

УДК 624.012.85

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ ПО ДЕЙСТВУЮЩИМ ТНПА РБ И РАЗНЫХ СТРАН

А.Е. Шилов<sup>1</sup>, Е.Г. Чечуха, О.А. Янушкевич

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь

e-mail: <sup>1</sup> [shilov@bnty.by](mailto:shilov@bnty.by)

*Расчёт железобетонных колонн напрямую зависит от принятой конструктивной схемы здания, т. е. типа каркаса, в свою очередь в зависимости от которого назначаются все параметры колонн, их расчётные длины, фактические и предельные гибкости. Определение типа каркаса, как и подходы, по которым данный тип каркаса относится к тому или иному виду, различаются по нормам разных стран. При проектировании зданий и сооружений расчет на прочность является недостаточным, чтобы судить об их надежности. Чаще решающим фактором, определяющим несущую способность, становится возможность потери устойчивости сооружения в целом или же отдельных его элементов.*

**Ключевые слова:** железобетонная колонна, потеря устойчивости, гибкость, минимальный процент армирования, конструктивные требования.

## FEATURES OF CALCULATION AND CONSTRUCTION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS OF FRAME BUILDINGS ACCORDING TO EXISTING TNLA RB FROM DIFFERENT COUNTRIES

A. Shilov<sup>1</sup>, E. Chechukha, O. Yanushkevich

Belarusian National Technical University, Republic of Belarus

e-mail: <sup>1</sup> [shilov@bnty.by](mailto:shilov@bnty.by)

*The calculation of reinforced concrete columns directly depends on the adopted structural scheme of the building, that is, the type of frame, in turn, depending on which all the parameters of the columns, their calculated lengths, actual and ultimate slenderness are assigned. The definition of the type of frame, as well as the approaches according to which this type of frame belongs to one or another type, differ according to the norms of different countries. When designing buildings and structures, the strength calculation is insufficient to judge their reliability. More often, the decisive factor determining the bearing capacity is the possibility of loss of stability of the structure as a whole or of its individual elements.*

**Keywords:** reinforced concrete column, buckling, flexibility, minimum percentage of reinforcement, design requirements.

В настоящее время в РБ большинство каркасных зданий возводится в железобетоне. Одними из основных несущих конструкций являются колонны. При проектировании зданий и сооружений расчет на прочность является недостаточным, чтобы судить об их надежности. Чаще решающим фактором, определяющим несущую способность, становится возможность потери устойчивости сооружения в целом или же отдельных его элементов.

Железобетонная колонна является элементом пространственной системы каркаса здания, при деформировании которого проявляется физическая нелинейность, обусловленная неупругими деформациями бетона и развитием трещин, а также геометрическая нелинейность, характеризующаяся влиянием продольных сил на деформации, а, следовательно, и на возникающие усилия в системе. Эффект возрастания усилий за счет геометрической нелинейности конструкции, называют эффектами второго порядка, или Р-Δ эффектами.

Расчёт железобетонных колонн напрямую зависит от принятой конструктивной схемы здания, т. е. типа каркаса, в зависимости от которого назначаются все параметры колонн, их расчётные длины, фактические и предельные гибкости.

Определение типа каркаса, как и подходы, по которым данный тип каркаса относится к тому или иному виду, различаются по нормам разных стран.

Различают следующие типы каркасов в зависимости от принятого ТНПА:

1. Начиная с 16.09.2020 г. на территории РБ утверждены и введены в действие постановлением Министерства архитектуры и строительства № 56 строительные правила СП 5.03.01-2020 “Бетонные и железобетонные конструкции” [1]. Нормы введены впервые с отменой на территории РБ СНБ 5.03.01-02. Многие положения наших национальных норм гармонизированы с Еврокодом-2.

