

Д. Г. ПЕТРЕНКО (Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА ОТ ГИБКОСТИ СТАЛЕБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА

В статье описаны существующие методики по расчету на устойчивость сталебетонных элементов, с учетом зависимости коэффициента продольного изгиба от гибкости элемента.

Ключевые слова: сталебетонный элемент, продольный изгиб, гибкость элемента, коэффициент продольного изгиба

Современный уровень строительного производства предъявляет к несущим конструкциям требования высокой надежности в сочетании с малой материалоемкостью и низкими трудовыми затратами при изготовлении и монтаже. Этим требованиям в полной мере соответствуют конструкции с внешним армированием, в том числе сталебетонные и трубобетонные конструкции.

Существует большое количество методик для расчета трубобетонных элементов. В результате расчетов отмечено, что трубобетонные элементы имеют повышенную прочность и устойчивость, по сравнению с железобетонными. Однако сопоставление результатов полученных по различным методикам свидетельствует об их не совершенности. Напряженно-деформированное состояние сталебетона изучено более детально, нежели вопросы устойчивости таких конструкций, а вопросы устойчивости при длительном нагружении, практически не изучены.

Благодаря упрочнению бетона в обойме, т.е. увеличения прочности сталебетонного элемента, появляется возможность уменьшения его поперечного сечения, что в свою очередь влияет на увеличение гибкости элемента. Поэтому изучение вопроса местной и общей устойчивости заслуживает особого внимания. При расчете сталебетонного элемента на устойчивость необходимо учитывать зависимость коэффициента продольного изгиба от гибкости этого элемента.

Кроме того, в постсоветских нормативных документах нет четких положений о расчетах на устойчивость сталебетонных элементов. Существуют только рекомендации по расчету на прочность железобетонных элементов с жесткой арматурой.

После анализа экспериментальных и теоретических исследований проведенных в области изучения вопросов устойчивости сталебетонных элементов, были отмечены работы, которые наиболее приближенно соответствуют изучению вопроса устойчивости сталебетонных элементов с учетом зависимости коэффициента продольного изгиба от гибкости элемента.

Школой Санжаровского Р. С. [1] проводились эксперименты над внецентренно-сжатыми трубобетонными стержнями с целью выявления их работы от начальных стадий нагружения до момента перехода в первое расчетное предельное состояние по устойчивости второго рода и далее, по мере возрастания нагрузки, до разрушения. Опыты ставились так, чтобы имитация и характеристика явления соответствовали бы теории их расчета.

Проверку несущей способности внецентренно-сжатых трубобетонных стержней с тонкостенной оболочкой следует производить по формуле

$$N \leq \Phi, \quad (1)$$

где N – продольная сила, приложенная к стержню с эксцентриситетом e (функция нагрузок, действующих на сооружение); Φ – несущая способность трубобетонного стержня с данными характеристиками (функция свойств материалов и размеров элемента)

$$\Phi = \varphi_{\text{вн}} \Phi_2, \quad (2)$$

где Φ_2 – прочность стержня при осевом сжатии, определяемая по формуле далее; $\varphi_{\text{вн}}$ – коэффициент продольного изгиба при внецентренном сжатии.

$$\Phi_2 = m(R_o^p F_o + R_c^p F_c). \quad (3)$$

Величина приведенной гибкости определяется по формуле

$$\lambda_{\text{прив}} = \frac{R}{L} \frac{1}{\sqrt{0,5 - 0,25 \frac{1}{1 + \frac{\mu \cdot n}{k}}}}. \quad (4)$$

Величина коэффициента $\varphi_{\text{вн}}$ определяется как

$$\varphi_{\text{вн}} = \frac{P'_{\text{кр}}}{\Phi_2}, \quad (5)$$

где $P'_{\text{кр}}$ – критическая сила внецентренно-сжатого трубобетонного стержня.

Коэффициент $\varphi_{\text{вн}}$ является функцией $\lambda_{\text{прив}}$ и $m_{\text{прив}}$.

Значение приведенного эксцентриситета определяется по формуле

$$m_{\text{прив}} = \frac{e}{R} \frac{1}{0,5 - 0,25 \frac{1}{1 + \frac{\mu \cdot n}{k}}}, \quad (6)$$

где e – эксцентриситет приложения сжимающей силы.

Практически оценка устойчивости трубобетонного элемента сводится к определению коэффициента продольного изгиба. Найденные коэффициенты продольного изгиба трубобетонных стержней следует давать в виде ряда кривых $\varphi - \lambda$ в зависимости от марок сталей и бетонов, сочетающихся в трубобетонных стержнях.

