

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СПЕЦИФИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ РАСЧЕТЕ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК

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

Расчет железобетонных пологих оболочек двойкой кривизны следует выполнять с учетом конструктивных особенностей изготовления. Ввиду малой толщины оболочки на ее работе под нагрузкой сказывается расположение каждого из слоев арматуры в разных уровнях поперечного сечения, что с переменным (в общем случае) процентом армирования придает двухкомпонентному материалу анизотропные свойства. Существенное значение имеет распределение арматуры по толщине и полю пологой оболочки.

Для числового эксперимента рассмотрим конечно-разностную модель с элементами армированными четырьмя слоями, два из которых ( $i = 1, 2$ ) расположены у нижней поверхности и два ( $i = 1', 2'$ ) – у верхней (рис. 1). Расстояние от середины нижнего слоя  $i$  до верхней поверхности элемента оболочки обозначим  $h_i$ , а расстояние от середины верхнего слоя  $i$  до нижней поверхности – через  $h'_i$ . Два слоя в верхней и нижней зонах представляют собой ортогональные сетки, направление стержней которых совмещены с направлением осей координат  $x$  и  $y$ .

В дальнейших расчетах нижние (верхние) слои будем совмещать в один обобщенный слой (т.е. переносить на один уровень). Срединная поверхность нижнего (верхнего) обобщенного слоя (рис. 1) отстоит от верхней (нижней) поверхности элемента оболочки на расстоянии  $h_0$  ( $h'_0$ ), где

$$h_0 = \frac{h_{ox} f_{sx} + h_{oy} f_{sy}}{f_{sx} + f_{sy}}, \quad h'_0 = \frac{h'_{ox} f'_{sx} + h'_{oy} f'_{sy}}{f'_{sx} + f'_{sy}}. \quad (1)$$

Здесь  $f_{sx}, f_{sy}, f'_{sx}, f'_{sy}$  – площадь соответственно нижней и верхней арматуры.



