

## ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Черноиван А.В.**

**Введение.** В соответствии с действующими в строительстве техническими нормативно-правовыми актами при проектировании зданий и сооружений обязательным является выполнение расчета строительных конструкций на ветровые воздействия. Так как понятие ветрового воздействия включает целый комплекс различных параметров, численные значения которых являются результатом статистического оценивания выборки случайных величин и производных от них, был выполнен сравнительный анализ ряда методик учета ветровой нагрузки [4...6, 12].

С другой стороны, современная ветроэнергетика не ограничивает рассмотрение ветровых воздействий исключительно в качестве временных неблагоприятных нагрузок, позволяя отнести их к одному из самых динамично развивающихся видов возобновляемых источников энергии. Так, согласно *Стратегии развития энергетического потенциала РБ* [7, 8], на территории Республики для размещения ветроэнергетических установок (ВЭУ) выявлено 1840 площадок, внесенных в государственный кадастр возобновляемых источников энергии, с теоретически возможным энергетическим потенциалом свыше 1600 МВт.

В статье, таким образом, рассмотрены как особенности нормирования ветровой нагрузки на здания и сооружения, так и перспективы использования энергии ветра на примере климатических условий Республики Беларусь.

**Обзор нормативных и литературных источников.** Выполненный обзор нормативных и литературных источников позволил выделить два подхода учета ветровой нагрузки. Первый, квазистатический подход, используется в нормативных документах стран-членов СЕН (включая Республику Польша), 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;

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

Второй подход, предлагаемый СНиП 2.01.07 [6], 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.

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 (NA), 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 [2], в первую очередь, была построена карта ветровых районов для территории Республики Беларусь, а также определены значения параметров (коэффициентов), применяемых в мультипликативной модели для нахождения характеристических значений ветровых нагрузок.

При исследовании второго аспекта ветрового воздействия, обзор литературных источников позволил выделить в качестве основополагающих при проектировании и выборе места размещения ВЭУ учет требований охраны окружающей среды и природопользования. Несмотря на то, что ветроустановки вырабатывают электрическую энергию с нулевой эмиссией диоксида углерода в окружающую среду [13], их отрицательное влияние связано с изменением ландшафта, генерацией шума и инфразвука. К недостаткам ветроэнергетических станций относится использование под их строительство значительных земельных ресурсов, что связано с необходимостью размещения турбины на достаточно большом расстоянии друг от друга (5-10 высот башни) для создания условий возобновления воздушного потока. Таким образом с 1 км<sup>2</sup> площади в среднем вырабатывается до 10 МВт электрической энергии. В частности, ТКП 17.02-02-2010 [9] запрещает размещение ВЭУ в пределах особо охраняемых природных территорий (заповедников, национальных парков и т.д.), природных территорий, подлежащих специальной охране (зонах отдыха и туризма, ландшафтно-рекреационные зоны и т.д.), а также традиционных путей перемещения перелетных птиц и миграции животных. Конкретные же места размещения ВЭУ (ВЭС) выбираются на основе долговременных контрольных измерений скорости ветра.

Анализ существующих разновидностей ветряных турбин различных производителей позволил заключить, что, к сожалению, ведущими являются иностранные производители, так как на территории РБ ветроустановки не производятся. Таким образом, для настоящего исследования целесообразным является рассмотрение ВЭУ производителей с расположением заводов-изготовителей в относительной близости от РБ, что позволит уменьшить расходы на транспортирование крупногабаритных грузов, а также высокие показатели технических характеристик ветротурбин с возможностью выбора оптимальной высоты башни для климатических условий Республики Беларусь.

**Принятая методика исследований.** 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 [0], 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.

