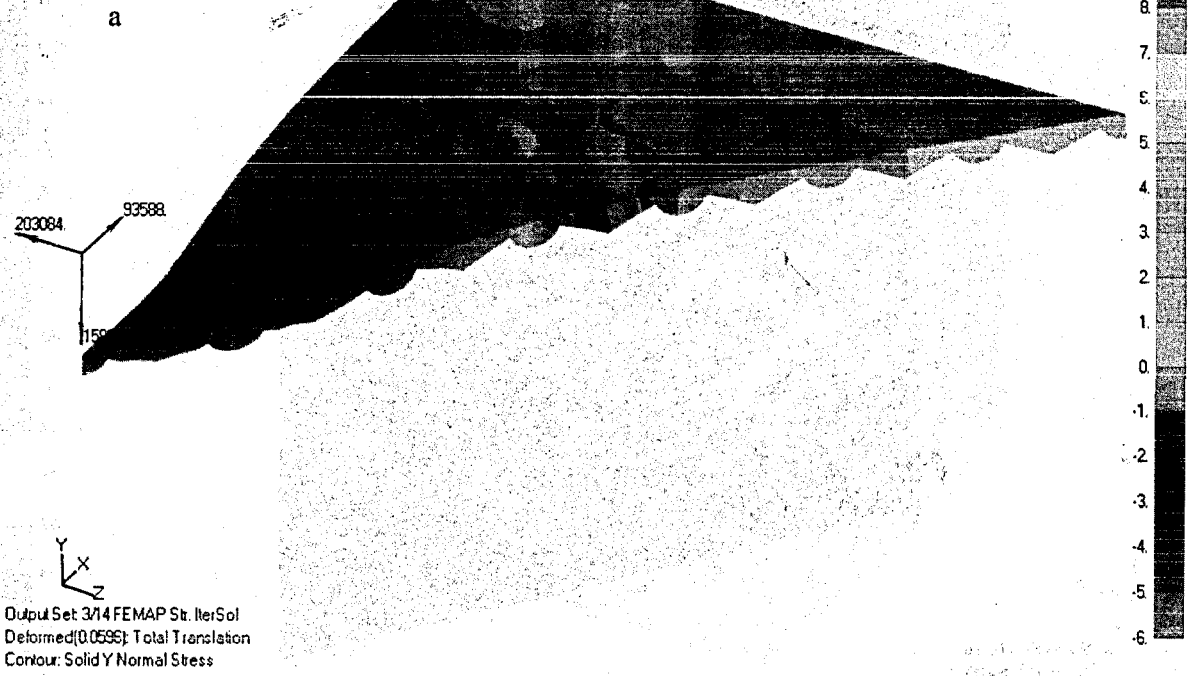
б



Output Set: 7/14 NASTRAN IterSol  
Deformed(0.0656). Total Translation  
Contour: Solid Min Prin Stress

Рисунок 2 – Общий вид КЭ-модели бетонного куба со стальной пластиной  $\delta_p = 12$  мм и характер распределения главных сжимающих напряжений  $\sigma_{мс}$  (МПа): а — при  $r_0 = 22,5$  мм; б — при  $r_0 = 52,5$  мм

V: Контакт S-B  
 L: Dis -59.033e-3 Al=7/14  
 C: Stamp 7/14  
 G: Контакт S-B



V: Контакт S-B  
 L: Dis -65.033e-3 Al=3/14  
 C: Stamp 3/14  
 G: Контакт S-B



Рисунок 3 – Характер распределения нормальных напряжений  $\sigma_y$  (МПа) на поверхности бетона при  $r_0=22,5$  мм под стальной пластиной: а — при  $\delta_p = 6$  мм; б — при  $\delta_p = 12$  мм



Величины вертикальных реакций по всем плоскостям рассматриваемых половин испытываемого при концентричном местном сжатии образца можно определить по формуле  $V = 4R$ . Точки приложения вертикальной реакции располагаются в диагональной плоскости образца на расстояниях  $c_1$  от вертикальной оси симметрии куба, где расстояния  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  соответствуют верхней плоскости пластины, нижней плоскости пластины или верхней плоскости бетона, а также средней плоскости кубического образца.

Анализ приведенных в таблице данных показал, что с появлением пластин равнодействующие усилия на верхней и средней плоскостях бетона смещаются наружу. Причем величина смещения увеличивается с увеличением толщины пластины. Кроме того, наблюдается более интенсивное смещение равнодействующих при меньших размерах площади нагружения. Причем, как правило, равнодействующая на верхней плоскости бетона смещается наружу более интенсивно, чем равнодействующая по средней. В связи с этим распорное усилие в бетоне при увеличении толщины пластины снижается. В большей степени эта тенденция наблюдается при размере площадки нагружения, меньшем половины размера образца. При этом, если это отношение примерно равно половине, то распор при увеличении толщины пластины практически не изменяется.

Обращает на себя внимание тот факт, что точка приложения равнодействующей вертикальной нагрузки в плоскости низа пластины с увеличением толщины последней все больше отклоняется наружу от точки приложения равнодействующей вертикальной нагрузки в плоскости верха пластины.

В целом анализ полученных на конечно-элементных моделях результатов показал, что стальные пластины существенно улучшают работу бетона в области приложения местных сжимающих нагрузок, что следует учитывать при разработке методики расчета прочности и деформаций контактных зон железобетонных конструкций.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заварзаев Г.Н. Платформенный стык с усилением внешним армированием тонколистовой сталью участков внутренних несущих стеновых панелей крупнопанельных зданий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / НИИЖБ. – М. 1988. – 19 с.
2. Клевцов В.А., Бирулин Ю.Ф., Заварзаев Г.Н. Влияние пластин закладных деталей на прочность узлов железобетонных конструкций при местном сжатии // Бетон и железобетон. – 1990. – № 2. – С. 16–18.
3. Гусева Т.К. Расчет и конструирование зон концентрированного приложения нагрузки в железобетонных мостах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.15 / ЦНИИС. – М., 1991. – 20 с.
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. – Мн.: БелНИИС, 1997. – Т. 1, ч. 2. – С. 107–114.
5. Рак Н.А., Аль-Арики Н. Влияние условий приложения нагрузки на прочность тяжелого высокопрочного бетона при местном сжатии // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. – № 1(13) – С. 64–68.
6. Рак Н.А., Аль-Арики Н. Контактные деформации при местном сжатии элементов из тяжелого высокопрочного бетона // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1(19) – С. 151–157.
7. Рак Н.А. К построению методики расчета железобетонных конструкций с учетом неоднородности структуры бетона // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2001. – № 1(7) – С. 90–99.
8. Рак Н.А. Исследование напряженно деформированного состояния элементов из высокопрочного бетона при местном сжатии с использованием метода конечных элементов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VII Международного научно-методического семинара. – Брест, БГТУ; 2001 - С. 162–168.