

КОНТРОЛЬ ЖЕСТКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОЧНОГО ТИПА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО МАТЕРИАЛА¹

Введение. Контроль жесткости конструкций балочного типа при их изготовлении и при обследовании зданий и сооружений является одной из актуальных современных проблем в области строительства. Как правило, для контроля жесткости конструкций используются статические методы, заключающиеся в нагружении балок контрольной нагрузкой, назначаемой соответствующими нормативными документами [1, 2]. Этот способ обладает большой трудоёмкостью из-за необходимости осуществления процедуры нагружения контролируемых конструкций. В последние годы в Архитектурно-строительном институте ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК» активно развиваются и совершенствуются динамические методы контроля жесткости конструкций в виде балок и пластинок, в основе которых лежит фундаментальная закономерность, связывающая элементарной зависимостью величину максимального прогиба упругих балок с их основной (или первой резонансной) частотой колебаний в ненагруженном состоянии [3]. Эти методы менее трудоёмки, чем методы статического нагружения, однако они охватывают в основном балки, изготовленные из материала, подчиняющиеся закону Гука. Они пока не могут применяться к конструкциям из физически нелинейного материала и к конструкциям, работающим в условиях эксплуатации в упругопластической и пластической стадиях.

1. Взаимосвязь максимального прогиба из физически нелинейного материала с основной частотой их колебаний в ненагруженном состоянии. Для балок, изготовленных из материала, подчиняющегося закону Гука и работающих в упругой стадии, известна закономерность [3], связывающая их максимальный прогиб w_0 при статическом нагружении равномерно распределенной нагрузкой q с основной (или первой резонансной) частотой колебаний ω в ненагруженном состоянии:

$$w_0 \approx \frac{4 q l^4}{\pi m \omega^2}, \quad (1)$$

где m – погонная масса балки постоянного сечения. По основной (или первой резонансной) частоте колебаний, зная погонную массу балки, можно определить её максимальный прогиб от заданной контрольной нагрузки q . Эта закономерность замечательна тем, что в ней две важнейшие физико-механические характеристики балки w_0 и ω не зависят от вида материала, граничных условий и длины пролета.

Рассмотрим диаграмму $\sigma - \varepsilon$ для материала, обладающего физически нелинейными свойствами (рис. 1). Тангенс угла наклона касательной, проведенной в начало координат, с горизонталью α_0 равен начальному модулю упругости E_0 материала; тангенс угла наклона касательной, проведенной к любой точке диаграммы, с горизонталью α равен текущему модулю упругости E материала.

Максимальный прогиб балки, изготовленной из материала, обладающего физически нелинейными свойствами и нагруженной по всему пролету равномерно распределенной нагрузкой q , определяется по формуле:

$$w_0 = \varphi q l^4 / EI, \quad (2)$$

где φ – коэффициент пропорциональности, зависящий от граничных условий по концам балки; l – пролет балки; E – модуль упругости материала, являющийся в данном случае переменной величиной, зависящей от интенсивности действующей нагрузки (от напряженного состояния в сечениях балки) (рис. 1); I – момент инерции поперечного сечения балки. Основная частота колебаний такой балки в ненагруженном состоянии ω_0 определяется по формуле:

$$\omega_0 = \beta^2 \sqrt{E_0 I / m l^4}, \quad (3)$$

где β^2 – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида граничных условий по концам балки; E_0 – начальный модуль упругости материала. С учетом выражений (1)...(3)

$$w_0 = \varphi \beta^4 \frac{q E_0 l^4}{m E \omega_0^2}. \quad (4)$$

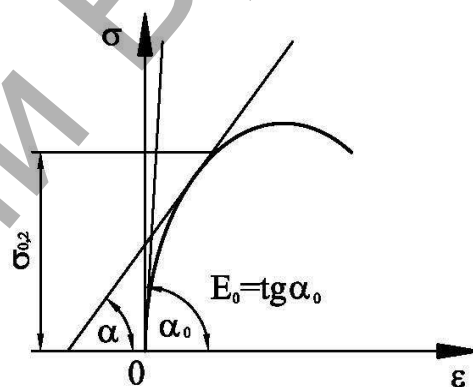


Рис. 1. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ для материала с физически нелинейными свойствами

В отличие от формулы (1), справедливой для балок из материала, подчиняющегося закону Гука, в формуле (4) появилось отношение начального модуля упругости E_0 к текущему E . Объединим это отношение с коэффициентом пропорциональности $\varphi \beta^4$, тогда

$$w_0 = \left(\varphi \beta^4 \frac{E_0}{E} \right) \frac{q l^4}{m \omega_0^2} = K \frac{q l^4}{m \omega_0^2}, \quad (5)$$

где $K = \alpha \beta^2 \times E_0 / E$. Если текущий модуль упругости E равен начальному E_0 , что соответствует материалу, подчиняющемуся закону Гука, то коэффициент $K = 4/\pi$, и выражение (5) приводится к виду (1).

