

# НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ

**В.В. Теряник**

Проанализированы и обобщены результаты экспериментальных исследований по определению несущей способности внецентренно сжатых колонн средней и большой гибкости. Усовершенствована методика проверки несущей способности внецентренно сжатых колонн из условия прочности и устойчивости с учетом реальных свойств материала.

Известно, что для нормальной эксплуатации конструкций должно соблюдаться общее требование строительных норм [4]

$$\gamma F \leq \Phi \cdot K, \quad (1)$$

где  $F$  - фактическая нагрузка на конструкцию в момент обследования, когда выявлены дефекты и повреждения;  $\Phi$  - несущая способность конструкции без учета повреждений и дефектов, определяемая расчетом из условия прочности и устойчивости по фактическим значениям площадей сечений  $A_b$ ,  $A_s$  и прочности бетона и стали  $R_b$ ,  $R_s$ ;  $K$  - коэффициент снижения несущей способности конструкции при наличии дефектов и повреждений, значение которого может быть установлено на основе результатов обследований;  $\gamma$  - коэффициент надежности по материалу.

При практических расчетах условие (1) удобно представить в виде

$$F \leq (1/\gamma)\Phi K. \quad (2)$$

Чтобы правильно решить вопрос, какие элементы конструкции надо усиливать и по какой причине, условие (2) необходимо проверять для каждого элемента конструкции отдельно. Для внецентренно сжатых элементов:

а) из условия прочности

$$M_{\text{факт}} \leq (\gamma_b, \gamma_s) M_{\text{пр}}$$

или

$$N_{\text{факт}} \leq (\gamma_b, \gamma_s) N_{\text{пр}}; \quad (3)$$

б) из условия устойчивости

$$N_{\text{факт}} \leq (\gamma_b, \gamma_s) N_{\text{кр}}, \quad (4)$$

где  $\gamma_b$ ,  $\gamma_s$  - коэффициенты надежности по бетону и арматуре.

Как показано в работе [1], для внецентренно сжатых элементов средней и большой гибкости несущая способность при потере устойчивости всегда будет меньше, чем из условия прочности  $N_{\text{пр}}$ . Однако методика определения  $N_{\text{кр}}$  из условия устойчивости для внецентренно сжатых эле-

ментов (колонн) при малых и средних эксцентриситетах  $e_0$  с учетом гибкости  $\lambda$  разработана пока недостаточно. По имеющейся методике расчета бетонных и железобетонных колонн в СНиПе [4] проверка устойчивости выполняется в косвенном виде и приближенно. При этом проектировщики не имеют возможности строгой оценки несущей способности таких колонн из условия устойчивости. А для решения вопроса о необходимости усиления сжатых колонн следует более точно проверять несущую способность их из условия возможной потери устойчивости, особенно это относится к колоннам средней и большой гибкости [2].

Для проверки несущей способности гибких сжатых элементов при  $\lambda > 14$  рекомендуется использовать условие [4]

$$N_{\text{рас}} \cdot e_{\text{рас}} \leq [M_{\text{пр}} = R_b A_b \cdot Z_b + R_{sc} A'_s \cdot Z_s], \quad (5)$$

где для прямоугольного сечения с симметричной арматурой  $A_s$  и  $A'$

$$e_{\text{рас}} = e_0 \cdot \eta + \left( \frac{h}{2} - a \right); \quad e_0 = \frac{M}{N} + e_a. \quad (6)$$

Здесь  $\eta$  - коэффициент, учитывающий влияние поперечного прогиба колонны на увеличение расчетного момента от  $N$ , определяемый по приближенной формуле

$$\eta = 1 / \left( 1 - N_{\text{рас}} / N_{\text{кр}} \right), \quad (7)$$

$N_{\text{кр}}$  - условная критическая сила для сжатой колонны, определяемая по обобщенной формуле, учитывающей неупругие свойства сжатого бетона и характер действия нагрузки, учитываемого коэффициентом  $\varphi$ :

$$N_{\text{кр}} = \frac{6,4 E_b}{l_0^2} \left[ \frac{J_b}{\varphi_l} \left( \frac{0,11}{0,1 + \delta_l / \varphi_p} + 0,1 \right) + \alpha I_s \right], \quad (8)$$

где

$$\alpha = E_s / E_b; \quad \delta_l = e_0 / h \geq (0,5 - 0,01 l_0 / h - 0,01 R_b). \quad (9)$$

Недостатком методики [4] является приближенная формула (7), которая при больших значе-

ниях  $N_{рас}$  дает неоправданно большое значение  $\eta$ .

