

УДК 69+624.014.2

**СИСТЕМЫ ЧАСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ПРИНЯТЫЕ
В ЕВРОКОДАХ И СНИПАХ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

МАРТЫНОВ Ю.С., НАДОЛЬСКИЙ В.В.

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Введение

Современный уровень развития науки в строительной области позволяет проектировать конструкции с заданными параметрами надежности. Данная возможность реализуется с помощью вероятностных методов расчета и методов теории надежности. Проектируя конструкции в соответствии с вероятностными методами величины, входящие в функции состояния, моделируют с учетом их вероятностной природы. Использование вероятностных методов на

стадии проектирования позволяет принимать оптимальные решения, как с позиций надежности, так и с позиций экономических затрат. При оценке существующих конструкций вероятностные методы расчета открывают обширные возможности благодаря гибкости расчетных методик, позволяющих учитывать изменения условий эксплуатации конструкций или предъявляемых к ним требований. Однако использование вероятностных методов в повседневном проектировании не нашло широкого применения в силу своей трудоемкости.

На практике широкое распространение получил полувероятностный метод расчета (метод частных коэффициентов), в котором изменчивость и неопределенность базисных переменных учитывается с помощью частных коэффициентов. Система частных коэффициентов представляет собой один из инструментов регулирования и обеспечения надежности. Эти коэффициенты, в частности, зависят от конкретных географических, социальных, экономических условий и по этой причине их значения в Еврокодах относятся к национально устанавливаемым параметрам (NDP) и определяются отдельным государством самостоятельно. В силу того, что значения именно этих параметров обеспечивают надежность строительных конструкций, их обоснованное принятие является очень важной задачей.

Анализ отечественных нормативных документов (СНиП) и Еврокодов по проектированию строительных конструкций свидетельствует о существенных различиях в значениях частных коэффициентов и в их структуре. Данные различия вызывают острые споры при внедрении Еврокодов в практику проектирования, как на территории нашей страны, так и за рубежом.

1 Принципы назначения частных коэффициентов

Основная задача при назначении частных коэффициентов заключается в обеспечении требуемого уровня надежности. При назначении частных коэффициентов также решается компромиссная задача простоты и точности (однако мера точности пока не установлена ни в одном из документов). Следует учитывать, что определяющее влияние на частоту отказов оказывают человеческие ошибки, поэтому увеличение надежности посредством частных коэффициентов не рационально, а лучше повышать надежность за

счет контроля качества в процессе проектирования, строительства и эксплуатации [1].

Система частных коэффициентов в общем случае состоит из следующих компонентов:

- коэффициенты, относящиеся к эффектам воздействия и учитывающие: неопределенность воздействия, погрешность моделирования воздействия, сочетание воздействий, погрешность расчетной модели для определения эффектов воздействий (т.е. погрешность при переходе от воздействия к эффекту вследствие погрешности статического расчета, идеализации расчетной модели);

- коэффициенты, относящиеся к сопротивлению и учитывающие: неопределенность свойств материала, неопределенность геометрических параметров, погрешность модели сопротивления;

- коэффициенты, относящиеся к дифференциации надежности, учитывают разный уровень последствий наступления отказа конструкции или отдельного элемента.

Принятие значений частных коэффициентов осуществляется одним из следующих способов:

- на основании экспертной оценки;

- на основании проверки соответствия с многолетним опытом и строительными традициями;

- на основании статистических методов исходя из требуемой обеспеченности расчетного значения базисной переменной;

- на основании вероятностных методов исходя из требуемого уровня надежности.

Последний способ является наиболее прогрессивным и позволяет учесть фактические условия и назначить научно обоснованные значения частных коэффициентов. Фундаментальные положения вероятностных методов расчета строительных конструкций представлены в работах В.В. Болотина и А.Р. Ржаницина. Однако частные коэффициенты в большинстве случаев принимались на основании экспертной оценки с использованием статистических методов. В то время применение способа, основанного на вероятностных методах, сдерживалось в основном отсутствием нормируемых параметров надежности и данных о базисных переменных.

В современных нормативных документах Европейского Союза, Соединенных Штатов Америки, Канады и других стран приняты частные коэффициенты на основании вероятностных методов. В

канадских нормах вероятностно подкрепленные частные коэффициенты были приняты в 1974 г. на основании работ D.E. Allen [1], D.J.L. Kennedy [2]. Первые вероятностно подкрепленные частные коэффициенты в американских нормах появились в 1986 г. на основании работ M. Ravindra, T.V. Galambos, B. Ellingwood, G. MacGregor, A. Cornell [3], в австралийских нормах с 1986 г. [4].

