

УДК 624.042.41

Тур В.В., Черноиван А.В.

## НОРМИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Введение.** В соответствии с действующими в строительстве ТНПА при проектировании зданий и сооружений обязательным является выполнение расчета строительных конструкций на ветровые воздействия. Так как понятие ветрового воздействия включает большой массив различных параметров, численные значения которых являются результатом статистического оценивания выборки случайных величин и производных от них, был выполнен сравнительный анализ ряда методик [2, 3, 4 и 5], позволивший выделить два подхода учета ветровой нагрузки. Первый, квазистатический подход, используется в нормативных документах стран-членов СЕН, Украины и ряда других государств. Механическая идеализация воздействия аэродинамической нагрузки на здания и сооружения в соответствии с данным подходом может быть представлена внешней нагрузкой, уравновешенной внутренними силами упругости, сопротивления и инерционной силой. При этом внутренняя сила упругости может быть рассмотрена как *эквивалентная статическая нагрузка*, вызывающая такие же реакции у сооружения, как от порывистого ветра, однако не требующая при проектировании уточненных динамических параметров:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}, \quad (1)$$

где  $F_w$  – ветровая нагрузка, действующая на конструкцию или конструктивный элемент;

$c_s c_d$  – конструкционный коэффициент;

$c_f$  – аэродинамический коэффициент усилия для конструкции или конструктивного элемента;

$q_p(z_e)$  – пиковое значение скоростного напора на высоте  $z$ , включающее средние и пульсационные изменения скорости ветра;

$A_{ref}$  – базовая площадь конструкции или конструктивного элемента, к которым приложено ветровое давление.

Второй подход, предлагаемый СНиП 2.01.07 [2], разработанными более 20 лет назад и в настоящее время в полной мере не отражающими всех особенностей проектирования современных зданий, базируется на необходимости учета инерционных сил. При этом если частоты собственных колебаний сооружения принимают определенные значения, решение задачи динамического расчета может быть сведено к квазистатической по аналогии с первым подходом.

Учитывая данное обстоятельство, в рамках реализации государственной программы по внедрению на территории Республики Беларусь Европейских норм проектирования, были выполнены исследования по адаптации методики и нормируемых параметров ветровых воздействий для территории Республики Беларусь и проведен сравнительный анализ моделирования ветровых воздействий на здания и сооружения [8] согласно EN 1991-1-4:2005/AC:2009 [5] и СНиП 2.01.07 [2].

Введение в 2010 году на территории Республики Беларусь ТКП EN 1991-1-4-2009 «Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия» в качестве национального ТНПА обусловило разработку к идентичному тексту перевода (ИДТ) Европейских норм Национального приложения (НА), в котором приводятся значения национально устанавливаемых параметров по нормированию ветровых воздействий на строительные конструкции по 54 пунктам. Для составления Национального приложения к ТКП EN 1991-1-4-2009 [1], в первую очередь, была построена

карта ветровых районов для территории Республики Беларусь, составленная по результатам статистического оценивания данных, зафиксированных на метеорологических станциях и постах Республики Беларусь. Также был выполнен комплекс исследований по установлению зависимости значений конструкционного коэффициента от параметров расчетной поверхности для основных строительных материалов конструктивных элементов и типов местности, характерных для Республики Беларусь, и определению значения коэффициента, учитывающего направление ветра, позволившие реализовать квазистатический подход учета ветровой нагрузки.

**Построение карты ветровых районов для территории Республики Беларусь.** Для отображения процессов воздействия атмосферных нагрузок на строительные конструкции используются различные вероятностные модели, выбор которых обуславливается физической природой нагрузки, особенностью статистических данных, их доступностью и трудоемкостью обработки, а также конечной целью исследования.

Исследованиями установлено [11], что наилучшее согласие с результатами систематических измерений базовых характеристик ветра имеет распределение Вейбулла, являющееся одной из трех выделяемых параметрических форм, называемых распределениями экстремальных значений:

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad \begin{cases} 0 < v < \infty; \\ \beta > 0; \\ \alpha > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $F(v)$  – вероятность того, что для установленного срока эксплуатации скорость ветра не превысит значения  $V$ ;

$\alpha, \beta$  – коэффициенты, определяемые для каждой метеостанции и зависящие от ветрового режима конкретной местности.