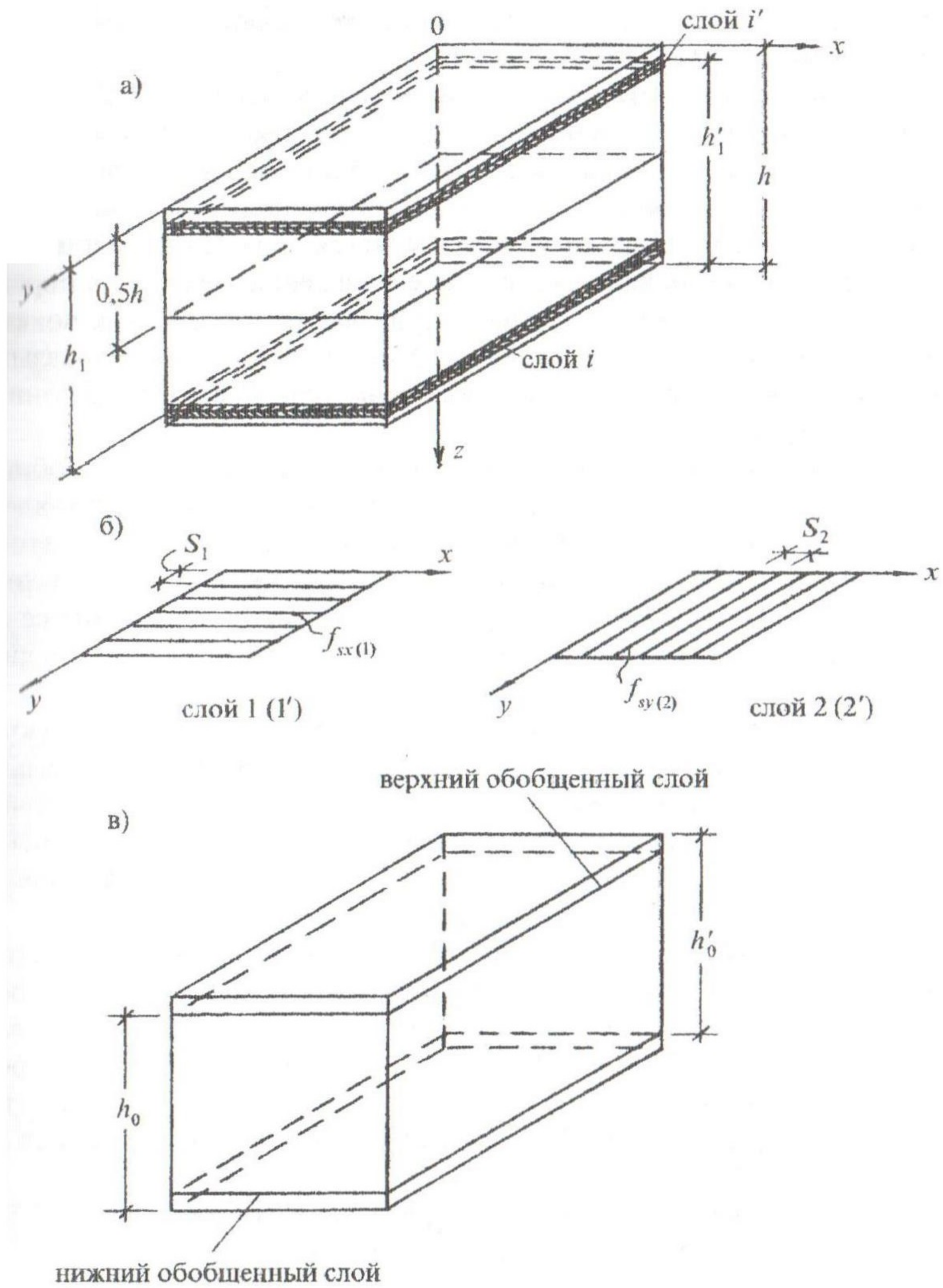


Рис. 1. Схема армирования элемента оболочки  
 а) элемент;  
 б) слои армирования;  
 в) расчетная схема армирования.



Полагая площади арматуры отдельных слоев равными нулю, можно получить частные схемы армирования.

Необходимо отметить, что при вычислении жесткостных коэффициентов физических соотношений теории деформирования железобетона с трещинами учитывается основное специфическое свойство железобетона, отличающее его от деформирования нелинейно-анизотропного тела. Этим свойством является нарушение сплошности в процессе деформирования вследствие появления трещин на определенном этапе нагружения. Процесс образования трещин, как показывают многочисленные расчеты и экспериментальные данные, оказывает решающее влияние на перераспределение усилий в железобетонных оболочках [1, 2].

С ростом нагрузки на оболочку, до появления трещин железобетон не теряет сплошности и перераспределение усилий в нем обусловлено лишь неоднородностью и быстронатекающей ползучестью бетона, обычно называемой пластичностью. Эти явления зависят от возникающих в оболочке усилий и непрерывно влияют на изменение ее деформационных характеристик. Максимальные изменения в последних оцениваются десятками процентов [3].

По достижении напряжениями значений, при которых образуются трещины, происходит разрыв сплошности материала, что вызывает скачкообразное падение жесткости в отдельном участке оболочки, причем порядок уменьшения составляет 3 – 10 раз. Такого изменения жесткостей при практически неизменных внешних воздействиях не вызывает никакой другой деформационный процесс.

Для учета трещинообразования при расчете пологих железобетонных оболочек условия возникновения различных схем трещин, представленные в работе [4], которые определяются соотношениями главных ядровых моментов с моментом трещинообразования  $M_{cr}$  и представляют обобщение балочной теории ядровых моментов Гвоздева А.А. и Дмитриева С.А. на более сложный случай напряженных состояний.