Следует уточнить понятие гибкости λ . Чисто габаритное представление гибкости как отношения длины стержня к его наружному диаметру надо заменить понятием приведенной гибкости, в которое войдут более широкая геометрическая характеристика поперечного сечения стержня и некоторые физические данные о прочности и жесткости материалов, из которых он изготовлен. Это теоретически строгое понятие гибкости выражается пучком кривых $\varphi - \lambda$.

Учитывая выше изложенное, получаем новую методику расчета трубобетонных стержней по первому предельному состоянию по устойчивости, сохраняющую стандартную форму общепринятого метода, но применяемую для различных сочетаний стали и бетона.

Проверку несущей способности при осевом сжатии необходимо производить по формуле

$$N \leq \varphi \cdot \Phi_2, \quad (7)$$

где φ – коэффициент продольного изгиба при центральном сжатии

При определении φ центрально-сжатые стержни рассматривались как внецентренно-сжатые со случайным эксцентриситетом

$$m = \frac{\lambda}{1000} + 0,05. \quad (8)$$

Для промежуточных марок бетона значение φ определяется линейной интерполяцией.

Школой Стороженко Л. И. [2] рассматривается методика расчета сжатых элементов по приведенному к стали сечению. Этот метод расчета является приближенным и используется для ориентировочной оценки несущей способности сталебетонных элементов. Расчет производится с выполнением условий устойчивости в плоскости действия моментов. Методика расчета рассматривается на примере сжатых элементов из стальных двутавров с заполненными бетоном боковыми пустотами. Значения коэффициентов и расчетные формулы берутся со СНиП II-23-81* [3].

Расчет прочности при внецентренном сжатии выполняется по формуле

$$\frac{N}{\varphi_e A_{\text{ред}}} \leq R_y \gamma_c, \quad (9)$$

где γ_c – коэффициент условия работы конструкции; R_y – расчетное сопротивление стального элемента при растяжении; $A_{\text{ред}}$ – приведенная площадь сечения сталебетонного элемента.

Гибкость сталебетонных элементов при работе на внецентренное сжатие учитывается коэффициентом продольного изгиба φ_e , который определяется с помощью интерполяции по табл. 74 СНиП II-23-81 при известных условной гибкости λ и приведенному относительному эксцентриситету m_{ef} .

Для изучения влияния гибкости на работу сжатых трубобетонных элементов были проведены экспериментальные исследования над гибкими, центрально сжатыми трубобетонными и железобетонными элементами при кратковременном и длительном действии нагрузки и разработаны рекомендации для определения

коэффициента продольного изгиба. С целью выявления влияния гибкости на предельное значение усилия были опробованы при кратковременной нагрузке трубобетонные образцы диаметром 50 мм с гибкостью 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 50.

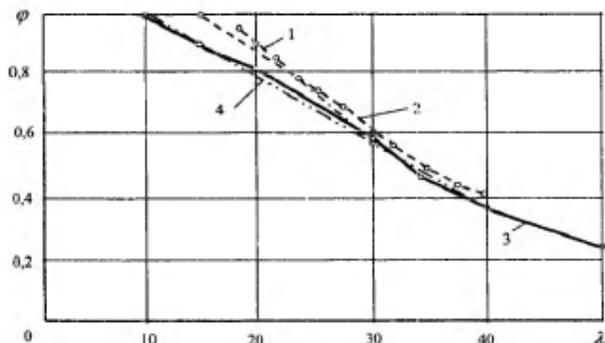


Рис. 1. Графики зависимости $\varphi - \lambda$

Как видно из графика, экспериментальные значения коэффициента продольного изгиба при гибкости в пределах 10...40, которые чаще всего встречаются при практических расчетах, располагаются на прямой линии. Если принять прямолинейную зависимость коэффициента продольного изгиба от гибкости в пределах $\lambda = 10...40$, то можно рекомендовать определять коэффициент продольного изгиба в зависимости от гибкости по формуле

$$\varphi = 1,209 - 0,0209 \cdot \lambda \quad (10)$$

Также были проведены эксперименты на устойчивость при внецентренном сжатии. Опыты проводились над двумя сериями внецентренно-сжатых трубобетонных элементов с длиной 5,6Д; 11,1Д; 21,3Д; 49Д (Д-диаметр элемента).

Коэффициент продольного изгиба предлагается вычислять по формуле

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{12CzR_b F_{np}} \left(\frac{l_0}{r_{н.пр}} \right)^2}, \quad (11)$$

где N – нагрузка; R_b – призмочная прочность бетона; F_{np} – приведенная площадь поперечного сечения; l_0 – расчетная длина; C – характеристика жесткости; z – коэффициент, который определяется по формуле

$$z = \frac{r_m(a+b) - Nr_m}{r_m(a+b) - Nr_m - Ne_0}, \quad (12)$$

где r_m – внешний радиус трубы; e_0 – начальный эксцентриситет;

$$a = R_b A_b \beta_{вн} \quad b = R_y A_s \alpha_{вн}, \quad (13)$$

где R_b – призмочная прочность бетона; R_y – сопротивление стали трубы сжатию; A_b – площадь поперечного сечения бетонного ядра; A_s – площадь поперечного сечения стальной трубы; $\beta_{вн}$, $\alpha_{вн}$ – коэффициенты, которые учитывают совместную работу бетона и стальной трубы.

Значение несущей способности гибкого внецентренно сжатого трубобетонного элемента рекомендуется определять по формулам: при $a \geq 0,5$

$$N \leq \frac{r_m}{e_0 \eta + r_m} (R_b A_b \beta_{вн} + R_y A_s \alpha_{вн}); \quad (14)$$

при $a < 0,5$

$$N \leq \frac{1}{\pi e_0 \eta} \left(\frac{2}{3} R_b A_b r_b k^3 \beta_{вн} + 2 R_y A_s k \alpha_{вн} \right), \quad (15)$$

где r_b – радиус бетонного ядра; α – половина центрального угла, который ограничивает сжатую зону

$$a = \frac{R_s A_s + N}{2 R_s A_s + R_b A_b} \quad k = \frac{a}{0,05 + 0,9 \cdot a}. \quad (16)$$

Теоретическая оценка устойчивости сжатых гибких трубобетонных стержней была проведена Ермоленко Д. А. [4]. Как свидетельствуют многочисленные экспериментальные исследования, для определения предельной нагрузки гибких сжатых трубобетонных элементов следует учитывать гибкость уже при относительной длине, большей чем 10. Несущая способность таких элементов по сравнению с короткими оказывается на 30...80 % меньше. Основой этих разработок послужили результаты экспериментальных исследований. Поэтому такие методики имеют частный характер и не могут распространяться на весь спектр разнообразия геометрических параметров трубобетонных элементов и физико-механических характеристик применяемых материалов.

Была разработана методика оценки устойчивости внецентренно сжатых трубобетонных стержней с учетом действительной работы материалов. При решении задачи устойчивости внецентренно сжатого трубобетонных стержня, с использованием разработанного метода, в ос-

нову расчета был положен энергетический метод, согласно которому предварительно задается форма потери устойчивости стержня и вычисляется для него полная потенциальная энергия. При этом принятие формы потери устойчивости и вычисления энергии выполняются для отдельного элемента, а затем последняя добавляется к энергии всего стержня.

Вектор перемещения всей системы состоит из векторов отдельных сечений и имеет вид

$$\{\Theta\} = (\{\vartheta_i\}, \{\omega_i\}, \{u_i\}). \quad (17)$$

Компоненты вектора нагрузки соответствуют компонентам вектора перемещений

$$\{F\} = (\{P_z\}, \{P_p\}, \{M_{pz}^F\}). \quad (18)$$

Напряженно-деформированное состояние трубобетона в соответствии с дискретной моделью описывается вектором усилия

$$\{S^{sb}\} = (\{N_z^{sb}\}, \{M_{pz}^{sb}\})^T. \quad (19)$$

Потенциальная энергия такой дискретной модели есть функция от всех параметров

$$\begin{aligned} U^{sb} &= U(\varphi_1, \omega_1, u_1, \dots, \varphi_n, \omega_n, u_n) = \\ &= U(\xi_1, \xi_1, \xi_1, \dots, \xi_{3n-2}, \xi_{3n-1}, \xi_{3n}) \end{aligned} \quad (20)$$

Уравнение равновесия при этом будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial U^{sb}}{\partial \xi_1} &= B_{11}\xi_1 + B_{12}\xi_2 + \dots + B_{1(3n)}\xi_{3n} = 0; \\ \frac{\partial U^{sb}}{\partial \xi_2} &= B_{21}\xi_1 + B_{22}\xi_2 + \dots + B_{2(3n)}\xi_{3n} = 0; \\ \frac{\partial U^{sb}}{\partial \xi_{3n}} &= B_{(3n)1}\xi_1 + B_{(3n)2}\xi_2 + \dots + B_{(3n)(3n)}\xi_{3n} = 0; \end{aligned} \quad (21)$$

$$B_{ij} = \frac{\partial^2 U^{sb}}{\partial \xi_i \partial \xi_j}.$$

Анализ устойчивости внецентренно сжатого трубобетонного стержня зависит от изгибающего и осевого деформирования конструкции. Поэтому задача устойчивости по дискретной модели расчетной схемы не может быть сформулирована независимо от анализа напряженно-деформированного состояния отдельного элемента.