По итогам выполненной оценки условий проведения наблюдений за характеристиками ветра на метеостанциях и постах Республики Беларусь было установлено, что результаты наблюдений могут использоваться при решении инженерных задач в общем случае и построении карты ветрового районирования в частном, если они обладают *единством качества* и составляют *микрометеорологически однородный ряд*. Единство качества обуславливается средствами и методами производства наблюдений и регламентирует определение таких характеристик ветра, как средняя скорость ветра, среднее направление ветра и максимальная скорость ветра в срок и между сроками наблюдений. Ряд данных о скорости ветра принято называть микрометеорологически однородным, если все относящиеся к нему результаты наблюдений можно рассматривать как полученные в одинаковых или эквивалентных микрометеорологических условиях. Эти условия определяются следующими факторами:

- высотой установки ветроприемника над поверхностью земли;
- шероховатостью поверхности окружающей местности;
- временем осреднения скорости ветра;
- сроками и количеством наблюдений в сутки;
- изменением конструкции ветроизмерительных приборов.

Так как в соответствии с принятой методикой выполнения измерений на метеостанциях, скорость ветра регистрируется с округлением к ближайшему целочисленному значению, при статистическом

**Тур Виктор Владимирович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологий бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

**Черноиван Анна Вячеславовна**, магистр технических наук, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

оценивании максимумов скорости был использован метод псевдослучайного квантования. Данная процедура предполагает добавление перед операцией квантования к исходным данным малой псевдослучайной составляющей и одновременное вычитание ее из получаемых данных на выходе. Псевдослучайная составляющая вносит дополнительные колебания вокруг уровня квантования, которые позволяют получить вероятности непривышения, необходимые для принятия характеристических значений ветровой нагрузки.

В качестве исходных данных для построения карты ветровых районов и определения соответствующим им основных значений базовой скорости ветра  $V_{b,0}$  были использованы результаты систематических измерений базовых характеристик ветра на 46 метеорологических станциях и постах, равномерно размещенных на территории Республики Беларусь, за период 1966–2008 г., предоставленные ГУ «Республиканский Гидрометеорологический центр».

С целью упрощения процедуры обработки исходных данных, обеспечения высокой точности результатов статистического оценивания данных наблюдений и расчета значений ветровой нагрузки в рамках проводимых численных исследований, были разработаны и реализованы расчетные алгоритмы на базе математического пакета MathCAD. Статистическая обработка данных выполнялась с помощью программы «Расчет скорости» [10]. На рис. 1 представлены распределения экстремальных значений трех типов и полученные с их помощью основные значения базовой скорости ветра на примере аэрогидрометеорологической станции Брест.

Результаты статистического оценивания показали, что не для всех метеорологических станций и постов выполняется установленная для характеристических значений воздействий годовая вероятность непривышения, равная 0,98 [7, 4.1.2(7)Р Примечание 2]. В связи с этим и согласно ТКП EN 1990-2011 «Еврокод. Основы проек-

тирования строительных конструкций» для уточнения полученных характеристических значений скорости ветра была проанализирована обеспеченность расчетных значений и выполнена калибровка частных коэффициентов для ветрового воздействия.

Практически все (за исключением одного) подобранные значения частных коэффициентов не превышают 1,5. Таким образом, при применении частного коэффициента  $\gamma_f = 1,5$  [7, таблица A.1.2(B)] требуемая вероятность безотказной работы конструктивных элементов будет выполняться для всех метеостанций за исключением Шарковщины. Это является достаточным условием для принятия для всей территории Республики Беларусь одного ветрового района с основным значением базовой скорости ветра  $V_{b,0} = 22$  м/с.

Для апробации полученного основного значения базовой скорости ветра для территории Республики Беларусь было выполнено сравнение с аналогичными нормируемыми параметрами, установленными в национальных ТНПА стран, граничащих с Республикой Беларусь (рис. 2).