После принятия Еврокодов многие европейские страны принимали рекомендуемые значения частных коэффициентов. Однако рекомендуемые значения являются очень усредненными и в одних случаях приводят к неэкономичным, а в других к небезопасным решениям. В ряде стран были проведены программы по сбору статистической информации о базисных переменных и уточнению частных коэффициентов вероятностными методами. Наиболее значимыми работами с практической реализацией калибровки частных коэффициентов, используемых в Еврокодах, являются [5-7]. Данные работы отражают европейский опыт и традиции при назначении частных коэффициентов.

2 Анализ частных коэффициентов

2.1 Частные коэффициенты согласно СНиП

Значения частных коэффициентов в большинстве случаев принимались на основании экспертной оценки с использованием статистических методов. При использовании в расчетах частных коэффициентов, полученных исходя только из установленной обеспеченности расчетного значения базисной переменной, конструкции имели разный уровень надежности. В связи с этим проф. В.Д. Райзер, один из основных разработчиков ГОСТ 27751 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету», отмечает: *«Невозможно найти сколь-нибудь разумного объяснения тому, что надежность сооружений одного и того же назначения, выполненных из различных материалов, запроектированных по действующим нормам, оказываются различной»* [8, с. 27].

Большая часть частных коэффициентов, учитывающих неопределенность воздействия (коэффициенты надежности по нагрузке γ_f), устанавливались статистическими методами исходя из заданной обеспеченности расчетного значения нагрузки. При этом нормативно обеспеченность расчетного значения не закреплена, а главным

образом определялась на основании экспертной оценки. О разной обеспеченности нагрузок можно судить из: «...расчетные предельные нагрузки повторяются редко (например, по литературным данным, от одного крана-один раз в 20 лет; ветровая-один раз в 10-15 лет; снеговая-в среднем один раз в 10-12 лет; на перекрытия-один раз в 15-20 лет)...» [9].

Коэффициент надежности по материалу γ_m установлен в СНиП II-23 «Стальные конструкции» [10] в зависимости от обеспеченности нормативных сопротивлений, гарантируемой методами контроля качества металлопроката на металлургических предприятиях.

Установленные в таблице 6* СНиП II-23 [10] коэффициенты условий работы γ_c для элементов конструкций введены с целью учета:

а) упрощения расчетных схем при расчетах на общую устойчивость сплошных балок, которые рассчитываются как идеально упругие системы (поз. 4 табл. 6* СНиП II-23-81*), а также сжатых элементов из одиночных уголков, прикрепляемых одной полкой и рассчитываемых как центрально-сжатые, хотя схема их работы соответствует внецентренному сжатию (поз. 9 и 10 табл. 6* СНиП II-23-81*);

б) фактических значений начальных искривлений сжатых составных элементов таврового сечения из уголков, в которых в связи с несимметричным расположением швов при приварке прокладок между уголками начальные искривления превышают учитываемые в расчетах (поз. 3 табл. 6* СНиП II-23-81*);

в) воздействия на конструкции больших постоянных и длительно действующих временных нагрузок, приводящих в процессе эксплуатации к высокому уровню напряжений, незначительное превышение которого может вызвать опасность наступления предельных состояний первой группы (поз. 1, 2 и 5 табл. 6* СНиП II-23-81*);

г) локального повышения прочностных свойств стали возле отверстий при расчете на прочность сечений, ослабленных отверстиями для болтов (поз. 6-8 табл. 6* СНиП II-23-81*)» [9].

Коэффициент, относящийся к дифференциации надежности конструкции в целом, так называемый коэффициент надежности по назначению, дает возможность регулировать надежность в зависи-

мости от особенностей проектной ситуации. Методика определения данного коэффициента с учетом степени ответственности сооружения, особенностей деформирования и сопротивления конструкции, объема последствий отказа и других показателей была предложена в [11]. Авторы, Складнев Н.Н. и Федяев А.А., отмечают, что, в общем случае, значения данного коэффициента затруднительно дифференцировать в зависимости только от класса сооружения (вероятности отказа). На результат оказывают влияние изменчивости базисных переменных для конкретного предельного состояния, а в рамках одного предельного состояния – разные схемы разрушения. Наибольшие различия возникают для предельных состояний несущей способности и предельных состояний эксплуатационной пригодности. Авторы отмечают, что коэффициент надежности по назначению может быть разным при определении прочности и прогибов балки. В [12] авторы указывают на необходимость пересмотра частных коэффициентов по назначению и рекомендуют вычислять данный коэффициент при расчете конкретной конструкции. В [13] В.Д. Райзер отмечает: «...классификация объектов по степени ответственности и значения частных коэффициентов надежности по назначению были определены методом экспертных оценок без строгого теоретического обоснования...» и также отмечает необходимость дифференциации надежности несущих конструктивных элементов в сооружении (в некоторой степени данная дифференциация выполнена в нормах проектирования стальных конструкций посредством коэффициента условий работы).

2.2 Частные коэффициенты согласно Еврокода

Согласно п. С.3 (2) [14] изначально большинство частных коэффициентов и коэффициентов сочетаний, приведенных в Еврокодах, получены на основании проверки соответствия с многолетним опытом и строительными традициями. При дальнейшем развитии Еврокодов значения частных коэффициентов подкреплялись вероятностными методами теории надежности. Система частных коэффициентов, представленная в Еврокоде [14], позволяет учесть все виды значимых неопределённостей.

Однако практическая их реализация, как в самом базовом документе, так и во многих национальных приложениях, представляется еще в очень «сыром», недоработанном виде. Например, значения

частного коэффициента для переменных воздействий γ_Q принято многими странами в большинстве случаев одинаковыми для всех переменных нагрузок, хотя согласно базовым положениям Еврокода [14] допускается их дифференциация. Еще одним из примеров может служить дифференциация значения частных коэффициентов для сопротивления стальных элементов. Согласно Еврокода 3 [15] рекомендовано одно значение частного коэффициента для всех проверок сечений γ_{M0} («for resistance of cross-sections») и одно для всех проверок элементов γ_{M1} («for resistance of members») (к тому же они оба равны единице в базовой редакции Еврокода). Данный факт свидетельствует о приравнивании всех моделей сопротивления к одному урону с точки зрения их точности. Данное положение вызывает парадоксальную ситуацию: многие исследователи борются за уточнение моделей сопротивления (иногда увеличивая точность на 5-10%), а при этом эти достижения не находят отражения при нормировании частных коэффициентов.

Наибольший интерес представляют критические высказывание в адрес Еврокода [14], представленные в независимом экспертном заключении [7] на технический отчет SAKO [5]. Проф. P. Spehl пишет: «*In the original probabilistic model first used to establish the European unified rules (CEB Bulletin N° 127 and 128, 1980), the target probability (for normal buildings, reference period 50 years) is 10⁻⁵/year (reliability index 4,26) or 5*10⁻⁴ over 50 years (reliability index 3,30), ...and the partial safety factors are already 1,35 for permanent actions and 1,5 for variable actions*» [7]. Здесь Проф. P. Spehl отмечает, что рекомендованные значения частных коэффициентов, принятые в Еврокоде, получены для индекса надежности 3.3 для базового периода 50 лет (что не соответствует целевому значению 3.8 для этого же периода согласно Еврокода [14]) и далее приводит вывод: «*...increase of the γ values is needed for the actual target probability of Class RC2 structural members...for the actual Eurocodes target probability, the same increase of γ values should apply to case A as to case B(1,4 instead of 1,35 and 1,7 instead of 1,5) in order to reach the target probability ...*» [7].

В справочном документе к Еврокоду «Основы проектирования строительных конструкций» написано: «*... all partial factors for variable loads are equal to 1.5. For wind and snow loads these values seem to be quite low. Another way of looking at results is say that the*

target reliability index for wind loading is lower than 3.8, indicating a safely differentiation (for economical reasons) with respect to the type of loading. Another point of thought should be that especially the wind load model contains many conservative assumptions» [16].

Парадоксальность данных высказываний заключается в том, что данные специалисты участвовали в разработке документа, который они «ругают».

В работах [17] показано, что частные коэффициенты [14] не могут обеспечить требуемый уровень надежности для легких металлических конструкций покрытия. В данных работах рекомендуется использовать переменный частный коэффициент для снеговой нагрузки. В работе [18] показано, что надежность конструкции, запроектированных согласно базовой редакции Еврокода [14], существенно меньше целевого значения с увеличением доли снеговой нагрузки.

Анализ значений частных коэффициентов сведен в Таблицу 1.

Таблица 1

Сравнение подходов к нормированию параметров сопротивления и эффектов воздействий в нормативных документах Республики Беларусь

Параметры	Нормативные значения	Частные коэффициенты	
		ТКП EN	СНиП
Постоянная нагрузка	$G_k^* / G_k \approx 1$	$\gamma_G = 1.35$; $\xi = 0.85$	$\gamma_G^* = 1.2$
Полезная нагрузка	$Q_k^* / Q_k \approx 1$	$\gamma_Q = 1.5$; $\psi_{0,Q} = 0.7$	$\gamma_Q^* = 1.3$ или 1.2 ; $\psi_Q^* = 0.9$
Снеговая нагрузка	$S_k^* / S_k \approx 0.83$	$\gamma_S = 1.5$; $\psi_{0,S} = 0.6$	$\gamma_S^* = 1.5$ или 1.6 ; $\psi_S^* = 0.9$
Предел текучести	$R_{yk} / f_y \approx 1$	$\gamma_{M0} = 1.025$	$\gamma_c = 1$; $\gamma_m = 1.025$
Дифференциация надежности	—	$k_{FI} = 1$	$\gamma_n = 0.95$

Заключение

Система частных коэффициентов представляет собой один из инструментов регулировки и обеспечения надежности, следовательно, их обоснованное и обдуманное принятие является важной задачей. На первом этапе введения Еврокодов в практику проектирования стальных конструкций на территории Республики Беларусь

часть частных коэффициентов была принята равным рекомендуемым значениям, а часть была принята на основании СНиП, а ряд частных коэффициентов на основании калибровки частных коэффициентов для железобетонных конструкций. Однако необходимо выполнить обоснование частных коэффициентов непосредственно для стальных конструкций с учетом особенностей республики исходя из целевого уровня надежности. Существует необходимость развития системы частных коэффициентов, принятых в Еврокодах.

В свою очередь система частных коэффициентов принятая в СНиП нуждается в корректировках. Главная причина заключается в том, что частные коэффициенты, полученные исходя только из установленной обеспеченности расчетного значения базисной переменной, не позволяют получить равнонадежности конструкций. Пересмотр частных коэффициентов необходим из-за обновления данных о базисных переменных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Allen, D. E. Limit States Design—A Probabilistic Study/ D. E. Allen // Canadian Journal of Civil Engineering. –1975. –Vol.2.– No. 1.– P. 36-49
2. Kennedy, D. J. L. Limit states design – an innovation in design standards for steel structures. / D. J. L. Kennedy// Canadian Journal of Civil Engineering. –1974.– Vol. 1. –No. 1. –P. 1-13
3. Ravindra, M. Load and resistance factor design for steel/ M. Ravindra, T.V. Galambos // Journal of the Structural Division, –1978.– Vol. 104. –No. 9. –P. 1337-1353.
4. Pham, L. Action on Structures: regulations and standards/ L.Pham// EJSE Special Issue: Loading on Structures. –2007. –p. 4-8.
5. Safety of Structures. An independent technical expert review of partial factors for actions and load combinations in EN 1990 "Basis of Structural Design": BRE Client Report № 210297 [Electronic resource] / Building Research Establishment. –2003. –Mode of access : <http://www.europeanconcrete.eu>. –Date of access : 10.05.2011.
6. SAKO; Joint Committee of NKB and INSTA-B. NKB Report: 1999:01 E, Basis of Design of Structures. Proposals for modification of Partial Safety Factors in Eurocodes

7. Ministry of the Environment, Housing and Building Department, Probabilistic Calibration of Partial Safety Factors (Eurocode and Finnish proposal) Ramboll, January 2000

8. Райзер, В.Д. Теория надежности в строительном проектировании / В.Д. Райзер. – Москва: Изд-во АСВ, 1998. – 304 с.

9. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II -23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1989. 148 с.

10. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции». Москва, 1991 г

11. Складнев, Н.Н. О методике определения коэффициента надежности по назначению / Н.Н.Складнев, А.А.Федяев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. – №2. – с.3-6

12. Знаменский, Е.М. О расчете конструкций с заданным уровнем надежности / Е.М. Знаменский, Ю.Д. Сухов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. – № 2. – С. 7-9.

13. Райзер, В.Д. Развитие теории надежности и совершенствование норм проектирования / В.Д.Райзер // Строит. механика и расчет сооружений. – 1983. – №5. – С. 1-4.

14. ТКП EN 1990. Еврокод. Основы проектирования конструкций. – Минск, РУП «Стройтехнорм», 2012.

15. ТКП EN 1993-1-1. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Минск, РУП «Стройтехнорм», 2014.

16. CEN/TC250 Background Document EC1:Part1: Basis of Design. 2nd draft, ECCS, 1996

17. Sykora, M. – Holický, M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load. In Li, J. - Zhao, Y.-G. - Chen, J. (eds.) Reliability Engineering - Proceedings of the International Workshop on Reliability Engineering and Risk Management IWRERM 2008, Shanghai, 21 - 23 August 2008. Shanghai: Tongji University Press, 2009, p. 183-188.

18. Takahashi, T. & Ellingwood, B.R. 2005. “Reliability-based assessment of roofs in Japan subjected to extreme snows: incorporation of site-specific data.” Engineering Structures, 27: p. 89–95.