

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

**А.А. Абросов, А.В. Соснин, О.Н. Куприкова**

*Смоленский филиал Московского государственного университета путей сообщения  
Императора Николая II, г. Смоленск*

На примере двух типоразмеров сечений железобетонных колонн прямоугольного сечения с гибкостью не более 8 рассмотрены некоторые особенности определения предельной продольной силы для случаев больших и малых эксцентриситетов. Для решения задачи применялись результаты натурных статических испытаний А.Г. Комара (Комар А.Г., Дубровин Е.Н., Кержнеренко Б.С., Заленский В.С. Испытания сборных железобетонных конструкций. М.: Высшая школа, 1980) и аналитическая методика, представленная в исследованиях М.С. Торяника (Торяник М.С., Вахненко П.Ф., Фалеев Л.В. и др. Расчёт железобетонных конструкций при сложных деформациях. М.: Стройиздат, 1974). При её реализации в системе компьютерной математики MathCAD учитывались фактические напряжения в растянутой арматуре. Для оценки достоверности полученные результаты сравнивались с результатами численной оценки, выполненной с применением расчётного модуля RCDiagra v.1.

*Ключевые слова: эксцентриситеты приложения продольного усилия, железобетонная колонна прямоугольного сечения, реконструкция, деформационная модель железобетона, натурные испытания.*

### Введение

В практике проектирования при реконструкции или техническом перевооружении существующих зданий возникает необходимость оценки резервов несущей способности железобетонных колонн. Они могут быть выявлены при учёте фактической работы железобетона под нагрузкой с применением в расчётах нелинейных деформационных моделей материалов. Несущая способность колонн малой гибкости определяется значением предельной продольной силы (обозначим её  $N_{пред}$ ) и эксцентриситетами её приложения в двух плоскостях. Значение  $N_{пред}$  возможно определить с применением нормативных, экспериментальных методик и расчётных программ. Авторы предлагают проверить сходимость значения  $N_{пред}$ , вычисленного для прямоугольных железобетонных колонн по различным методикам, с результатами натурных испытаний и уточнить область применения методик при различных эксцентриситетах приложения продольного усилия.

В зависимости от величины эксцентриситета приложения нагрузки выделяют случаи малых и больших эксцентриситетов. Случай малых эксцентриситетов – схема разрушения сечения, при которой выполняется условие:

$$S_b > \zeta S_0, \quad (1)$$

где  $S_b$  и  $S_0$  – статические моменты сжатой зоны бетона и всего сечения элемента относительно оси, проходящей через точку равнодействующей усилий в растянутой арматуре, перпендикулярно силовой линии, а  $\zeta$  – отношение призменной и кубиковой прочности бетона. При несоблюдении условия (1) имеет место случай больших эксцентриситетов. Разделение эксцентриситетов приложения

нагрузок на «большие» и «малые» произведено в большинстве научных работ, посвящённых исследованию напряжённо-деформированного состояния (НДС) нормальных сечений внецентренно сжатых элементов.

Выводы, представленные в статье, следует считать справедливым только для железобетонных колонн прямоугольного сечения с гибкостью не более 8. Статья может оказаться полезной инженерам, занимающихся оценкой категории технического состояния существующих зданий (сооружений) и усилением их конструкций. Авторы рассмотрели алгоритмы, найденные на Интернет-ресурсах в свободном доступе. По указанной причине методики, представленные в работах [1, 2], не рассматривались.

### Основная часть

В соответствии с СП 63.13330.2012 [3] расчёт по прочности сечений колонны, внецентренно сжатой в одной из плоскостей, производится из условия (8.10). Проверка прочности нормальных сечений железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии должна производиться с применением нелинейной деформационной модели сечения по пунктам 8.1.20–8.1.30 СП 63.13330.2012. Данная деформационная модель предполагает разбивку сечения бетонного тела на элементарные участки, в середине которых определяется нормальное напряжение в соответствии с диаграммами состояния бетона. Напряжение в центре тяжести каждого арматурного стержня определяется по двух или трёхлинейной диаграмме состояния арматуры. При этом распределение относительных деформаций бетона по высоте сечения элемента

принимают по линейному закону. Одним из упрощений указанной модели является громоздкость вычислений при мелком разбиении сечения на элементарные участки.

Известен и аналитический метод определения  $N_{пред}$  при заданных эксцентриситетах, реализованный в работе, выполненной под руководством М.С. Торьяника [4, с. 10–43]. Аналитическая методика была апробирована им в ходе натурных испытаний образцов железобетонных колонн на косое внецентренное сжатие. Расхождение теоретической и измеренной разрушающей продольной силы в соответствии с данными табл. 1.8 [4] не превышает 12 %. В зависимости от положения нейтральной оси в сечении по Торьянику выделяются три расчётных случая (рис. 1).

