

УДК 624.426.5

ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ СОЧЕТАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЙ В СООТВЕТСТВИИ С ТКП EN 1990

д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР
(Брестский государственный технический университет;
канд. техн. наук, доц. В.В. НАДОЛЬСКИЙ; Ф.А. ВЕРЁВКА
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлен обзор принципов сочетания значений воздействий в соответствии с действующим в настоящее время на территории Республики Беларусь нормативным документом по расчету строительных конструкций ТКП EN 1990. Обобщена информация о методике выбора расчетного сочетания воздействий для различных групп предельных состояний с учетом различных типов репрезентативных значений переменных воздействий. В качестве примера составления расчетных сочетаний воздействий для проверки предельного состояния несущей способности конструкции (ULS), а также для проверок в рамках предельного состояния эксплуатационной пригодности (SLS) рассмотрена условная стальная колонна, относящаяся ко второму классу надежности RC2, подверженная воздействию постоянной, функциональной (категория помещения D – торговое помещение), снеговой и ветровой нагрузок.

Ключевые слова: надежность, воздействия, репрезентативные значения, метод частных коэффициентов, предельные состояния, расчетные ситуации.

Введение. Конструкции следует проектировать и изготавливать таким образом, чтобы они в течение предусмотренного срока эксплуатации с требуемым уровнем надежности и без необоснованных экономических затрат воспринимали *все воздействия*, появление которых имеет наибольшую вероятность, а также при этом бы полностью сохраняли свою пригодность к эксплуатации в соответствии с назначением [1, п. 2.1(1)P]. Решение данной задачи требует от проектировщика наиболее адекватного учета комплексного воздействия различных нагрузок на конструкцию. Конструкции в основном подвергаются воздействию более чем одной нагрузки, кроме того необходимо учитывать, что данные нагрузки являются различными: по своему происхождению (*прямые и косвенные*); свойствам (характеру) (*статические или динамические*); месту приложения, их изменению в пространстве (*фиксированные или свободные*); времени и интенсивности воздействия; многим другим параметрам. Следовательно, проблема составления необходимых расчетных сочетаний различных воздействий является ключевой при осуществлении расчета строительных конструкций. В соответствии с приказом Минстройархитектуры от 10.12.14 № 340 «О переходе на ТКП EN» сочетания воздействий и эффектов от воздействий для расчета и проектирования строительных конструкций на территории Республики Беларусь следует принимать по ТКП EN 1990 «Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций» [1]. В связи с этим предполагается актуальным предоставление обобщенной информации по составлению расчетных сочетаний воздействий в соответствии с ТКП EN 1990 [1], основанных на применении метода частных коэффициентов.

В рамках данной работы в качестве примера составления расчетных сочетаний воздействий для проверки предельного состояния несущей способности конструкции (ULS), а также для проверок в рамках предельного состояния эксплуатационной пригодности (SLS) рассмотрена условная стальная колонна, относящаяся ко второму классу надежности RC2, подверженная воздействию постоянной, функциональной (категория помещения D – торговое помещение), снеговой и ветровой нагрузке.

1 Репрезентативные значения переменных воздействий

Согласно [1, п. 4.1.1(5)] в расчетах при проектировании конструкций любое воздействие должно быть описано с помощью модели (физической или математической), при этом в большинстве случаев величина воздействия выражается одним скалярным числовым значением, которое при этом может принимать различные репрезентативные значения. В свою очередь, при осуществлении проверки по предельным состояниям в соответствии с ТКП EN 1990 [1] с использованием метода частных коэффициентов в расчетных моделях должны быть приняты расчетные значения воздействий или эффектов воздействий, которые следует устанавливать, используя характеристические или другие репрезентативные значения [1, п. 6.1.(3)].

Наиболее важным репрезентативным значением воздействия F [1, п. 4.1.2(1)P] является *характеристическое значение* F_k . В зависимости от представленных данных и принятой практики характеристическое значение должно быть определено как средняя, нижняя или верхняя оценка по статистическим данным или как номинальное значение (которое не относится ни к одному из известных статистических распределений). В настоящее время существует очевидный недостаток статистических данных относительно различного рода воздействий и влияния окружающей среды. В тех случаях, когда статистическое распределение является неизвестным, характеристическое значение может быть определено как номинальное [1, п. 4.1.2(1)P].

Для определения характеристического значения переменного воздействия используются два отдельных независимых показателя:

- *промежуток времени* (базовый период), во время которого достигается экстремум (например, годовой максимум или минимум);
- *заданная вероятность*, при которой экстремальные значения не выше (в случае максимума) или не ниже (в случае минимума) характеристического значения.

В общем случае характеристическое значение Q_k климатических воздействий и полезных (функциональных) нагрузок в постоянных расчетных ситуациях базируется на заданной вероятности 0,98, а базовый период составляет 1 год [1, п. 4.1.2(7), прим. 2].

Для переменных воздействий помимо характеристических значений ТКП EN 1990 [1] содержит ряд репрезентативных значений. Так, согласно [1, п. 4.1.3(1)P)] для переменных воздействий обычно используются три вида репрезентативных значений:

- комбинационное $\psi_0 Q_k$;
- частое $\psi_1 Q_k$;
- практически постоянное $\psi_2 Q_k$.

При этом соблюдается следующее неравенство:

$$Q_k > \psi_0 Q_k > \psi_1 Q_k > \psi_2 Q_k. \quad (1)$$

Графическое отображение различных репрезентативных значений переменных воздействий в соответствии с ТКП EN 1990 [1] представлено на рисунке 1.

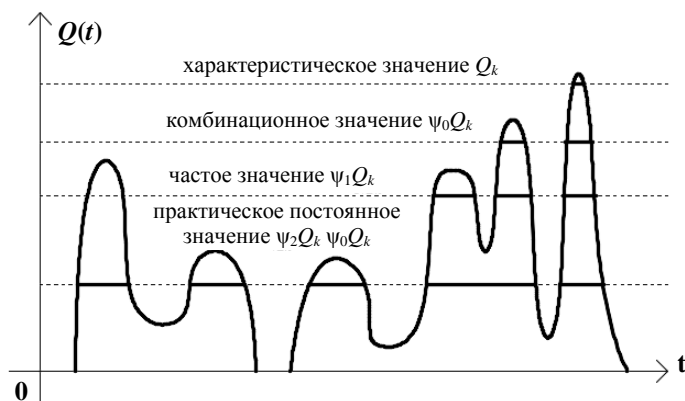


Рисунок 1. – Репрезентативные значения переменных воздействий в соответствии с ТКП EN 1990 [1]

В таблице 1 приведены виды предельных состояний и соответствующие им расчетные ситуации в соответствии с ТКП EN 1990 [1], для которых применяются указанные репрезентативные значения.

Таблица 1. – Репрезентативные значения переменных воздействий, используемые для составления расчетных сочетаний воздействий в соответствии с ТКП EN 1990 [1]

Значение переменного воздействия	Вид предельного состояния	Расчетная ситуация (ПСС – проектный срок службы)	Пример
Комбинационное $\psi_0 Q_k$	ULS	Постоянная (период ~ ПСС)	Нормальные условия эксплуатации
	ULS	Переходная (период >> ПСС)	В период возведения и реконструкции зданий
	SLS	Необратимые предельные состояния эксплуатационной пригодности	Предельная ширина раскрытия трещин для железобетонных конструкций
Частое $\psi_1 Q_k$	ULS	Особые	Результаты пожара, взрывов, ударов транспортных средств и т.д.
	SLS	Обратимые предельные состояния эксплуатационной пригодности	Декомпрессионные проверки в преднапряженных железобетонных конструкциях
Практически постоянное $\psi_2 Q_k$	ULS	Особые	Результаты пожара, взрывов, ударов транспортных средств и т.д.
	ULS	Сейсмические	Землетрясения
	SLS	Длительные эффекты воздействий	Эффекты ползучести и усадки в бетонных конструкциях

Следует отметить, что в соответствии с [1, п. 2.2(5)b] применение репрезентативных значений воздействий наряду с выбором частных коэффициентов служит в качестве одного из инструментов для достижения требуемых *уровней надежности*, относящихся к несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций. Здесь отмечаются «уровни надежности» вместо единого «уровня надежности», так как для различных предельных состояний (ULS, SLS) *вероятность отказа* конструкции или же соответствующий ей *индекс надежности* могут иметь различные значения [1, п. 2.2(2)].

Рекомендуемые значения коэффициентов ψ_0 , ψ_1 и ψ_2 для сооружений и зданий представлены в [1, приложении А (А.1.2.2)] и отражены в таблице 2.

Таблица 2. – Рекомендуемые значения коэффициентов ψ в соответствии с национальным приложением к ТКП EN 1990[1]

Воздействие	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Функциональные переменные нагрузки для зданий (см. EN 1991-1-1)			
Категория А: жилые помещения	0,7	0,5	0,3
Категория В: офисные помещения	0,7	0,5	0,3
Категория С: помещения со значительным скоплением людей	0,7	0,7	0,6
Категория D: торговые помещения	0,7	0,7	0,6
Категория Е: складские помещения	1,0	0,9	0,8
Категория F: места с движением транспорта весом (массой) до 30 кН	0,7	0,7	0,6
Категория G: места с движением транспорта весом (массой) св. 30 кН до 160 кН	0,7	0,5	0,3
Категория Н: кровли	0	0	0
Снеговые нагрузки на здания (см. ТКП EN 1991-1-3) [2]	0,6	0,5	0
Ветровые нагрузки (см. ТКП EN 1991-1-4) [3]	0,6	0,2	0
Температурные нагрузки (исключая пожары)	0,6	0,5	0

2 Предпосылки для составления расчетных сочетаний эффектов воздействий

Особым видом базисной переменной является суммарный эффект нескольких воздействий. Как отмечает профессор В.Д. Райзер [4]: «*Нагрузки обладают большим статистическим разбросом. При математическом описании нагрузки могут быть представлены в виде случайных величин, случайных функций времени, а также изменяющихся не только во времени, но и в пространстве по случайным или детерминированным законам*». Вопросу сочетания нагрузок как стохастических процессов посвящены работы [5–10]. Задача, связанная с проблемой сочетания нескольких воздействий, представленных в виде стохастических (случайных) процессов, в общем виде впервые была решена В.В. Болотиным [11], однако полученные зависимости оказались слишком сложными для практического использования. В связи с этим были разработаны упрощенные методы [9]. Как правило, для составления расчетных сочетаний воздействий используют правило Turkstra [1], которое позволяет решить задачу, связанную с необходимостью перехода от зависимых от времени нагрузок к независимым. Вместе с этим широкое применение получила модель нагрузок «Ferry Borges – Castanheta» [12; 13], основанная на возобновляемых волновых процессах с прямоугольной формой импульсов фиксированной продолжительности. Кроме этого, известны модели с переменной продолжительностью самих импульсов и времени их возобновления [8; 14; 15].

Используя результаты анализа различных моделей, предназначенных для сочетания воздействий и для целей калибровки, рекомендуется применять правило Turkstra [16; 17]. В статье [10] отмечено, что правило Turkstra позволяет получить хорошую оценку при доминировании основной нагрузки, однако в других случаях может приводить к неверной оценке¹. Применение правила Turkstra рекомендовано в нормах [1; 18].

В соответствии с правилом Turkstra необходимо рассмотреть два сочетания:

1) Q_1 – доминирующая нагрузка; Q_2 – сопутствующая нагрузка. Результирующий эффект воздействий, таким образом, равен

$$E_{\max} = E(Q_{1,\max,T}, Q_{2C}); \quad (2)$$

2) Q_2 – доминирующая нагрузка; Q_1 – сопутствующая нагрузка. Результирующий эффект воздействий составляет

$$E_{\max} = E(Q_{1C}, Q_{2,\max,T}), \quad (3)$$

где $Q_{i,\max,T}$ – максимальное значение i -й нагрузки в течение базового периода времени T ; Q_{iC} – комбинационное значение i -й нагрузки, равное максимальному значению этой нагрузки в период длительности действия максимального значения доминирующей нагрузки.

¹ «Generally Turkstra's rule provides good estimate when principal load is strongly dominant; however, it provides erroneous otherwise» [10, с. 93].

В большинстве случаев нагрузки рассматривают как взаимно независимые процессы, обладающие свойствами стационарности и эргодичности. Для нестационарных условий (проверки выносливости, проверки с учетом процессов деградации, если наблюдаются действия нестационарных воздействий) следует применять модели сочетания возобновляемых волновых процессов с прямоугольной формой импульса с переменной продолжительностью самих импульсов и времени их возобновления [16]. В таком случае правило Turkstra (сочетание максимальных эффектов воздействий с минимальным сопротивлением) может быть применено в качестве верхней оценки.

При использовании правила Turkstra совместно с моделью нагрузок Ferry Borges – Castanheta [12] сочетание эффектов воздействий от двух различных нагрузок примет следующий вид (базовый период отнесения T принят равным 50 лет):

$$E_{\max,1} = K_E (C_G G + C_{Q1} Q_{1,50\text{лет}} + C_{Q2} Q_{2,C}); \quad (4)$$

$$E_{\max,2} = K_E (C_G G + C_{Q2} Q_{2,50\text{лет}} + C_{Q1} Q_{1,C}), \quad (5)$$

где C_G – погрешность модели постоянной нагрузки; C_{Q_i} – погрешность модели i -го переменного воздействия; K_E – погрешность модели эффекта воздействия; $Q_{i,50\text{лет}}$ – максимальное значение i -го воздействия в течение базового периода времени $T = 50$ лет; $Q_{i,C}$ – комбинационное значение i -го воздействия, равное максимальному значению этой нагрузки в период действия максимального значения доминирующей нагрузки.

Комбинационное значение i -го воздействия зависит от вида доминирующей нагрузки. Например, при сочетании доминирующей полезной нагрузки со снеговой комбинационное значение для снеговой нагрузки принимается как 5...10-летний максимум (так как продолжительность действия 50-летнего максимального значения полезной нагрузки в среднем составляет 5...10 лет [14]). В рассмотренном случае логика рассуждений довольно проста. Однако при сочетании доминирующей снеговой нагрузки с полезной дело обстоит несколько сложнее. Продолжительность действия 50-летнего максимума снеговой нагрузки составляет в среднем 1...2 недели [14]. Поэтому для полезной нагрузки необходимо рассмотреть 1...2 недели максимум, но при этом долговременная часть полезной нагрузки в среднем изменяется один раз в 5...10 лет [14]. Поэтому наименьший период для распределения максимумов полезной нагрузки может быть принят только 5...10 лет.

Стоит отметить, что в основу правил составления расчетных сочетаний воздействий в соответствии с ТКП EN 1990 [1] положено правило Turkstra совместно с моделью нагрузок Ferry Borges – Castanheta [19].

3 Общие требования составления расчетных сочетаний воздействий

Влияние воздействий, которые не могут сосуществовать одновременно в силу физических или функциональных причин, не следует рассматривать вместе в виде сочетаний воздействий [1, п. А1.2.1(1)].

В целях упрощения проектирования в соответствии с ТКП EN 1990 [1] возможно при расчете сочетаний воздействий брать за основу не более двух переменных воздействий [1, п. А1.2.1(1)]. При этом использование отмеченного упрощения зависит от назначения, формы и местоположения здания, однако конкретные указания не даны.

В ТКП EN 1990 [1] даны следующие принципы составления сочетаний воздействий:

[1, п. 6.4.3.1(4)P]: Если результаты проверки могут быть очень чувствительны к изменениям значения постоянного воздействия от места к месту в конструкции, неблагоприятная и благоприятная части этого воздействия должны рассматриваться как отдельные воздействия. Несомненно, для того чтобы выявить случаи зависимости предельных состояний от изменения интенсивности воздействия, необходимо принять инженерное решение, что вносит в него субъективность. Данное правило в основном распространяется на предельные состояния статического равновесия.

[1, п. 6.4.3.1(5)]: Если несколько эффектов одного воздействия (например, изгибающий момент и вертикальная сила от собственного веса) не имеют полной взаимной корреляции, частный коэффициент, примененный к любому благоприятному компоненту, может быть понижен.

Если две или более независимые нагрузки будут оказывать воздействие одновременно, их сочетание должно рассматриваться в соответствии с главой 6 ТКП EN 1990 [1]. Для каждой нагрузки необходимо рассматривать несколько реалистичных сценариев, разработать варианты результатов воздействий, которые необходимо учесть в проекте.

В общем случае правила сочетания воздействий различны для следующих типов проверок:

- проверок предельных состояний несущей способности;
- проверок предельных состояний эксплуатационной пригодности.

В рамках проверок предельных состояний несущей способности для постоянных или переходных расчетных ситуаций (основные сочетания) необходимо отдельно рассмотреть следующие группы предельных состояний несущей способности [1, п. 6.4.1(1)P]:

1) **ЕQU**: потеря статического равновесия конструкции или любой ее части, рассматриваемой как жесткое тело, для которой незначительные изменения значения или пространственного распределения

постоянных воздействий от одного источника являются значительными и прочность материалов конструкции или основания в общем случае не оказывают влияния на предельное состояние;

2) **STR**: внутреннее разрушение или чрезмерные деформации конструкции или элементов конструкции, включая фундаменты, сваи, подпорные стенки и т.д., для которых прочность материалов имеет определяющее значение;

3) **GEO**: разрушение или чрезмерные деформации основания, для которых прочность основания или скальной породы имеет определяющее значение для обеспечения несущей способности конструкции;

4) **FAT**: усталостное разрушение конструкции или элементов конструкции.

Также при проверках предельных состояний несущей способности в отдельную группу выделяют расчетные ситуации, возникающие при особых и сейсмических воздействиях.

4 Сочетание воздействий для проверок предельных состояний несущей способности

4.1 Сочетание воздействий в случае постоянных или переходных расчетных ситуаций (основные сочетания). Правила составления сочетаний эффектов воздействий для постоянных или переходных расчетных ситуаций сводятся к выражениям (6.10) и (6.10a)/(6.10b) ТКП EN 1990 [1]:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \quad (6.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}. \end{array} \right. \quad (6.10a)/$$

$$(6.10b)$$

В рамках данного правила сочетаний воздействий принято, что несколько переменных воздействий действуют одновременно, при этом выделяют доминирующее переменное воздействие Q_1 ($Q_{k,1}$), основное (при его наличии) сопутствующее переменное воздействие $\psi_0 Q_k$ ($\psi_{0,1} Q_{k,1}$), другие сопутствующие переменные воздействия $\psi_0 Q_k$ ($\psi_{0,i} Q_{k,i}$).

Доминирующее переменное воздействие Q_1 означает, что для рассматриваемого эффекта воздействия (например, изгибающего момента в поперечном сечении элемента) переменное воздействие Q_1 создает наиболее неблагоприятные значения эффекта и, таким образом, принимается в расчет со своим характеристическим значением $Q_{k,1}$. Если доминирующее воздействие не очевидно, то необходимо каждое переменное воздействие по очереди рассмотреть как доминирующее.

Если физически возможно, то другие переменные воздействия должны быть приняты в расчет как сопутствующие переменные воздействия со своими комбинационными значениями $\psi_0 Q_k$. Разделение сопутствующих переменных воздействий на «основное» и «другие» методологически позволяет учесть пониженную вероятность появления «других» сопутствующих переменных воздействий, однако данное разделение требует введения дополнительных значений коэффициентов ψ_0 , и по этой причине в настоящее время в численных записях различий между «основным» и «другими» сопутствующими переменными воздействиями нет.

Понижающий коэффициент ξ применяется для неблагоприятных постоянных воздействий. В выражении (6.a) все временные воздействия приняты в расчет со своими комбинационными значениями ($\psi_0 Q_k$). В выражении (6.b) одно переменное воздействие определено как доминирующее воздействие (другие временные воздействия приняты в расчет как сопутствующие), а уменьшающий коэффициент применяется к неблагоприятным постоянным воздействиям.

Ниже рассмотрены указания по определению сочетаний в зависимости от подгруппы предельных состояний несущей способности с учетом положений национального приложения к ТКП EN 1990 [1]. Стоит отметить, что в целом для критических предельных состояний в постоянных и переходных расчетных ситуациях согласно [1, п. А.3.1(1)] расчетные значения воздействий следует принимать в соответствии с [1, т. А.2(A) – А.2(C)].

Предельные состояния EQU

Статическое равновесие конструкции или ее части (рассматриваемой как твердое тело) проверяется путем применения расчетных сочетаний воздействий, основанных на формуле (6.10) ТКП EN 1990 [1].

Предельные состояния STR

Расчеты элементов конструкций (STR, см. 6.4.1 [1]), не учитывающие геотехнические воздействия, рекомендуется производить, применяя расчетные сочетания воздействий, основанные на менее благоприятном варианте из формул (6.10a) и (6.10b) ТКП EN 1990 [1].

Применение двух выражений – (6.10a) и (6.10b) – позволяет каждое воздействие, в том числе постоянные воздействия G , рассматривать как в качестве «доминирующего» воздействия, так и в качестве «сопутствующего» воздействия.

Применение двух выражений (6.10a) и (6.10b) позволяет каждое воздействие, в том числе постоянные воздействия G , рассматривать как в качестве «доминирующего» воздействия, так и в качестве «сопутствующего» воздействия. При расчетах элементов конструкций заводского изготовления национальное приложение к ТКП EN 1990 [1] позволяет принимать в выражениях (6.10a) и (6.10b) значение частного коэффициента $\gamma_{G,sup} = 1,15$ при соблюдении следующих условий:

- в заводских условиях организована система контроля качества продукции; коэффициент вариации собственного веса составляет не более 5%; отношение суммы характеристических значений переменной (полезной) нагрузки к полной нагрузке на элемент конструкции, включая нагрузку от его собственного веса, должно находиться в следующих пределах:

$$0,1 \leq \frac{\sum_{i \geq 1} Q_{k,i}}{\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}} \leq 0,4. \quad (2)$$

Предельные состояния STR/GEO

Сопротивление элементов конструкции (фундаменты, сваи, стены подвалов и т.д.) (STR), учитывающих геотехнические воздействия и сопротивление грунта (GEO, см. 6.4.1), рекомендуется проверять, используя один из следующих трех подходов, дополненных с учетом геотехнических воздействий и сопротивления указаниями, приведенными в ТКП EN 1997 [20]:

- *подход 1*: расчетные значения согласно таблице A1.2(C) и расчетные значения согласно таблице A1.2(B) применяются в отдельных расчетах как для геотехнических воздействий, так и для других воздействий на конструкцию или для воздействий, создаваемых конструкцией. Как правило, размеры фундаментов определяют на основе таблицы A1.2(C), а несущую способность конструкции – на основе таблицы A1.2(B);

- *подход 2*: расчетные значения согласно таблице A1.2(B) применяют как для геотехнических, так и для других воздействий;

- *подход 3*: расчетные значения согласно таблице A1.2(C) применяют для геотехнических воздействий и одновременно частные коэффициенты согласно таблице A1.2(B) – для других воздействий на конструкцию или для воздействий, создаваемых конструкцией.

В таблице 3 представлены принципы составления расчетных сочетаний воздействий в случае постоянных или переходных расчетных ситуаций (основные сочетания) в соответствии с ТКП EN 1990[3]. Сочетания составлены для конструкций и их конструктивных элементов относящихся ко второму классу надежности RC2.

Таблица 3. – Принципы составления расчетных сочетаний воздействий для расчета по предельным состояниям несущей способности в случае постоянных или переходных расчетных ситуаций (основные сочетания)

Предельные состояния		Постоянные воздействия		Переменные воздействия		
		неблагоприятные	благоприятные	доминирующие	сопутствующие	
					основное	прочие
EQU	EQU 1	1,1 $G_{kj,sup}$	0,9 $G_{kj,inf}$	1,5 $Q_{k,1}$	–	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
	EQU 2	1,35 $G_{kj,sup}$	1,15 $G_{kj,inf}$	1,5 $Q_{k,1}$	–	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
	EQU 3	две отдельные проверки согласно сочетаниям EQU 1и STR 1				
STR	STR 1	1,35 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	—	1,5 $\psi_{0,1} Q_{k,1}$	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
		0,85 1,35 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	1,5 $Q_{k,i}$	–	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
	STR 2	1,15 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	—	1,5 $\psi_{0,1} Q_{k,1}$	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
		0,85 1,15 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	1,5 $Q_{k,i}$	–	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
STR/GEO	GEO 1	1,0 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	1,3 $Q_{k,1}$	–	1,3 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
		1,35 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	—	1,5 $\psi_{0,1} Q_{k,1}$	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
		0,85 1,35 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	1,5 $Q_{k,i}$	—	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
	GEO 2	1,35 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	—	1,5 $\psi_{0,1} Q_{k,1}$	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
		0,85 1,35 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	1,5 $Q_{k,i}$	—	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
	GEO 3	1,35 $G_{kj,sup}$	1,0 $G_{kj,inf}$	1,5 $Q_{k,i}$	—	1,5 $\psi_{0,i} Q_{k,i}$
		+ 1,0 $G_{kj,sup}^{(GEO)}$	+ 1,0 $G_{kj,inf}^{(GEO)}$	ИЛИ 1,3 $Q_{k,1}^{(GEO)}$	—	+ 1,3 $\psi_{0,i} Q_{k,i}^{(GEO)}$

В таблице 2 обозначение EQU 1 принято для описания ситуации, при которой сопротивление элементов конструкции не включено в расчет статического равновесия, расчетные значения воздействий в таком случае определяются согласно данным национального приложения [1, т. A.2(A)]. Обозначения EQU 2, EQU 3 приняты для описания ситуации, при которой расчет статического равновесия включает также сопротив-

ление элементов конструкции, расчетные значения воздействий в таком случае определяются согласно данным национального приложения [1, прим. 2 т. А.2(A)]. Обозначение STR 1 принято для общего описания ситуации расчета на внутреннее разрушение или чрезмерные деформации элементов конструкций, для которых прочность материалов имеет определяющее значение, при этом в данной расчетной ситуации не учитываются геотехнические воздействия. Обозначение STR 2 – для описания ситуации расчета на внутреннее разрушение или чрезмерные деформации элементов конструкций, выполненных в заводских условиях. Обозначения STR/GEO 1/2/3 приняты для описания ситуации расчета на внутреннее разрушение или чрезмерные деформации элементов конструкций, с учетом геотехнических воздействий соответственно для расчета согласно 1-му, 2-му и 3-му подходам в рамках ТКП EN 1990 [1].

Сочетание воздействий для особых расчетных ситуаций. Особые воздействия характеризуются очень низкой вероятностью возникновения на протяжении срока эксплуатации конструкции. Такие ситуации являются следствиями нестандартных условий использования (например, взрывов, ударов транспортных средств или судов, пожара, а также могут явиться следствием землетрясения, ураганных ветров или сильнейших снегопадов), они являются кратковременными. Сейсмические воздействия выделены в отдельный вид особого воздействия, так как для некоторых сооружений при определенных расчетных ситуациях они могут выступать как переменные воздействия.

При особых расчетных сочетаниях доминирующим является особое воздействие. Особые воздействия A_d учитываются совместно с частыми или практически постоянными значениями основного переменного воздействия (если имеется) ($\Psi_{1,1}$ или $\Psi_{2,1}$) $Q_{k,i}$ и практически постоянными значениями прочих переменных воздействий $\Psi_{2,i}Q_{k,i}$. В таблице 4 представлены принципы составления расчетных сочетаний при особых и сейсмических воздействиях в соответствии с ТКП EN 1990 [1].

Таблица 4. – Принципы составления расчетных сочетаний при особых и сейсмических воздействиях

Предельные состояния	Постоянные воздействия		Переменные воздействия		
	неблагоприятные	благоприятные	доминирующие	сопутствующие	
				основное	прочие
Особое	$G_{k,i,sup}$	$G_{k,i,inf}$	A_d	$(\Psi_{1,1} \text{ или } \Psi_{2,1}) Q_{k,i}$	$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$
Сейсмическое	$G_{k,i,sup}$	$G_{k,i,inf}$	$A_{Ed} = \gamma_f A_{Ek}$	–	$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$

Сочетания для особых расчетных ситуаций включают либо явное расчетное значение особого воздействия A_d (например, удара), либо относятся к ситуации после особого события ($A_d = 0$). Для ситуаций пожара A_d относится к расчетному значению непрямого температурного воздействия, как определено в ТКП EN 1991-1-2 [21].

Сочетание воздействий для проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности. В ТКП EN 1990 [1] предложены три сочетания воздействий: характеристическое, частое и практически постоянное. Соответствующее сочетание воздействий должны выбираться в зависимости от требований и критериев эксплуатационной пригодности, заданных в отдельном проекте, заказчиком или соответствующим национальным компетентным органом [1, п. 6.5.3(1)]. Если в ТКП EN 1991–ТКП EN 1999 не установлено другое, то для предельного состояния эксплуатационной пригодности рекомендуется применять частные коэффициенты, равные 1,0.

В таблице 5 представлены принципы составления расчетных сочетаний воздействий для проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности согласно ТКП EN 1990 [1].

Таблица 5. – Принципы составления расчетных сочетаний воздействий для проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности

Сочетание	Постоянные воздействия G_d		Переменные воздействия Q_d	
	неблагоприятные	благоприятные	доминирующие	прочие
Характеристическое	$G_{k,i,sup}$	$G_{k,i,inf}$	$Q_{k,1}$	$\Psi_{0,i} Q_{k,i}$
Частое	$G_{k,i,sup}$	$G_{k,i,inf}$	$\Psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$
Практически постоянное	$G_{k,i,sup}$	$G_{k,i,inf}$	$\Psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$

Характеристическое сочетание, как правило, используют для необратимых предельных состояний [1, п. 6.5.3(2)а], например превышение некоторых пределов раскрытия трещин в бетонных конструкциях. Частое сочетание, как правило, используют для обратимых предельных состояний [1, п. 6.5.3(2)б]. Практически постоянное сочетание, как правило, для оценки длительных эффектов (например, эффекты ползучести и усадки в бетонных конструкциях) и внешнего вида конструкции [1, п. 6.5.3(2)с, п. А1.4.3(4)].