Для физически нелинейного материала K является сложной функцией, зависящей от напряженного состояния в сечениях балки, то есть в первую очередь от действующей нагрузки q .

Преобразуем зависимость (5) к следующему виду:

$$\omega_0^2 m \frac{w_0}{q} = K. \quad (6)$$

Колчунов Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные конструкции и материалы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс».

Калашникова Ольга Владимировна, аспирантка кафедры «Строительные конструкции и материалы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс».

Россия, ФГБОУ ВПО ОрёлГТУ, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.

На рисунке 2 кривой 1 представлен график $K-q$, построенной по экспериментальным данным испытания железобетонной перемычки типа 2ПБ-26-4. Прямая 2 на этой фигуре соответствует балкам из материала, подчиняющегося закону Гука, а пунктирная – некоторому гипотетическому материалу с физически нелинейными свойствами. Зная величину контрольной нагрузки по кривой 1, построенной для эталонной балки, можно найти значение параметра K , который в дальнейшем согласно (5) будет использован для контроля максимального прогиба балок серийного изготовления по их основной частоте колебаний.

2. Экспериментальные исследования

Для апробации предложенного способа определения жесткости балок из физически нелинейного материала была изготовлена железобетонная балка в опалубке перемычек типа 2ПБ-26-4 ($l = 2590$ мм; $b = 120$ мм; $h = 140$ мм, масса балки $m \approx 109,0$ кг).

Арматурный каркас состоял из рабочей арматуры нижней зоны (арматура класса А400 диаметром $d_s = 12$ мм), конструктивной арматуры верхней зоны (проволочной арматуры В500 $d_s = 5$ мм) и поперечных связей из арматуры В500 $d_s = 4$ мм. Для замоноличивания использовался бетон с начальным модулем упругости $E_b = 27,5 \cdot 10^3$ МПа. Балка изготавливалась в заводских условиях под строгим контролем всех технологических операций согласно ГОСТ Р 53231-2008 [4] (подбор состава бетона и его укладка в опалубку, контроль режимов формования и термообработки, соблюдение геометрических размеров, армирования и др.).

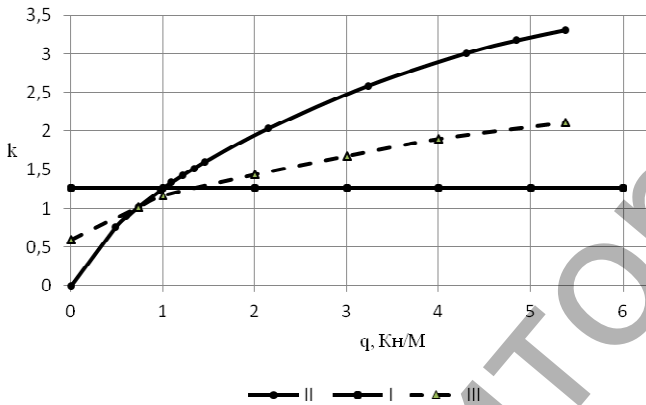


Рис. 2. График зависимости $k-q$ для железобетонной перемычки типа 2ПБ-26-4

Испытания железобетонных балок проводились на специальном стенде, который включал в себя набор стандартного оборудования,

приборов и средств измерений. Функциональная схема этого стенда приведена на рисунке 3.

Балка 1 устанавливалась и закреплялась на шарнирных опорах. Одна из них шарнирно неподвижная 3 в виде стального уголка, другая шарнирно подвижная 2 в виде металлического круглого стержня. Шарнирные опоры 2 и 3 установлены на силовых опорах 6. В средней части балки закреплялся вибродатчик 5 прибора «Вибран-2.0» и прогибомер часового типа 4 на основе контактора КТ6042-У3 с емкостным накопителем мощностью до 600 Дж), работу которого обеспечивали вспомогательные устройства: генератор сигнала типа Г6-26 и усилитель мощности типа LV-103 (ММФ).