Теоретически, при  $N_{рас} \rightarrow N_{кр} \rightarrow \eta = \infty$ .

Чтобы не было большого перерасхода арматуры, в правой части условия (4) СНиП ограничивают максимальное значение этого коэффициента величиной  $\eta_{max} = 2,5$ , чему соответствует отношение  $N_{рас}/N_{кр} = 0,6$ .

В последние годы при строительстве жилых, общественных и промышленных зданий начали широко применяться бетоны повышенной и высокой прочности с прочностью до 800 МПа. Внедрение высокопрочных бетонов в изготовлении несущих каркасов повлекло за собой применение конструкций сжатых колонн меньшего сечения по сравнению с сечениями из обычного бетона. При этом гибкости их возрастают, поэтому возникает опасность\* потери устойчивости колонн в плоскости эксцентриситета или из плоскости. Таким образом, актуальность разработок по совершенствованию методики проверки устойчивости таких колонн возрастает. При этом важными факторами в решении задачи устойчивости является более точный учет неупругих свойств материала (бетона), расчетных эксцентриситетов  $e_{рас}$ , а также расчетных длин колонн  $l_0$ , входящих в состав каркаса.

За последние пять лет вопрос совершенствования нормативных рекомендаций поднимался многократно проектировщиками и исследователями. Среди выполненных исследований особо надо отметить натурные эксперименты, выполненные Д.О. Астафьевым [1] и В.С. Бабицем [2].

Исследования Д.О. Астафьева производились на рамном каркасе с гибкостью колонн  $\lambda = 80$ . Бабиц В.С. для экспериментов использовал одиночные колонны гибкостью  $\lambda = 95$ , варьируя эксцентриситеты приложения продольной силы. Общим выводом экспериментальных исследований является доказательство об исчерпании несущей способности колонн вследствие потери устойчивости первоначальной изогнутой оси колонн при достижении критического значения прогиба. При этом найденные значения  $N_{кр}$  близко совпадали с уточненными теоретическими значениями  $N_{кр}$ , полученными авторами [3, 5, 6]. В работе В.С. Бабица [2] уточняется формула (7) для определения  $\eta$ , но по структуре она остается такой же. В работе Д.О. Астафьева [1] уточняется формула для определения  $N_{кр}$  с использованием коэффициента продольного изгиба  $\varphi$ , зависящего от гибкости  $\lambda$ , относительного эксцентриситета  $m = e_0 A/W$  и класса бетона. Для прямоугольного сечения  $W = bh^2/6$ , тогда

$$m = e_0 (bh) \cdot 6/bh^2 = 6e_0/h. \quad (10)$$

Экспериментальные значения  $N_{кр}$ , полученные В.С. Бабицем, близко совпадают с теоретическими  $N_{кр}$ , полученными автором [3, 5, 6] из общего условия потери устойчивости 2 рода внецентренно сжатых колонн в виде

$$dN/df = 0, \quad (И)$$

при кубической и квадратной зависимостях « $\sigma - \varepsilon$ » для бетона:

$$\sigma = \alpha_1 \varepsilon - \alpha_3 \varepsilon^3 \quad \text{и} \quad \sigma = \alpha_1 \varepsilon_1 - \alpha_2 \varepsilon^2. \quad (12)$$

Здесь  $\alpha_1 = E_b$ ,  $\alpha_3 = E_b/3\varepsilon_{тн}^2$ ,  $\alpha_2 = E_b/2\varepsilon_{тн}$ ,  $\varepsilon_{тн}$  – относительная деформация бетона при напряжении, равном пределу прочности  $\sigma_{тн}(R_b)$ .

Использованы допущения: учитывается работа только восходящих ветвей диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ »; деформация стойки в предельном состоянии по устойчивости происходит по полуволне синусоиды до появления трещин; при выводе основных уравнений используется закон плоских сечений; работа сжатых элементов происходит при малых относительных деформациях  $\varepsilon_1$  соответствующих  $\sigma = \sigma_{вр}$ ; при выявлении физико-механических характеристик используются диаграммы одноосного напряженного состояния; рассматривается симметричное сечение колонны (в виде прямоугольника или двутавра с одинаковыми полками).

С учетом принятых допущений для внецентренно сжатой стойки составлены уравнения равновесия

$$N = \int_A \sigma_z dA; \quad M = \frac{E}{\rho} \int_A z dA - \frac{\alpha_3}{\rho^3} \int_A z^3 dA.$$

В результате решения приведенных уравнений получена простая формула для определения  $N_{кр}$ , в которой впервые поперечные прогибы  $f$  внецентренно сжатой стойки учтены более точно по сравнению с [6]:

$$N_{кр} = N_{кр}^y \cdot k_n, \quad (13)$$

где  $N_{кр}^y = \pi^2 E_b J_b / l^2$  – в упругой стадии работы бетона;  $k_n$  – коэффициент, учитывающий деформацию  $f$  внецентренно сжатой стойки с учетом нелинейности материала, значение которого всегда меньше единицы (коэффициент нелинейности);  $f$  – поперечный прогиб, определяемый из решения кубического или квадратного уравнения, полученного из условия (12) с учетом выражения  $N_{кр}$  по (13).

Доказано, что с увеличением эксцентриситета продольной силы значение коэффициента нелинейности уменьшается. Получены графики зависимости коэффициента нелинейности от поперечного прогиба элемента при различных значениях относительного эксцентриситета и гибкости. Разработана методика решения уравнений по определению поперечных прогибов. Формула (13) может

быть использована для построения кривых равновесных состояний  $N_{кр} - f$ . Произведена оценка несущей способности сжатых элементов различной гибкости по условиям прочности и устойчивости, в том числе для железобетонных колонн из серии, испытанных Бабиным С.В. и Астафьевым Д.О. при гибкостях  $\lambda = 98$  и 78. Результаты сравнения экспериментальных данных с результатами аналитического расчета, полученными по предлагаемой методике, показали незначительные расхождения в пределах до 5%. Инженерная практика допускает применение расчетов с такой погрешностью.

Таким образом, получена формула для критической продольной силы в сжатом элементе, в которой более точно учитывается геометрическая и физическая нелинейность по сравнению с нормами [4].

#### Литература

1. Астафьев Д.О. Расчет реконструируемых железобетонных конструкций. - СПб.: СПб гос. архит.-строит ун-т, 1995. - 158 с.
2. Бабин В.С. Исследование и расчет сжа-

тых элементов с переменными эксцентриситетами по длине // Бетон и железобетон. - 1992. - №10, - С. 12.

3. Раевский А.Н., Теряник В.В. Определение несущей способности внецентренно сжатых элементов средней и большой гибкости по прочности и устойчивости // Известия ТулГУ. Серия «Строительные материалы, конструкции и сооружения». - Вып. б. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. - С. 152-156.

4. СНиП 2.03.01-84\* Бетонные и железобетонные конструкции. — М.: Госстрой России, 1999. - 75 с.

5. Теряник В.В. О проблеме устойчивости внецентренно сжатых бетонных и железобетонных элементов средней и большой гибкости // Вестн. СамГТУ. Серия «Физико-математические науки». - Вып. 19. - Самара: Изд-во СамГТУ, 2003.-С. 167-169.

6. Теряник В.В. Совершенствование методики определения несущей способности железобетонных колонн из условия прочности и устойчивости // Наука - производству. - 2004. - №8(76). - С. 27-29.