

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КВАДРАТНЫХ, ШАРНИРНО ОПЕРТЫХ, ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК С НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ

Дорофеев В.С., Коломийчук Г.П. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Для расчета несущей способности квадратной железобетонной оболочки двойкой кривизны использован метод предельного равновесия. Учтено влияние ограниченных несовершенств формы срединной поверхности на местное разрушение для шарнирно опертых оболочек. Выполнено сравнение полученных результатов с другими известными решениями.

Экспериментами на моделях установлено, что когда контур не имеет горизонтальных смещений, а также существуют начальные несовершенства формы в виде локальных вмятин при смещаемом контуре, схема излома всей оболочки не реализуется, а возникает местное разрушение в виде круговой вмятины [1, 2].

В таблице 1 приведены данные полученные на моделях оболочек двойкой кривизны при разных контурных условиях.

Таблица 1

Несущая способность железобетонных моделей оболочек двойкой кривизны

№ п/п	Геометрические размеры модели, мм			K_x, K_y	\bar{k}	$E, \text{кг/см}^2$	Закрепление	$q, \text{кг/см}^2 \times 10^{-4}$	q	Автор
	a	b	h							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2000	2000	13,8	17,37	34,74	265000	—	268	44,10	[3]
2	2000	2000	16,0	27,42	54,84	230000	—	712	75,58	[3]
3	2000	2000	15,5	28,30	56,60	245000	—	574	64,94	[3]
4	2000	2000	15,0	29,24	58,48	207000	—	484	73,89	[3]

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	2000	2000	14,6	30,04	60,08	205000	—"	465	79,87	[3]
6	2940	2940	10,0	213,42	26,84	297000	—"	3120	7848,51	[4]
7	2940	2940	10,0	213,42	26,84	324000	—"	3280	7563,42	[4]
8	3000	3000	10,0	222,22	44,44	400000	—"	5700	11542,50	[5]
9	3000	3000	30,0	23,96	47,92	352000	—"	1605	45,60	[6]
10	6000	6000	16,0	45,96	91,92	408000	—"	2095	1624,40	[7]
11	2000	2000	14,4	60,39	120,8	267000	—"	1173	163,47	[3]
12	2030	2030	6,6	121,69	243,4	408000	—"	1957	4292,80	[2]
13	2030	2030	6,4	126,25	252,5	398000	—"	1670	4247,15	[1]

Для определения несущей способности тонких железобетонных несовершенных оболочек используем методику, предложенную для квадратных сферических оболочек защемленных по контуру, в работах [1, 2].

Схему излома принимаем в виде круговой вмятины радиусом ρ_0 (рис. 1). Часть оболочки, ограниченной кольцевым шарниром с радиусом ρ_0 , рассматриваем как отдельную защемленную по контуру условную сферическую оболочку на круглом плане с радиусом кривизны R_{cp} , равным среднему радиусу кривизны в пределах вмятины.

Круглый контур представляем полигональным с достаточно большим числом сторон. Сосредоточенные деформации в оболочке с таким контуром приводим к сосредоточенным удлинениям ε и сосредоточенным кривизнам θ . Считаем, что условие $\varepsilon/\theta = C$ (где C – расстояние от нейтрального слоя до срединной поверхности), принимаемое для изотропных оболочек, сохраняется и в нашем случае.

Работа внутренних сил на сосредоточенных деформациях по одной из линий может быть представлена в виде

$$T_j = \sigma_0 \left(h \int_0^\ell |\varepsilon| dS + \frac{h^3}{12} \int_0^\ell \left| \frac{\theta}{C} \right| dS \right), \quad (1)$$

где σ_0 – напряжения в срединной поверхности оболочки;

h – толщина оболочки;

ℓ – полная длина дуги меридиана;

dS – длина элементарного отрезка меридионального сечения.