В контролируемой балке сначала измерялась основная частота колебаний в ненагруженном состоянии, а затем осуществлялось статическое нагружение ступенчато возрастающей равномерно распределенной нагрузкой в виде силикатного кирпича с размерами 250x120x88 мм и массой $\approx 5,2$ кг. Каждая ступень нагрузки согласно требованиям ГОСТ 8829-94 [2] не превышала 10 % от контрольной разрушающей нагрузки. Схема нагружения балок показана на рисунке 4. На каждом этапе нагружения балки определялся её максимальный прогиб.

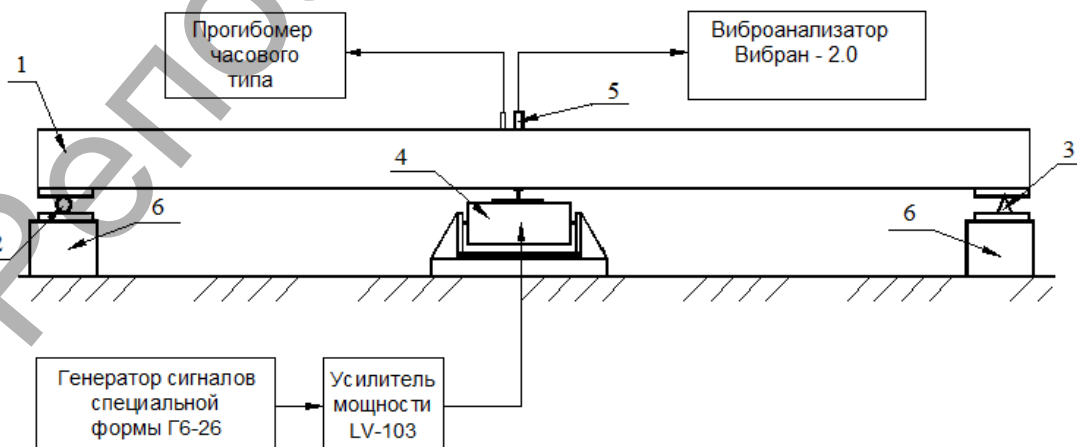
При динамическом испытании балки в ненагруженном состоянии в режиме свободных колебаний была найдена основная частота $f = 29,9$ Гц ($\omega = 2 \pi f = 187,87$ с⁻¹). Результаты статических испытаний балки приведены в следующей таблице (колонки 2 и 3).

Результаты подсчёта коэффициента пропорциональности K по формуле (6) и экспериментальным данным после их статистической обработки приведены в колонке 4. По этим значениям K построена аппроксимирующая кривая $K-q$.

$$K = \sqrt{a + bq + cq^2 + dq^3}, \tag{7}$$

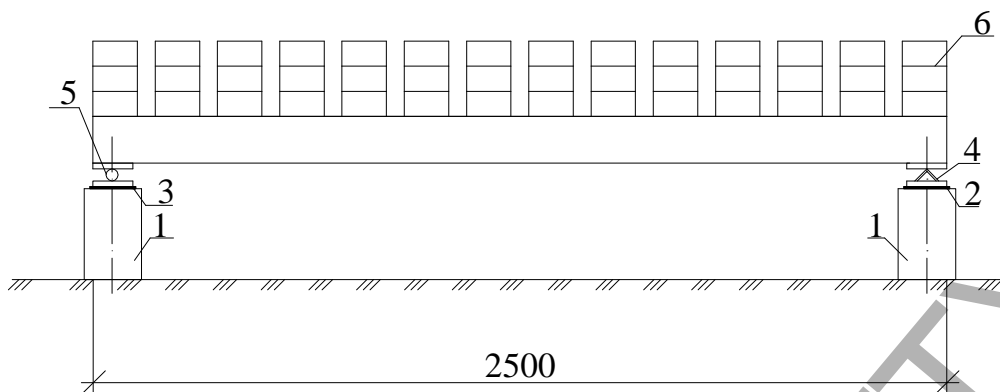
где $a = -0,2496$, $b = 1,5591$, $c = 0,3130$, $d = -0,04021$. Результаты расчета по этой формуле приведены в колонке 5, а в колонке 6 – их отклонения от результатов, приведенных в колонке 4. Графическое представление этой зависимости представлено на рисунке 2 (кривая 1). Графический анализ этой кривой 1 показал, что она является монотонно возрастающей без каких-либо заметных переломов в момент перехода работы балки из упругой стадии в упругопластическую и пластическую.