При этом отдельные положения, в частности по определению коэффициента продольного изгиба, приняты по нормам бывшего СССР и действующим нормам РФ. Подход к определению типа каркаса аналогичен положениям Еврокода-2. [2]

2. В ТКП EN 1992-1-1-2009\* [2] приняты следующие типы каркасов:

– раскреплённые элементы или системы: конструктивные элементы или подсистемы, для которых при расчёте и проектировании принято, что они не способствуют общей горизонтальной устойчивости конструкции;

– раскрепляющие элементы и системы: конструктивные элементы или подсистемы, для которых при расчёте и проектировании принято, что они способствуют общей горизонтальной устойчивости конструкции.

Рекомендации (численные эквиваленты), согласно которым тот или иной элемент следует относить к раскреплённым или раскрепляющим элементам, не даны. Таким образом, выбор той или иной системы полностью основан на предположениях и допущениях, закладываемых проектировщиком в работу каркаса.

3. В СП 63.13330.2018 [3] нет информации по назначению типа или элементов каркаса.

4. В американских нормах ACI 318-95 [4] различают:

– несмещаемые каркасы – каркасы, имеющие связевые элементы, или без них, в которых влияние перемещения узлов на расчетные моменты и усилия незначительно (не превышает 5%);

– смещаемые каркасы – каркасы, которые не являются несмещаемыми.

Согласно [4], перед тем, как приступить к расчёту колонны, следует в первую очередь определить тип каркаса.

Раньше каркасные здания представлялись в виде пилонов – диафрагм с примыкающими колоннами, а также отдельных колонн, объединённых жёсткими дисками перекрытий. В качестве обычных упрощений принималось, что диски перекрытий абсолютно жёсткие; деформации сдвига в швах между сборными конструкциями учитывались приближёнными коэффициентами; в открытых диафрагмах крутильная жёсткость не учитывалась, а в закрытых – принималось, что жёсткость при стеснённом кручении мала, по сравнению с таковой при свободном кручении; масса здания равномерно распределялась по объёму и т.д.

В работе [5] отмечается, что сегодня в практике проектирования стали использовать программные комплексы, реализующие конечно-элементные модели, которые позволяют с единых методологических позиций рассчитывать здания разнообразных конструктивных схем, состоящие из стержневых и плоских элементов, сгруппированных в любых сочетаниях. Сейчас имеется возможность задавать достаточно сложные конфигурации и схемы зданий, моделировать различные сопряжения элементов с применением сложных пространственных шарниров и связей и т.д. При этом, однако, значительно усложнилась подготовка исходных данных и соответственно потребовалась высокая квалификация пользователей, повышенные требования к пониманию ими характера работы конструкций и узлов под нагрузкой и теоретических расчётных положений, положенных в основу программных комплексов. К сожалению, трудно выявить ошибки в форми-

ровании расчётных схем, связей и т.п., несмотря на большое количество вспомогательных инструкций и руководств, но эти ошибки могут привести к аварийным ситуациям на объектах, о чём постоянно напоминают, как авторы программ, так и реальная практика проектирования и эксплуатации зданий и сооружений.

Методика необходимости и учёта эффектов второго порядка при расчёте сжатых железобетонных элементов по нормам Республики Беларусь, Российской Федерации, Европейского союза и нормам США имеет свои особенности и различия. На сегодняшний день нет необходимой статистики результатов применения методов учёта эффектов второго порядка при расчёте сжатых железобетонных элементов по нормам Республики Беларусь, Российской Федерации, Европейского союза и США их анализу.

В работах [10], [11] был выполнен сравнительный анализ результатов определения необходимости учёта продольного изгиба при одних и тех же исходных характеристиках и параметрах колонн по нормам разных стран. Результат оказался в определенных ситуациях противоречивым, что в большинстве случаев было связано с определением критерия предельной гибкости  $\lambda_{lim}$  по нормам РБ, РФ и Евросоюза.

