

УДК 624.042.3:534.222.092

## РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ

Усов А.М.\*, к.т.н., Жук М.М.\*, Миканович А.С.

\*Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем ЧС

*Отсутствие расчетных методик, учитывающих воздействие взрывных нагрузок на строительные конструкции здания, в большинстве случаев приводит к разрушению конструкций при дефлаграционном взрыве. В статье рассмотрены причины разрушения строительных конструкций и изложен алгоритм расчета основных железобетонных строительных конструкций здания на воздействие квазистатической взрывной нагрузки.*

Статистика данных свидетельствует о том, что ущерб от взрывов в производственных зданиях во всем мире остается довольно большим и имеет тенденцию ежегодно увеличиваться. По данным Industrial Risk Insurers (IRI), из 34 аварий в перерабатывающей промышленности с ущербом свыше 250 000 долларов США основной ущерб (81 %) наносят аварии со взрывами. Анализ аварий, выполненный IRI, показывает, что взрывы составили 67 % всех инцидентов, а нанесенный ими ущерб — 85 % общего ущерба. Как показал анализ около 1000 наиболее крупных аварий, проведенный Американской страховой ассоциацией (AIA), ущерб при авариях в 63 % обусловлен взрывом или несколькими взрывами, либо совместным действием пожара и взрыва [1].

Основным параметром, влияющим на способность строительных конструкций воспринимать взрывные нагрузки, является допустимое избыточное давление взрыва. Величина допускаемого избыточного давления ( $\Delta p_{\text{доп}}$ ) должна назначаться с учетом прочности несущих конструкций здания, обеспечивающих его взрывоустойчивость при внутреннем аварийном взрыве, а также наличия и степени защищенности рабочего персонала. Конструкции не должны разрушаться, а люди не должны получить ущерб для здоровья при повышении избыточного давления в помещении категории А или Б до величины  $\Delta p_{\text{доп}}$ . Согласно [2,3] максимальное значение  $\Delta p_{\text{доп}}$  следует принимать не более 5 кПа. В то же время, как показывают расчеты, выполненные специалистами Московского государственного строительного университета (МГСУ), для большинства типовых сборных железобетонных конструкций, запроектированных без учета действия на них взрывных нагрузок,  $\Delta p_{\text{доп}}$  менее 5 кПа. При необходимости усиление сборных железобетонных конструкций (для того, чтобы они могли воспринимать действие взрывных нагрузок при  $\Delta p_{\text{доп}} = 5$  кПа) следует производить без изменения их опалубочных размеров за счет повышения содержания арматуры, а также применения бетона и арматуры более высоких классов. Для конструкций, выполняемых из монолитного железобетона, необходимая их прочность может обеспечиваться при  $\Delta p_{\text{доп}}$  более 5 кПа [4].

В настоящее время в Республике Беларусь расчет конструкций при действии взрывной нагрузки при внутреннем аварийном взрыве не производится, так как нет соответствующей методической базы, что в ряде случаев может сделать бесполезным комплекс проводимых мероприятий по обеспечению взрывобезопасности.

Расчет строительной конструкции на воздействие квазистатической нагрузки проводится по сечению, в котором изгибающие моменты относительно осей  $X$  и  $Y$  и нагрузка имеют максимальное значение. Согласно [5] расчет железобетонных конструкций по прочности сечений, нормальных к продольной оси, при действии изгибающих моментов и продольных сил может выполняться с использованием нескольких методов. В данной статье рассмотрен общий деформационный метод расчета, при котором диаграмма деформирования имеет вид параболы с ниспадающей ветвью [6].