Результаты сравнения показали, что основное значение базовой скорости ветра  $V_{b,0}$ , установленное для приграничных районов Литовской и Латвийской Республик и Республики Польша, а также средняя скорость ветра, заложенная в нормативном значении ветрового давления  $W_0$  приграничных районов Российской Федерации, хорошо коррелируют с полученным значением  $V_{b,0}$  для территории Республики Беларусь. Скорость ветра для характеристических значений ветрового давления  $W_0$  для приграничных районов Украины на 25...30% превышает значения, полученные для Республики Беларусь. Такое расхождение результатов, по всей вероятности,

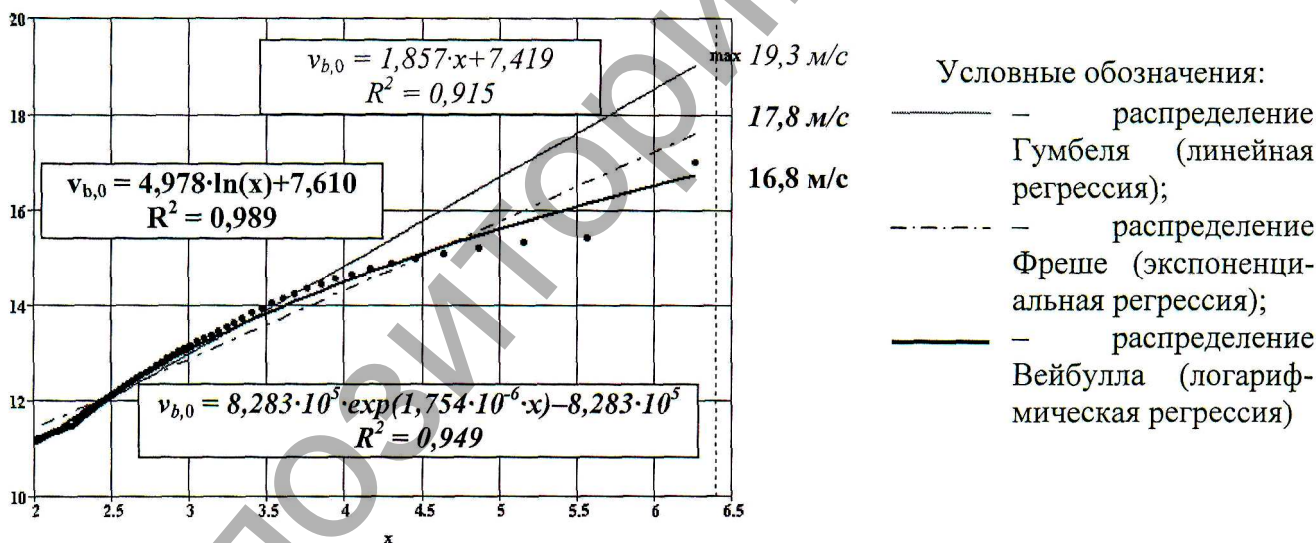


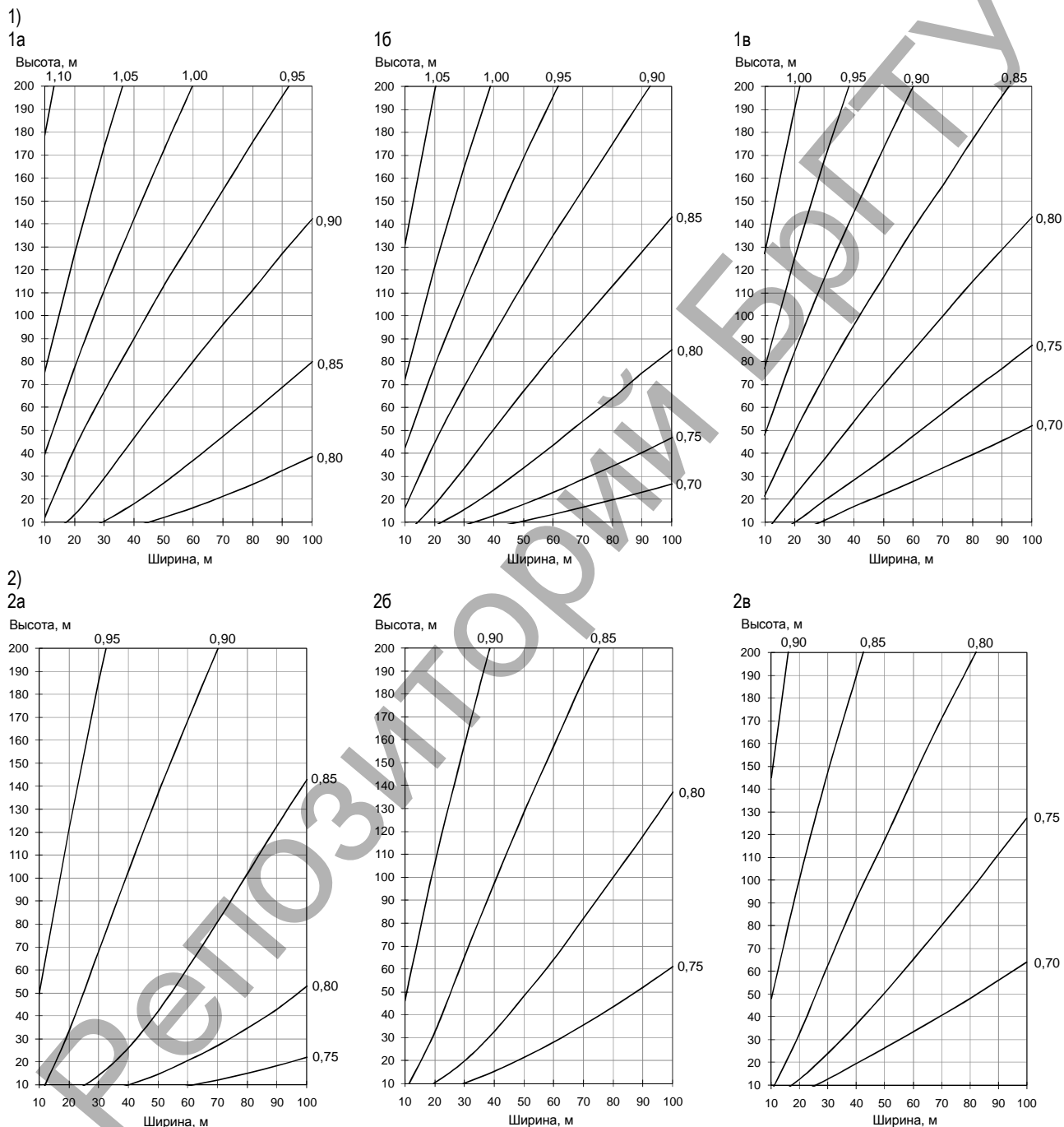
Рис. 1. Результаты оценивания месячных максимумов средней скорости ветра методом псевдослучайного квантования



Рис. 2. Карта ветрового районирования Республики Беларусь и приграничной территории

Таблица. Значения коэффициента, учитывающего направление ветра  $C_{dir}$

Сектор	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Направление, град	350–10	20–40	50–70	80–100	110–130	140–160	170–190	200–220	230–250	260–280	290–310	320–340
$C_{dir}$	0,80	0,71	0,78	0,78	0,79	0,84	0,76	0,77	0,95	1,00	0,94	0,96



1 – для зданий со стальным каркасом; 2 – для зданий с железобетонным каркасом  
а – II тип местности; б – III тип местности; в – IV тип местности

Рис. 3. Значения коэффициента  $C_s C_d$

вызвано тем, что при построении карты районирования территории Украины была использована большая выборка базовых характеристик ветра (около 12 млн. результатов), зарегистрированных за относительно короткий период с 1970 г. по 1990 г.

**Определение значения коэффициента, учитывающего направление ветра и конструктивного коэффициента.** Значения коэффициента, учитывающего направление ветра, были определены с использованием предположения о равновероятности всех гори-

зональных направления ветра. Согласно ему величины максимальных средних значений скорости ветра, зафиксированные на метеостанциях и скорректированные с учетом основных параметров микрометеорологически однородного ряда, были разделены на 12 секторов по 30° каждый. Полученные с помощью программы «Расчет коэффициента направления» [10] значения коэффициента, учитывающего направление ветра по секторам для климатических условий Республики Беларусь, представлены в таблице.