В расчётах учитываются внутренние усилия в бетоне и арматуре в виде сосредоточенных сил, приложенных в точках равнодействующего усилия в сжатой зоне бетона и центре тяжести наиболее сжатых/растянутых участков арматуры. При этом напряжения в условной сжатой зоне бетона считаются равномерно распределёнными по площади и равными значению призматической прочности. На практике в сечении железобетонного элемента при больших и малых (при наличии в сечении растянутой зоны) эксцентриситетах чаще всего реализуются II и III случаи положения нейтральной оси. Разрушающее продольное усилие при этом определяется по формулам (2) и (3) [с. 25; 4]. После умножения на  $R_{пр} \cdot b \cdot h$  выражения (2) и (3) принимают вид:

$$а) \text{ для II случая положения нейтральной оси} \\ N_{II} = 0,5(\xi_1 + \xi_2)R_{пр}bh + R'_{sc}A'_s - R_sA_s; \quad (2)$$

$$б) \text{ для III случая положения нейтральной оси} \\ N_{III} = 0,5(1 + \varphi_2 + \xi_2 - \varphi_2 \xi_2)R_{пр}bh + \\ + R'_{sc}A'_s - R_sA_s. \quad (3)$$

При малых эксцентриситетах, в случае, когда всё сечение находится в состоянии сжатия, разру-

шающее продольное усилие по Торьянику определяется по формуле [4, с. 24]:

$$N = \frac{AR_{пр}bh^2 + R'_{sc}A'_sC}{e_{sm}}, \quad (4)$$

где параметры  $A$  и  $C$  определяются в соответствии с формулами 1.53 и 1.11 [4],  $e_{sm}$  – эксцентриситет приложения нагрузки по силовой линии относительно центра тяжести наименее сжатой арматуры.

Разрушающие натурные испытания серии железобетонных колонн прямоугольного сечения марки К-1 при малых эксцентриситетах проводились научным коллективом под руководством А.Г. Комара [5, с. 148–155]. Размеры испытываемых колонн – 40×40×310 см. Наряду с результатами испытаний, в работе [5] приведены оценки разрушающих продольных усилий по аналитическим формулам. Экспериментальная оценка прочности колонн производилась по величине нагрузки, вызывающей реализацию хотя бы одного из ниже-следующих состояний:

- 1) текучесть арматуры (характеризуется прогибом конструкции на величину, превышающую 1/50 пролёта, или зафиксирована непосредственным измерением деформаций арматурных стержней);
- 2) раздробление бетона от сжатия одновременно с текучестью арматурной стали (характеризуется прогибом конструкции в 1,5 и более раза, превышающим прогиб от контрольной нагрузки по проверке жёсткости при одновременном раскрытии трещин, нормальных к оси элемента шириной  $\geq 1,0$  мм;
- 3) раздробление бетона от сжатия до достижения в арматуре предела текучести (характеризуется прогибом конструкции на величину, менее чем в 1,5 раза превышающую прогиб от нормативной нагрузки и раскрытием трещин шириной  $\leq 1,0$  мм;
- 4) разрыв арматуры;
- 5) выдёргивание арматуры или раскол торцов элемента.

На современном этапе развития вычислитель-

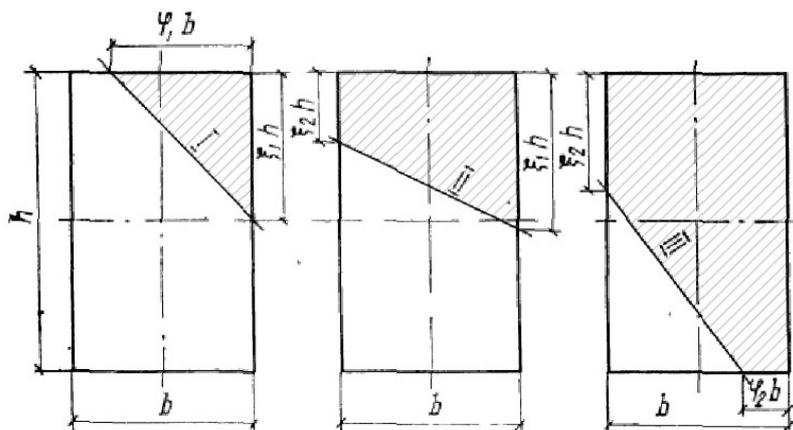


Рис. 1. Расчётные случаи положения нейтральной оси внецентренно сжатого железобетонного элемента по Торьянику; здесь коэффициенты  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  характеризуют размеры сжатой зоны сечения

## Теория расчета строительных конструкций

ных комплексов проверка прочности сечений железобетонных колонн может быть выполнена в расчётной программе *RCDiagra v.1* (далее по тексту – *RCD*), входящей в комплект поставки *Stark ES* (разработчик комплекса – ООО «Еврософт», Москва, 2012). Эта программа позволяет учитывать распределение напряжений в нормальном сечении элемента с последующей интуитивно понятной визуализацией результатов расчёта. Определение предельной продольной силы осуществляется итерационным подбором значения продольного усилия и изгибающих моментов (с последующей проверкой условия (1) из [6]), вызывающих наступление предельного состояния. Отметим, что достоинства и недостатки *RCD* в объёме работы не оценивались.