Для сечения произвольной формы при любой системе сил, действующих на сечение  $(M_{Sd,x}, M_{Sd,y}, N_{Sd})$ , имеющего арматуру, распределенную по сечению, расчетная система уравнений деформационного метода в общем случае имеет вид [6]:

— условия равновесия:

$$\begin{cases} \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) dA_c + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} - N_{Sd} = 0; & (1) \\ \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) x dA_c + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} x_k - (M_{Sd,x} + N_{Sd,x} e_x) = 0; & (2) \\ \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) y dA_c + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} y_k - (M_{Sd,y} + N_{Sd,y} e_y) = 0. & (3) \end{cases}$$

— Уравнения совместности относительных деформаций в виде гипотезы плоского сечения, определяющие их распределение по сечению:

$$\varepsilon_{cn} = \varepsilon_z + \varphi_x x_n + \varphi_y y_n; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{sk} = \varepsilon_z + \varphi_x x_k + \varphi_y y_k. \quad (5)$$

— Физические уравнения, связывающие напряжения и относительные деформации для бетона и арматуры в виде диаграмм деформирования (состояния) для бетона и арматуры:

$$\sigma_c = f(\varepsilon_c); \quad (6)$$

$$\sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}); \quad (7)$$

$$\sigma_s = f(\varepsilon_s). \quad (8)$$

В соответствии с [5] при выполнении расчетов прочности в условиях равновесия допускается не учитывать сопротивление растянутого бетона за исключением случаев, относящихся к расчету конструкций по образованию трещин.

При использовании деформационной расчетной модели критерием исчерпания прочности железобетонной конструкции по сечению, нормальному к продольной оси, принято условие достижения сжатым бетоном и (или) растянутой арматурой установленных предельных значений относительных деформаций. Величины предельных относительных деформаций сжатого бетона  $\varepsilon_{cu}$  в зависимости от его класса по прочности при сжатии приведены в [5]. Предельные относительные деформации арматуры принимают равными:

$$\varepsilon_{s,u} = \varepsilon_{s,R}, \text{ но не более } 10 \%, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{s,R}$  — нормируемая относительная деформация для арматуры соответствующего класса, установленная нормативными документами.

При решении уравнений, устанавливающих условия равновесия, используют либо правила точного интегрирования, либо прибегают к численному интегрированию напряжений, действующих по элементарным площадкам, выделенным в пределах расчетного сечения. Наиболее распространенным считается метод численного интегрирования, в котором бетонное сечение мысленно разбивается на отдельные малые участки площадью  $A_{cn}$ , как правило, прямоугольной формы, дополненные по необходимости треугольными или трапециевидными участками. Принимается допущение о том, что напряжения  $\sigma_{cn}$  в пределах каж-

дого выделенного элементарного участка бетона постоянны и равны напряжениям на уровне его центра тяжести. Поэтому относительные деформации  $\epsilon_{cn}$  рассчитывают на уровне центра тяжести каждого элементарного участка. Считается, что допущение о постоянстве напряжений в пределах элементарного участка не вносит существенной погрешности в расчеты, если его размеры не превышают 1/10 соответствующего размера сечения.

Расчет строительной конструкции на воздействие квазистатической нагрузки начинается с определения степени точности вычислений.

После определения степени точности вычислений задаются параметры расчетной строительной конструкции, такие как геометрические размеры сечения, армирование. Геометрические размеры сечения строительной конструкции и ее армирование (места расположения арматурных стержней, вид и диаметр арматуры) определяются по проектной документации либо по каталогу типовых строительных конструкций, используемых при строительстве зданий и сооружений различного назначения. Затем определяются расчетные усилия, такие как изгибающие моменты от внешней нагрузки относительно осей  $X$  и  $Y$  —  $M_{Sd,x}$ ,  $M_{Sd,y}$  — и продольная сила  $N_{Sd,z}$  с учетом требований, изложенных в [7].

В связи с тем, что критерием исчерпания прочности железобетонной конструкции по сечению, нормальному к продольной оси, принято условие достижения сжатым бетоном и (или) растянутой арматурой установленных предельных значений относительных деформаций, для каждого из материалов конструкции определяются расчетные диаграммы деформирования, общий вид которых показан на рисунках 1 и 2.