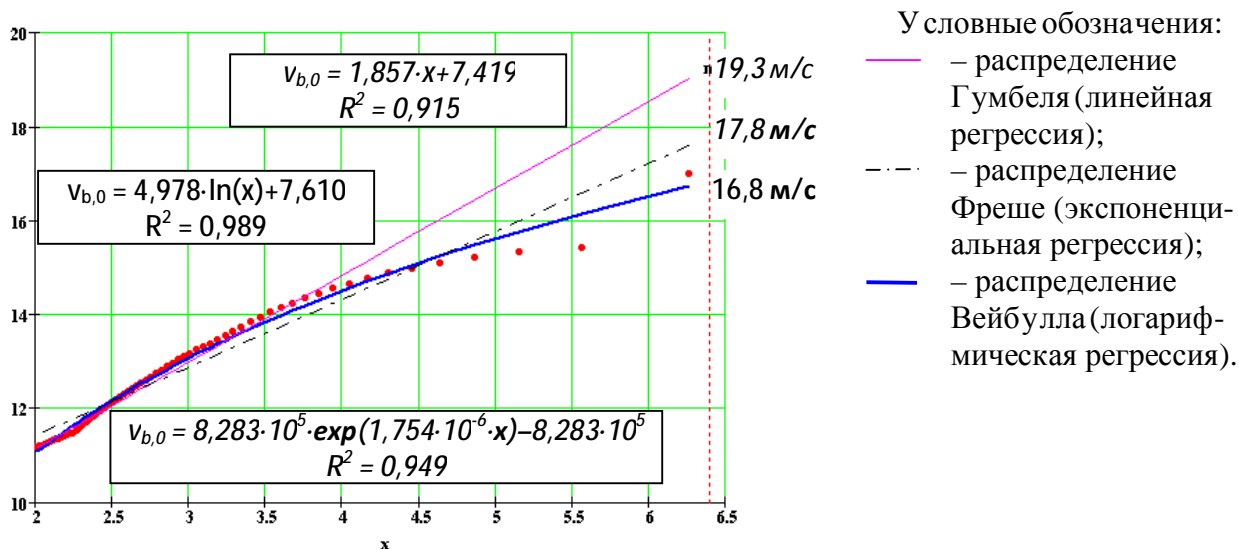
По итогам выполненной оценки условий проведения наблюдений за характеристиками ветра на метеостанциях и постах Республики Беларусь было установлено, что для возможности использования результатов наблюдений при решении инженерных задач, зафиксированные значения должны обладать *единством качества* и составлять *микрометеорологически однородный ряд*. Единство качества обуславливается средствами и методами производства наблюдений и регламентирует определение таких характеристик ветра, как средняя скорость ветра, среднеенаправление 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 оценивании максимумов скорости был использован также метод псевдошумового 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 [10].

**Результаты выполненных исследований.** В качестве исходных данных для определения основных значений базовой скорости ветра для климатических условий Республики Беларусь были использованы результаты систематических измерений базовых характеристик ветра на 46 метеорологических станциях и постах, равномерно размещенных на территории Республики Беларусь, за период 1966–2013 гг., официально предоставленные ГУ «Республиканский Гидрометеорологический центр». Ранжированные значения «хвостовой» части

средних максимальных месячных значений скоростей ветра, а также соответствующие им распределения экстремальных значений на примере аэрогидрометеорологической станции Брест представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Результаты оценивания месячных максимумов средней скорости ветра методом псевдошумового квантования**

Продление рядов наблюдений за ветровым режимом по 2013 год включительно (ранее выборка ограничивалась 2008 г. [11]), показало незначительное снижение скоростей ветра по 34 метеостанциям в диапазоне 0,1–0,4 м/с. Максимальное снижение скоростей ветра имеет место на метеостанциях Мозырь, Воложин – 0,6 м/с и Минск – 0,9 м/с.

Калибровка частных коэффициентов  $\gamma_f$ , учитывающих возможность неблагоприятных отклонений значений воздействий от репрезентативных значений [3], для расчетных значений ветровой нагрузки за репрезентативный период 1966–2013 гг. дала возможность выделить на территории Республики Беларусь ветровой район с базовой скоростью ветра 21 м/с. К этому району относятся 26 метеостанций, что составляет около 60% всей территории Республики Беларусь. Другой выделенный ветровой район соответствует базовой скорости ветра 23 м/с. Ранее, в Национальном приложении к ТКП EN 1991-1-4-2009 [2] выделялись 2 ветровых района с базовыми скоростями ветра 22 и 24 м/с соответственно. Причем, ветровой район со скоростью ветра 24 м/с занимал незначительные площади в южной, восточной и северной части территории Республики Беларусь. Отмечаемая ранее климатологами и подтвержденная в настоящем исследовании тенденция к снижению скоростей ветра на территории Республики Беларусь нашла свое отражение в современной карте ветровых районов. Выделенные районы полностью соответствуют физико-географическим особенностям территории Республики Беларусь (учтены орографические особенности, преобладающее направление ветра, шероховатость подстилающей поверхности, выраженная лесистостью и другие факторы). Район с более высокой базовой скоростью ветра 23 м/с в центральной и южной части Республики Беларусь корреспондирует с установленными специалистами Республиканского гидрометеорологического центра районами, перспективными для развития ветроэнергетики.

Значения коэффициента, учитывающего направление ветра, были определены на предположении о равновероятности всех горизонтальных направления ветра [14]. Согласно ему величины максимальных средних значений скорости ветра, зафиксированные на метеостанциях и скорректированные с уче-

том основных параметров микрометеорологически однородного ряда, были разделены на 12 секторов по 30° каждый. Полученные значения коэффициента, учитывающего направление ветра по секторам для климатических условий Республики Беларусь, представлены в таблице.