Согласно п. 5.8.3.1 [2], эффекты второго порядка могут не учитываться, если фактическая гибкость  $\lambda$  меньше предельного значения  $\lambda_{lim}$ :

$$\lambda_{lim} = \frac{20ABC}{\sqrt{n}}$$

где:

$$n = \frac{N_{ED}}{A_c \cdot f_{CD}}$$

$n$  – относительное продольное усилие.

$$1. \quad A = \frac{1}{1 + 0.2\varphi_{ef}}, \text{ рекомендационное значение } A=0,7;$$

где  $\varphi_{ef}$  – эффективный коэффициент ползучести.

Уточнение определения коэффициента ползучести по номограммам [2], либо по таблице 4.1.2 [1] может привести к изменению коэффициента  $A$  в пределах до 10 %.

$$2. \quad C = 1,7 - r_m, \text{ рекомендационное значение } C=0,7;$$

где  $r_m$  – отношение моментов;

$$r_m = \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$M_{01}, M_{02}$  — моменты на концах элемента с учетом эффектов первого порядка;

По приведенной выше формуле, можно сделать вывод о том, что коэффициент  $C$  имеет значительный диапазон изменения, а именно от 0,7 до 2,7. Это связано с тем что, если моменты на концах элемента  $M_{01}, M_{02}$  дают растяжение с одной и той же стороны, то  $r_m$  принимается как положительное значение т. е. в этом случае  $C \leq 1,7$ , если растяжение с разных сторон, то как отрицательное, при этом  $C > 1,7$

$$3. \quad B = \sqrt{1 + 2\omega}; \text{ рекомендационное значение } B=1,1;$$

где  $\omega$  – механический коэффициент армирования;

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Величина  $\lambda_{lim}$  зависит от коэффициентов  $A, B, C$ , определение которых расчетом является относительно трудоёмкой, но реализуемой задачей.

Следует отметить что рекомендации по определению  $\lambda_{lim}$  в источнике [1] аналогичны положениям источника [2]. Разница лишь в условных обозначениях коэффициентов.

В работе [9] выполнен анализ критерия гибкости  $\lambda_{lim}$ , определенного по назначаемым (рекомендационным) значениям коэффициентов **A, B, C** и по расчету в соответствии с рекомендациями [2]. В результате было установлено, что возможны “переходные” ситуации в необходимости учета продольного изгиба, в которых целесообразен именно “расчетный” вариант определения **A, B, C**, а не рекомендационный. В качестве примера на рисунке 1 приведена одна из гистограмм изменения величин  $\lambda_{lim}$  и  $\lambda$  (фактическое значение).