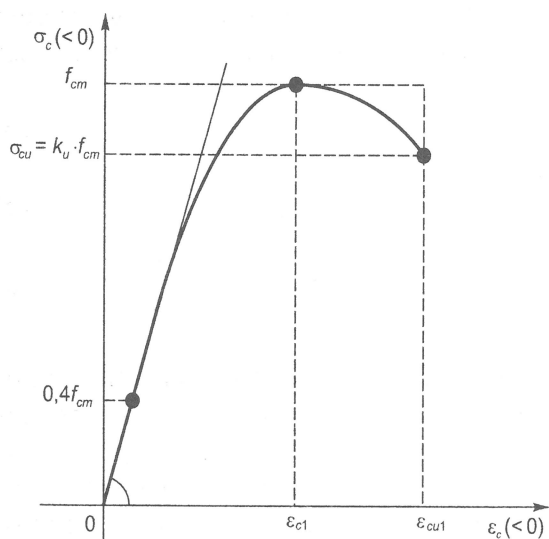


Рисунок 1 — Диаграмма деформирования бетона при осевом кратковременном сжатии

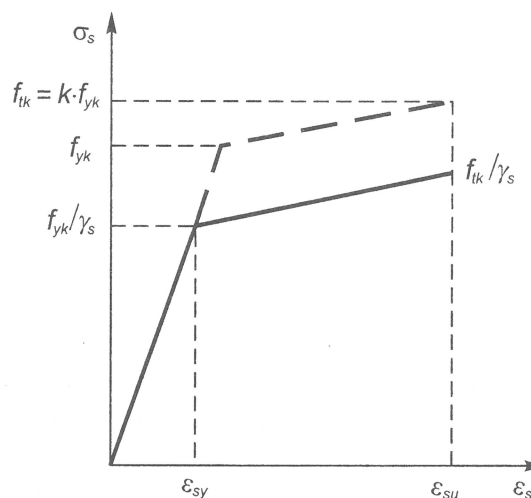


Рисунок 2 — Диаграмма деформирования ненапрягаемой стержневой арматуры класса S500

Для проведения дальнейшего расчета сечение строительной конструкции мысленно разбивается на элементарные участки площадью  $A_{cn}$ . Для каждого из элементарных участков бетона и каждого арматурного стержня (арматурной проволоки или арматурного каната) определяются координаты центра тяжести относительно осей  $X$  и  $Y$ .

Так как расчет в общем случае производится итерационным методом, то первоначально принимается, что пересечение осей  $X$  и  $Y$  происходит в геометрическом центре фигуры сечения, а расчетные значения модулей упругости бетона  $E'_{cn}$  и арматуры  $E'_{sk}$  равны модулям упругости, определенным по [5].

Изгибающие моменты относительно осей  $X$  и  $Y$  принимаются равными  $M_x = (M_{Sd,x} + N_{Sd}e_x)$ ,  $M_y = (M_{Sd,y} + N_{Sd}e_y)$ . В этом случае уравнения равновесия принимают вид [6]:

$$\sum_n \sigma_{cn}(\varepsilon_c) A_{cn} + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} = N_{Sd,z}; \quad (10)$$

$$\sum_n \sigma_{cn}(\varepsilon_c) A_{cn} x_n + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} x_k = M_x; \quad (11)$$

$$\sum_n \sigma_{cn}(\varepsilon_c) A_{cn} y_n + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} y_k = M_y. \quad (12)$$

Напряжения и относительные деформации на рассматриваемом уровне нагружения конструкции связаны секущим модулем деформаций, определяемым из диаграмм деформирования, следовательно:

$$\sigma_{cn}(\varepsilon_c) = E'_{cn} \varepsilon_{cn}; \quad (13)$$

$$\sigma_{sk}(\varepsilon_s) = E'_{sk} \varepsilon_{sk}, \quad (14)$$

где  $E'_{cn}, E'_{sk}$  — численные значения секущего модуля деформаций соответственно для бетона и арматуры, определяемые из диаграммы деформирования на соответствующем уровне нагружения.

С учетом уравнений (13) и (14) условия равновесия уравнений (10)—(12) принимают вид:

$$\sum_n \varepsilon_{cn} E'_{cn} A_{cn} + \sum_k \varepsilon_{sk} E'_{sk} A_{sk} = N_{Sd}; \quad (15)$$

$$\sum_n \varepsilon_{cn} E'_{cn} A_{cn} x_n + \sum_k \varepsilon_{sk} E'_{sk} A_{sk} x_k = M_x; \quad (16)$$

$$\sum_n \varepsilon_{cn} E'_{cn} A_{cn} y_n + \sum_k \varepsilon_{sk} E'_{sk} A_{sk} y_k = M_y. \quad (17)$$