Компоненты ядровых моментов определяются по формулам:

а) относительно поверхности верхних ядровых точек

$$M_x^{rp} = M_x + N_x r_{rp}, \quad M_y^{rp} = M_y + N_y r_{rp}, \quad M_{xy}^{rp} = M_{xy} + N_{xy} r_{rp} \quad (2)$$

б) относительно поверхности нижних ядровых точек

$$M_x'^{rp} = -M_x + N_x r_{rp}, \quad M_y'^{rp} = -M_y + N_y r_{rp}, \quad M_{xy}'^{rp} = -M_{xy} + N_{xy} r_{rp} \quad (3)$$



где  $r^{rp}$  определяется по следующим формулам [4]

$$\left. \begin{aligned} \text{при } N_n < 0, r^{rp} &\approx \frac{1}{6} h \left[ 1 - 0,2 \left( N_n / (h \cdot R_{bt}) \right)^2 \right]; \\ \text{при } N_n > 1,2 M_{crc} / h, r^{rp} &= 0,29 h; \\ \text{при } 1,2 M_{crc} / h > N_n > 0, r^{rp} &= h/6; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{\max}^{rp} &= \frac{M_x^{rp} + M_y^{rp}}{2} \pm \sqrt{\frac{(M_y^{rp} - M_x^{rp})^2}{4} + (M_{xy}^{rp})^2}, \\ M_{\max}'^{rp} &= \frac{M_x'^{rp} + M_y'^{rp}}{2} \pm \sqrt{\frac{(M_y'^{rp} - M_x'^{rp})^2}{4} + (M_{xy}'^{rp})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь  $M_{\max}^{rp}$ ,  $M_{\max}'^{rp}$  – главные ядровые моменты относительно поверхности верхних и нижних ядровых точек.

Наклон площадок главных ядровых моментов  $M_{\max}^{rp}$  и  $M_{\max}'^{rp}$  обозначим соответственно  $\alpha$  и  $\alpha'$ . Нормальные силы действующие на площадке с  $\alpha$  обозначим через  $N_n$ , а на площадке  $\alpha + 90^\circ$  –  $N_e$ . Аналогичные силы, действующие на площадках  $\alpha'$  и  $\alpha' + 90^\circ$ , обозначим через  $N_n'$  и  $N_e'$ .

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{M_{\max}^{rp} - M_x^{rp}}{|M_{xy}^{rp}|}, \quad \operatorname{ctg} \alpha' = \frac{M_{\max}'^{rp} - M_x'^{rp}}{|M_{xy}'^{rp}|}. \quad (6)$$

При совместном действии моментов и мембранных сил момент трещинообразования записывается в виде

$$M_{crc} = k_p \cdot k_n \cdot R_{bt} \cdot h^2 / 3,5. \quad (7)$$

Здесь  $k_p$  – коэффициент, учитывающий влияние двухосного напряженного состояния на момент трещинообразования: при  $N_e > 0$   $k_p = 1$ ; при  $N_e < 0$

$$k_p = 1 - (N_e / R_{bt} \cdot h)^2 \quad (8)$$

$k_n$  – коэффициент, учитывающий влияние нормальных сил на изменения ядровых моментов в случае действия больших растягивающих и больших сжимающих нормальных сил на площадке трещинообразования:



$$\left. \begin{array}{l} \text{при } h R_{bt} \geq N_n > 0 \quad k_n \approx 1 - 0,4 N_n / (R_{bt} \cdot h); \\ \text{при } N_n < 0 \quad k_n \approx 1 - 0,4 N_n / (R_b \cdot h)^2. \end{array} \right\} \quad (9)$$

Аналогично определяется  $M'_{crc}$ . В этом случае в формулах для  $k_p$  и  $k_n$  вместо  $N_n$  и  $N_e$  подставляем  $N'_n$  и  $N'_e$ .

Условия отсутствия трещин формулируются так:

для нижней зоны элемента оболочки:

$$M_{\max}^{rp} \leq M_{crc}; \quad M_{\min}^{rp} \leq M_{crc}; \quad (10)$$

для верхней зоны элемента оболочки:

$$M'_{\max}{}^{rp} \leq M'_{crc}; \quad M'_{\min}{}^{rp} \leq M'_{crc}; \quad (11)$$

Если нарушается первое условие (10), то образуется трещина по схеме 1А (непересекающаяся трещина внизу) (рис. 2, а). Угол наклона площадки трещины к оси  $x$  можно определить из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = (M_{\max}^{rp} - M_y^{rp}) / |M_{xy}^{rp}|. \quad (12)$$

При нарушении первого неравенства (11) образуется трещина по схеме 1Б (непересекающаяся вверху) (рис. 2, б).