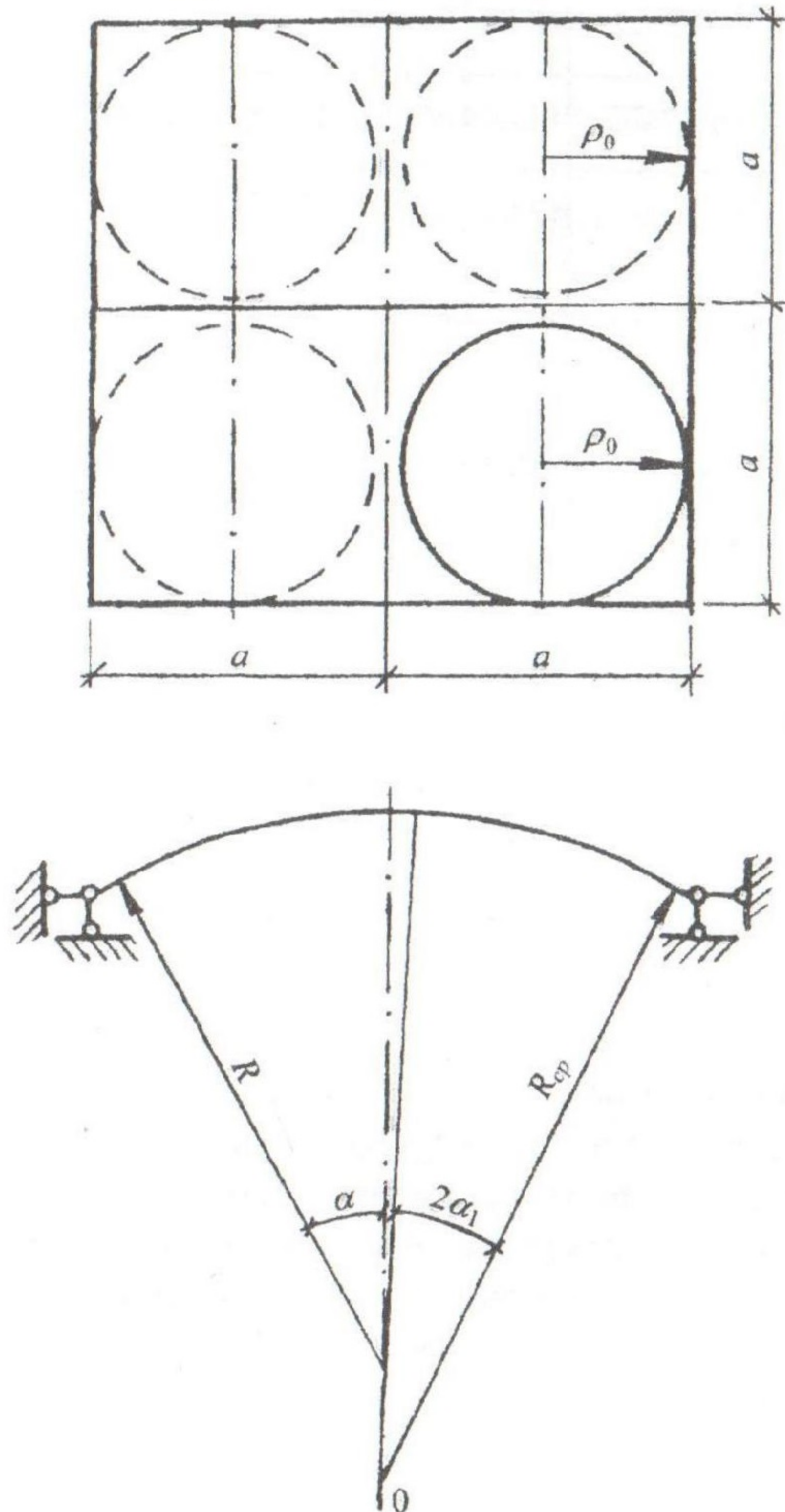


Рис. 1. Схема излома несовершенной пологой железобетонной оболочки

При числе сторон контура $j \rightarrow \infty$ оболочка с полигональным контуром образует оболочку вращения с множеством меридионально расположенных линий сосредоточенных деформаций.

Полная работа внутренних сил для такой оболочки с учетом работы предельных моментов по кольцевому пластическому шарниру записывается в виде

$$T = 2\pi\varphi \left[\sigma_0 \left(S_i + \frac{h^3}{12} \int_0^\ell \frac{1}{Z} dS \right) + \rho_0 m \right], \quad (2)$$

где S_i – статический момент сечения оболочки по линии сосредоточенных деформаций относительно ее проекции на плоскость опорного сечения; Z – аппликата срединной поверхности; m – предельный момент в кольцевом пластическом шарнире.

Считая приближенно форму изгиба оболочки во вмятине, получим выражение для работы внешних сил:

$$V = q \frac{\pi}{3} \varphi \rho_0^3, \quad (3)$$

где q – интенсивность равномерно распределенной внешней нагрузки.

