

УДК 624.012.4

**ОСНОВЫ РАСЧЕТА
ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ПО EN 1992 И
НАЦИОНАЛЬНЫМ СТАНДАРТАМ РФ**

Ба Абдулай, Сако Брайма

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

daby200586@mail.rubrama.sako@yahoo.com

Сопоставляются методики для основных этапов расчета ненапрягаемых изгибаемых железобетонных элементов по российским национальным стандартам и европейскому стандарту EN 1992. Проведены методики основных этапов проектирования для предельных состояний по несущей способности (ULS) и эксплуатационной пригодности (SLS) изгибаемых железобетонных элементов по российским нормам и EN 1992-1-1. Приведены рисунки и формулы для расчета изгибаемых железобетонных элементов по EN 1992 и национальным стандартам РФ.

Ключевые слова: еврокод, национальный стандарт РФ, железобетон, изгибаемый элемент, предельные состояния, несущая способность, эксплуатационная пригодность, изгибающий момент.

Введение. Еврокоды (европейские кодексы) представляют собой систему европейских нормативных документов (аналогичных системе Свода правил в России), обеспечивающих безопасность и надежность здания и сооружений при их строительстве и эксплуатации [1]. В основу Еврокодов положен усовершенствованный метод расчета конструкций по предельным состояниям, разработанный в 50-е годы в СССР и применяемый в настоящее время в Российской Федерации и в странах Таможенного союза (ТС) [2]. Очевидно, что введение Еврокодов в России полностью не решает проблем в строительной отрасли. Но Еврокоды могут способствовать дальнейшему развитию российских строительных норм и служить общей основой для исследований и опытных разработок совместно с другими странами, что приведет к значительному снижению затрат на исследования в области строительных конструкций. Открываются новые перспективы для российских проектных и строительных организаций. Они смогут проектировать и строить объекты не только по российским нормам, но и по европейским строительным нормам Еврокодам. Универсальность Еврокодов позволяет применять их в большинстве европейских стран, а также в странах ТС. При разработке проектной документации инженер-проектировщик, использующий Еврокоды, принимает в расчетах данные из Национальных приложений к Еврокодам той страны, для которой выполняется проектирование объекта [1].

UDC 624.012.4

**BASIS FOR CALCULATION OF FLEXIBLE
REINFORCED CONCRETE ELEMENTS
ACCORDING TO EN 1992 AND RUSSIAN
FEDERATION NATIONAL STANDARDS**

Bah Abdoulaye, Sacko Brahma

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

daby200586@mail.rubrama.sako@yahoo.com

The article compares the methods for the main stages of calculation of non-tensional flexible ferro-concrete elements according to Russian national standards and European standard EN 1992. The paper provides the methods for the main design stages for the limiting states of bearing capacity (ULS) and serviceability (SLS) of flexible ferro-concrete elements according to Russian standards and EN 1992-1-1. The figures and formulas for calculation of flexible ferro-concrete elements according to EN 1992 and national standards of the Russian Federation are given.

Keywords: Eurocode, RF national standard, reinforced concrete, flexible element, limit states, bearing capacity, serviceability, moment of flexion.

Целью работы является сопоставление методики для основных этапов расчета ненапрягаемых изгибаемых железобетонных элементов по российским национальным стандартам и европейскому стандарту EN 1992.

Далее приводятся методики основных этапов проектирования для предельных состояний по несущей способности (ULS) и эксплуатационной пригодности (SLS) изгибаемых железобетонных элементов по российским нормам и EN 1992–1–1. При дальнейшем описании большинство коэффициентов в формулах не расшифровывается, так как это сделано в соответствующих стандартах [2].

1. Определение расчетного пролета конструкций

Национальные стандарты РФ. Отсутствует единая методика по определению расчетного пролета конструкций [3].

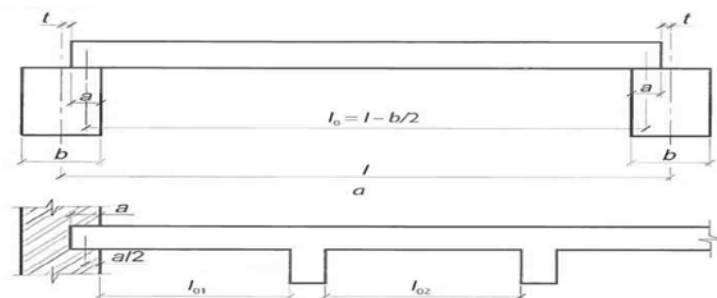


Рис. 1. Определение расчетного пролета конструкций по национальным стандартам РФ

Еврокод EN 1992. [4, п.5.3.2.2]

$$l_{eff} = l_n + a_1 + a_2 \quad (1)$$

где l_{eff} — расчетный пролет; l_n — расстояние между гранями опор; a_1 и a_2 — размеры, зависящие от способа опирания: $a_i = \min\{0,5h; 0,5t\}$, здесь h — высота плиты; t — ширина опоры.