Одновременное нарушение первого условия (10) или первого условия (11) и дополнительного неравенства  $N_n \leq 0,75 R_{bt} h$  указывает на образование трещины по схеме 2 (сквозная непересекающаяся трещина) (рис. 2, в).

Одновременное нарушение первого неравенства (10) и первого неравенства (11) указывает на образование трещины по схеме 3 (трещины разных направлений одновременно на нижней и верхней поверхностях элемента) (рис. 2, г).

Нарушение двух неравенств (10) указывает на образование трещин по схеме 4А (на нижней поверхности проходят трещины двух и более направлений), а нарушение двух неравенств (11) – по схеме 4Б (на верхней поверхности проходят трещины двух и более направлений).

Одновременное нарушение условий (10) и неравенств  $N_n \leq 0,75 R_{bt} h$  и  $N_e \leq 0,75 R_{bt} h$  или (11) и неравенств  $N'_n \leq 0,75 R_{bt} h$  и  $N'_e \leq 0,75 R_{bt} h$  ведет к образованию трещин по схеме 5 (пересекающиеся сквозные трещины).

Нарушение условия (10) и лишь одного из неравенств  $N_n \leq 0,75 R_{bt} h$  или  $N_e \leq 0,75 R_{bt} h$  или условия (11) и лишь одного из неравенств  $N'_n \leq$



$0,75R_{bt} h$  или  $N'_e \leq 0,75R_{bt} h$  указывает на образование трещин по схеме б (на одной поверхности имеются непересекающиеся трещины, а на другой пересекающиеся).

Работе железобетонной оболочки с трещинами предшествуют стадии:

– упругая

$$\left( M_{\max}^{rp} < 0,5M_{crc} ; M_{\max}^{r'p} < 0,5M'_{crc} \right); \quad (13)$$