Учитывая большие прогибы во вмятине, приравниваем вариации работы внешних и внутренних сил по некоторому параметру Δ и получаем выражение для интенсивности предельной нагрузки в виде:

$$q = \frac{6R_{cp}}{\rho_0^3} \left\{ n \left[\left(\rho_0 - \alpha_1 R_{cp} + \alpha_1 f \right) - \Delta \left(\alpha_1 - f/\rho_0 \right) \right] (1 + \lambda) + m \frac{\rho_0}{R_{cp}} \right\}, \quad (4)$$

где n – предельное усилие сжатия в кольцевом пластическом шарнире; α_1 – половина центрального угла дуги условной сферической оболочки (в радианах); f – стрела подъема условной оболочки; Δ – параметр, представляющий собой прогиб центра условной оболочки в момент исчерпания несущей способности; λ – коэффициент, учитывающий долю моментной составляющей в работе внутренних сил (без учета моментов по контуру кольцевого шарнира).

Коэффициент λ определяется следующей зависимостью:

$$\lambda = \frac{h^2}{12R_{cp}} \left\{ \frac{\frac{R_{cp}}{\rho_0} \psi + \frac{\Delta R_{cp}}{h\rho_0^3} \left[2 \frac{\rho_0}{R_{cp}} (\chi - \rho_0) + h(1 - \cos \alpha_1 + \psi \cos \alpha_1) \right]}{\left(\frac{\rho_0}{R_{cp}} - \alpha_1 \cos \alpha_1 \right) - \frac{\Delta}{R_{cp}} (\alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_1)} \right\}, \quad (5)$$

где

$$\psi = \ln \left| \frac{[R_{cp} + \gamma_1][R_{cp} - \gamma_1 + 0,5h]^{1/2} + \rho_0 [R_{cp} - \gamma_1 + 0,5h]^{1/2}}{[R_{cp} + \gamma_1][R_{cp} - \gamma_1 + 0,5h]^{1/2} - \rho_0 [R_{cp} + \gamma_1 + 0,5h]^{1/2}} \right|;$$

$$\chi = \left[R_{cp}^2 - \left(\sqrt{R_{cp}^2 - \rho_0^2} + 0,5h \right)^2 \right]^{1/2}; \quad \gamma_1 = \left(R_{cp} - \rho_0^2 \right)^{1/2}.$$

Поскольку в кольцевом шарнире, ограничивающем область вмятины, имеет место предельное состояние сечения при внецентренном сжатии с малым эксцентриситетом, для определения n и m воспользуемся методикой предлагаемой в [8]. Так как формы вмятин при исчерпании несущей способности железобетонных моделей оболочек имеют различную поверхность, то рассмотрен вариант замены сферической формы вмятин вписанным 36 гранником. Расчетная формула для определения несущей способности тонкостенной железобетонной оболочки положительной кривизны на квадратном плане с шарнирным опиранием по контуру имеет вид

$$q_p = \frac{\delta \nu E_b}{312} \left[4k_p \Phi_N + \frac{3(k - k_p)\delta^2}{\rho_0^2} \Phi_M \right], \quad (6)$$

где

$$k_p = k \sqrt{1 - (6\varepsilon_b / k^2 \rho_0^2)}; \quad \varepsilon_b = \varepsilon_{b,ser} \frac{\xi - \mu_s \eta_s}{1 + \mu_s};$$

$$\mu_s = \frac{k_s f_s}{\ell_s \delta_0}; \quad \eta_s = \frac{R_s}{R_b}; \quad \varepsilon_{b,ser} \approx \frac{R_b}{\nu_{cp} E_b};$$

$$\Phi_N = 750 \left(\frac{1}{\alpha_p} - \frac{1}{\alpha} \right) + 54 \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta} \right) + \frac{1}{\gamma_p} - \frac{1}{\gamma};$$

$$\Phi_M = \frac{43200}{\alpha_p \alpha^2} + \frac{216}{\beta_p \beta^2} + \frac{1}{\gamma_p \gamma^2}; \quad \alpha = \sqrt{36 + 25k^2 \rho_0^2};$$

$$\beta = \sqrt{4 + k^2 \rho_0^2}; \quad \gamma = \sqrt{36 + k^2 \rho_0^2}; \quad \alpha_p = \sqrt{36 + 25k_p^2 \rho_0^2};$$

$$\beta_p = \sqrt{4 + k_p^2 \rho_0^2}; \quad \gamma_p = \sqrt{36 + k_p^2 \rho_0^2}.$$

Переменные ξ и ρ_0 имеют следующие ограничения

$$\mu_s \eta_s \leq \xi \leq \xi_{cp}; \quad \xi_{cp} = \psi \xi_0 \approx 0,4 \xi_0; \quad \xi_{cp} = \mu_s \eta_s + \frac{\delta k (1 + \mu_s)}{6\varepsilon_{b,ser}}.$$

$$0,5a \geq \rho_0 \geq \begin{cases} \sqrt{\delta/k} & \text{при } \xi \leq \xi_{2p}; \\ \sqrt{6\varepsilon_b/k} & \text{при } \xi > \xi_{2p}. \end{cases}$$