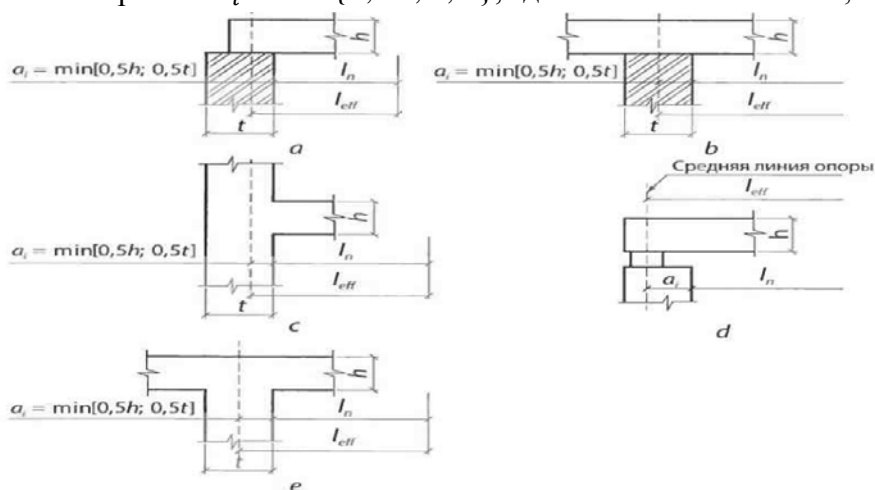


Рис. 2. Определение расчетного пролета конструкций по Еврокоду EN 1992

2. Определение расчетного (эквивалентного) поперечного сечения конструкций Национальные стандарты РФ [3, п. 8.1.11].

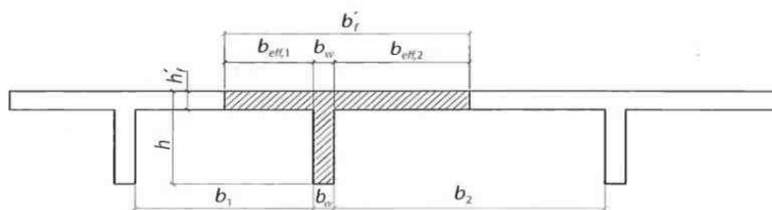


Рис. 3. Определение расчетного (эквивалентного) поперечного сечения конструкций по национальным стандартам РФ

$$b_f' = \sum b_{eff,i} + b_w, \tag{2}$$

$$b_{eff,i} \leq \frac{1}{6} l, \tag{3}$$

где l — пролет элемента;

при $h_f' \geq 0,1h$ или при наличии поперечных ребер:

$$b_{eff,i} \leq \frac{1}{2} b_i, \tag{4}$$

при $h_f' < 0,1h$ и отсутствии поперечных ребер:

$$b_{eff,i} \leq 6h_f'. \tag{5}$$

При консольных свесах полок:

$$b_{eff,i} \leq 6h_f' \text{ при } h_f' \geq 0,1h, \tag{6}$$

$$b_{eff,i} \leq 6h_f' \text{ при } 0,05h \leq h_f' < 0,1h, \tag{7}$$

$$b_{eff,i} = 0 \text{ при } h_f' < 0,05h, \tag{8}$$

Еврокод EN 1992 [4, п. 5.3.2.1].

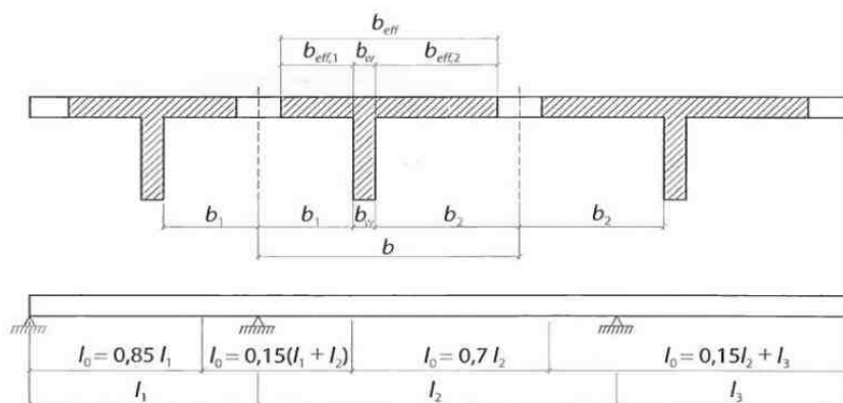


Рис. 4. Определение расчетного (эквивалентного) поперечного сечения конструкций по Еврокоду EN 1992

$$b_{eff} = \sum b_{eff,i} + b_w \leq b, \tag{9}$$

$$b_{eff,i} = 0,2b_i + 0,1l_0 \leq 0,2l_0, \tag{10}$$

$$b_{eff,i} \leq b_i. \tag{11}$$

3. Расчеты на действие изгибающего момента (предельные состояния по несущей способности)

Национальные стандарты РФ [3, п. 8.1].

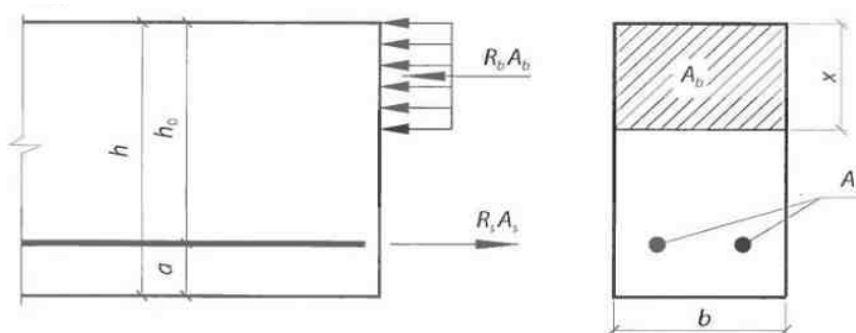


Рис. 5. Расчеты на действие изгибающего момента (предельные состояния по несущей способности) по национальным стандартам РФ

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b}, \quad (12)$$

где R_s — расчетное сопротивление арматуры растяжению; A_s — площади сечения арматуры; R_b — расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; b — ширина прямоугольного сечения; x — высота сжатой зоны бетона.

$$\xi = \frac{x}{h_0}, \quad (13)$$

где ξ — относительная высота сжатой зоны бетона; h_0 — рабочая высота сечения.

$$\alpha_m = \frac{M}{R_b b h_0^2} \leq \alpha_R, \quad (14)$$

где M — изгибающий момент; $\alpha_R = f(R_b, R_s) = 0,372 \div 0,425$ [5, табл. 3.2]

$$A_s = \frac{M}{R_s \eta h_0}, \quad (15)$$

$$\eta = (1 - 0,5\xi). \quad (16)$$

Еврокод EN 1992 [4, п. 3.1.7(3)].

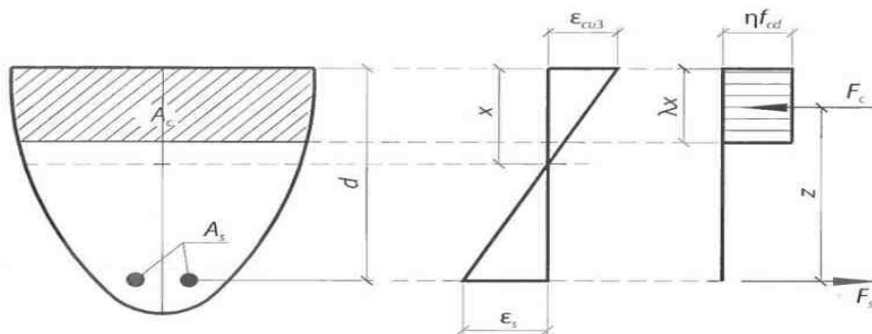


Рис. 6. Расчеты на действие изгибающего момента (предельные состояния по несущей способности) по Еврокоду EN 1992

$$\lambda = 0,8 (f_{ck} \leq 50 \text{ МПа}); \lambda = 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} (50 < f_{ck} \leq 90 \text{ МПа}), \quad (17)$$

$$\eta = 1,0 (f_{ck} \leq 50 \text{ МПа}); \eta = 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} (50 < f_{ck} \leq 90 \text{ МПа}), \quad (18)$$

где f_{ck} — нормативная (характеристическая) цилиндрическая прочность бетона на сжатие.

$$K = \frac{M_{Ed}}{\left(\frac{f_{ck}}{\gamma_c}\right) b d^2} \leq K', \quad (19)$$

где M_{Ed} — расчетное значение внутреннего изгибающего момента; b — ширина сечения; d — рабочая высота сечения; γ_c — коэффициент надежности для бетона; $K' = 0,296$ для конструкций, где возможно перераспределение моментов ($f_{ck} \leq 50$ МПа); $K' = 0,348$ для конструкций без возможности перераспределения моментов ($f_{ck} \leq 50$ МПа).