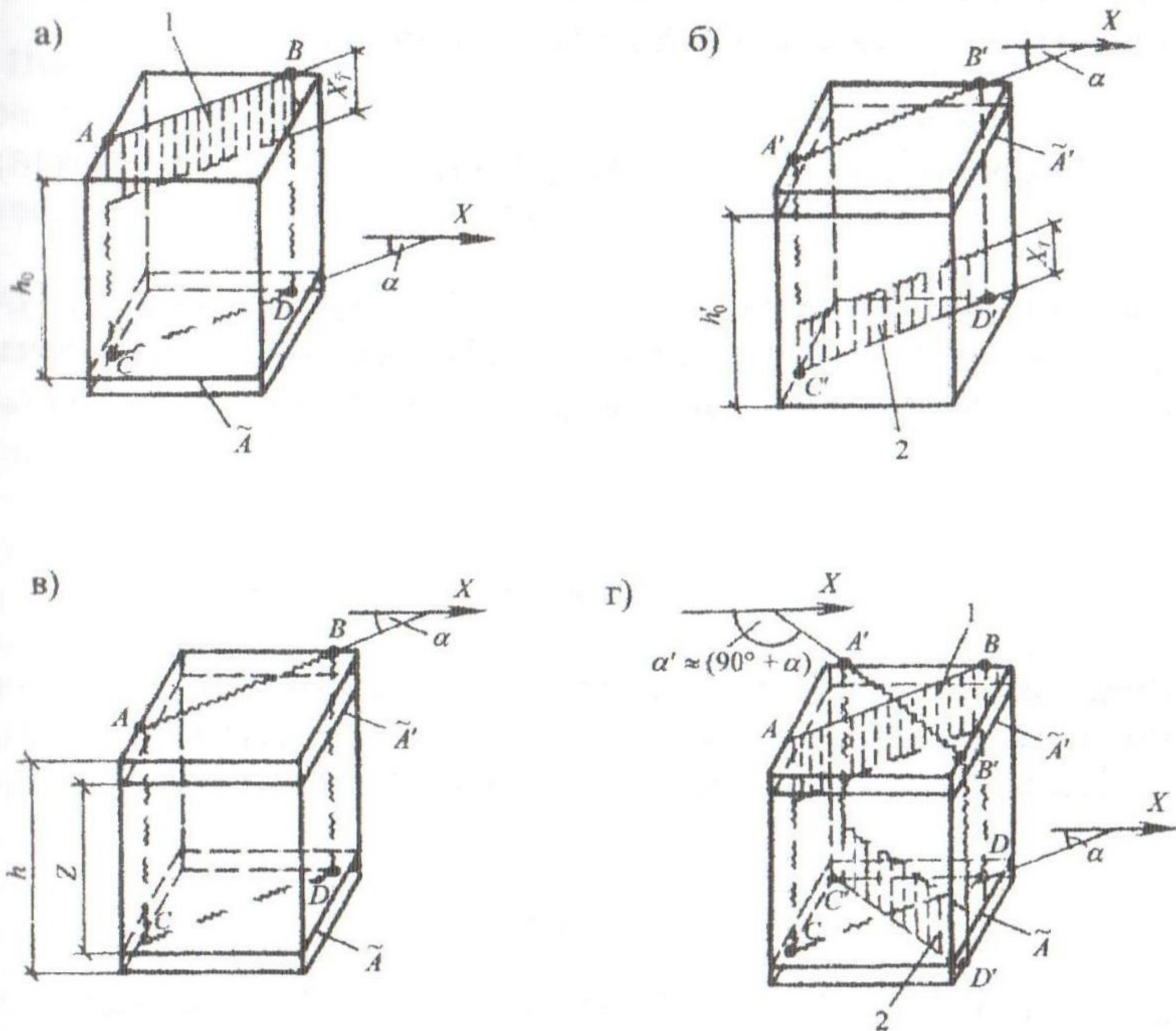


Рис. 3.4. Схемы непересекающихся трещин  
 а, б – фрагменты поверхностей плиты с 1-й схемой трещин;  
 в – то же, со 2-й схемой;  
 г – то же, с 3-й схемой трещин, где:  
 1 – сжатая зона над трещинами; 2 – сжатая зона под трещинами;  
 $\tilde{A}$ ,  $\tilde{A}'$  – обобщенные слои армирования.



– упруго-пластическая

$$\left(0,5M_{crc} \leq M_{\max}^{rp} < M_{crc} ; 0,5M'_{crc} \leq M'_{\max}{}^{rp} < M'_{crc}\right). \quad (14)$$

Для упруго-пластической стадии характерно постепенное падение жесткости за счет развития неупругих деформаций растянутой зоны бетона.

Изменение коэффициентов матрицы жесткостей для элемента, находящегося в упруго-пластической стадии выполним с применением коэффициента пластических деформаций  $\nu_b$  по формуле

$$\nu_b = 1 - 0,4 \left[ M_{\max}^{rp} - N_n \cdot \frac{h}{6} - 0,5M_{crc} \right] / M_{crc}. \quad (15)$$

Умножив упругие жесткости  $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}, D_{33}, D_{44}, D_{45}, D_{54}$ , и  $D_{66}$  на коэффициент пластических деформаций  $\nu_b$  (15), получаем матрицу жесткостей, отражающую упруго-пластическую работу элемента оболочки.

### Вывод

Предложены зависимости, определяющие характерные состояния поведения железобетонной полой оболочки при нагружении, и даны рекомендации по учету их в математическом моделировании.

### Литература

1. Дубинский А.М. Расчет несущей способности железобетонных плит и оболочек. – К.: Будівельник, 1976. – 160 с.
2. Тярно Ю.А. Расчет железобетонных оболочек в стадии с трещинами. – Таллин: ТПИ, 1983. – 101 с.
3. Ярин Л.И. К решению физически нелинейных задач для железобетонных пластин с учетом трещин // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1987. – С. 56-65.
4. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. – М.: Стройиздат, 1976. – 208 с.