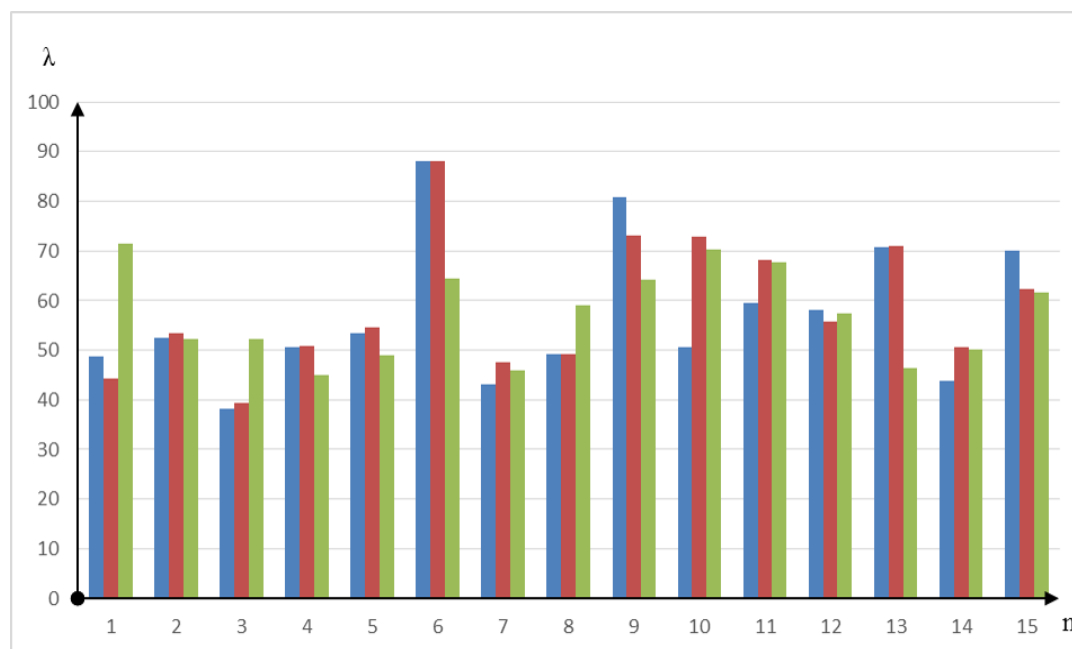


Рисунок 1. – Гистограмма изменения значений  $\lambda_{lim}$  и  $\lambda$  (фактическое значение) для колонн, где  $n$  - варианты исходных данных;  $\lambda_{lim}$  - величина предельной гибкости с учетом вычисления всех коэффициентов (A, B,C);  $\lambda_{lim}$  (при A=0,7; B=1,1) – величина предельной гибкости с учетом рекомендуемых значений коэффициентов A, B

При этом выявлено, что основное влияние на изменение величины  $\lambda_{lim}$  оказывает уточнение коэффициента **B**, зависящего от механического коэффициента армирования  $\omega$  (рисунок 2), т.е. от предварительно назначаемой площади продольной арматуры колонны.

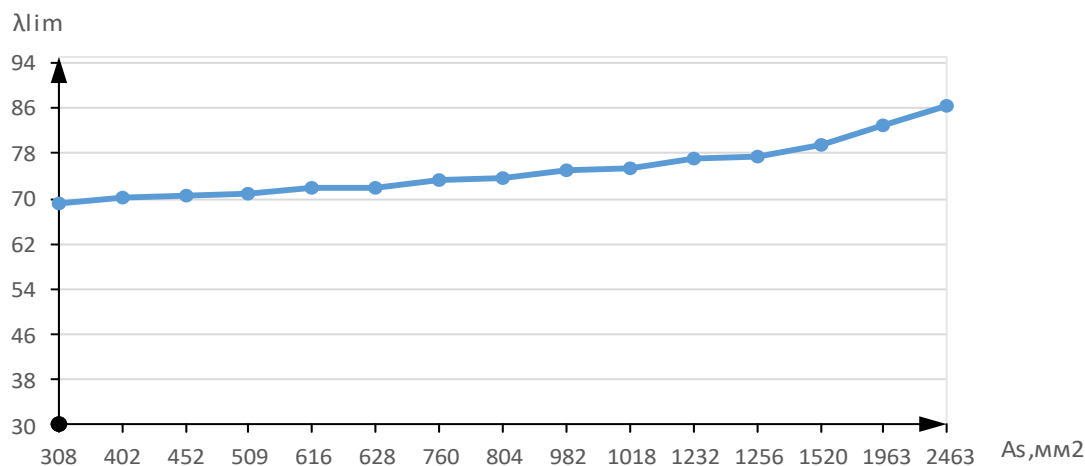


Рисунок 2. – График зависимости предельной гибкости  $\lambda_{lim}$  от  $A_s$

Назначение  $A_s$  по рекомендуемым минимальным значениям, т.е. по  $A_{s,min}$ , по нормам [1], [2], [3] во всех выполненных расчетных ситуациях оказалось неприемлемым. Оптимальный результат был получен только в результате определенного количества итераций по назначению  $A_s$ .

Для того, чтобы уменьшить количество таких итераций, многие источники предлагают назначение площади арматуры колонн по графическим зависимостям. В работе [9] были проанализированы предложения и рекомендации различных источников, при этом было выявлено, что для принятых исходных данных колонн наиболее оптимальная "сходимость" достигалась при использовании графических зависимостей представленных на рисунках 3-5.