В исследованиях Э. Д. Чихладзе [5] были определены значения критических напряжений в зависимости от отношения $1/d$ и найдены

коэффициенты продольного изгиба. Величина критической нагрузки тонкостенного круглого стержня, заполненного бетоном, определялась по формуле

$$F_{kp} = \frac{\pi^2 TJ}{l^2} \quad (22)$$

где l – длина стержня; TJ – переменная жесткость трубобетонного стержня.

$$TJ = E_6 \int_{\omega_6} z^2 d\omega_6 + E_1 \int_{\omega_1} z^2 d\omega_1 + E \int_{\omega_2} z^2 d\omega_2, \quad (23)$$

где ω_6 – площадь сечения сжатой зоны бетона с модулем E_6 ; ω_1 – площадь сечения сжатой зоны трубы с модулем E_1 ; ω_2 – площадь сечения растянутой части трубы с модулем упругости E ; z – расстояние от нейтральной оси до центра тяжести рассматриваемой зоны сечения.

В упругой стадии модули одинаковы на выпуклой и вогнутой стороне стержня, а нейтральная ось проходит через центр тяжести сечения. При работе элемента в зоне пластических деформаций нейтральная ось будет смещаться относительно центра тяжести сечения, при этом на вогнутой стороне модуль будет переменным, зависящим от напряжений в оболочке, а на выпуклой – постоянным, вследствие разгрузки напряжений.

Коэффициент продольного изгиба следует определять по формуле

$$\varphi = F_{kp} / F_{пч} \quad (24)$$

где F_{kp} – критическая сила центрально сжатого стержня; $F_{пч}$ – сила, найденная из условной прочности центрально сжатого стержня.

После анализа существующих методик расчета на устойчивость гибких трубобетонных элементов, можно сделать вывод, что использование эмпирических коэффициентов при расчетах трубобетонного элемента на прочность и устойчивость, не в полной мере учитывают совместную работу бетонного ядра и стальной оболочки. В этих расчетах остается нерешенным вопрос о контактном взаимодействии ядра и оболочки, что в свою очередь не дает нам полного представления о работе сталебетонного элемента как единой системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кикин, А. И., Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном [Текст] / А. И. Кикин,

- Р. С. Санжаровский, В. А. Труль. – М.: Стройиздат, 1974. – 145 с.
2. Стороженко, Л. І., Трубобетон [Текст]: монографія / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, О. І. Лапенко. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 306 с.
 3. СНиП II-23-81* Стальные конструкции [Текст]. – 2011. – 172 с.
 4. Єрмоленко, Д. А. Напружено-деформований стан трубо бетонного елемента при позацентровому стисненні [Текст] / Д. А. Єрмоленко // *Строительство, материаловедение, машиностроение*: сб. науч. тр. / Днепропетровск, ПГАСА. – Д., 2011. – Вып. № 61. – С.172-175.
 5. Чихладзе, Э. Д. Несущая способность сталебетонных конструкций в условиях статического и динамического нагружения [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук., защищена 05.23.01. – Харьков, 1985. – 35 с.

Поступила в редколлегию 21.06.2012.
Принята к печати 11.07.2012.

Д. Г. ПЕТРЕНКО (Українська державна академія залізничного транспорту, Харків)

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КОЕФІЦІЄНТУ ПОВЗДОВЖНЬОГО ЗГИНУ ВІД ГНУЧКОСТІ СТАЛЕБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТУ

У статті розглянуті існуючі методики з розрахунку на стійкість сталебетонних елементів з урахуванням залежності коефіцієнту повздовжнього згину від гнучкості елемента.

Ключові слова: сталебетонний елемент, повздовжній згин, гнучкість елемента, коефіцієнт повздовжнього згину

D. G. PETRENKO (Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkov)

BUCKLING COEFFICIENT DEPENDENCE DETERMINATION FROM THE FLEXIBILITY OF STEEL CONCRETE ELEMENT

The article describes current methods for calculating the stability of reinforced concrete elements, taking into account the dependence of the longitudinal bending of the flexible element.

Keywords: reinforced concrete element, buckling, flexible element, the coefficient of buckling