Совместно с испытанной эталонной железобетонной балкой была изготовлена и испытана вторая балка, отличающаяся от первой тем, что приготовленная бетонная смесь была жестче за счет снижения объема воды в ней на 5 %. После ее укладки в опалубку смесь вибрировалась дольше, чем в первой балке.



1 – контролируемая балка; 2, 3 – подвижная и неподвижная шарнирные опоры; 4 – ударное устройство – возбудитель собственных поперечных колебаний; 5 – вибронализатор спектра колебаний «Вибран-2.0»; 6 – силовые опоры

Рис. 3. Функциональная схема испытательного стенда



1 – силовые опоры; 2, 3 – металлические пластины; 4 – шарнирно неподвижная опора; 5 – шарнирно подвижная опора; 6 – силикатный кирпич
Рис. 4. Схема нагружения балок

Таблица. Результаты статических испытаний железобетонной балки

№ исп.	q, кН/м	w ₀ , мм	K	K по (7)	Разница, %
1	2	3	4	5	6
1	0,488	0,251	0,764	0,762	0,26
2	0,600	0,389	0,929	0,889	4,31
3	0,732	0,500	1,014	1,022	0,79
4	0,976	0,810	1,233	1,238	0,41
5	1,098	1,010	1,366	1,337	2,12
6	1,220	1,163	1,416	1,430	0,99
7	1,342	1,368	1,514	1,520	0,40
8	1,466	1,590	1,611	1,607	0,25
9	2,152	2,901	2,002	2,038	1,80
10	3,228	5,608	2,580	2,587	0,27
11	4,304	8,752	3,020	3,009	0,36
12	4,842	10,33	3,168	3,174	0,19
13	5,380	11,979	3,307	3,307	0,00

В этой балке в ненагруженном состоянии была определена основная частота колебаний $f = 32,47$ Гц ($\omega = 204,015$ с⁻¹). Далее балка была испытана тремя ступенями статически приложенной равномерно распределенной нагрузки: $q_1 = 0,488$ кН/м, $q_2 = 1,466$ кН/м и $q_3 = 3,228$ кН/м. Первая нагрузка соответствовала упругой работе балки, вторая – приблизительно моменту появления трещин, третья – работе балки в упругопластической стадии. Для этих нагрузок экспериментально были определены прогибы: $(w_0)_1 = 0,22$ мм, $(w_0)_2 = 1,28$ мм, $(w_0)_3 = 4,60$ мм.

По формуле (5) для заданных нагрузок и найденной экспериментально основной частоте колебаний были подсчитаны значения максимальных прогибов $(w_0)_1 = 0,212$ мм, $(w_0)_2 = 1,345$ мм, $(w_0)_3 = 4,768$ мм. Эти результаты отличаются от полученных экспериментально соответственно на 3,64 %, 5,07 % и 3,65 %.

3. Оценка максимально возможной погрешности при проведении испытаний балки рассматриваемого типа

Оценим максимально возможную абсолютную погрешность Δw_0 при определении максимального прогиба экспериментальной балки с использованием зависимости (5) по методу максимума-минимума [5]:

$$\Delta w_0 = \frac{\partial w_0}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial w_0}{\partial q} \Delta q + \frac{\partial w_0}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial w_0}{\partial \omega_0^2} \Delta \omega_0,$$

где ΔK , Δq , Δm и $\Delta \omega_0$ – абсолютные погрешности измерения соответственно параметра K , нагрузки q , погонной массы m и основной частоты колебаний балки ω_0 .

Значения абсолютных погрешностей принимаем по существующим нормативным документам или задаем по результатам проведенных экспериментальных исследований:

$\Delta K = 4,31$ % по результатам аппроксимации экспериментально полученных значений параметра K (см. таблицу);

$\Delta q = 0,5$ % по результатам взвешивания мелкоштучных элементов, используемых для нагружения балок контрольной нагрузкой q_0 ;

$\Delta m = 0,5$ кг/м по результатам взвешивания контролируемых балок;

$\Delta \omega = 0,2\%$ – по данным статистической обработки результатов измерений основной частоты колебаний балок в ненагруженном состоянии.