В случае малых эксцентриситетов, при наличии в сечении зоны растягивающих напряжений и значительного количества арматуры (что характерно для симметрично армированных колонн), разрушение сечения происходит по бетону сжатой зоны. Поэтому в таком предельном состоянии текучесть в растянутой арматуре может и не наступить [7]. Для учёта различных по величине напряжений в центре тяжести сжатой и растянутой арматуры, с целью уточнения формул (2) и (3), в указанном случае авторы предлагают использовать деформационную модель сечения по силовой линии (рис. 2).

Из соотношения прямоугольных треугольников при  $y_a = y_a'$  и  $x_a = x_a'$  получаем:

$$\varepsilon_s' = \frac{\varepsilon_{b,ult}(2\eta + z)}{2\eta + z + \psi}; \quad \varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{b,ult}z}{2\eta + z + \psi}. \quad (5)$$

Тогда в соответствии с двухлинейной диаграммой состояния арматуры получаем:

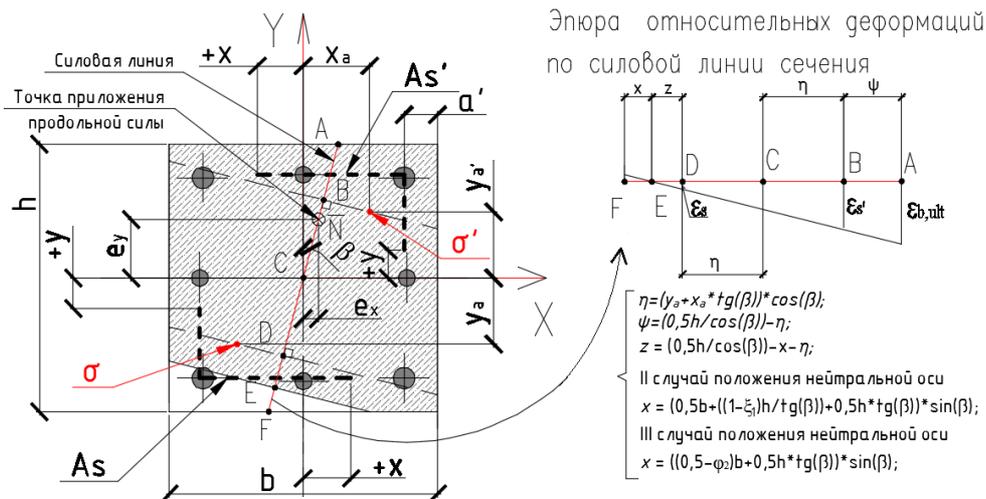


Рис. 2. Эпюра относительных деформаций по силовой линии симметрично армированного сечения для случая малых эксцентриситетов при наличии в сечении растянутой зоны

Примечания: 1. Представленные на рисунке формулы применимы только при  $0 < \beta < \arctan(0,5 \cdot (b/h))$ , поэтому при расчёте сечение требуется ориентировать так, чтобы  $M_y > M_x$ .

2. Утолщённой пунктирной линией обозначена площадь наиболее нагруженной арматуры, учитываемой в расчёте.

$$\sigma = \begin{cases} \text{if } E_s \varepsilon_s < 0 \rightarrow \begin{cases} \text{if } |E_s \varepsilon_s| < |R_s| \rightarrow E_s \varepsilon_s \\ \text{otherwise} \rightarrow R_s \end{cases} \\ \text{if } E_s \varepsilon_s \geq 0 \rightarrow \begin{cases} \text{if } |E_s \varepsilon_s| < |R_{sc}| \rightarrow E_s \varepsilon_s \\ \text{otherwise} \rightarrow R_{sc} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma' = \begin{cases} |E_s \varepsilon_s'| < |R_{sc}| \rightarrow E_s \varepsilon_s' \\ \text{otherwise} \rightarrow R_{sc} \end{cases} \quad (7)$$

Для определения разрушающего продольного усилия в случае малых эксцентриситетов, при наличии в сечении растянутой зоны, авторы предлагают применять следующие выражения:

а) для II случая положения нейтральной оси

$$N_{II} = 0,5(\xi_1 + \xi_2) R_b b h + \sigma' A_s' + \sigma A_s; \quad (8)$$

б) для III случая положения нейтральной оси

$$N_{III} = 0,5(1 + \varphi_2 + \xi_2 - \varphi_2 \xi_2) R_b b h + \sigma' A_s' + \sigma A_s. \quad (9)$$

Краткая характеристика и особенности всех применяемых методик приведена в табл. 1.

Проверочные расчёты произведены по вышеуказанным методикам при больших и малых эксцентриситетах приложения нагрузки для серии экспериментальных колонн типа К-1 (частный пример № 1) и монолитной колонны многоэтажного жилого здания сечением 60×60 см (частный пример № 2). В частном примере № 1 эксцентриситеты продольных усилий (для случая малых эксцентриситетов при отсутствии в сечении растянутой зоны) приняты по таблице 46 [5]. В остальных случаях эксцентриситеты приложения продольной силы получены путём деления изгибающего момента в каждом из направлений на продольное усилие. В частном примере № 2 эксцентриситеты приложения продольной силы для всех расчётных случаев получены путём деления изги-

бающего момента в каждом из направлений на продольное усилие, но не меньше значения случайного эксцентриситета (см. п. 7.1.7 [3]). Расчётные значения эксцентриситетов приведены в табл. 2.