После подстановки условий равновесия сечения выражений (15)—(17) в уравнения, описывающие распределение относительных деформаций в бетоне и арматуре, система уравнений принимает вид:

$$\sum_n (\varepsilon_z + \varphi_x x_n + \varphi_y y_n) E'_{cn} A_{cn} + \sum_k (\varepsilon_z + \varphi_x x_k + \varphi_y y_k) E'_{sk} A_{sk} = N_{Sd}; \quad (18)$$

$$\sum_n (\varepsilon_z + \varphi_x x_n + \varphi_y y_n) E'_{cn} A_{cn} x_n + \sum_k (\varepsilon_z + \varphi_x x_k + \varphi_y y_k) E'_{sk} A_{sk} x_k = M_x; \quad (19)$$

$$\sum_n (\varepsilon_z + \varphi_x x_n + \varphi_y y_n) E'_{cn} A_{cn} y_n + \sum_k (\varepsilon_z + \varphi_x x_k + \varphi_y y_k) E'_{sk} A_{sk} y_k = M_y. \quad (20)$$

С учетом преобразования уравнений (18)—(20) получается:

$$\varepsilon_z \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} + \sum_k E'_{sk} A_{sk} \right) + \varphi_x \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k \right) + \varphi_y \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} y_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} y_k \right) = N_{Sd}; \quad (21)$$

$$\varepsilon_z \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k \right) + \varphi_x \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n^2 + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k^2 \right) + \varphi_y \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n y_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k y_k \right) = M_x; \quad (22)$$

$$\varepsilon_z \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} y_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} y_k \right) + \varphi_x \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n y_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k y_k \right) + \varphi_y \left( \sum_n E'_{cn} A_{cn} y_n^2 + \sum_k E'_{sk} A_{sk} y_k^2 \right) = M_y. \quad (23)$$

В результате преобразований получается система расчетных уравнений относительно неизвестных  $\varepsilon_z$ ,  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  [6]:

$$R_{1,1} z + R_{1,2} \varphi_x + R_{1,3} \varphi_y = N_{sd}; \quad (24)$$

$$R_{2,1} z + R_{2,2} \varphi_x + R_{2,3} \varphi_y = M_x; \quad (25)$$

$$R_{3,1} z + R_{3,2} \varphi_x + R_{3,3} \varphi_y = M_y. \quad (26)$$

где  $R_{1,1} = \sum_n E'_{cn} A_{cn} + \sum_k E'_{sk} A_{sk}$  — (27)

осевая жесткость, зависящая от уровня нагружения и геометрических характеристик сечения;

$$R_{1,2} = R_{2,1} = \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k \quad (28)$$

изгибно-осевая жесткость, отражающая взаимное влияние продольного сжатия (растяжения) и изгиба по направлению оси  $x$ ;

$$R_{2,2} = \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n^2 + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k^2 \quad (29)$$

изгибная жесткость по направлению оси  $x$ ;

$$R_{1,3} = R_{3,1} = \sum_n E'_{cn} A_{cn} y_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} y_k \quad (30)$$

изгибно-осевая жесткость по направлению оси  $y$ ;

$$R_{2,3} = R_{3,2} = \sum_n E'_{cn} A_{cn} x_n y_n + \sum_k E'_{sk} A_{sk} x_k y_k \quad (31)$$

жесткость, отражающая взаимное влияние изгиба в направлении осей  $x$  и  $y$ ;

$$R_{3,3} = \sum_n E'_{cn} A_{cn} y_n^2 + \sum_k E'_{sk} A_{sk} y_k^2 \quad (32)$$

изгибная жесткость в направлении оси  $y$ .

Систему уравнений (24)—(26) удобно решать в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_{sd,z} \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}. \quad (33)$$

Параметры деформированного состояния сечения  $\varepsilon_z, \varphi_x, \varphi_y$  при заданных геометрических характеристиках и компонентах вектора внешних усилий  $\{N_{Sd,z}, M_x, M_y\}^T$  на промежуточной итерации «i» определяются из решения системы уравнений (33):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} \end{bmatrix}_{(i-1)}^{-1} \times \begin{Bmatrix} N_{Sd,z} \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}, \quad (34)$$

где  $[R]^{-1}$  — матрица, обратная матрице  $[R]$ , определяемая по:

$$[R]^{-1} = \frac{1}{\det R} \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

где  $\det R$  — определитель матрицы  $[R]$ ;

$A_{i,j}$  — алгебраические дополнения элементов  $R_{i,j}$  матрицы жесткостей  $[R]$ .