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

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;

$I_v(z)$  – 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.

Для реализации квазистатического подхода были построены графики огибающих безопасных значений коэффициента  $c_s c_d$  в зависимости от ширины и высоты расчетной поверхности, перпендикулярной направлению действия ветра для основных строительных материалов конструктивных элементов зданий и сооружений зданий и сооружений и типов местности для климатических условий Республики Беларусь [2].

Согласно полученным выше основным характеристикам воздействия ветра на примере Брестской области Республики Беларусь в качестве наиболее целесообразной локализации для строительства ветропарка была выделена территория, прилегающая к г. Пружаны.

Так как по данным государственной сети гидрометеорологических наблюдений, среднегодовой фоновый ветер на высоте установки датчиков анеморумбометров (10–12 м) составляет около 3–4 м/с, в качестве возможных для установки на территории Республики Беларусь рассматривались турбины, начинающие работать при скорости ветра 2 м/с с предельной скоростью (при которой происходит остановка) – 28 м/с. Данное решение является экономически эффективным благодаря работе в очень широком диапазоне скоростей ветра. Электростанции данной модели могут быть установлены на пяти различных высотах башни от 78 м до 138 м.

Выполненный имитационный расчет возможного объема выработки электроэнергии показал, что так как климат Беларуси не характеризуется достаточно высоким ветровым потенциалом, возникает необходимость использования энергии ветра на высотах, близких к отметке градиентного уровня. В частности, для г. Пружаны, при высоте башни турбины, равной 138 м (максимум в рассматриваемом ряде моделей), ветроэлектростанция номинальной мощностью 2 МВт может вырабатывать за год более 5 тыс. МВтч, что будет достаточным для электроснабжения частного жилого дома.

**Анализ полученных результатов** Для апробации полученного основного значения базовой скорости ветра для территории Республики Беларусь было выполнено сравнение с аналогичным нормируемым параметром, установленным в национальных ТНПА стран, граничащих с Республикой Беларусь (рис. 2).



**Рисунок 2 – Карта ветрового районирования приграничных территорий Республики Беларусь**

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, 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.

**Выводы:**

1. По результатам статистического оценивания систематических измерений базовых характеристик ветра с применением метода псевдошумового квантования и калибровки частных коэффициентов для расчетных значений ветрового воздействия построена карта ветрового районирования для территории Республики Беларусь с основными значениями базовой скорости ветра  $v_{b,0}$ , равными 21 и 23 м/с.

2. Для апробации полученных значений базовой скорости ветра выполнено сравнение с аналогичными нормируемыми параметрами, установленными в национальных ТНПА стран, граничащих с Республикой 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) с  $c_{dir} = 1,0$ .

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 [2].

5. Выполненный имитационный расчет возможного объема выработки электроэнергии на территории РБ позволил определить перспективы использования энергии ветра для Республики Беларусь на примере Брестской области.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.

2. 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.

3. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990-2011. – Введ. 01.07.2012. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. – 96 с.

4. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*: СП 20.13330.2011. – Введ. 20.05.11. – М.: Минрегион России, 2011. – 80 с.

5. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2:2006. – Введ. 01.01.07. – Киев: Минстрой Украины, 2006. – 78 с.

6. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.01.87. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 36 с.

7. Об утверждении национальной программы развития местных и возобновляемых энергоисточников на 2011–2015 годы и признании утратившим силу постановления Совета Министров Республики Беларусь от 7 декабря 2009 г.: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 10 мая 2011 г., № 586 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2011. – № 5/33764.

8. Об утверждении стратегии развития энергетического потенциала Республики Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 9 авг. 2010 г. № 1180 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2010. – № 5/32338.

9. Охрана окружающей среды и природопользование. Правила размещения и проектирования ветроэнергетических установок: ТКП 17.02-02-2010. – Введ. 15.04.2010. – Мн.: Минприроды РБ, 2010. – 19 с.

10. Тур, В.В. Нормирование ветровой нагрузки на здания и сооружения для климатических условий Республики Беларусь / В.В. Тур, А.В. Черноиван // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – № 1: Архитектура и строительство. – С. 35–40.

11. Черноиван, А.В. Нормирование ветровой нагрузки на здания и сооружения для климатических условий Республики Беларусь: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Черноиван. – Брест, 2012. – 179 л.

12. 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.

13. Jarzyna, W. Technological development of wind energy and compliance with the requirements for sustainable development / W. Jarzyna, A. Pawłowski, N. Viktorovich // Problemy Ekorozwoju. – 2014. – № 9. – P. 167-177.

14. Żurański, J.A. Wpływ warunków klimatycznych i terenowych na obciążenie wiatrem konstrukcji budowlanych / J.A. Żurański. – Warszawa: Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, 2005. – 128 p.