С целью сравнения предельных продольных усилий, полученных по всем вышеуказанным методикам с *RCD*, для монолитной колонны сечени-

ем 60×60 см были произведены расчёты для различных эксцентриситетов  $e_x$  и  $e_y$ . При этом приняты: а) постоянное в ходе расчёта соотношение  $e_y=2,4e_x$ ; б) начальные значения эксцентриситетов  $e_y=2,4$  см,  $e_x=1$  см; конечные – 28 см и 12 см соответственно. Результаты расчётов приведены на рис. 5.

Таблица 1

Методики определения  $N_{пред}$  для прямоугольных железобетонных колонн, используемые в настоящем исследовании

№ п/п	Наименование методики	Особенности рассматриваемой методики	Источник
1	Натурный эксперимент А.Г. Комара	Выполнено натурное испытание трёх образцов железобетонных колонн марки К-1 на испытательном прессе. Внешняя нагрузка прикладывалась к образцам по центру сечения. Закрепление концов колонн на испытательном стенде – упруго податливое. Продольные деформации опытных образцов колонн измеряли в трёх сечениях по высоте тензорезисторами, а в середине колонн – тензорезисторами и индикаторами часового типа (рис. 88 [5]). Анализ показаний приборов указывает на наличие «случайных» эксцентриситетов, приведённых в табл. 46 [5]. В ходе испытания образцы получили характерное разрушение граней сечения в верхней трети длины колонны	[5, с. 148]
2	Выражение А.Г. Комара	Представлена аналитическая формула для определения несущей способности колонн с учётом двух эксцентриситетов в направлении главных осей при косом внецентренном сжатии	[5, с. 154]
3	Методика М.С. Торьяника	Разрушающее продольное усилие в нормальном сечении железобетонной колонны определяется по аналитическим формулам (2)–(4) в зависимости от величины эксцентриситетов и наличия в сечении растянутой зоны бетона	[4]
4	Методика М.С. Торьяника с учётом предложений авторов статьи	Разрушающее продольное усилие в нормальном сечении железобетонной колонны определяется по аналитическим выражениям (8), (9) для случая малых эксцентриситетов при наличии в сечении растянутой зоны бетона. Вышеуказанные формулы получены с применением плоской деформационной модели сечения и учитывают фактические напряжения в точке равнодействующего усилия в растянутой арматуре	
5	Оценка в <i>RCDiagra v.1</i>	В <i>RCD</i> применялись следующие критерии наступления предельного состояния: 1 критерий – текучесть хотя бы в одном арматурном стержне; 2 критерий – текучесть более чем в 50 % стержней сжатой/растянутой арматуры и/или разрушение бетона сжатой зоны. При этом использовалась криволинейная диаграмма деформирования бетона с учётом работы при растяжении и двухлинейная диаграмма состояния арматуры	[6]

Таблица 2

Расчётные значения эксцентриситетов приложения продольных усилий в нормальных сечениях исследуемых колонн

Расчётный случай эксцентриситетов приложения $N_{пред}$	Значения эксцентриситетов приложения продольной силы, см			
	<sup>4</sup> Колонна К-1 (40×40 см)			<sup>5</sup> Монолитная колонна сеч. 60×60 см
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	
<sup>1</sup> $e_{min1}$ (1 случай)	$e_x = 4,0$	$e_y = 1,2$	$e_x = 1; e_y = 2,0$	$e_x = 2,0; e_y = 4,8$
<sup>2</sup> $e_{min2}$ (2 случай)	$e_x = 9,0$	$e_y = 8,7$	$e_x = 3,1; e_y = 6,0$	$e_x = 4,6; e_y = 11,0$
<sup>3</sup> $e_{max}$ (3 случай)	$e_x = 15,0$	$e_y = 17,0$	$e_x = 15,0; e_y = 6,0$	$e_x = 7,6; e_y = 22,0$

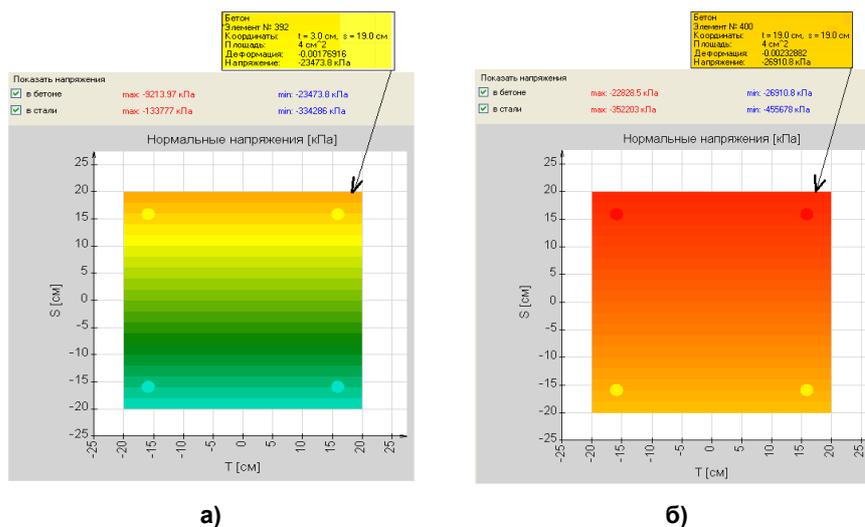
Примечания: 1.  $e_{min1}$  – случай малых эксцентриситетов приложения  $N_{пред}$  (в сечении отсутствует растянутая зона бетона), рис. 3 для колонн марки К-1.