Практическое решение задачи осуществляется следующим образом. Задаются концентрические окружности границы вмятины (симметричный случай) с радиусами $\rho_0^1, \dots, \rho_0^n$, причем $\rho_0^1 \geq \rho_{\min}$, $\rho_0^n \geq \rho_{\max}$. Для каждого ρ_0^i рассматривается серия кривых сечения оболочки с кривизнами k_{p1}, \dots, k_{pn} причем $k_{p1} \leq k_p$, $k_{pn} \geq k_{p \min}$. Предполагается, что внутри матрицы переменных $\rho_0^i \times k_{pi}$ содержится пара ρ_0^0, k_{p0} , которая является решением задачи.

На рис. 2 приведены результаты расчетов несущей способности пологих железобетонных квадратных оболочек двойкой кривизны шарнирно опертых по контуру с применением разных подходов. Прямые линии 1 – 4 получены по формулам [9], где разрушение оболочки происходит вследствие исчерпания ее несущей способности, а не местного разрушения. Рассматривалась модель оболочки с такими исходными данными: $a = 9$ м; $h = 6$ см; $E_b = 40000$ МПа; подъемистость оболочки изменялась в диапазоне $0 < k < 400$. Линия 1 построена для варианта: $\mu_n = 0,005$, $\mu_y = 0,008$. Здесь: μ_n – процент армирования поля оболочки; μ_y – процент армирования косой угловой арматуры. Линия 2 построена для варианта: $\mu_n = 0,008$, $\mu_y = 0,005$. Линия 3: $\mu_n = 0,005$, $\mu_y = 0,005$; линия 4: $\mu_n = 0,005$, $\mu_y = 0$. Из графиков видно какую важную роль играет угловая арматура. В моделях пологих железобетонных оболочек (на рис. 2 показаны кружочками) армирование выполнялось с отсутствием угловой арматуры. Кривые 5, 6 (рис. 2) построены по формулам (4) и (6) соответственно для разных форм вмятин. Предполагается, что начальная вмятина совпадает по форме с вмятиной потери несущей способности. Введено ограничение на максимальную величину начального несовершенства в центре вмятины. Начальный прогиб не превышает половины толщины оболочки. За начальную выбрана кривизна в которой реализуется вмятина в четверти оболочки. Наименьшая нагрузка в диапазоне кривизн $120 \div 220$ получена по формуле (6), при этом радиус вмятины в плане не превышал $0,5a$.

Выводы

1. Методика расчета несущей способности железобетонных, жестко заземленных оболочек распространена на определение несущей

