

УДК 338.436.33:630.9

UDC 338.436.33:630.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОНСТРУКЦИИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА**MODELING OF WIND LOADS ACTING ON THE WIND POWER STATION CONSTRUCTION OF THE COMBINED TYPE**

Бухтоярова Екатерина Сергеевна
ассистент

Bukhtoyarova Ekaterina Sergeevna
assistant

*Донской государственный аграрный университет,
Ростовская область, Октябрьский район,
п. Персиановский, Россия*

*Donskoy State Agrarian University, Rostov region,
Octyabrskiy district, village Persianovskiy, Russia*

В статье рассмотрены вопросы оценки интенсивности ветровых нагрузок, действующих на ветроэлектрические станции комбинированного типа применительно к условиям Ростовской области на основе метода структурного динамического моделирования

The article presents the solution of questions about the intensity of wind loads acting on the wind power station of the combined type in relation to the conditions of the Rostov region on the basis of the structural dynamic simulation

Ключевые слова: ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ, СТРУКТУРНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Keywords: WIND POWER STATIONS, WIND LOAD, STRUCTURAL DYNAMIC MODELING

Рассматривается конструкция ветроэлектрической станции (ВЭС) комбинированного типа [1, 4], выполненная в виде вертикально возведенной трубы высотой 30 м с железобетонным основанием, в верхней части которой размещена башня с планетарным редуктором и ветропривод пропеллерного типа (рис. 1). Башня с ветроприводом выполнена с возможностью свободного вращения в горизонтальной плоскости (при изменении направления движения ветра). Подобная конструкция ВЭС является потенциально опасным объектам, поскольку ее падение при ураганной скорости ветра связано с риском травматизма и с определенными экономическими потерями. Для обеспечения устойчивости такой конструкции использование обычно применяемых трех тросовых растяжек под углом 120° в данном случае оказывается не пригодным, поскольку они захватывают зону вращения лопастей ветропривода. Поэтому нами выполнены теоретические и экспериментальные исследования по оценке устойчивости и надежности подобных конструкции.

Как известно, при выполнении расчетов устойчивости и прочности конструкций ветроэлектрических станций, необходимо иметь информацию о возможных величинах, действующих на них ветровых нагрузок для метеоусловий Ростовской области. Для их определения целесообразно, по нашему мнению, использовать методы структурного динамического моделирования.