Определитель матрицы  $[R]$  определяется по формуле

$$\det R = R_{1,1} \cdot R_{2,2} \cdot R_{3,3} + 2 \cdot R_{1,2} \cdot R_{2,3} \cdot R_{1,3} - R_{1,3}^2 \cdot R_{2,2} - R_{2,3}^2 \cdot R_{1,1} - R_{1,2}^2 \cdot R_{3,3}. \quad (36)$$

Алгебраические дополнения элементов  $R_{i,j}$  матрицы жесткостей  $[R]$  определяются как миноры матрицы  $[R]$  по формулам [8,9]

$$A_{1,1} = \begin{vmatrix} R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{3,2} & R_{3,3} \end{vmatrix} = R_{2,2} \cdot R_{3,3} - R_{2,3}^2; \quad (37)$$

$$A_{1,2} = \begin{vmatrix} R_{2,1} & R_{2,3} \\ R_{3,1} & R_{3,3} \end{vmatrix} = R_{2,1} \cdot R_{3,3} - R_{2,3} \cdot R_{3,1}; \quad (38)$$

$$A_{1,3} = \begin{vmatrix} R_{2,1} & R_{2,2} \\ R_{3,1} & R_{3,2} \end{vmatrix} = R_{2,1} \cdot R_{3,2} - R_{2,2} \cdot R_{3,1}; \quad (39)$$

$$A_{2,1} = \begin{vmatrix} R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{3,2} & R_{3,3} \end{vmatrix} = R_{1,2} \cdot R_{3,3} - R_{1,3} \cdot R_{3,2}; \quad (40)$$

$$A_{2,2} = \begin{vmatrix} R_{1,1} & R_{1,3} \\ R_{3,1} & R_{3,3} \end{vmatrix} = R_{1,1} \cdot R_{3,3} - R_{1,3}^2; \quad (41)$$

$$A_{2,3} = \begin{vmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} \\ R_{3,1} & R_{3,2} \end{vmatrix} = R_{1,1} \cdot R_{3,2} - R_{1,2} \cdot R_{3,1}; \quad (42)$$

$$A_{3,1} = \begin{vmatrix} R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{2,2} & R_{2,3} \end{vmatrix} = R_{1,2} \cdot R_{2,3} - R_{1,3} \cdot R_{2,2}; \quad (43)$$

$$A_{3,2} = \begin{vmatrix} R_{1,1} & R_{1,3} \\ R_{2,1} & R_{2,3} \end{vmatrix} = R_{1,1} \cdot R_{2,3} - R_{1,3} \cdot R_{2,1}; \quad (44)$$

$$A_{3,3} = \begin{vmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} \\ R_{2,1} & R_{2,2} \end{vmatrix} = R_{1,1} \cdot R_{2,2} - R_{1,2}^2. \quad (45)$$

С учетом знака алгебраического дополнения и уравнений (36)—(45) матрица  $[R]^{-1}$  преобразуется следующим образом:

$$[R]^{-1} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\det R} A_{1,1} & \frac{1}{\det R} A_{1,2} & \frac{1}{\det R} A_{1,3} \\ \frac{1}{\det R} A_{2,1} & \frac{1}{\det R} A_{2,2} & \frac{1}{\det R} A_{2,3} \\ \frac{1}{\det R} A_{3,1} & \frac{1}{\det R} A_{3,2} & \frac{1}{\det R} A_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1,1} & -B_{1,2} & B_{1,3} \\ -B_{2,1} & B_{2,2} & -B_{2,3} \\ B_{3,1} & -B_{3,2} & B_{3,3} \end{bmatrix}. \quad (46)$$