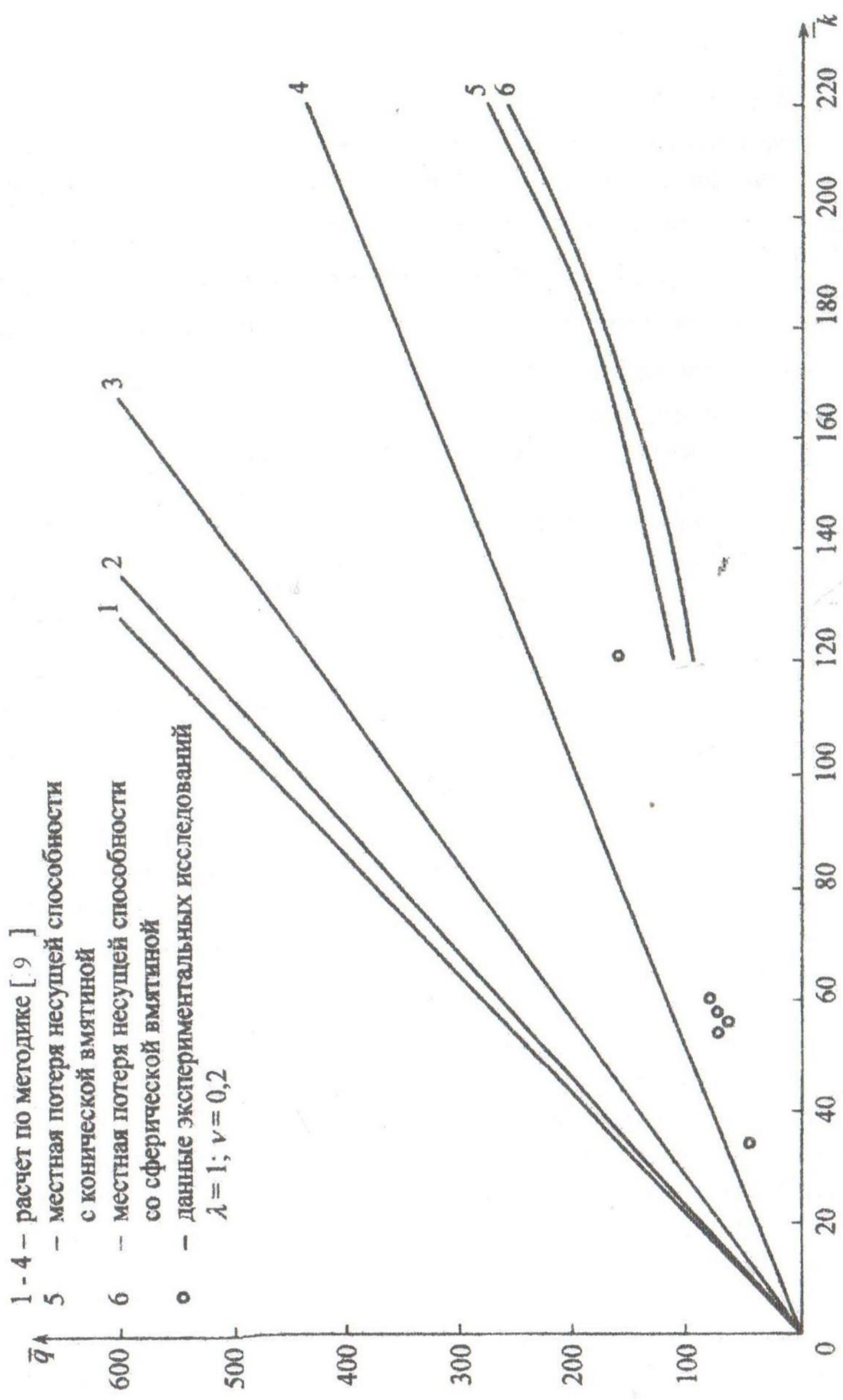


Рис. 2. Нагрузки потери несущей способности квадратных в плане пологих оболочек двойкой кривизны шарнирно опертых по контуру

способности оболочек с шарнирным опиранием, имеющих локальные ограниченные вмятины срединной поверхности.

2. Исследовано изменение несущей способности железобетонных оболочек с двумя типами ограниченных локальных вмятин в диапазоне кривизн 120...220. Наиболее неблагоприятное влияние оказывает вмятина сферической формы.
3. Определены нагрузки потери несущей способности квадратных в плане пологих оболочек двойкой кривизны, шарнирно опертых по контуру.

Литература

1. Хайдуков Г.К., Шугаев В.В. Исследование предельного состояния железобетонных пологих оболочек при больших прогибах // Бетон и железобетон, 1970. – № 3. – С. 13-17.
2. Хайдуков Г.К., Шугаев В.В., Миронов Ю.К. Исследование на моделях несущей способности пологих железобетонных оболочек при кратковременном и длительном действии нагрузок // Исследования железобетонных пространственных конструкций на моделях. – М., 1974. – Вып. 9. – С. 76-99.
3. Оатул А.А., Новоселов А.П. Экспериментальное исследование кратковременной и длительной устойчивости моделей пологих железобетонных оболочек // Строительные конструкции. – Киев: Будівельник, 1969. – Вып. II. – С. 79-86.
4. Чиненков Ю.В., Байниетов Т.Ч. Исследование на моделях оболочек положительной кривизны, опертых по контуру на колонны // Пространственные конструкции зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1984. – Вып. 4. – С. 120-132.
5. Чиненков Ю.В., Краковский М.Б. Учет податливости диафрагм при расчете пологих оболочек положительной гауссовой кривизны // Промышленное строительство и инженерные сооружения, 1968. – № 2. – С. 33-35.
6. Добудогло Н.Г., Лукаш П.А. Испытание пологой сферической оболочки // Экспериментальные и теоретические исследования тонкостенных пространственных конструкций. – М.: Стройиздат, 1952. – С. 5-20.
7. Стельмах С.И. Исследование модели предварительно напряженной железобетонной оболочки-покрытия в упругой стадии и в стадии предельного равновесия // Бетон и железобетон, 1966. – № 9. – С. 24-27.
8. Шугаев В.В. Несущая способность пологих железобетонных оболочек при локальном разрушении и больших деформациях // Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М., 1975. – 45 с.
9. Рекомендации по расчету несущей способности железобетонных оболочек положительной кривизны. – К.: НИИСП, 1973. – 28 с.