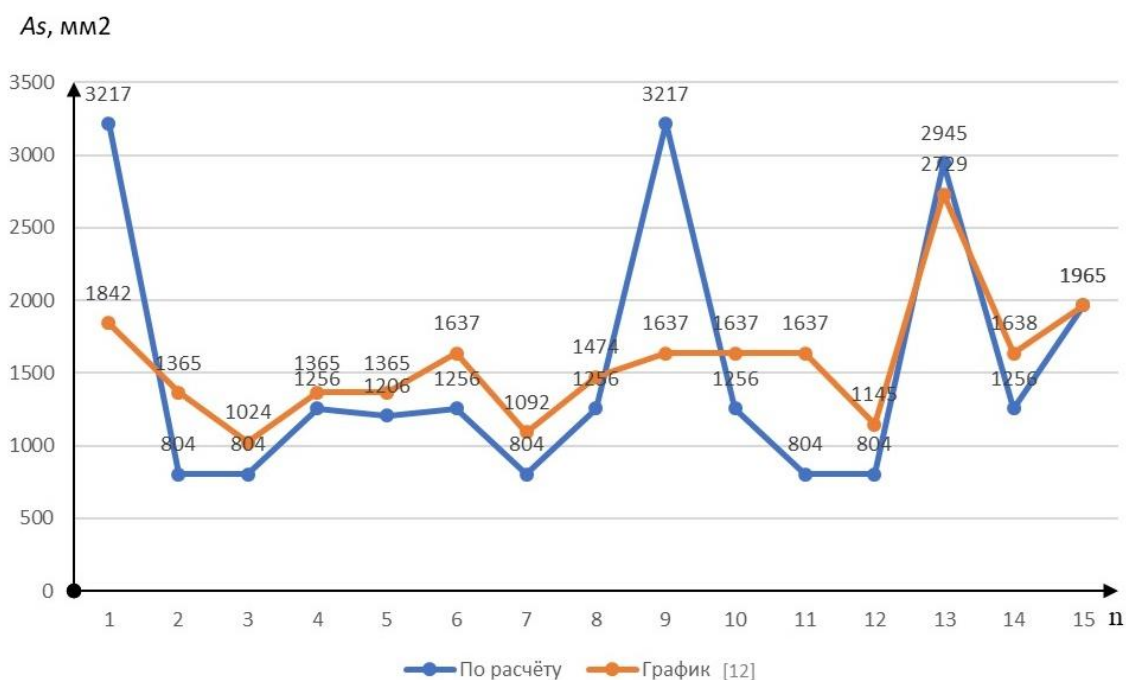


Рисунок 3. – График изменения значений продольного армирования  $A_s$  по графику из источника [12], где  $n$  - варианты исходных данных