Вектор деформаций  $\{\varepsilon_z, \varphi_x, \varphi_y\}^T$  определяется по формуле (47)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix}^T = \begin{bmatrix} B_{1,1} & -B_{1,2} & B_{1,3} \\ -B_{2,1} & B_{2,2} & -B_{2,3} \\ B_{3,1} & -B_{3,2} & B_{3,3} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} N_{sd,z} \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{1,1} \\ C_{2,1} \\ C_{3,1} \end{Bmatrix}, \quad (47)$$

$$\text{где } \varepsilon_z = C_{1,1} = B_{1,1} \cdot N_{sd,z} - B_{1,2} \cdot M_x + B_{1,3} \cdot M_y; \quad (48)$$

$$\varphi_x = C_{2,1} = -B_{2,1} \cdot N_{sd,z} + B_{2,2} \cdot M_x - B_{2,3} \cdot M_y; \quad (49)$$

$$\varphi_y = C_{3,1} = B_{3,1} \cdot N_{sd,z} - B_{3,2} \cdot M_x + B_{3,3} \cdot M_y. \quad (50)$$

После определения значений вектора деформации для каждого из элементарных участков бетона и арматурного стержня определяются относительные деформации  $\varepsilon_{cn}$  и  $\varepsilon_{sk}$  по формулам

$$\varepsilon_{cn} = \varepsilon_z + \varphi_x \cdot x_n + \varphi_y \cdot y_n; \quad (51)$$

$$\varepsilon_{sk} = \varepsilon_z + \varphi_x \cdot x_k + \varphi_y \cdot y_k. \quad (52)$$

Значения  $\varepsilon_z, \varphi_x, \varphi_y$  определяются по формулам (48)—(50). Затем, используя диаграммы деформирования для бетона и арматуры, по определенным относительным деформациям  $\varepsilon_{cn}$  и  $\varepsilon_{sk}$  рассчитываются напряжения, действующие по элементарным участкам бетона  $\sigma_{cn}$  и в арматурных стержнях  $\sigma_{sk}$  в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие, марки бетонной смеси по удобоукладываемости, вида и класса арматуры.

При известных значениях напряжений, действующих на элементарных площадках бетона и в арматурных стержнях, используя уравнения (10)—(12), рассчитываются внутренние усилия, действующие в сечении, на основании которых определяется численное значение

расчетного вектора внутренних усилий  $\{N_{Sd}, M_x, M_y\}_{calc}$ . Затем по формуле (53) определяется вектор разностей  $\{R\} = \{R_1, R_2, R_3\}^T$ :

$$\begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_{Sd,z} \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}_{calc} - \begin{Bmatrix} N_{Sd,z} \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}, \quad (53)$$

где  $\{N_{Sd,z}, M_x, M_y\}_{calc}$  — вектор внутренних усилий, рассчитанный после первой итерации;  
 $\{N_{Sd,z}, M_x, M_y\}$  — вектор внутренних усилий, рассчитанный по уравнениям (10)—(12).

Вектор разностей  $\{R\}$ , определенный по формуле (53), должен быть близок к нулю при заданной степени точности вычислений ( $\{R\} \leq \{R\}_{lim}$ ). Если данное условие не выполняется, то необходимо проводить дальнейший расчет до его выполнения. В этом случае необходимо провести корректировку значений секущих модулей деформаций  $E'_{cn}$  и  $E'_{sk}$  для каждого элементарного участка бетона и арматурного стержня. Значение скорректированного модуля деформации определяется по формулам [6]

$$E'_{cn} = \frac{\sigma_{cn}}{\varepsilon_{cn}}; \quad (54)$$

$$E'_{sk} = \frac{\sigma_{sk}}{\varepsilon_{sk}}, \quad (55)$$

где  $\sigma_{cn}, \sigma_{sk}$  — соответственно напряжения в  $n$ -м элементарном участке бетона и  $k$ -м арматурном стержне, рассчитанные из диаграмм деформирования для материалов при полученных  $(i-1)$  итерации значениях относительных деформаций  $\varepsilon_{cn}$  и  $\varepsilon_{sk}$ .

Для проведения дальнейшего расчета необходимо определить по уравнению (56) положение нейтральной оси, определяющей границу сжатой зоны сечения и исключить из дальнейшего расчета все элементарные участки бетона, попадающие в растянутую зону сечения:

$$\varepsilon_z + \varphi_x \cdot x + \varphi_y \cdot y = 0, \quad (56)$$

где  $x$  и  $y$  — координаты положения нейтральной оси в сечении строительной конструкции.