Пример составления расчетных сочетаний для условной стальной колонны. Рассмотрим пример составления расчетного сочетания воздействий для проведения проверки предельного состояния несущей способности конструкции в целом или отдельных ее элементов (ULS), а также для проверки предельного состояния эксплуатационной пригодности (SLS) в соответствии с ТКП EN 1990 [1]. Варианты сочетаний рассмотрим на примере условной стальной колонны, подверженной воздействию постоянной g , функциональной q , снеговой s и ветровой w нагрузок. Проектный срок эксплуатации 50 лет, класс надежности RC2, категория помещения D (торговое помещение). Расчетная схема и условные обозначения нагрузок приведены на рисунке 2. Следует отметить, что сочетания воздействий необходимо осуществлять на основании наиболее неблагоприятных эффектов воздействий для возможных форм исчерпания

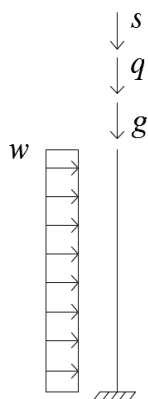


Рисунок 2. – Расчетная схема и условные обозначения нагрузок, действующих на условную стальную колонну

несущей способности конструкции в целом или отдельных ее элементов. Так, для рассматриваемой колонны возможны следующие формы исчерпания несущей способности: потеря несущей способности вследствие действия максимального значения продольной силы и соответствующего ей изгибающего момента (N_{max} , M_{coome}), потеря несущей способности вследствие действия максимального значения изгибающего момента и соответствующего ему значения продольной силы (M_{max} , N_{coome}), а также потеря несущей способности вследствие разрыва анкерных болтов, характеризующегося минимальным значением продольной силы и соответствующим значением изгибающего момента (N_{min} , M_{coome}).

В таблице 6 приведены варианты расчетных сочетаний воздействий для условия внутреннего разрушения (STR), также рассмотрены характеристические, частые и практически постоянные сочетания для проверки предельного состояния эксплуатационной пригодности (SLS).

Таблица 6. – Пример составления расчетных сочетаний воздействий для проверки условия внутреннего разрушения (STR) и для проверки предельного состояния эксплуатационной пригодности (SLS) условной стальной колонны в соответствии с ТКП EN 1990 [1]

№ загрузки-женности	ПС	Расчетная ситуация	№ уравнения	Воздействия				Доминирующие
				g	q	s	w	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ULS	STR	6.10(a)	1,35				–
2				1,35	1,5·0,7			
3				1,35	1,5·0,7	1,5·0,6		
4				1,35	1,5·0,7		1,5·0,6	
5				1,35	1,5·0,7	1,5·0,6	1,5·0,6	
6				1,35		1,5·0,6		
7				1,35			1,5·0,6	
8				1,35		1,5·0,6	1,5·0,6	
9				1,0				
10				1,0	1,5·0,7			
11				1,0	1,5·0,7	1,5·0,6		
12				1,0	1,5·0,7		1,5·0,6	
13				1,0	1,5·0,7	1,5·0,6	1,5·0,6	
14				1,0		1,5·0,6		
15				1,0			1,5·0,6	
16				1,0		1,5·0,6	1,5·0,6	
17	ULS	STR	6.10(b)	0,85·1,35	1,5			q
18				0,85·1,35	1,5	1,5·0,6		
19				0,85·1,35	1,5		1,5·0,6	
20				0,85·1,35	1,5	1,5·0,6	1,5·0,6	s
21				0,85·1,35		1,5		
22				0,85·1,35	1,5·0,7	1,5		
23				0,85·1,35		1,5	1,5·0,6	w
24				0,85·1,35	1,5·0,7	1,5	1,5·0,6	
25				0,85·1,35			1,5	
26				0,85·1,35	1,5·0,7		1,5	
27				0,85·1,35		1,5·0,6	1,5	
28				0,85·1,35	1,5·0,7	1,5·0,6	1,5	

Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	SLS		Характеристическое	1,0				–	
2				1,0	1,0			q	
3				1,0	1,0	0,6			
4				1,0	1,0		0,6		
5	SLS		Частное	1,0	1,0	0,6	0,6	s	
6				1,0		1,0			
7				1,0	0,7	1,0			
8				1,0		1,0	0,6		
9				1,0	0,7	1,0	0,6	w	
10				1,0			1,0		
11				1,0	0,7		1,0		
12				1,0			0,6	1,0	q
13				1,0	0,7	0,6	1,0		
14				1,0	0,7				s
15				1,0			0,5		
16				1,0	0,6	0,5			w
17				1,0				0,2	
18				1,0	0,6			0,2	
19			Практически постоянное	1,0	0,6			–	

Заключение. В результате анализа правил составления расчетных сочетаний воздействий, принципов назначения и области применения различных репрезентативных значений воздействий при составлении расчетных сочетаний воздействий для различных групп предельных состояний в соответствии с ТКП EN 1990 [1] сделана попытка систематизации и приведения к табличному виду правил составления расчетных сочетаний для предельных состояний несущей способности для условия потери статического равновесия EQU с учетом и без учета влияния сопротивления элементов, для условия внутреннего разрушения или недопустимых (чрезмерных) деформаций конструкции или ее элементов STR с учетом и без учета геотехнических воздействий GEO, а также с учетом фактора заводского изготовления. Также в качестве примера составления расчетных сочетаний воздействий для предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности для расчетной ситуации, характеризующейся внутренним разрушением STR, рассмотрена условная стальная колонна, подверженная действию снеговой, функциональной, постоянной и ветровой нагрузок, с составлением таблицы вариантов расчетных сочетаний в соответствии с положениями ТКП EN 1990 [1]. На основании выполненного анализа можно выделить ряд недостатков, лежащих в основе правил сочетаний воздействий согласно ТКП EN 1990 [1]:

- нет конкретных указаний о применении допущения (упрощения) о возможности учета не более двух переменных воздействий при составлении расчетных сочетаний.

- в национальном приложении к ТКП EN 1990 [1] и ТКП EN 1993 не установлены значения предельных значений для критериев (предельные значения деформаций, колебаний, повреждений) проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности применительно к стальным конструкциям. Среди подобных критериев в отдельную группу стоит выделить значения предельных прогибов.

- относительная точность определения номинального характеристического значения воздействия при явном отсутствии статистических данных относительно различного рода воздействий и влияния окружающей среды.

Актуальность направления дальнейшего исследования, связанного с необходимостью рассмотрения вероятностного подхода применительно к сочетанию воздействий, обуславливают главным образом несколько факторов:

- необходимость объективного учета сложного характера изменения во времени нагрузок и новых статистических данных;

- учет вероятностных свойств воздействий, в частности представление воздействий в виде случайных процессов и анализ их взаимодействий;

- установление корреляционных связей между воздействиями, так как не все воздействия могут быть отнесены к независимым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы проектирования конструкций. Еврокод : ТКП EN 1990-2011. – Введ. 01.07.12. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2012. – 70 с.

2. Еврокод 1 Воздействия на конструкции : ТКП EN 1991-1-3-2009. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки. – Введ. 10.12.2009. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2009. – 50 с.
3. Еврокод 1 Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия : ТКП EN 1991-1-4-2009. – Введ. 10.12.2009. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2009. – 127 с.
4. Райзер, В.Д. Теория надежности в строительном проектировании / В.Д. Райзер – М. : Изд-во АСВ, 1998. – 304 с.
5. Болотин, В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В.В. Болотин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1982. – 351 с.
6. Пичугин, С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий / С.Ф. Пичугин. – Полтава : ООО «АСМИ», 2009. – 452 с.
7. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
8. Ditlevsen, O. Structural Reliability Methods / O. Ditlevsen, H.O. Madsen. – Technical University of Denmark : Department of Mechanical Engineering : Coastal, Maritime and Structural Engineering, July 2005. – 363 p.
9. Madsen, H.O. Methods of structural safety / H.O. Madsen, S. Krenk, N.C. Lind. – New Jersey : Prentice Hall, 1986. – 416 p.
10. Mori, Y. Probabilistic models of combinations of stochastic loads for limit state design / Y. Mori, T. Kato, K. Murai // Structural Safety. – 2003. – Vol. 25. – P. 69–97.
11. Болотин, В.В. О сочетаниях случайных нагрузок, действующих на сооружение / В.В. Болотин // Строительная механика и расчет сооружений. – 1962. – № 2. – С. 1–5.
12. Ferry Borges, J. Structural safety / J. Ferry Borges, M. Castanheta. – 2 ed. – Lisbon : Laboratório Nacional De Engenharia Civil, 1971. – 326 p.
13. Melchers, R.E. Structural reliability – analysis and prediction / R.E. Melchers. – New Jersey : John Willey, 1999. – 456 p.
14. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. – Date of access: 15.01.2012.
15. Wen, Y.K. Structural load modeling and combination for performance and safety evaluation / Y.K. Wen. – New York : Elsevier Science Publisher, 1990. – 219 p.
16. Sýkora, M. Comparison of load combination models for probabilistic calibrations / M. Sýkora, M. Holický // Proceedings of 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP11, 1–4 August, 2011 / ETH Zurich, Switzerland ; eds. : M.H. Faber, J. Köhler, K. Nishijima. – Leiden, 2011. – P. 977–985.
17. Sýkora, M. Competitive Comparison of Load Combination Models / M. Sýkora, M. Holický // Book of abstracts – 1st International Symposium on Uncertainty Modelling in Engineering ISUME 2011, Prague, 2–3 May, 2011 / CTU in Prague ; eds.: A. Kučerová, J. Sýkora, O. Špačková, J. Vorel. – Prague, 2011. – P. 59–60.
18. Надежность строительных конструкций. Общие принципы : СТБ ISO 2394-2007. – Введ. 01.07.2008. – Минск : Госстандарт Респ. Беларусь, 2007. – 69 с.
19. Надольский, В.В. Параметры конструкционной надежности для проверок изгибаемых стальных элементов по предельным состояниям несущей способности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.В. Надольский ; Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2015. – 138 с.
20. Геотехническое проектирование. Еврокод 7. Часть 1. Общие правила : ТКП EN 1997-1-2009. – Введ. 10.12.2009. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 131 с.
21. Еврокод 1 Воздействия на конструкции. Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости : СТБ EN 1991-1-2-2009. – Введ. 10.12.2009. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2009. – 50 с.

Поступила 11.06.2018

PRINCIPLES OF CALCULATION OF DESIGN COMBINATIONS IN ACCORDANCE WITH TCP EN 1990

V. TUR, V. NADOLSKI, F. VEREVKA

The article is devoted to the review of the deterministic approach to the combination of loads in accordance with the normative document TCP EN 1990, which is currently used in the Republic of Belarus in the calculation of building structures. The aim of this work is to provide with the generalized information about the method of choosing the design combination of loads for various groups of limit states in accordance with different types of representative values of variable loads. As an example of compilation of design combinations of impacts for testing the ultimate limit state of a structure, and for inspections within the serviceability limit state, a conditional steel column is considered that belongs to the second class of reliability RC2, subject to constant, functional (category of the premise D – a trading premise), a snow and wind loadings.

Keywords: reliability, impacts, representative values, the method of partial coefficients, limit states, design situations.