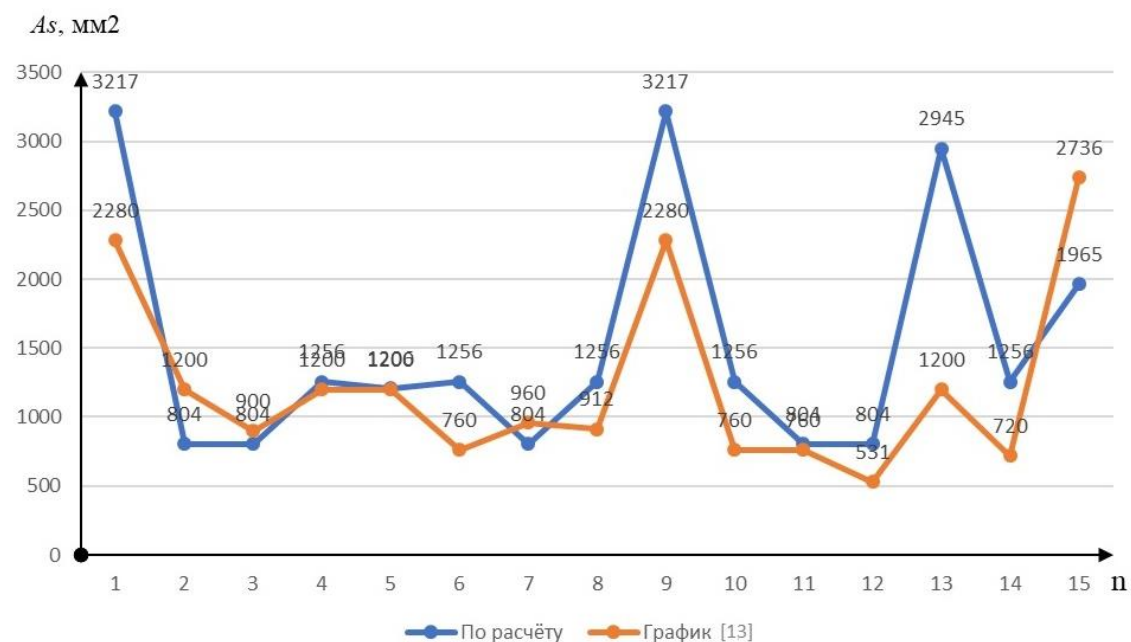


Рисунок 4. – График изменения значений продольного расчетного армирования  $A_s$  части по графику из источника [13], где  $n$  - варианты исходных данных

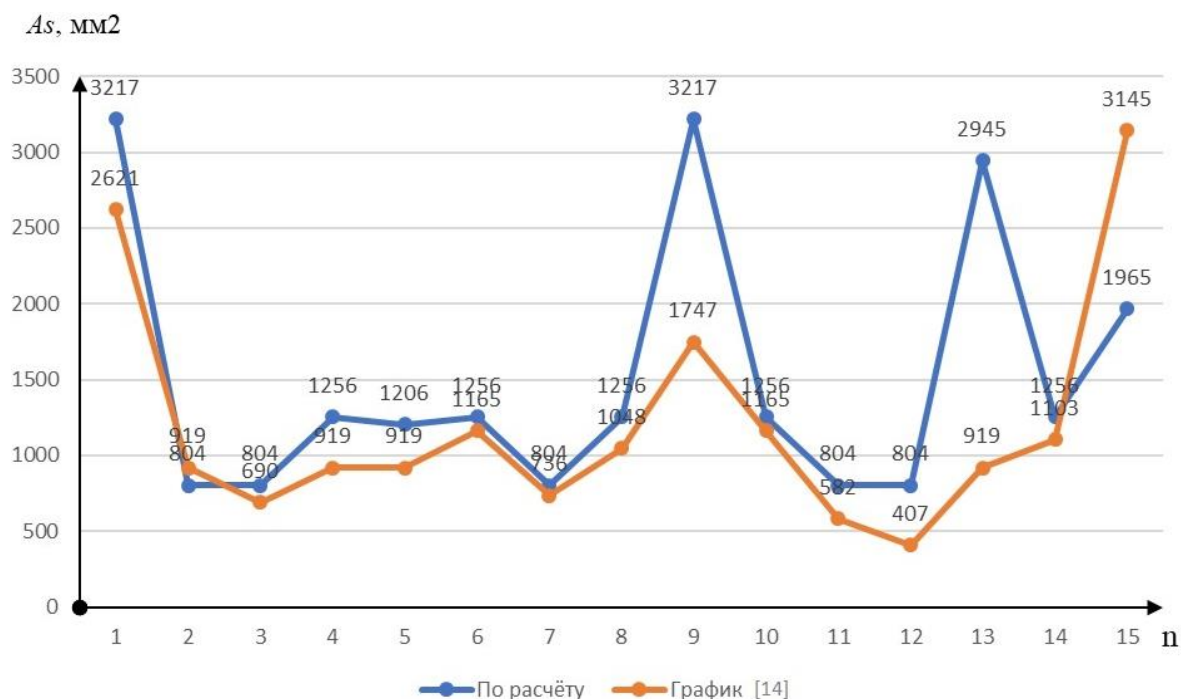


Рисунок 5. – График значений продольного армирования  $A_s$  по графику из источника [14], где  $n$  - варианты исходных данных

Подход к определению значения  $\lambda_{lim}$  в нормах других стран различен и более прост.