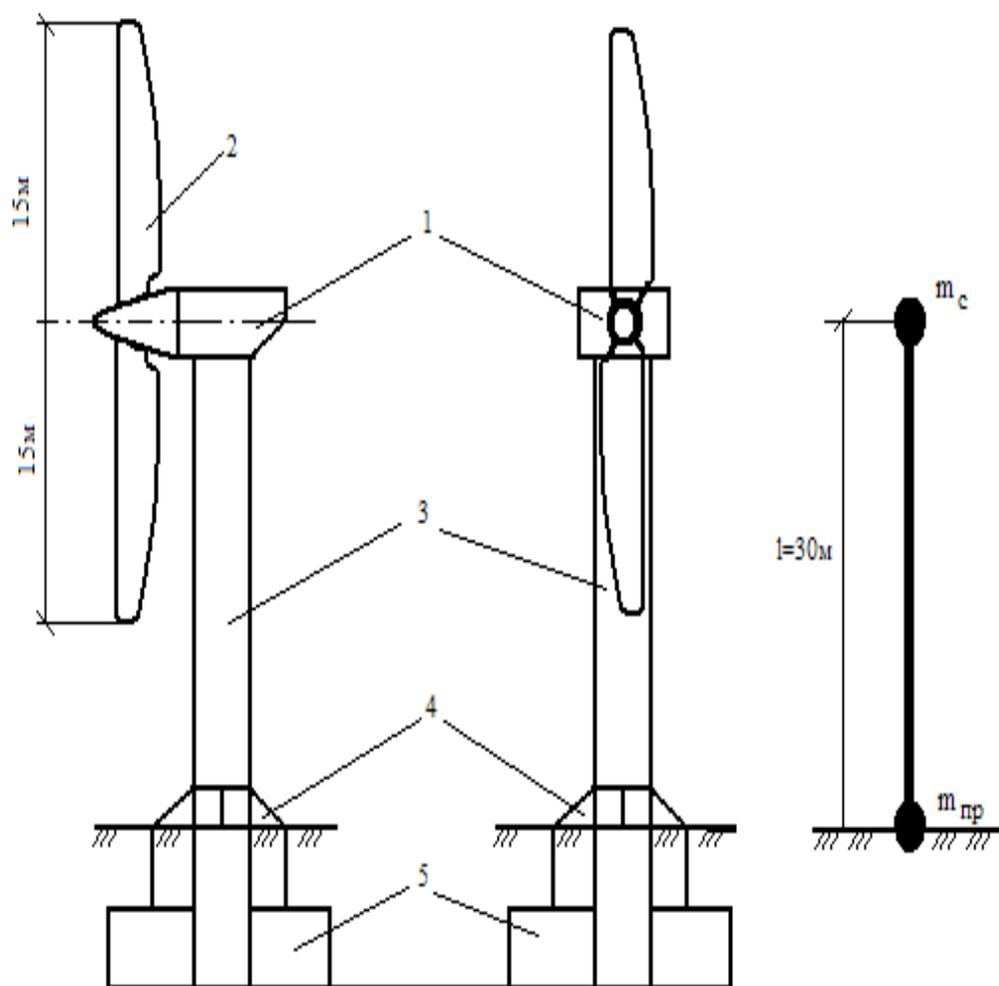


Рисунок 1 - Реальная и расчетная (справа) схемы ВЭС:
 1-башня; 2-ветроколесо; 3-трубная конструкция; 4-база трубного
 основания; 5-фундамент

Ниже приведены результаты расчетов и моделирования ветровых нагрузок, действующих на подобные конструкции при нормальных и экстремальных режимах их эксплуатации.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что модели, получаемые с использованием структурного динамического моделирования, позволяют достаточно просто определять нагрузки, возникающие под воздействием ветра в заданном диапазоне скоростей с учетом турбулентности воздушного потока.

При проведении исследований нами использована экспериментальная конструкция ВЭС со следующими параметрами. Основная часть конструкции представляет собой трубу, выполненную в виде 12 секций из обычной стали СТ-3. Толщина стенки трубы $t = 0,8$ мм. Внешний диаметр трубы $D = 60$ см. Длина трубы, на верхнем конце которой расположена башня 1 с ветроколесом 2, равна 30 м. Рабочий диапазон скорости ветра на уровне оси ветроколеса $v_{in}-v_{aut} = 10-15$ м/с. Рабочий диапазон температур $t_{in}^0-t_{aut}^0 = -30$ °С+35 °С. В климатическом исполнении конструкция относится к классу У (ГОСТ Р 51991). Экстремальные режимы ветра характеризуются скоростями $v_{in}-v_{aut} = 35-40$ м/с. При таких значениях скоростей данное сооружение относится к классу 3, параметры которого описывают процессы турбулентности и требования к надежности [2, 5, 6].

Для нормального класса 3 базовая скорость ветра $v_{ref} = 37,5$ м/с, а для умеренной турбулентности подкласса В ожидаемое значение интенсивности турбулентности воздушного потока при средней скорости 12,5 м/с, определенной на 10-ти минутном интервале, на высоте оси ветроколеса $J_{ref} = 0,14$.

Для обеспечения безопасности и определения силового воздействия на элементы конструкции ВЭС режимы ветра разделяют на нормальные и экстремальные [2, 5].

Для нормального режима ветра модель распределения скорости найдем через определение его средней скорости на высоте оси ветроколеса, распределенную на 10-минутном интервале в соответствии с распределением Рэля:

$$P_{R(V_{hub})} = 1 - \exp\left[-\pi\left(\frac{V_{hub}}{2 \cdot V_{ave}}\right)^2\right], \quad (1)$$

где V_{hub} – скорость набегающего воздушного потока на высоте оси ветроколеса (для ВЭС с горизонтальной осью вращения); V_{ave} – среднее значение скорости ветра.

Графически модель распределения скорости ветра для нормального режима представляет собой прямую параллельную оси абсцисс, т.е. $P_{R(V_{hub})} = \text{const}$.