При установленном положении нейтральной оси и скорректированных значениях секущих модулей деформаций  $E'_{cn}$  и  $E'_{sk}$  по формулам (27)—(32) повторно рассчитываются численные значения элементов матрицы жесткостей  $[R]$  и с использованием итерации Ньютона-Рафсона (57) вычисляется вектор приращения деформаций  $\{\Delta\varepsilon_z, \Delta\varphi_x, \Delta\varphi_y\}^T$  [6]:



$$[R]_{cor} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \varphi_x \\ \Delta \varphi_y \end{Bmatrix}_i^T = - \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{Bmatrix}, \quad (57)$$

где  $[R]_{cor}$  — матрица жесткостей для сечения, скорректированная после первой итерации;  
 $\{\Delta \varepsilon_z, \Delta \varphi_x, \Delta \varphi_y\}_i^T$  — вектор приращения деформаций.

Тогда:

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \varphi_x \\ \Delta \varphi_y \end{Bmatrix}_i = - \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} \end{bmatrix}_{cor}^{-1} \times \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{Bmatrix}. \quad (58)$$

Матрица жесткостей для сечения, скорректированная после первой итерации, рассчитывается по формулам (35)—(46).

Из решения системы уравнения (58) получается вектор приращения деформаций  $\{\Delta \varepsilon_z, \Delta \varphi_x, \Delta \varphi_y\}_i^T$ , и далее определяются параметры деформированного состояния сечения после корректировки жесткостных характеристик:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix}_{(i-1)} + \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_z \\ \Delta \varphi_x \\ \Delta \varphi_y \end{Bmatrix}. \quad (59)$$

При вновь установленных параметрах деформированного состояния сечения  $\{\Delta \varepsilon_z, \Delta \varphi_x, \Delta \varphi_y\}_i$  повторно по формулам (51) и (52) рассчитываются относительные деформации для  $n$  элементарных участков бетона и  $k$  арматурных стержней. Используя аналитические описания диаграммы деформирования, определяют напряжения, действующие в сечении, вычисляют по формуле (53) вектор разностей  $\{R\}$  и проверяют выполнение условия  $\{R\} \leq \{R\}_{lim}$ . Количество итераций, необходимых для определения напряжений на элементарных площадках бетона и в арматурных стержнях, зависит от заданной степени точности и начальных условий задачи. После выполнения условия  $\{R\} \leq \{R\}_{lim}$  осуществляется проверка условий разрушения строительной конструкции.

**Вывод.** На основании анализа технических нормативных документов описан метод расчета железобетонных строительных конструкций здания на воздействие квазистатической взрывной нагрузки. В качестве расчетного предложен к использованию итерационный метод с расчетом железобетонных элементов по нормальному сечению на воздействие изгибающих моментов и поперечных сил. Нагрузки и воздействия приняты согласно расчетным схемам зданий и сооружений при особых сочетаниях нагрузок при взрывном горении горючих смесей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мольков, В.В. Вентиляция газовой дефлаграции: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / В.В. Мольков; ВНИИПО МВД РФ. — М., 1996. — 48 с.
2. Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ П 11.05.03-2006. —

- Введ. 01.02.2007. — Минск: НПРУП «Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации», 2007. — 65 с.
3. Конструкции легкобрасываемые. Правила расчета: ТКП 45-2.02-38-2006. — Введ. 01.01.2007. — Минск: М-во архитектуры и строительства, 2006. — 27 с.
  4. Орлов, Г.Г. Легкобрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий / Г.Г. Орлов. — М.: Стройиздат, 1987. — 200 с.
  5. Национальный комплекс нормативно-технических документов в строительстве. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. — Введ. 01.07.2003. — Минск: М-во архитектуры и строительства, 2003. — 139 с.
  6. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования: учеб. пособие для студентов строит. специальностей / Н.П. Блещик [и др.]; под ред. Т.М. Пецольда, В.В. Тура. — Брест: БГТУ, 2003. — 380 с.
  7. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. — Введ. 01.01.1987. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 36 с.

*Поступила в редакцию 22 мая 2007 г.*