2.  $e_{min2}$  – то же (в сечении присутствует растянутая зона бетона).

3.  $e_{max}$  – случай больших эксцентриситетов приложения  $N_{пред}$ .

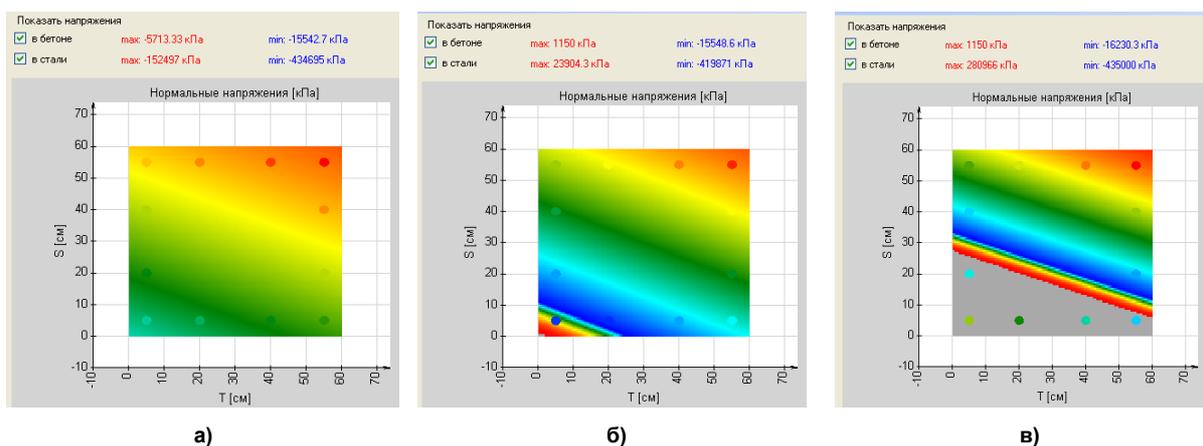
4. Маркировка колонн принята по исследованиям А.Г. Комара [5];

5. НДС монолитной колонны см. на рис. 4.



Примечание: при  $N=650$  тс;  $M_y=13$  тс·м;  $M_x=6,5$  тс·м для колонны К-I № 3 в RCD получено сообщение о разрушении сечения

**Рис. 3.** Напряжённо-деформированное состояние нормальных сечений колонн марки К-I в RCD при действии экспериментальных нагрузок (см. 1 случай в табл. 2):  
 а) НДС в сечении колонны К-I № 1 при  $N = 325$  тс;  $M_y = 13$  тс·м;  
 б) НДС в сечении колонны К-I № 2 при  $N = 478$  тс;  $M_y = 5,74$  тс·м



**Рис. 4.** Напряжённо-деформированное состояние нормальных сечений монолитной колонны сеч. 60×60 см в RCD при эксцентриситетах  $e_{min1}$ ,  $e_{min2}$ ,  $e_{max}$  (табл. 2):  
 а) НДС в сечении монолитной колонны при  $N = 659$  тс;  $M_y = 31,6$  тс·м;  $M_x = 13,2$  тс·м;  
 б) НДС в сечении монолитной колонны при  $N = 459$  тс;  $M_y = 50,5$  тс·м;  $M_x = 21,1$  тс·м;  
 в) НДС в сечении монолитной колонны при  $N = 255$  тс;  $M_y = 56,1$  тс·м;  $M_x = 19,4$  тс·м

Случаи больших и малых эксцентриситетов разделяются в [8] с помощью критерия относительного граничного эксцентриситета, определяемого аналитическим выражением:

$$\frac{e_{0R}}{h} = 0,004 \dots 0,245, \quad (10)$$

где  $e_{0R}$  – эксцентриситет усилия относительно оси симметрии бетонного сечения (без учёта продольного изгиба оси элемента),  $h$  – высота прямоугольного сечения железобетонного элемента. При этом в [8] отмечается, что вышеуказанная величина зависит от деформативно-прочностных и геометрических характеристик сечения.