В нормах РФ [3], согласно п.7.1.8 и 8.1.12, при гибкости элементов  $\lambda$  более 14 необходимо учитывать влияние на их несущую способность прогибов путем умножения значения  $e_0$  на коэффициент продольного изгиба  $\eta$ , определенный по формуле Тимошенко согласно п.7.1.11.

В нормах США [4], а так же в отменённом на сегодняшний день СНБ 5.03.1-2, для колонн смещаемых каркасов влияние продольного изгиба следует учитывать при  $\lambda$  более 22, для несмещаемых каркасов – по формуле (10-7), а именно:  $\lambda > 34 - 12 M_{min} / M_{max}$ , т.е. для несмещаемых каркасов  $\lambda_{lim}$  зависит только от соотношения моментов по концам элементов.

Методики учета продольного изгиба в случае превышения фактической гибкости  $\lambda$  значения  $\lambda_{lim}$  в источниках [1] и [2] имеют свои особенности и различия, а именно:

- в СП 5.03.01-2020. [1], согласно п. 8.1.6.1, коэффициент  $\eta_a$ , учитывающий влияние продольного изгиба (прогиба) элемента на его несущую способность определяют по известной формуле Тимошенко. Условная критическая сила  $N_{crit}$  определяется по формуле Эйлера с учетом номинальной жесткости.

- в ТКП EN 1992-1-1-2009\* [2] согласно п.5.8.5, методы расчета с учетом эффектов второго порядка включают общий метод, основанный на нелинейном расчете и следующие два упрощенных метода:

- а) метод основанный на номинальной жёсткости;
- б) метод основанный на номинальной кривизне;

В зависимости от принятого метода по [2] определяется соответствующий коэффициент увеличения момента.

Окончательный результат проектирования колонн принимается с обязательным учетом всех соответствующих конструктивных требований, в том числе и по назначению минимального процента армирования ( $\rho_{min}$ ). Следует отметить, что и по этому вопросу в нормах РБ, Евросоюза и РФ имеются различия и свои особенности.

В работе [10] выполнен анализ изменения величин  $\rho_{\min}$  по нормам РБ, РФ и Евросоюза для колонн одноэтажных промышленных зданий. В результате было выявлено, что изменение величины  $A_{s,\min}$  в зависимости от рекомендаций вышеуказанных норм находится в пределах 5-15 %.

Представленная статья является обзорно-аналитической. Проработка вопросов и затронутых проблем, связанных с расчётом железобетонных колонн в зависимости от типа каркаса здания требует дальнейших исследований, анализ которых поможет выявить преимущества и недостатки различных ТНПА и их положений с учетом особенности нынешней ситуации, заключающейся в том, что в настоящий момент на территории РБ одновременно действуют СП 5.03.01-2020. [1] и ТКП EN 1992-1-1-2009\* [2].

Работа в этом направлении в настоящее время продолжается авторами статьи, результаты которой, после тщательного анализа полученных данных, позволяющего сделать конкретные, обоснованные выводы и рекомендации, будут опубликованы.

Неоспоримо, что нормы должны обеспечивать требуемую надежность, однако при этом они также должны быть максимально просты и репрезентативны для практики. Один из основоположников кибернетики У. Эшби утверждал: “Я убежден, что в будущем теоретик должен стать экспертом по упрощению”.