Модель нормального профиля ветра (НПВ) можно найти в соответствии со следующими условиями. Согласно [3] профиль ветра $V_{(z)}$ определяет среднюю скорость ветра в функции от высоты Z над уровнем земли. Тогда нормальный профиль скорости ветра определяют по зависимости:

$$V_{(z)} = V_{hub} \left(\frac{z}{Z_{hub}}\right)^{0.2} \quad (2)$$

Для построения модели нормальной турбулентности (НМТ) определяем среднеквадратическое отклонение продольной составляющей скорости ветра на высоте оси ветроколеса по формуле:

$$\sigma_1 = J_{ref} \cdot (0,75 \cdot V_{hub} + v) \quad (3)$$

Модель НПВ представлена на рисунке 2.

Как известно, экстремальные режимы ветра включают как процессы сдвига в потоке ветра, так и пиковые скорости при шторме, а также быстрые изменения скорости и направления ветра [6].

Поэтому при экстремальной скорости ветра могут быть две модели: модель стабильного перемещения воздушного потока и турбулентная модель ветра.

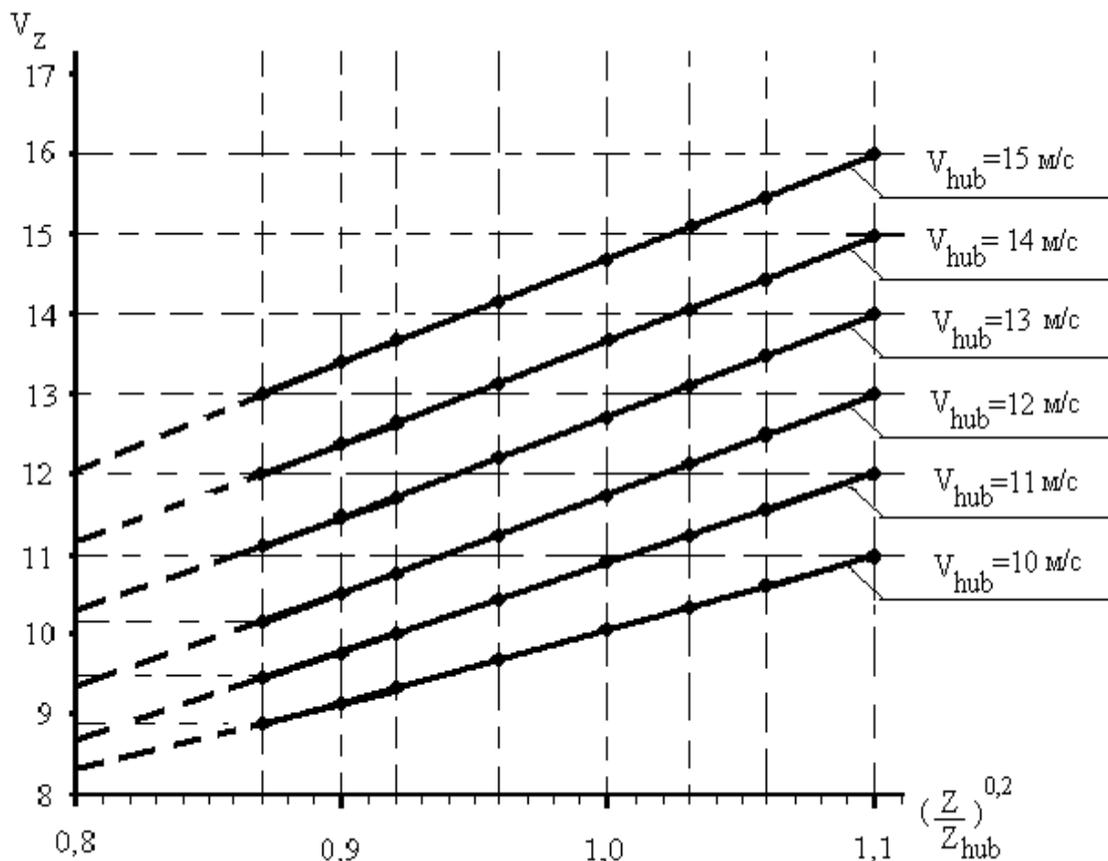


Рисунок 2 - Модель нормального профиля ветра

Обе модели основываются на базовой скорости ветра v_{ref} и фиксированном значении величины среднеквадратичного отклонения σ_1 . В модели стабильного экстремального воздушного потока экстремальные скорости ветра v_{e50} с периодом повторяемости 50 лет и v_{e1} с периодом повторяемости один год определяются по формулам:

$$v_{e50}(z) = 1,4 \cdot v_{ref} \cdot \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0,11} \quad (4)$$

$$v_{e1}(z) = 0,8 \cdot v_{e50}(z) \quad (5)$$

Графически обе модели представлены на рисунках 3а и 3б.

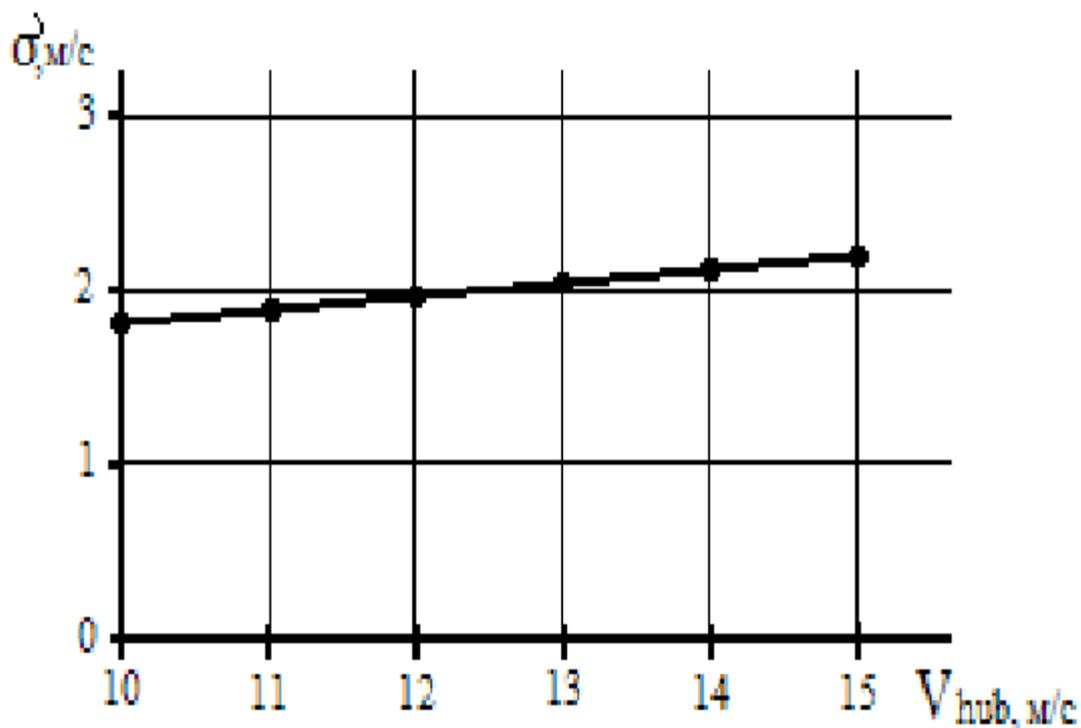


Рисунок 3а - Среднеквадратическое отклонение продольной составляющей скорости ветра для модели НМТ

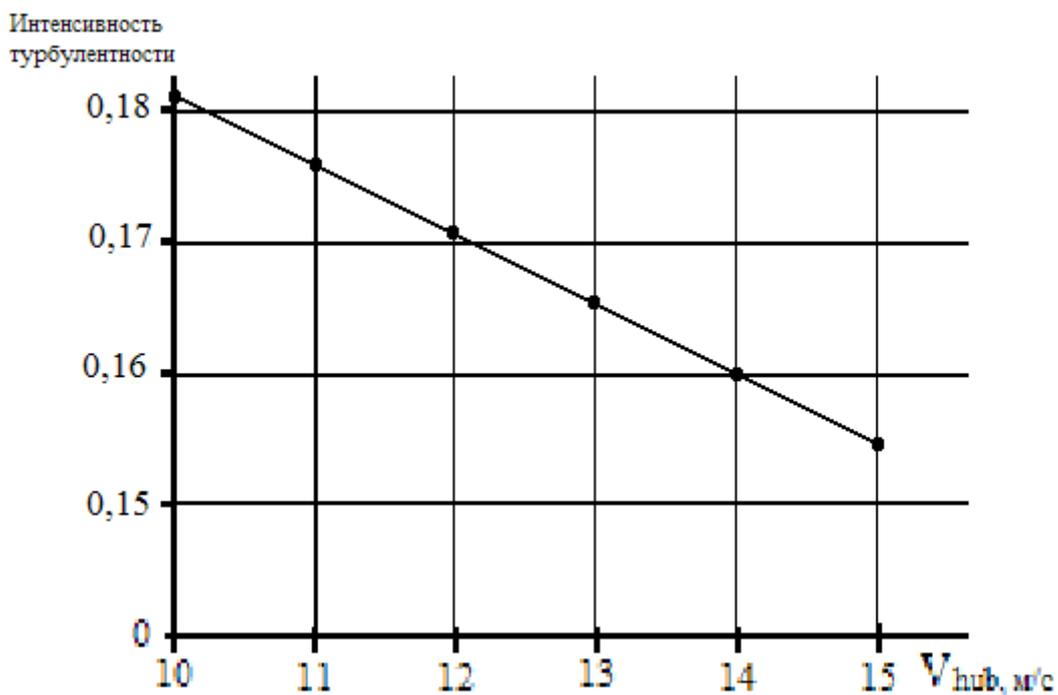


Рисунок 3б - Интенсивность турбулентности для модели НМТ

Модель экстремальной скорости ветра представлена на рисунке 4.

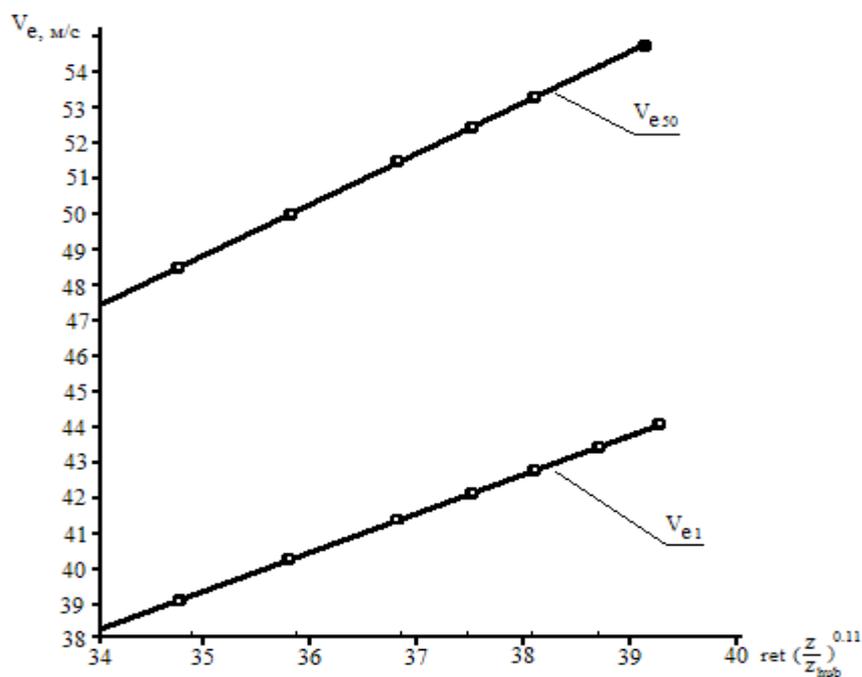


Рисунок 4 - Модель экстремальной скорости ветра

Определяем величину среднеквадратического отклонения продольной составляющей модели экстремальной скорости ветра. Характеристическое значение отклонения σ_1 приведены на рисунке 5.

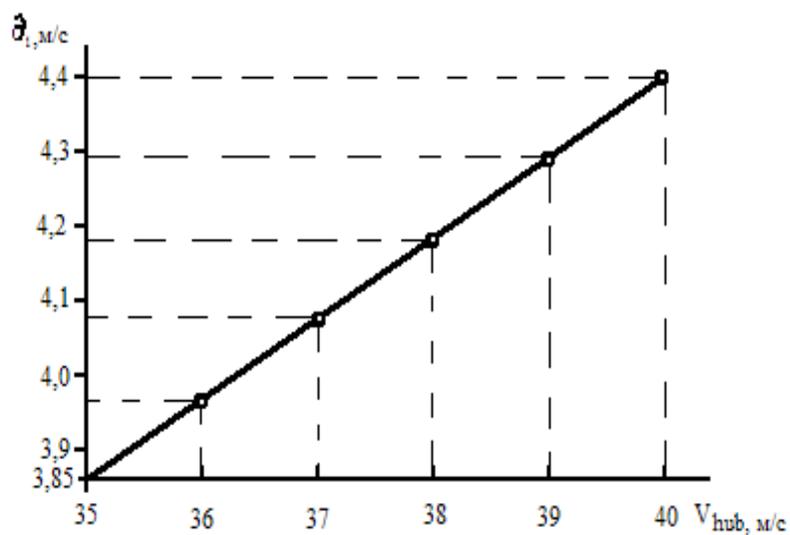


Рисунок 5 - Среднеквадратическое отклонение продольной составляющей скорости ветра

Величину скорости порыва ветра на высоте оси ветроколеса V_{gust} для периода повторяемости 50 лет определяем по зависимости:

$$V_{gust} = \text{Min}\{1,35(v_{e1}-v_{hub}); 3,3(\sigma_1/(1 + 0,1(D/\Lambda_1)))\}, \quad (6)$$

где σ_1 – стандартное отклонение в соответствии с выражением (5); Λ_1 – масштабный параметр турбулентности воздушного потока на высоте оси ветроколеса, определяемый по зависимости:

$$\Lambda_1 = 0,7z \text{ при } z \leq 60 \text{ м;}$$

$$\text{при } z = 20 \text{ м } \Lambda_1 = 0,7 \cdot 20 = 14$$

$$D = 20 \text{ м – диаметр ветроколеса.}$$

Подставив имеющиеся величины в (6), получим конкретные значения скоростей в диапазоне значений 5,29 – 12,7 м/с.

Скорость ветра при экстремальном рабочем порыве можно найти, используя следующее уравнение:

$$V_{(z,t)} = V_{(z)} - 0,37 V_{gust} \cdot \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) \cdot (1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)) \text{ для } 0 \leq t \leq T \quad (7)$$

В нашем примере диапазон изменений скорости ветра находится в пределах 35,36 – 41,99 м/с.

Пример экстремального рабочего порыва ($V_{hub} = 37$ м/с, класс 3 Б, $D = 20$ м) показан на рисунке 6.

Для построения экстремальной модели турбулентности воспользуемся моделью нормального профиля ветра и турбулентностью со среднеквадратическим отклонением продольной составляющей σ_1 , определенным по уравнению:

$$\sigma_1 = c \cdot J_{ref} \cdot (0,072 \cdot \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3\right) \cdot \left(\frac{V_{hub}}{c} - 4\right) + 10), \quad (8)$$

$$\text{где } c = 2 \text{ м/с; } J_{ref} = 0,14; V_{ave} = 27,5 \text{ м/с; } V_{hub} = 35-40 \text{ м/с}$$

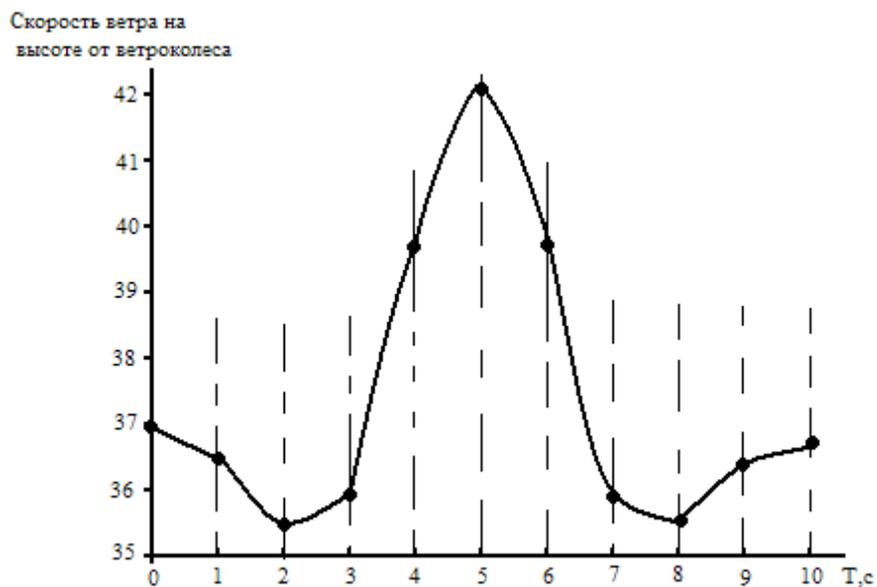


Рисунок 6 - Экстремальный рабочий порыв ветра на высоте оси
 Графическое изображение экстремальной модели турбулентности
 представлено на рисунке 7.

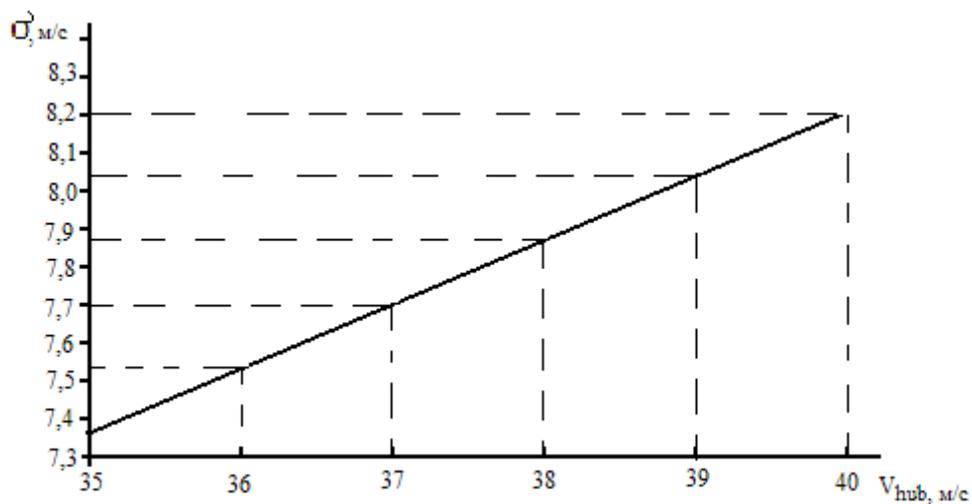


Рисунок 7 - Экстремальная модель турбулентности воздушного
 потока

Выводы

1. Выполненные расчеты свидетельствуют о целесообразности применения метода структурного динамического моделирования при оценке ветровых нагрузок, действующих на конструкции ВЭС комбинированного типа.

2. Результаты расчетов могут быть использованы проектными организациями, занятыми проектированием ветроэлектрических станций для малых предприятий и фермерских хозяйств АПК.

Литература

1. Бухтоярова Е.С. Ветроэлектрическая станция нового типа для малых предприятий и фермерских хозяйств. Научный журнал «Фундаментальные исследования» РАЕ.-2012.-№ 11(4).-С. 906-907.
2. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников в России. Коллектив авторов. – СПб.:Наука, 2002. - 314 с.
3. СНиП 2.01.07-85*.Нагрузки и воздействия / Госстрой России. М. - ФГУП ЦПП, 2004.-44 с.
4. Тахо-Годи А.З., Тахо-Годи Г.А. Ветроэлектрическая станция комбинированного типа. Патент РФ на изобретение № 2426004.
5. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. / Дж. Твайделл, А. Уэйр. М.: Энергоатомиздат, 1990. - 392 с.
6. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. - 280 с.

References

1. Buhtojarova E.S. Vetrojelektricheskaja stancija novogo tipa dlja malyh predpriyatij i fermerskih hozjajstv. Nauchnyj zhurnal «Fundamental'nye issledovanija» RAЕ.-2012.-№ 11(4).-S. 906-907.
2. Resursy i jeffektivnost' ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov v Rossii. Kollektiv avtorov. – SPb.:Nauka, 2002. - 314 s.
3. SNiP 2.01.07-85*.Nagruzki i vozdejstvija / Gosstroj Rossii. M. - FGUP CPP, 2004.- 44 s.
4. Taho-Godi A.Z., Taho-Godi G.A. Vetrojelektricheskaja stancija kombinirovannogo tipa. Patent RF na izobretenie № 2426004.
5. Tvajdell Dzh. Vozobnovljaemye istochniki jenerгии: Per. s angl. / Dzh. Tvajdell, A. Uejr. M.: Jenergoatomizdat, 1990. - 392 s.
6. Haritonov V.P. Avtonomnye vetrojelektricheskie ustanovki / V.P. Haritonov M.: GNU VIJeSH, 2006. - 280 s.