

УДК 338.436.33:630.9

Е. С. Бухтоярова, А. З. Тахо-Годи

Донской государственный аграрный университет, Персиановский, Российская Федерация

К РАСЧЕТУ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА В НОРМАЛЬНЫХ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье рассматриваются вопросы расчета устойчивости и прочности новой разновидности ветроэлектрических станций, предназначенной главным образом для электроснабжения малых предприятий АПК, электрификации и механизации сельских гидротехнических сооружений. Ее основное отличие от известных конструкций состоит в сочетании классического ветропривода и аэробарической составляющей, выполненной в виде турбины, размещенной внутри трубной конструкции, вращающей через обгонную муфту общий для них генератор. На основании проведенных экспериментальных исследований ранее было установлено, что использование обычно применяемых трех тросовых растяжек под углом 120° для обеспечения устойчивости подобных конструкций в данном случае оказывается непригодным, поскольку они являются помехой основному классическому ветроприводу крыльчатого типа. В связи с этим целью исследований являлся расчет параметров подобной трубной конструкции, обеспечивающих необходимую устойчивость и прочность без применения растяжек. Для достижения цели был использован метод структурного динамического моделирования для метеоусловий Ростовской области. В результате представлена модель расчета конструкции данного типа ветроэлектрических станций, по которой определены параметры элементов, обеспечивающие устойчивость и прочность данной конструкции в нормальных и экстремальных режимах ее эксплуатации. Полученные результаты моделирования нормальных и экстремальных условий эксплуатации ветроэлектрических станций для метеоусловий Ростовской области показали, что для обеспечения устойчивости все же следует использовать возможность расчаливать ее трубную конструкцию в трех местах растяжками, как показано на представленной в статье схеме.

Ключевые слова: ветроэлектрическая станция, устойчивость, прочность, ветровые нагрузки.

Ye. S. Bukhtoyarova, A. Z. Taho-Godi

Don State Agrarian University, Persianovskiy, Russian Federation

CALCULATING THE ULTIMATE STRENGTH AND STABILITY OF WIND POWER PLANTS OF COMBINED TYPE IN NORMAL AND EXTREME OPERATION CONDITIONS

The article deals with the calculation of stability and strength of the new kind of wind power plants (WPP) intended for power supply of small agricultural enterprises, electrification and mechanization of rural hydraulic facilities. Its main difference from known designs is the combination of classical wind gear and air pressure components, made as a turbine and placed inside the pipe construction which rotates the common generator by freewheeling clutch. Based on the conducted research, it was established earlier that the common use of three anchor line at an angle of 120 degrees is not suitable for providing stability of such constructions because the lines are the main obstacle to the classical wind gear of scoop type.

Thereby the objective of the research is to calculate parameters of such a pipe construction which provide the required stability and strength without using anchor lines. To achieve the objective, method for structural dynamic simulating for weather conditions in the Rostov region was used. As a result, a model for calculating the construction of this type of WPP is presented. Using the model, parameters of the elements providing stability and strength of the given construction for normal and extreme operation regimes were determined. Simulating results for normal and extreme operation of WPP in the Rostov region have shown that to provide stability of pipe construction, anchor lines in three points according to the scheme presented in the article should still be used.

Keywords: wind power plant, stability, strength, wind load.

Как известно, в последние десятилетия существенно возросло энергопотребление практически во всех развитых и развивающихся странах. Быстрыми темпами идет строительство новых электрических станций, в том числе и атомных. Однако функционирование таких электростанций связано с загрязнением атмосферы планеты и ее территорий. В современных условиях большое значение приобретают разработки и создание новых экологически чистых источников энергии. Многие известные из них основаны на преобразовании энергии ветра, солнечной энергии, энергии морских отливов и приливов, большие перспективы обещает водородная энергетика и др. Подобные источники могут частично компенсировать потребности в электроэнергии сельской мелиорации, малых предприятий АПК, мелких фермерских хозяйств. В этой связи в настоящей работе рассматривается новая разновидность ветроэлектрических станций (ВЭС) [1], предназначенная главным образом для электроснабжения малых предприятий АПК, электрификации и механизации сельских гидротехнических сооружений. На основании проведенных экспериментальных исследований ранее было установлено, что использование обычно применяемых трех тросовых растяжек под углом 120° для обеспечения устойчивости подобных конструкций в данном случае оказывается непригодным, поскольку они являются помехой основному классическому ветроприводу крыльчатого типа. Требуется обеспечить необходимую устойчивость и прочность подобной трубной конструкции без применения растяжек.