Чем больше будет исследований по практике применения ТНПА РБ, РФ и Евросоюза, тем раньше будет установлен баланс между нормативными требованиями и практической стороной их реализации, а также будет продолжаться необходимый процесс совершенствования ТНПА РБ, что безусловно позволит обеспечить и повысить надежность проектируемых зданий и сооружений в нашей стране.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2020. – 236 с.
2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009\* (02250). Еврокод 2 / М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2015. – 205 с.
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Министерство региональной федерации РФ, 2012. – 159 с.
4. ACI 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete.
5. Казачёк, В. Г. Особенности расчета железобетонных каркасных зданий с учетом требований действующих норм Республики Беларусь / В. Г. Казачек, А. Е. Шилов, Е. Л. Коршун // Строительная наука и техника: научно-технический журнал. – 2010. – № 5. – С. 25-30.
6. Шилов, А. Е. Особенности учета эффектов второго порядка при расчете сжатых железобетонных элементов по ТКП EN-1992-1-1-2009\* / А. Е. Шилов, В. В. Мезен // Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов): материалы Международной научно-технической конференции (Минск, 30 мая 2017 г.) / [редколлегия: В. Ф. Зверев, С.М. Коледа]. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 160-166.
7. Шилов, А. Е. К расчету железобетонных колонн каркасных зданий по ТНПА разных стран / А. Е. Шилов, Е. Г. Чечуха // Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 28 мая 2020 г. / редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 160-163.
8. Янушкевич, О. А. К расчету сборных сжатых железобетонных элементов по ТКП EN 1992-1-1-2009 / О. А. Янушкевич; науч. рук. А. Е. Шилов // Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций: материалы 74-й студенческой научно-технической конференции, 23 мая 2018 г. / редкол.: В. Ф. Зверев, А. А. Хотько, С. М. Коледа. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 51-61.
9. Янушкевич О.А. Особенности расчёта и конструирования сборных железобетонных конструкций по нормативным документам Евросоюза: дис. на соискание степени магистра техн. наук: 2018 / О.А. Янушкевич. – Минск, 2018. – 71 с.

10. Чечуха, Е. Г. Сравнительный анализ результатов расчета сборных железобетонных колонн ОПЗ по различным ТНПА / Е. Г. Чечуха; науч. рук. А. Е. Шилов // Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций: материалы 74-й студенческой научно-технической конференции, 23 мая 2018 г. / редкол.: В. Ф. Зверев, А. А. Хотько, С. М. Коледа. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 48-51.
11. Чечуха, Е. Г. Особенности расчета каркасов зданий по ТНПА разных стран / Е. Г. Чечуха; науч. рук. А. Е. Шилов // Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций: материалы 75-й студенческой научно-технической конференции, Минск, 23 мая 2019 г. / редкол.: В. Ф. Зверев, А. А. Хотько, С. М. Коледа. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 97-100.
12. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры. – М.: ЦНИИПРОМЗДАНИЙ и НИИЖБ, 2005. – 304 с.
13. How to Design Concrete Structures using Eurocode 2 / A.J. Bond [et al]; editor A.J. Bond. – Surrey: The Concrete Centre, Surrey, 2006. – 100 ps.
14. Narayanan R.S. Concise Eurocode 2 / R.S. Narayanan, C.H. Goodchild; editor R.S. Narayanan. – Surrey: The Concrete Centre, Surrey, 2006. – 219 ps.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

*Текстовое электронное издание*

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2021

УДК 72:624/628+69(082)

Одобрено и рекомендовано в качестве электронного издания  
Советом инженерно-строительного факультета (протокол № 8 от 27.10.2021 г.)

**Редакционная коллегия:**

Д. Н. Лазовский (председатель), А. А. Бакатович, Е. Д. Лазовский,  
Л. М. Парфенова, Ю. В. Вишнякова, Р. М. Платонова, А. М. Хаткевич

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**  
[Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. III междунар. науч. конф., Новополоцк, 29–30 апр.  
2021 г. / Полоц. гос. ун-т ; Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк :  
Полоц. гос. ун-т, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).  
ISBN 978-985-531-779-2.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.  
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018 г.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**№ госрегистрации 3671815379**  
**ISBN 978-985-531-779-2**

©Полоцкий государственный университет, 2021

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

Технический редактор *И. Н. Чапкевич.*

Компьютерная верстка *А. А. Прадидовой, С.Е. Рясовой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

---

Подписано к использованию 09.11.2021.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>