Из выражения (1) следует, что для квазистатической модели учета ветровых нагрузок на здания и сооружения необходимо иметь численные значения конструкционного коэффициента. Конструкционный коэффициент учитывает возможность одновременного возникновения пиковых значений скоростного напора ветра по всей поверхности (масштабный коэффициент  $C_s$ ) и влияние резонансных колебаний сооружения вследствие турбулентности ветра (динамический коэффициент  $C_d$ ). При выполнении ряда условий конструкционный коэффициент может быть рассчитан по формуле:

$$C_s C_d = \frac{1 + 2k_p \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_e)}, \quad (3)$$

где  $k_p$  – пиковый коэффициент, определяемый как отношение максимального значения пульсационной составляющей реакции сооружения к его стандартному отклонению;

$I_v(z_e)$  – интенсивность турбулентности на высоте  $Z$ , равная отношению стандартного отклонения турбулентности к средней скорости ветра;

$B^2$  – фоновая составляющая реакции, учитывающая отсутствие полной корреляции давления на поверхность конструкции;

$R^2$  – резонансная составляющая реакции, учитывающая резонансные колебания с учетом формы колебаний вследствие турбулентности.

Коэффициент  $C_s C_d$  также допускается определять по графикам огибающих безопасных значений в зависимости от ширины и высоты расчетной поверхности, перпендикулярной направлению действия ветра, для основных строительных материалов конструктивных элементов зданий и сооружений и типов местности для климатических условий Республики Беларусь (рис. 3), полученных с помощью программы «Расчет конструкционного коэффициента» [10].

**Сравнительный анализ существующих методик по учету ветровых воздействий.** Сравнительный анализ методик по учету ветровых воздействий при проектировании зданий и сооружений, заложенных в таких нормативных документах как ТКП EN 1991-1-4-2009 [1], СНиП 2.01.07 [2], СП 20.13330.2011 [3] и ДБН В.1.2-2:2006 [4], был выполнен в виде численного эксперимента в программном комплексе ЛИРА версии 9.4. При расчетах рассматривались здания каркасного типа с ядром жесткости и конструктивными элементами, выполненными из железобетона.

Учитывая требования ТКП 45-3.02-108-2008 «Высотные здания. Строительные нормы проектирования» и практику строительства, были рассмотрены следующие типы зданий с высотами 25 м, 50 м и 200 м:

- тип «1» – здание квадратное в плане с размерами 30×30 м;
- тип «2» – здания прямоугольные в плане с размерами 72×30 м;
- тип «3» – здания сложной конфигурации с габаритными размерами в плане 72×30 м.

При расчетах ветровая нагрузка прикладывалась как узловая в точках сопряжения колонн с плитами перекрытия и покрытия в уровнях каждого типового этажа. Определение значений ветровой нагрузки в соответствии с методикой, принятой в ТКП EN 1991-1-4-2009 [1], выполнялось с использованием разработанной программы «Расчет ветровой нагрузки» [10]. Значения расчетной ветровой нагрузки согласно СНиП 2.01.07 [2] и СП 20.13330.2011 [3] определялись с применением программы «ВеСТ», входящей в расчетный комплекс SCAD Office версии 11.1. Основное значение базовой скорости ветра и нормативное

(характеристическое) значение ветрового давления, используемые в расчетах, были приняты для климатических условий г. Бреста.

При проведении анализа полученных результатов выполненных расчетов зданий по учету ветровых воздействий согласно существующим методикам, сравнения выполнялись по значениям продольных сил и изгибающих моментов в колоннах зданий, а также величинам горизонтальных перемещений верха зданий.