**Частный пример № 1.** Сборные железобетонные колонны марки К-I сечением 40×40 см.

Исходные данные:

– бетон тяжёлый (проектная марка М400), коэффициенты условий работы бетона и арматуры приняты равными единице ( $\gamma_{b1}=1,0$ ;  $\gamma_{s1}=1,0$ );

– в качестве расчётных сопротивлений бетона приняты экспериментальные значения призмной прочности бетона из табл. 45 [5] (с целью исключения расхождений экспериментальных и расчётных значений разрушающей продольной силы, обусловленных отклонением расчётного сопротивления бетона от среднего значения фактической призмной прочности образцов в сторону уменьшения);

– расчётные сопротивления арматуры приняты по табл. 45 [5], продольное армирование каждого из образцов колонн – 4Ø22 мм; поперечная арматура Ø12 с шагом 40 см по длине элемента;

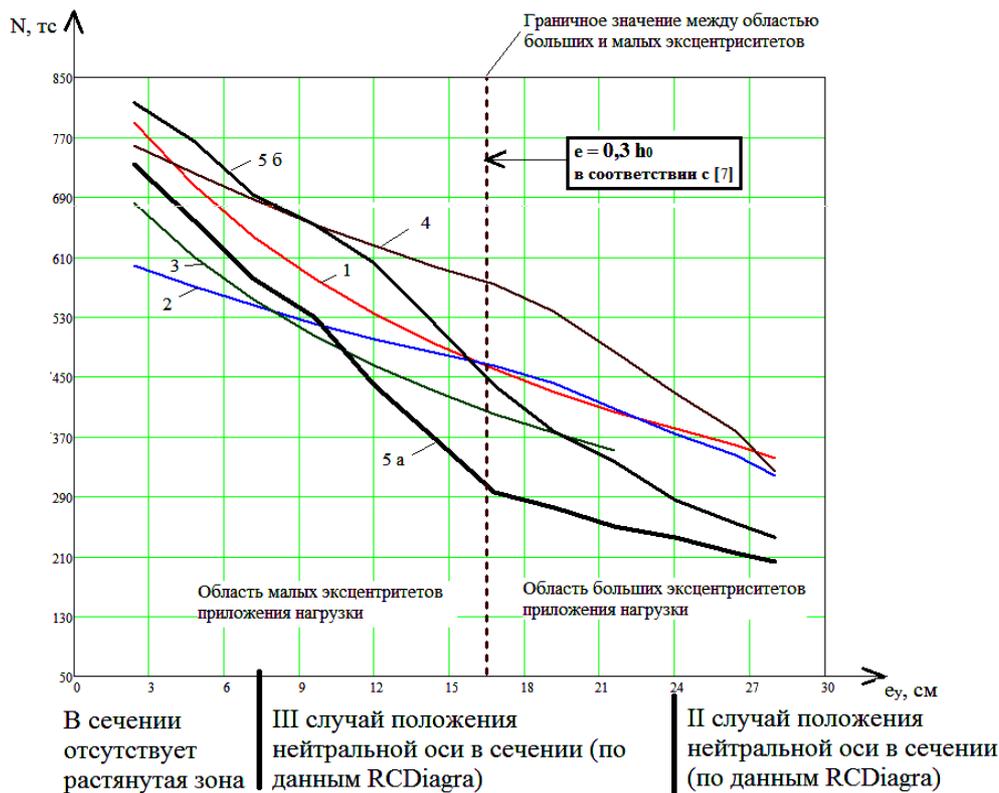


Рис. 5. График зависимости формата « $N_{пред.} - e_y$ » для монолитной колонны сеч. 60×60 см: 1 – по аналитической формуле А.Г. Комара [с. 154; 5]; 2 – по формулам (2) и (3) М.С. Торяника; 3 – по формуле (4) М.С. Торяника; 4 – по методике М.С. Торяника с учётом предложений авторов статьи по формулам (8) и (9); 5а – при расчёте в RCD с применением 1 критерия наступления предельного состояния; 5б – при расчёте в RCD с применением 2 критерия наступления предельного состояния

– расчётные длины колонн –  $l_{0x} = l_{0y} = 3,1$  м, коэффициент приведённой длины принят равным единице.

**Частный пример № 2.** Монолитная колонна прямоугольного сечения 60×60 см. Исходные данные:

- бетон класса В30,  $R_b = 17$  МПа (принято по табл. 6.8 [3] в связи с отсутствием фактического значения призмочной прочности бетона для данной колонны),  $\gamma_{b1} = 1,0$ ;  $\gamma_{s1} = 1,0$ ;
- арматура класса А500С (12 Ø 28) по СТО АСЧМ 7-93,  $R_s = R_{sc} = 435$  МПа;
- фактическая длина колонны – 1,95 м; коэффициент приведённой длины принят равным 0,8.

Результаты расчётов предельных продольных усилий для рассматриваемых колонн прямоугольного сечения сведены в табл. 3.

Расхождение экспериментальных и расчётных значений  $N_{пред.}$  для серии железобетонных колонн марки К-1, испытанных А.Г. Комаром [5, с. 148–155], может быть обусловлено следующими факторами:

– случайным характером распределения внутренних дефектов структуры бетона;

– недостаточностью поперечного армирования испытываемых колонн;

– сопряжением колонн с испытательным стендом;

– отсутствием в ходе эксперимента единого визуального или инструментально измеренного признака наступления первого предельного состояния для данных колонн.

### Выводы

1. Из расчётов первого частного примера установлено, что предельные продольные усилия, вычисленные по формулам М.С. Торяника [4] для случая малых эксцентриситетов не превышают значений, полученных из натуральных экспериментов А.Г. Комара [5], и результатов расчётов в RCDiagra при обеспечении 1 рассмотренного критерия предельного состояния (п. 5 табл. 1).