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot z}, \quad (20)$$

где f_{yd} — расчетное значение предела текучести арматуры; z — плечо внутренней сил.

$$z = \frac{d}{2} (1 + \sqrt{1 - 2K}). \quad (21)$$

4. Расчеты на действие поперечной силы (предельные состояния по несущей способности)

Национальные стандарты РФ. Расчеты по бетонной полосе между наклонными сечениями [3].

$$Q = \varphi_{bl} R_b b h_0, \quad (22)$$

где Q — максимальная поперечная сила; R_b — расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; b — ширина сечения; h_0 — рабочая высота сечения; $\varphi_{bl} = 0,3$.

Несущая способность сечения с учетом поперечной арматуры:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw}, \quad (23)$$

где Q_b — несущая способность бетона (усилие в бетоне); Q_{sw} — несущая способность хомутов (усилие в хомутах).

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{c} \quad (24)$$

где R_{bt} — расчетные сопротивления бетона осевому растяжению, b — ширина сечения; h_0 — рабочая высота сечения; $\varphi_{b2} = 1,5$; c — длина проекции наклонного сечения на горизонтальную ось.

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} q_{sw} c, \quad (25)$$

где $\varphi_{sw} = 0,75$.

$$q_{sw} = \frac{A_{sw} R_{sw}}{s}, \quad (26)$$

где A_{sw} — площадь поперечного сечения хомутов; R_{sw} — расчетное сопротивление арматуры хомутов растяжению; s — шаг расстановки хомутов на участке с данным наклонным сечением.

Еврокод EN 1992. Несущая способность сечения без поперечной арматуры [4, п. 6.2.2]:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}, \quad (27)$$

где V_{Ed} — расчетная поперечная сила; $V_{Rd,c}$ — несущая способность сечения по поперечной силе.

$$V_{Rd,c} = [c_{Rd,c} \cdot k (100 \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}] b_w \cdot d, \quad (28)$$

где f_{ck} — нормативная (характеристическая) цилиндрическая прочность бетона на сжатие; b_w — ширина стенки; d — рабочая высота сечения.

Здесь:

$$c_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}, \quad (29)$$

где γ_c — коэффициент надежности для бетона.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, \quad (30)$$

где d — рабочая высота сечения.

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d}, \quad (31)$$

где A_{sl} — площадь сечения продольной арматуры; b_w — ширина стенки; d — рабочая высота сечения.

Несущая способность сечения с учетом поперечной арматуры [4, п. 6.2.3]:

$$\min \begin{cases} V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{S} z \cdot f_{ywd} \cot \theta \\ V_{Rd,s} = \frac{a_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \end{cases} \quad (32)$$

где A_{sw} — площади поперечного сечения поперечной арматуры; S — расстояние между стержнями поперечной арматуры; z — плечо внутренней пары сил с постоянной высотой; f_{ywd} — расчетное сопротивление растяжению поперечной арматуры; θ — угол между бетонным сжатым раскосом и осью балки, перпендикулярной к поперечному усилию; a_{cw} — коэффициент учитывающий уровень напряжения в сжатом поясе; v_1 — коэффициент понижения прочности бетона; f_{cd} — расчетное значение предела прочности бетона при осевом сжатии.

5. Расчеты по раскрытию трещин (предельные состояния по эксплуатационной пригодности — SLS)

Национальные стандарты РФ [3].

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (33)$$

где a_{crc} — ширина раскрытия трещин; $a_{crc,ult}$ — предельная ширина раскрытия трещин [3, п. 8.2.6].

$$a_{crc} = 20 \cdot (3,5 - 100\mu) \cdot \delta \cdot \eta \cdot \varphi_e \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \sqrt[3]{d} \quad (34)$$

где δ — коэффициент учета различных видов нагрузок; η — коэффициент, зависящий от вида и профиля продольной растянутой арматуры; φ_e — коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки; σ_s — напряжения в продольной арматуре или приращение напряжений после погашения обжатия в растянутой арматуре; E_s — модуль упругости арматуры; μ — коэффициент армирования сечения; d — диаметр арматуры.

Продолжительное раскрытие трещин [3, п. 7.2.4]:

$$a_{crc} = a_{crc,1} \cdot \quad (35)$$

Непродолжительное раскрытие трещин [3, п. 7.2.4]:

$$a_{crc} = a_{crc,1} + a_{crc,2} - a_{crc,3} \cdot \quad (36)$$

Еврокод EN 1992 [4, п. 7.3.4].

$$w_k \leq w_{max}, \quad (37)$$

где w_k — ширина раскрытия трещин; w_{max} — предельная ширина раскрытия трещин.

$$w_k = S_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (38)$$

где $S_{r,max}$ — максимальное расстояние между трещинами; ε_{sm} — средние относительные деформации арматуры при определяющем сочетании воздействий, включая влияние вынужденных деформации и учитывая работу бетона на растяжение; ε_{cm} — средние относительные деформации бетона между трещинами.

Выводы

При сопоставлении стандартов РФ и европейского стандарта EN 1992–1–1 необходимо отметить наиболее важные моменты:

1. Характеристическая (нормативная) цилиндрическая прочность бетона на сжатие f_{ck} сопоставима с нормативной призматической прочностью бетона R_{bn} .

2. При расчете прочности сечений элементов на действие изгибающего момента отсутствует предпосылка, что предельное состояние элемента наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре напряжений, равных расчетному сопротивлению арматуры. Принятые предпосылки позволяют обойтись без относительной высоты сжатой зоны бетона $\xi =$

x/h_0 и сразу использовать в расчетах коэффициент. K вычисляется и при $f_{ck} \leq 50$ Мпа, является величиной постоянной, равной 0,296 см для конструкций, где возможно перераспределение моментов (многопролетные неразрезные плиты и балки и т.д.). Для конструкций без возможности перераспределения моментов (свободно опертые плиты и балки и т.д.) $K'=0,348$ см. При $K > K'$ необходима установка арматуры в сжатой зоне бетона изгибаемого элемента. Плечо внутренней пары сил Z в сечении элемента также вычисляется.

3. Трещиностойкость сечений изгибаемых элементов на действие поперечной силы обеспечивается соблюдением конструктивных требований при установке поперечной арматуры.

4. Предельное состояние по деформациям контролируется посредством ограничения отношения пролета к высоте конструкции (l/d), либо прямым расчетом деформации и сравнением ее с предельно допустимым значением.

Библиографический список

1. Яковлев, С. К. Расчет железобетонных конструкций по Еврокоду EN 1992: в двух частях: учебно — методич. Пособие / Ч.1: Изгибаемые и сжатые железобетонные элементы без предварительного напряжения. Определение снеговых, ветровых и крановых нагрузок. Сочетание воздействий // С. К. Яковлев, Я. И. Мысляев. — Москва: МГСУ, 2015. — 204 с.

2. Яковлев, С. К. Расчет железобетонных конструкций по Еврокоду EN 1992. Учебно-методич. пособие: в 2 ч. Ч. 2. / С. К. Яковлев, Я. И. Мысляев. — Москва : НИУ МГСУ, 2017. — 220 с.

3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями №1,2) / Приказ Минрегиона России от 29.12.2011 N 635/8. — Москва, 2012. — 194 с.

4. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. — Режим доступа: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).

5. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52–101–2003). ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. — Москва : ОАО «ЦНИИПромзданий», 2005. — 214 с.

6. Гульванесян, Х. Руководство для проектировщиков к Еврокоду EN 1990. Основы проектирования сооружений / Х. Гульванесян, Ж. - А. Калгаро, М. Голицки; [пер. с англ.]. — Москва : МГСУ, 2011. — 264 с.

7. Биби, Э. В. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2: Проектирование железобетонных конструкций / Э. В. Биби, З. С. Нараян; под ред. Х. Гульванесян; [пер. с англ.] — Москва : МГСУ, 2012. — 292 с.

8. Руководство по конструированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения) / ГПИ Ленингр. Промстройпроект Госстроя СССР, ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. — Москва : Стройиздат, 1978. — 175 с.

9. Проектирование железобетонных конструкций. Справочное пособие / под ред. А. Б. Голышева. 2-е изд. перераб. и дополн. — Киев : Будивельник, 1985г. — 496с.