По результатам выполненных расчетов установлено, что наилучшая корреляция численных значений продольных сил  $N$  и изгибающих моментов  $M$  для принятых расчетных высот зданий всех типов имеет место для методик, заложенных в ТКП EN 1991-1-4-2009 [1] и ДБН В.1.2-2:2006 [4], а также для зданий типа «3» с высотами 25...50 м при расчете согласно ТКП EN 1991-1-4-2009 [1] и методикам СНиП 2.01.07 [2] и СП 20.13330.2011 [3]. Наибольшие расхождения результатов расчета (от 25% до 45%) были получены для зданий типа «1» с высотами 25...50 м и типа «2» с высотой 25 м при расчетах по методике ТКП EN 1991-1-4-2009 [1] и методикам СНиП 2.01.07 «Нагрузки и воздействия» и СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия». Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. Полученные значения горизонтальных перемещений верха зданий всех типов не превышают предельных значений, установленных в п. 10.1.1 ТКП 45-3.02-108-2008 «Высотные здания. Строительные нормы проектирования».

Результаты выполненного сравнительного анализа определения значений средней скорости ветра и ее изменения с высотой подробно приведены в [9].

#### Заключение

1. По результатам статистического оценивания систематических измерений базовых характеристик ветра с применением метода псевдошумового квантования и калировки частных коэффициентов для расчетных значений ветрового воздействия построена карта ветрового районирования для территории Республики Беларусь с основным значением базовой скорости ветра  $V_{b,0}$ , равным 22 м/с.
2. Для апробации полученного основного значения базовой скорости ветра выполнено сравнение с аналогичными нормируемыми параметрами, установленными в национальных ТНПА стран, граничащих с Республикой Беларусь. Результаты сравнения показали хорошую корреляцию с полученным значением  $V_{b,0}$  для всех приграничных территорий, за исключением Украины, где значения ветрового давления  $w_0$  на 25...30% превышают значения, полученные для Республики Беларусь.
3. С использованием предположения о равновероятности всех горизонтальных направлений ветра получены значения коэффициента  $C_{dir}$ , учитывающего неравномерность ветровой нагрузки по направлениям ветра и позволяющего оптимизировать расчет зданий и сооружений с учетом их привязки на местности. Установлено, что преобладающим для климатических условий Республики Беларусь является западное направление (сектор 10), для которого значение коэффициента, учитывающего направление ветра, принято равным 1,0.
4. Построены графики зависимости конструкционного коэффициента  $C_s C_d$  от ширины и высоты расчетной поверхности, перпендикулярной направлению действия ветра, позволяющие выполнять расчеты зданий и сооружений со стальными и железобетонными несущими конструкциями с использованием квазистатического подхода определения ветровой нагрузки. Исходными данными для построения графиков стало основное значение базовой скорости ветра  $V_{b,0}$ , принятое для карты ветровых районов территории Республики Беларусь, а также параметры шероховатости для II, III и IV типов местности.
5. Анализ результатов выполненных численных исследований зданий трех типов показал, что наилучшее согласие значений

$N$  и  $M$ , полученных в соответствии с ТКП EN 1991-1-4-2009 [1], имеет место с аналогичными параметрами, рассчитанными согласно ДБН В.1.2-2:2006 [4], а наибольшее расхождение – согласно методикам СНиП 2.01.07 [2] и СП 20.13330.2011 [3]. Полученные значения горизонтальных перемещений верха зданий всех типов не превышают предельных значений, установленных ТКП 45-3.02-108-2008 [6, п. 10.1.1].