2. Результаты расчётов второго примера по формуле, предложенной авторами статьи (п. 4 табл. 1) для случая малых эксцентриситетов, на начальной стадии формирования зоны растягивающих напряжений в сечении хорошо согласуются с результатами RCDiagra.

Результаты расчётов  $N_{пред}$

Расч. сл. для «е»	Значение предельного продольного усилия, тс																			
	Пример № 1 (Колонна К-I 40×40 см)															Пример № 2 (монолитная колонна сеч. 60×60 см)				
	Исследуемый образец № 1					Исследуемый образец № 2					Исследуемый образец № 3									
	Методики определения $N_{пред}$																			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	325	387	314	–	420	478	491	403	–	490	650	488	408	–	515	–	705	611	–	659
$^1K$	1	1,19	0,97	–	1,29	1	1,03	0,84	–	1,03	1	0,75	0,63	–	0,79	–	1,07	0,93	–	1
2	–	309	275	293	250	–	342	304	324	296	–	369	368	395	326	–	553	509	636	459
$K$	–	1,24	1,10	1,17	1	–	1,15	1,03	1,10	1	–	1,13	1,13	1,21	1	–	1,2	1,11	1,38	1
3	–	249	203	–	112	–	255	191	–	92	–	240	192	–	92	–	411	404	–	255
$K$	–	2,23	1,82	–	1	–	2,78	2,07	–	1	–	2,6	2,08	–	1	–	1,61	1,58	–	1

Примечание.

$K=N_{теор}/N_{эталон}$  (д.е.) – коэффициент использования сечения, равный отношению теоретического значения разрушающего продольного усилия к эталонному.

В качестве эталонных значений приняты:

для колонн марки К-I при эксцентриситетах  $e_{min1}$  – экспериментальные значения  $N_{пред}$ ;

для колонн марки К-I при эксцентриситетах  $e_{min2}, e_{max}$  – значения, полученные в RCD;

для монолитной колонны 60×60 при эксцентриситетах  $e_{min1}, e_{min2}, e_{max}$  – расчётные значения, полученные в RCD.

3. Результаты расчётов по формуле (4) и в RCDiagra (при рассмотрении 2 критерия предельного состояния) имеют хорошую сходимость при эксцентриситетах, близких к граничному значению, указанному в работе [7]. В случае больших эксцентриситетов, предельные продольные усилия, вычисленные по формулам, представленным в работах А.Г. Комара и М.С. Торьяника, при обеспечении 1 и 2 критериев предельного состояния оказываются завышенными по сравнению с результатами RCDiagra. Их сходимость с экспериментальными значениями при больших эксцентриситетах приложения нагрузок не удалось оценить из-за отсутствия в имеющейся у авторов литературе результатов испытаний железобетонных колонн для указанного случая. По той же причине для случая больших эксцентриситетов применять выражения (8) и (9) пока не рекомендуется.

**Условные обозначения, принятые в статье:**

$b, h$  – геометрические размеры сечения;

$\xi_1 \cdot h, \xi_2 \cdot h, \varphi_1 \cdot b, \varphi_2 \cdot b$  – размеры участков сжатой зоны бетона;

$x, z, \eta, \psi$  – размеры участков силовой линии сечения;

$\epsilon_{b,ult}$  – предельная относительная деформация бетона для крайнего сжатого волокна в соответствии с СП 63.13330.2012;

$y_a, x_a$  – расстояния от центра координат до точек равнодействующего усилия в растянутой (наименее сжатой) арматуре по осям  $Y$  и  $X$  соответственно;

$\epsilon_s', \epsilon_s$  – относительные деформации в точках равнодействующего усилия в сжатой и растянутой (наименее сжатой) арматуре;

$E_s$  – модуль упругости стали;

$R_s, R_{sc}$  – расчётные сопротивления стали растяжению, сжатию;

$e_{0R}$  – эксцентриситет усилия относительно оси симметрии бетонного сечения (без учёта продольного изгиба оси элемента).

### Литература

1. Чистяков, Е.А. Основы теории, методы расчёта и экспериментальные исследования несущей способности сжатых железобетонных элементов при статическом нагружении: дис. ... д-ра техн. наук / Е.А. Чистяков. – М., НИИЖБ, 1988. – 638 с.

2. Беглов, А.Д. Теория расчёта железобетонных конструкций на прочность и устойчивость. Современные нормы и евростандарты / А.Д. Беглов, Р.С. Санжаровский. – СПб.; М.: АСВ, 2006. – 221 с.

3. СП 63.13330.2012. СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: ЦПП, 2012. – 147 с.

4. Расчёт железобетонных конструкций при сложных деформациях / М.С. Торьяник, П.Ф. Вахненко, Л.В. Фалеев и др.; под ред. М.С. Торьяника. – М.: Стройиздат, 1974. – 297 с.

5. Испытания сборных железобетонных конструкций / А.Г. Комар, Е.Н. Дубровин, Б.С. Керженеренко, В.С. Заленский. – М.: Высшая школа, 1980. – 269 с.