Согласно методу максимума-минимума [5], для нахождения максимально возможной абсолютной погрешности необходимо взять наибольшие предельные отклонения для всех параметров, у которых коэффициенты влияния положительные, и наименьшие предельные отклонения для параметров с отрицательными коэффициентами влияния; для нахождения минимально возможной погрешности необходимо взять наименьшие предельные отклонения для всех параметров, у которых коэффициенты влияния положительные, и наибольшие предельные отклонения для параметров, у которых коэффициенты влияния отрицательные. Согласно этому правилу и принятым абсолютным погрешностям

$$\begin{aligned} \Delta w_0 &= \frac{\partial w_0}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial w_0}{\partial q} \Delta q + \frac{\partial w_0}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial w_0}{\partial \omega_0^2} \Delta \omega_0 = \\ &= \frac{q}{m \omega_0^2} \left(\pm \frac{1,430 \cdot 4,31}{100} \right) + K \frac{1}{m \omega_0^2} \left(\pm \frac{1220 \cdot 0,5}{100} \text{ Н / м} \right) - \\ &- K \frac{q}{m^2 \omega_0^2} (\mp 0,5 \text{ кг / м}) - 2K \frac{q}{m \omega_0^3} \left(\mp \frac{187,87 \cdot 0,2}{100} \text{ с}^{-1} \right). \end{aligned}$$

Подставляя в эту формулу значения экспериментальных данных, получим:

$$\begin{aligned} \Delta w_0 &= \underbrace{\frac{1220}{42,08} \frac{1}{187,87^2} \left(\pm \frac{1,430 \cdot 4,31}{100} \right)}_{5,06 \cdot 10^{-5}} + \\ &+ \underbrace{1,430 \frac{1}{42,08} \frac{1}{187,87^2} \left(\pm \frac{1220 \cdot 0,5}{100} \text{ Н / м} \right)}_{5,87 \cdot 10^{-6}} - \\ &- \underbrace{1,430 \frac{1220}{42,08^2} \frac{1}{187,87^2} (\mp 0,5 \text{ кг / м})}_{1,396 \cdot 10^{-5}} - \\ &- \underbrace{2 \cdot 1,430 \frac{1220}{42,08} \frac{1}{187,87^3} \left(\mp \frac{187,87 \cdot 0,2}{100} \text{ с}^{-1} \right)}_{4,70 \cdot 10^{-6}} = \\ &= 7,509 \times 10^{-5} \text{ м} = 7,509 \times 10^{-2} \text{ мм}. \end{aligned}$$

С учетом этого результата найдём максимально возможную относительную погрешность при определении максимального прогиба

железобетонных балок рассмотренного типа с помощью предложенного способа:

$$\Delta w_0 / w_0 \times 100 = 7,509 \cdot 10^{-2} / 1,163 \times 100 = 6,46 \%$$

Таким образом, для железобетонных балок рассмотренного типа максимальный прогиб от действия равномерно распределенной нагрузки будет определяться по формуле

$$w_0 = \sqrt{-0,2496 + 1,5591q + 0,3130q^2 - 0,04021q^3} \frac{q}{m \omega_0^2} \quad (6)$$

с относительной погрешностью, не превышающей 6,5%.

Заключение

1. Разработан вибрационный способ контроля жесткости балок из физически нелинейного материала, работающих как в упругой, так и в упругопластической стадиях, позволяющий оценивать их максимальный прогиб по основной частоте колебаний в ненагруженном состоянии.
2. Предложенная математическая модель не включает модуля упругости материала балки и ее геометрических размеров. В нее входит всего 3 независимых параметра (нагрузка, масса и основная частота колебаний), что предопределяет достаточно вы-

сокую точность оценки контролируемого параметра. Проведенные экспериментальные исследования железобетонной перемычки типа 2ПБ-26-4 убедительно подтвердили работоспособность предложенной математической модели.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лужин, О.В. Обследование и испытание сооружений [Текст] / О.В. Лужин, А.Б. Злочевский, И.А. Горбунов, А.Н. Волохов; под ред. О.В. Лузина. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
2. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Методы испытания нагружением и оценка прочности, жесткости и трещиностойкости [Текст]: ГОСТ 8829–94. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 26 с.
3. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода – Т. 1. [Текст] / В.И. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 1997. – 390 с.
4. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности [Текст]: ГОСТ Р 53231-2008. – М.: Стандартинформ, 2009. – 15 с.
5. Коробко, В.И. Лекции по курсу «Основы научных исследований» [Текст] / В.И. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 218 с.

Материал поступил в редакцию 04.06.13

KOLCHUNOV V.I., KALASHNIKOV O.V. Control of rigidity of designs of balochnogo of the type, made of physically nonlinear material

The article presents theoretical grounds of method of maximum deflection rate control of beams being made of material that has physically-nonlinear properties. The results of experimental study of reinforced-concrete link beams of type 2PB-26-4 that provided convincing proof of efficiency of suggested method are given. The analysis of the expected error at the suggested method application showed that for beams of the considered type it will not excess 6%.

УДК 624.046.5/624.014

Надольский В.В., Тур В.В., Голицки М., Сыкора М.

НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СВЕТЕ ТРЕБОВАНИЙ ЕВРОПЕЙСКИХ И РОССИЙСКИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ

1. Введение. С 2011 года на территории Российской Федерации введены в действие новые своды правил (СП) по расчету строительных конструкций. Вопрос сравнения европейской системы норм (Еврокоды) и нормативных документов Российской Федерации (СП) по расчету строительных конструкций представляет большой интерес в связи с современным процессом гармонизации норм проектирования. Сравнение базовых расчетных положений и уровня надежности, обеспечиваемого этими документами, позволит судить о возможности внедрения Еврокодов на территории России. Данные, полученные из таких исследований и практического опыта применения Еврокодов полезны для разработки национальных приложений, а также для улучшения и гармонизации норм проектирования (Еврокодов, СП).

Ответ на этот вопрос требует достаточно обширных и комплексных исследований. В рамках данных исследования должны быть выполнен анализ базовых положений проектирования, заложенных в систему нормативных документов (таких как правила сочетания нагрузок, система частных коэффициентов); сопоставление основных положений по определению параметров, характеризующих усилия (нагрузки) и несущую способность; анализ отдельных расчетных положений и формул.

В данной статье сделан основной упор на сопоставление параметров моделей сопротивления и усилий для обобщенного стального элемента. Исследована надежность стальных элементов с использованием вероятностных методов. Следует отметить, что сравнение отдельных расчетных положений и проверочных формул требует дополнительных исследований. В статье выполнена оценка уровня надежности конструкций с применением методов теории надежности 1-го порядка.

2. Детерминированный расчет. В основу Еврокодов и СП положен метод предельных состояний с использованием системы частных коэффициентов. Общая формулировка проверки стального конструктивного элемента по EN 1993-1-1 [1] и СП 16.13330 [2] имеет схожий характер (таблица 1).

Таблица 1. Проверки прочности и устойчивости конструктивного элемента

	Проверка по прочности	Проверка по устойчивости
[1]	$E_d \leq z \cdot f_y / \gamma_{M0}$	$E_d \leq z \cdot \chi \cdot f_y / \gamma_{M1}$
[2]	$\gamma_n \cdot C_m / z \leq \gamma_c \cdot R_y = \gamma_c \cdot R_{yn} / \gamma_m$	$\gamma_n \cdot C_m / (\varphi \cdot z) \leq \gamma_c \cdot R_y$

В таблице приняты следующие обозначения: E_d и C_m – расчетный эффект воздействия (усилие), см. 2.2; z – геометрическая характеристика поперечного сечения элемента (площадь, момент сопротивления); χ и φ – понижающие коэффициенты для соответствующей формы потери устойчивости; f_y – характеристическое значение (characteristic value) предела текучести стали; R_y – расчетное значение предела текучести; R_{yn} – нормативное значение предела текучести; γ_{M0} – частный коэффициент для проверки сечения (проверка предельного состояния по прочности); γ_{M1} – частный коэффициент для проверки элемента (проверка предельного состояния по устойчивости); γ_c – коэффициент условий работы; γ_n – коэффициент надежности по ответственности здания.

Надольский В.В., Белорусский национальный технический университет.

Голицки М., Сыкора М., Чешский технический университет в Праге, Институт Клокнера.