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1–4. Общие воздействия. Ветровые воздействия: ТКП EN 1991-1-4-2009. – Введ. 01.01.2010. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2010. – 118 с.
2. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.01.87. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 36 с.
3. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*: СП 20.13330.2011. – Введ. 20.05.11. – М.: Минрегион России, 2011. – 80 с.
4. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2:2006. – Введ. 01.01.07. – Киев: Минстрой Украины, 2006. – 78 с.
5. Eurocode 1. Actions on structures – General actions – Part 1–4: Wind actions: EN 1991-1-4:2005/AC:2009. – Brussels: European Committee for Standardization, 2009. – 148 p.
6. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108-2008 (02250) – Введ. 01.12.2008. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2008. – 92 с.
7. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990-2011. – Введ. 01.01.2012. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. – 96 с.
8. Тур, В.В. Моделирование ветровых воздействий на здания и сооружения в соответствии с ТКП EN 1991-1-4 / В.В. Тур, А.В. Черноиван // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: Т.М. Пецольт (отв. ред.), Е.А. Ровба [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2010. – С. 203–211.
9. Тур, В.В. К оценке средней скорости ветра при расчете зданий и сооружений / В.В. Тур, А.В. Черноиван // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2011. – № 1(67): Архитектура и строительство. – С. 50–53.
10. Тур, В.В. Расчет некоторых параметров ветрового воздействия с использованием математического пакета MathCAD / В.В. Тур, А.В. Черноиван // Вестник Российского университета дружбы народов. – 2011. – № 2: Инженерные исследования. – С. 31–37.
11. Райзер, В.Д. Теория надежности в строительном проектировании / В.Д. Райзер. – М.: АСВ, 1998. – 304 с.
12. Żurański, J.A. Wpływ warunków klimatycznych i terenowych na obciążenie wiatrem konstrukcji budowlanych / J.A. Żurański. – Warszawa: Wydawnictwa Instytut Techniki Budowlanej, 2005. – 128 p.
13. Гордеев, В.Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин; под общей ред. А.В. Перельмутера. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 482 с.
14. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан / Пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецовою; под ред. Б.Е. Маслова. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с.

Материал поступил в редакцию 31.02.12

#### TUR V.V., CHERNOIVAN A.V. Standardization of wind loading on buildings and constructions for climatic conditions of Belarus

In article state fundamentals of a technique of wind mapping and the map of wind zone for Belarus and frontier territory is presented. Values of the directional factor and structural factor, entered into the National Annex to ТКП EN 1991-1-4 «Eurocode 1. Actions on structures. Part 1–4. General actions. Wind actions». Results of the comparative analysis of some techniques under the account of the wind actions, executed in the form of numerical experiment are presented.

УДК 624.014.27

**Драган В.И., Морилова Н.Л.**

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЖИВУЧЕСТИ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БРГТУ»

**Введение.** Структурные покрытия с применением системы «БргТУ» относятся к 1 уровню ответственности, для которых необходим расчет уровня живучести. Сразу отметим, что при последующем расчете не берется вероятность терактов, взрывов и других событий, имеющих бесконечно малую вероятность их появления. Данный расчет проводился с целью определения величины критической нагрузки, выявления путей разрушения различных структурных систем, а также влияния формы системы на характер их разрушения.

Обоснование уровня живучести проводилось в ПК SAP2000 в нелинейной постановке. Было необходимо рассчитать весь процесс нагружения, включая докритическое и закритическое деформирование. Кроме того, предлагаемый метод позволил рассчитать такие сложные задачи, которые традиционным способом решались или очень приближенно, или не решались вовсе. Полученные результаты оказались весьма наглядными, а сам процесс определения несущей способности оказался полностью автоматизированным.

Весьма важной задачей было нахождение величины критической (разрушающей) узловой нагрузки, определение предельного состояния системы в целом. Предельное напряженное состояние системы соответствует такому напряженному состоянию, когда малейшее до-

бавочное силовое воздействие нарушает существующее равновесие и приводит систему в неустойчивое состояние. Достаточное условие устойчивости – потенциальная энергия имеет минимум. Выполнение этого условия, а также определение границ перехода различных состояний энергии представляет сложнейшую проблему.

Структурные пространственные покрытия являются весьма сложной системой включающей в себя тысячи элементов, в которой при увеличении нагрузки происходит исчерпание несущей способности отдельных стержней, перераспределение усилий и даже смена знака усилия в элементах. По сравнению с растянутыми элементами, расчет сжатых элементов требует значительно большей исходной информации. Во-первых, необходимо описать геометрические характеристики стержня: длину, форму поперечного сечения и форму оси, которая имеет начальную погибь. Во-вторых, необходимо задать упругопластическую диаграмму материала. И, в-третьих, необходимо описать условия прикрепления концов элемента к остальной конструкции.

При создании расчетных моделей были приняты следующие исходные параметры: все узлы системы (кроме опорных) принимаются шарнирными, принималась гипотеза о центральном нагружении

**Драган Вячеслав Игнатьевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

**Морилова Наталья Леонидовна**, аспирантка кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура