

Заключение. С введением в 2009 году Еврокодов в РБ появилась возможность нормативно закреплённого расчёта холодноформованных элементов, но чтобы выполнить этот расчёт правильно, нужна высокая подготовка инженеров-проектировщиков. Поэтому часто конструкции из тонкостенных элементов рассчитывают без учёта эффективных характеристик. Недостатком Еврокодов является отсутствие ярко выраженной инженерной методики расчёта. Для учёта правильной работы под нагрузкой конструкций из тонкостенных элементов необходимо, чтобы расчётный комплекс имел возможность учесть дополнительно ещё одну степень свободы, а также выполнялся учёт эффективных характеристик сечения.

Программа CFSteel может рассматриваться как виртуальный инструмент научных исследований для оценки несущей способности стержневых систем из стальных тонкостенных холодногнутых конструкций (СТХК), а при наличии деформационной модели воздействий стержневых систем сложной геометрической структуры, и ее реализации в компьютерной программе, их совместная работа может рассматриваться как деформационная модель их расчёта, позволяющая предельно приблизить результаты ее расчёта к реальному напряженно-деформированному состоянию конструктивных схем систем из СТХК.

Список цитированных источников

1. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем. – Москва : Наука, 1967. – 984 с.
2. Власов, В. З. Тонкостенные упругие стержни. – Москва : Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 568 с.
3. Бычков, Д. В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. – Москва : 1962. – 478 с.
4. Лещенко, А. П. Фундаментальная строительная механика упругих систем. – Москва, 2008 – 546 с.
5. Туснин, А.Р. Расчёт и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля / автореферат на соиск. учен. степ. спец.: 05.23.01. – Москва, 2004. – 37 с.
6. Ray, E. Clough. Dynamic of Structures. – New York : McGraw-Hill, 1995. – 3th ed. – P. 752.
7. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. – Ч. 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов: ТКП EN 1993-1-3-2009*(02250). – Минск : Минстройархитектуры, 2014. – 119 с.
8. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. – Ч. 1-5. Пластинчатые элементы конструкций: ТКП EN 1993-1-3-2009*(02250). – Минск : Минстройархитектуры, 2014. – 51 с.

УДК 624.426.5

СОЧЕТАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ В СООТВЕТСТВИИ С ТКП EN 1990

Верёвка Ф. А., Мартынов Ю. С., Надольский В. В.

Annotation: *The article is devoted to the review of the deterministic approach to the combination of loads in accordance with the normative document TKP 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.*

Аннотация: *статья посвящена обзору принципов сочетания значений воздействий в соответствии с действующим в настоящее время на территории Республики Беларусь нормативным документом по расчёту строительных конструкций ТКП EN 1990. Цель данной работы обобщение информации о методике выбора расчетного сочетания воздействий для различных групп предельных состояний с учётом различных типов репрезентативных значений переменных воздействий.*

Введение. Строительные конструкции, как правило, подвергаются воздействию более одной переменной нагрузки. В связи с этим возникает проблема выбора «адекватного» расчетного сочетания нагрузок, которое наиболее полно и объективно описывало бы комплексное воздействие на конструкцию. Важно подчеркнуть, что данная проблема является одной из ключевых при определении надежности сооружений, поэтому работы многих отечественных и зарубежных исследователей направлены на ее преодоление. Отметим, что более правильно было бы рассматривать данную проблему не как задачу о выборе расчетного сочетания нагрузок, а как задачу о выборе расчетного сочетания эффектов воздействий (внутренних усилий, напряжений и т. п.) [1].

В общем случае можно отметить, что правила сочетания воздействий должны быть составлены таким образом, чтобы были учтены следующие факторы:

- «с помощью правила сочетаний нагрузок и содержащегося в нем коэффициента сочетаний учитывается ограниченная вероятность одновременного появления наибольшего значения кратковременных нагрузок» [2];

- правила сочетания должны быть легкодоступными в плане понимания и применения с целью простоты анализа получаемых расчетов;

- правила сочетания должны быть такими, чтобы запроектированная с их применением конструкция обладала примерно равной надежностью для всех возможных сочетаний воздействий и соответствовала целевому уровню надежности;

- правила сочетания не должны зависеть от материала конструкции.

В настоящее время в рамках ТКП EN 1990 [3] в общем случае различают основные и особые сочетания. Основные сочетания учитывают постоянные и переходные расчетные ситуации. Наличие внезапных нагрузок (вследствие взрывов, пожаров, землетрясений и т. д.) рассматривается в особых расчетных ситуациях. Во всех нормативных документах принято, что в особом сочетании особое воздействие вводится с полным значением, а для значений переменных нагрузок применяются понижающие коэффициенты.

Задачей настоящего обзора является рассмотрение подхода к решению задачи о выборе расчетного сочетания воздействий в соответствии с положениями ТКП EN 1990 [3].

1 Репрезентативные значения переменных воздействий. В расчетах при проектировании конструкций все воздействия, включая воздействия окружающей среды, в соответствии с ТКП EN 1990 [3], характеризуются репрезентативными значениями. Наиболее важным репрезентативным значением воздействия F [3, 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 [3, п. 4.1.2(1)P].

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

- установленный *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 [3, п. 4.1.2(7), прим. 2].

Помимо характеристических значений воздействий, ТКП EN 1990 [3] содержит еще целый ряд репрезентативных значений переменных воздействий. Для переменных воздействий обычно используются три репрезентативных значения: комбинационное $\psi_0 Q_k$, частое $\psi_1 Q_k$ и практически постоянное $\psi_2 Q_k$ [3, п. 4.1.3(1)P]. При этом соблюдается следующее неравенство:

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

Комбинационное значение переменного воздействия $\psi_0 Q_k$ используется для проверки предельных состояний несущей способности и необратимых предельных состояний эксплуатационной пригодности [3, п. 4.1.3(1)P]. Множитель ψ_0 учитывает вероятность одновременного появления наиболее неблагоприятных значений двух (или более) независимых переменных воздействий.

Частое значение переменного воздействия $\psi_1 Q_k$ используется для проверки предельных состояний несущей способности, включающих особые воздействия, и для проверки обратимых предельных состояний эксплуатационной пригодности. В соответствии с ТКП EN 1990 [3] частое значение $\psi_1 Q_k$ переменного воздействия Q определяется так, что общее время для которого $Q > \psi_1 Q_k$ в пределах выбранного установленного промежутка времени является всего лишь небольшой частью или частота события $Q > \psi_1 Q_k$ является ограниченной заданной величиной. Например, согласно [3, п. 4.1.3(1)P, прим. 1] для зданий ее значение рекомендовано применять равным 0,01 от продолжительности периода отнесения.

Практически постоянное значение переменного воздействия $\psi_2 Q_k$ используется для проверки предельных состояний несущей способности, включающих особые воздействия, для проверки обратимых предельных состояний эксплуатационной пригодности, для расчетов долговременных (длительных) эффектов. В соответствии с [3, п. 4.1.3(1)P, прим. 1] практически постоянное значение нагрузок, действующих на перекрытия зданий, обычно принимается таким образом, чтобы время его превышения составляло 0,5 базового периода. Практически постоянное значение альтернативно может быть определено как значение, усредненное за определенный период времени. Для некоторых видов воздействий коэффициент ψ_2 может быть весьма незначительным.

Рекомендуемые значения коэффициентов ψ_0 , ψ_1 и ψ_2 для сооружений и зданий представлены в приложении А ТКП EN 1990 [3, А. 1.2.2].

2 Общие требования составления сочетаний воздействий. Влияние воздействий, которые не могут сосуществовать одновременно в силу физических или функциональных причин, не следует рассматривать вместе, в виде сочетаний воздействий [3, п. А1.2.1(1)].

В целях упрощения проектирования в соответствии с ТКП EN 1990 [3] возможно при расчете сочетаний воздействий брать за основу не более двух переменных воздействий [3, п. A1.2.1(1)]. При этом использование отмеченного упрощения зависит от назначения, формы и местоположения здания, однако конкретные указания не даны.

В ТКП EN 1990 [3] даны следующие принципы составления сочетаний воздействий:

[3, 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. Конечно, для того чтобы выявить случаи зависимости предельных состояний от изменения интенсивности воздействия, необходимо принятие инженерного решения, что вносит субъективность в принятое решение. Данное правило в основном распространяется на предельные состояния статического равновесия.

[3, 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 [3]. 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. EQU: 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.

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

3 Сочетание воздействий для проверок предельных состояний несущей способности.

3.1 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[3]:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \quad (6.10) [3]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{array} \right. \quad (6.10a)/ (6.10b) [3]$$

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 неблагоприятное значение 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 (6.10a) все временные воздействия приняты в расчет со своими комбинационными значениями ($\psi_0 Q_k$). В выражении (6.10b) одно переменное воздействие определено как доминирующее воздействие (другие временные воздействия приняты в расчет как сопутствующие воздействия), 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 [3]. Стоит отметить, что в целом для критических предельных состояний в постоянных и переходных расчетных ситуациях согласно [3, п А.3.1(1)] расчетные значения воздействий следует принимать в соответствии с [3, т. А.2(A) – А.2(C)].

1.1.1.1.1 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 [3].

1.1.1.1.2 Предельные состояния STR

Расчеты элементов конструкций (STR, см. 6.4.1 [3]), 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 [3].

Применения 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 [3] 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:

$$0.1 \leq \frac{\sum_{i \geq 1} Q_{k,i}}{\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}} \leq 0.4 . \quad (2)$$

Ниже в таблице 1 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.

В таблице 1 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 [3, т. А.2(А)].

Обозначения EQU 2, EQU 3 приняты для описания ситуации, при которой *расчет статического равновесия включает также сопротивление элементов конструкции*, расчетные значения воздействий в таком случае определяются согласно данным национального приложения [3, прим. 2 т. А.2(А)].

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 принято для описания ситуации расчета на внутреннее разрушение или чрезмерные деформации элементов конструкций, выполненных в заводских условиях.

Таблица 1 – Принципы составления расчетных сочетаний воздействий для расчета по предельным состояниям по несущей способности в случае постоянных или переходных расчетных ситуаций (основные сочетания)

Предельные состояния		Постоянные воздействия		Переменные воздействия		
		неблагопр.	благопр.	доминир.	сопутств.	
					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 1 и STR 1				
STR	STR 1	$1.35 G_{kj,sup}$	$1.0 G_{kj,inf}$	—	$1.5 \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$1.5 \psi_{0,i} Q_{k,i}$
		$0.85 \cdot 1.35 G_{kj,sup}$	$1.0 G_{kj,inf}$	$1.5 Q_{k,i}$	–	$1.5 \psi_{0,i} Q_{k,i}$
	STR 2	$1.15 G_{kj,sup}$	$1.0 G_{kj,inf}$	—	$1.5 \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$1.5 \psi_{0,i} Q_{k,i}$
		$0.85 \cdot 1.15 G_{kj,sup}$	$1.0 G_{kj,inf}$	$1.5 Q_{k,i}$	–	$1.5 \psi_{0,i} Q_{k,i}$

3.2 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 учитывается 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 $\psi_{2,i} Q_{k,i}$. Ниже в таблице 2 представлены принципы составления расчетных сочетаний при особых и сейсмических воздействиях в соответствии с ТКП EN 1990 [3].

Таблица 2 – Принципы составления расчетных сочетаний при особых и сейсмических воздействиях

Предельные состояния	Постоянные воздействия		Переменные воздействия		
	неблагопр.	благопр.	доминир.	сопутствующие	
				основное	прочие
Особое	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	A_d	$(\psi_{1,1}$ или $\psi_{2,1}) Q_{k,i}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Сейсмическое	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$A_{Ed} = \gamma_f A_{Ek}$	–	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

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 [4].

4 Сочетание воздействий для проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности. В ТКП EN 1990 [3] предложены три сочетания воздействий: характеристическое, частое и практически постоянное. Соответствующее сочетание воздействий должно выбираться в зависимости от требований

и критериев эксплуатационной пригодности, заданных в отдельном проекте, заказчиком или соответствующим национальным компетентным органом [3, 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. Ниже в таблице 3 представлены принципы составления расчетных сочетаний воздействий для проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности согласно ТКП EN 1990 [3].

Таблица 3 – 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	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$Q_{k,1}$	$\Psi_{0,i}Q_{k,i}$
Частое	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\Psi_{1,1}Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i}Q_{k,i}$
Практически постоянное	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\Psi_{2,1}Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i}Q_{k,i}$

Характеристическое сочетание, как правило, используют для необратимых предельных состояний [3, п. 6.5.3(2)а], например превышение некоторых пределов раскрытия трещин в бетонных конструкциях. Частое сочетание, как правило, используют для обратимых предельных состояний [3, 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 [3, п. 6.5.3(2)с, п. А1.4.3(4)].

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 [3] сделана попытка систематизации и приведения к табличному виду правила составления расчетных сочетаний для предельных состояний по несущей способности для EQU с учетом и без учета влияния сопротивления элементов и для STR без учета геотехнических воздействий в общем случае, а также с учетом фактора заводского изготовления. На основании выполненного анализа можно выделить ряд недостатков, лежащих в основе правил сочетаний воздействий согласно ТКП EN 1990 [3]:

- не обосновано допущение (упрощение) о возможности учета не более двух переменных в сочетаниях воздействий, что, в свою очередь, при использовании формул (6.10а) и (6.10б) может привести к недопустимому снижению уровня надежности.
- в национальном приложении к ТКП EN 1990 [3] не установлены значения предельных значений для критериев (предельные значения деформаций, колебаний, повреждений) проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности. 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 [1, 5, 6], 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.

Список цитированных источников

1. Перельмутер, А. В. Расчетные сочетания нагрузок для проверки надежности конструкций (обзор) / А. В. Перельмутер, С. Ф. Пичугин // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. – 2015. – № 15. – С. 4.
2. Шпете, Г. Надёжность несущих строительных конструкций / Г. Шпете – Москва : Стройиздат, 1994. – 288 с.
3. Еврокод. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990-2011. Введ. 01.07.12. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2012. – 70 с.
4. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: EN 1991-1-2-2009. – Введ. 10.12.2009. – Минск : МАиС РБ, 2009. – 50 с.
5. Мартынов, Ю. С. Вероятностные модели воздействий для условий Республики Беларусь / Ю. С. Мартынов, В. В. Надольский // Вестник Полоцкого государственного университета. – Серия F: Прикладные науки. Строительство. – 2014. – № 16. – С. 13–19.
6. Nadolski, V. A first attempt to determine the partial factors according to Eurocodes for the verification of ULS of steel elements for conditions of the Republic of Belarus / V. Nadolski, V. Tur // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering –2016 – Vol. 14 (No 1) – P. 44 – 50.

УДК 624.014

ПОТЕРЯ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ КУПолов С ЖЁСТКИМИ УЗЛАМИ

Глушко К. К.

Введение. Сетчатые купола обладают архитектурной выразительностью, высокой жёсткостью, небольшим расходом материалов. Однако широкому распространению конструкций такого вида препятствует недостаточная изученность их работы под действием внешней нагрузки. Несмотря на широкое распространение компьютерных программ для расчёта строительных конструкций, ряд задач, связанных с устойчивостью сетчатых куполов, остаётся нерешённым. Одно из явлений, сопровождающееся геометрически нелинейным процессом деформирования, является потерей местной устойчивости формы сетчатого купола, проявляющаяся во внезапном переходе одного из стержневых многогранников, образующих купол, из выпуклого состояния в вогнутое - происходит потеря устойчивости формы стержневого многогранника.

Разработкой и совершенствованием аналитических методов расчёта потери местной устойчивости сетчатых куполов занимались К. Клёпель и Ф. Шардт, Д. Райт, В. А. Савельев, А. А. Журавлёв, Т. Судзуки, Т. Огава, К. Иракаши, М. Сайто, И. Хангай, И. Тода, Т. Ямагива, Т. Окухара и другие [2, 3, 5, 7–9]. Авторами отмечено, что наибольшее влияние на величину критической нагрузки, вызывающей прощёлкивание узлов сетчатого купола, оказывают форма сетчатого купола, расчётная схема сооружения, конструкции узлов, точность сборки.