6. Симбиркин, В.Н. К расчету напряженно-деформированного состояния и прочности элементов железобетонных конструкций по нормальным сечениям / В.Н. Симбиркин, В.В. Матковский // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2010. – № 4. – С. 20–26.

7. Старишко, И.Н. Варианты и случаи, предлагаемые для расчётов внецентренно сжатых

элементов / И.Н. Старишко // *Бетон и железобетон*. – 2012. – № 3. – С. 14–19.

8. Никулин, А.И. О разделении расчетов прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов на случаи малых и больших эксцентриситетов / А.И. Никулин // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2006. – № 4. – С. 16–20.

**Абросов Александр Александрович**, ассистент кафедры зданий и сооружений на транспорте, Смоленский филиал Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (Смоленск), ntc-nbs@yandex.ru

**Соснин Алексей Викторович**, старший преподаватель кафедры зданий и сооружений на транспорте, Смоленский филиал Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (Смоленск), ntc-nbs@yandex.ru

**Куприкова Ольга Николаевна**, канд. пед. наук, доцент кафедры высшей математики и естественных наук, Смоленский филиал Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (Смоленск), ntc-nbs@yandex.ru

Поступила в редакцию 15 апреля 2017 г.

DOI: 10.14529/build170303

## THE ESTIMATION OF ULTIMATE NORMAL FORCE FOR RECTANGULAR RC COLUMNS

**A.A. Abrosov, A.V. Sosnin, O.N. Kuprikova**,  
*Emperor Nicholas II Moscow State University of Railway Engineering (Smolensk Branch),  
Smolensk, Russian Federation*  
ntc-nbs@yandex.ru

By the example of two sections sizes of rectangular RC columns with a flexibility of not more than 8, some features for the estimation of an ultimate normal force for the cases of large and small eccentricities are considered by the authors. To solve the problem, the results of full-scale static tests by A.G. Komar and an analytical technique presented in the research of M.S. Toryanik are used. With its implementation in the software MathCAD true stresses of tensile reinforcement are taken into account. For confidence estimation the results obtained are compared with the results of numerical evaluation performed with the use of RCDiagra v.1 software.

*Keywords: eccentricities of normal force application, rectangular RC column, reconstruction, RC deformation model, full-scale tests.*

### References

1. Chistjakov E.A. *Osnovy teorii, metody raschjota i jeksperimental'nye issledovanija nesushhej sposobnosti szhatyh zhelezobetonnyh jelementov pri staticheskom nagruzenii*. Doct. diss. [Fundamentals of the Theory, Calculation Methods and Experimental Studies of the Load-Bearing Capacity of Compressed Reinforced Concrete Elements under Static Loading. Doct. sci. diss]. Moscow, 1988. 638 p.

2. Beglov A.D., Sanzharovskij R.S. *Teorija raschjota zhelezobetonnyh konstrukcij na prochnost' i ustojchivost'. Sovremennye normy i evrostandarty* [The Theory Calculation of Reinforced Concrete Structures for Strength and Stability. Modern Norms and European Standards]. Moscow, ASV Publ., 2006. 221 p.

3. SP 63.13330.2012. SNiP 52-01-2003. *Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozenija* [Concrete and Reinforced Concrete Structures. The Main Provisions]. Moscow, 2012. 147 p.

4. Torjanik M.S., Vahnenko P.F., Faleev L.V., Serdjuk L.I., Kuz'menko A.M., Dolja K.H., Rudenko Ju.M. *Raschjot zhelezobetonnyh konstrukcij pri slozhnyh deformacijah* [Testing of Precast Concrete Structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1974. 297 p.

5. Komar A.G., Dubrovii E.N., Kerzhnerenko B.S., Zalenskij V.S. *Ispytanija sbornyh zhelezobetonnyh konstrukcij* [The Calculation of Reinforced Concrete Structures under the Action of Complex Deformations]. Moscow, High School Publ., 1980. 269 p.

6. Simbirkin V.N., Matkovskij V.V. [To the Calculation of the Stress-Strain State and Strength of Elements of Reinforced Concrete Structures on Normal Cross-Sections]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2010, no. 4, pp. 20–26 (in Russ.).

7. Starishko I.N. [Variants and Cases Proposed for Calculations of Eccentrically Compressed Elements]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2012, no. 3, pp. 14–19 (in Russ.).

8. Nikulin A.I. [On the Division of Strength Calculations of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements in Cases of Small and Large Eccentricities]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2006, no. 4, pp. 16–20 (in Russ.).

*Received 15 April 2017*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Абросов, А.А. К вопросу оценки предельной продольной силы для железобетонных колонн прямоугольного сечения / А.А. Абросов, А.В. Соснин, О.Н. Куприкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 18–26. DOI: 10.14529/build170303

### FOR CITATION

Abrosov A.A., Sosnin A.V., Kuprikova O.N. The Estimation of Ultimate Normal Force for Rectangular RC Columns. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2017, vol. 17, no. 3, pp. 18–26. (in Russ.). DOI: 10.14529/build170303