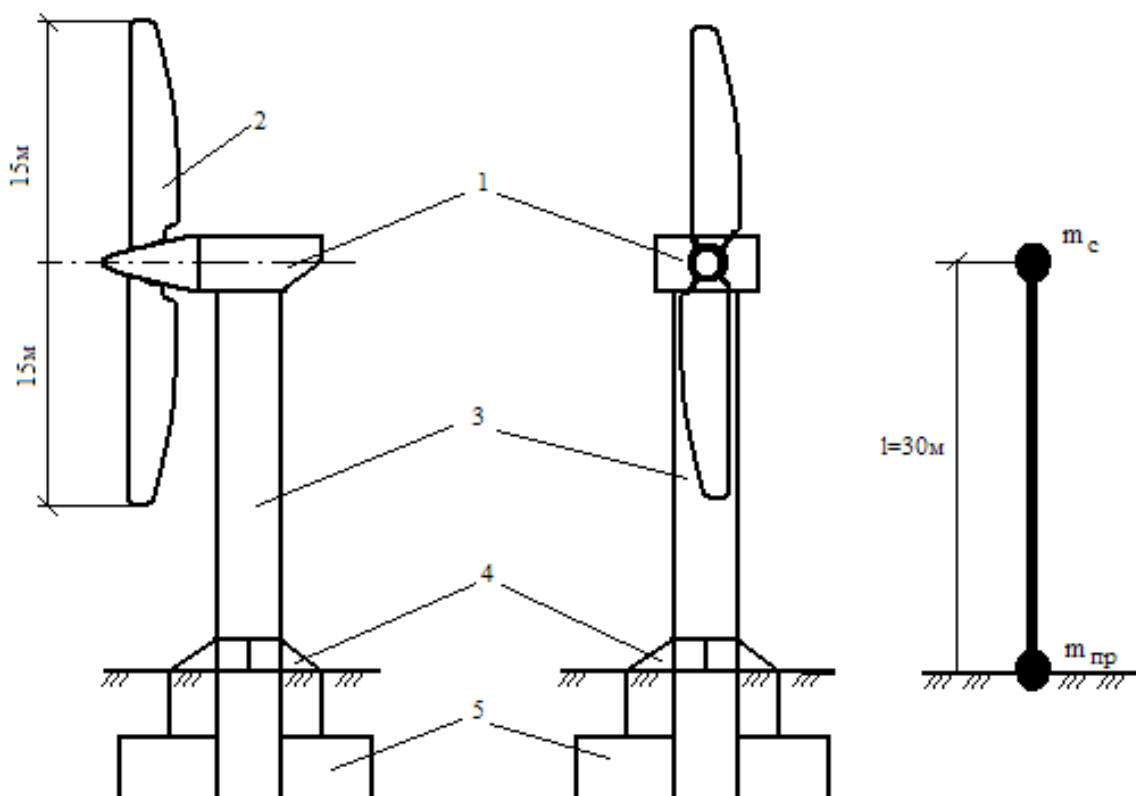
Для решения задач моделирования устойчивости трубную конструк-

цию ветроэлектрической станции комбинированного типа представим в виде стержня с равномерно распределенной по его длине нагрузкой (сил тяжести):

$$g_{\delta} = \rho \cdot A_{\delta} = 78,5 \cdot 0,0015052 = 0,1182 \text{ кН/м},$$

где $\rho = 78,5 \text{ кН/м}^3$ – плотность стали;

$$A_{\delta} = \pi \cdot d_{\text{сп}} \cdot t = 3,14 \cdot 0,6 \cdot 0,0008 = 0,0015052 \text{ м}^2 \text{ – площадь поперечного сечения ствола конструкции (рисунок 1).}$$



1 – башня (гондола); 2 – ветроколесо; 3 – трубная конструкция; 4 – база трубного основания; 5 – фундамент

Рисунок 1 – Реальная и расчетная (справа) схемы ветроэлектрической станции

Расчет выполняем по формулам [2, 3]:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_k;$$

$$f_d = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_k,$$

где F_d – проектная расчетная величина суммарной внутренней нагрузки

или реакция, возникающая внутри рассматриваемого элемента конструкции в результате одновременного воздействия всех составляющих внешней нагрузки для рассматриваемого варианта нагружения;

γ_f – парциальный коэффициент безопасности по нагрузкам;

F_k – нормативная величина нагрузки;

f_d – проектная расчетная величина, учитывающая свойства материала;

γ_m – парциальный коэффициент безопасности для материала;

f_k – нормативное значение свойств материала.

Обычно ВЭС испытывает неблагоприятные нагрузки в пределах между нормальными и аварийными. В этом режиме работы коэффициент $\gamma_f = 1,00$. Коэффициент безопасности для материалов, учитывающий естественную нестабильность прочностных свойств, согласно СНиП 2.01.07-85 [3] принимается $\gamma_m = 1,3$ (для разрушения вследствие превышения напряжений растяжения или сжатия). Парциальный коэффициент безопасности, учитывающий последствия отказа для элементов класса 3, $\gamma_n = 1,3$.

Условия прочности по предельному состоянию определяются следующей функциональной зависимостью [2, 3]:

$$\gamma_n \cdot S(F_d) \leq R(f_d). \quad (1)$$

Расчетное сопротивление R в большинстве случаев соответствует максимально допустимым расчетным прочностным характеристикам материала, следовательно, $R(f_d) = f_d$.

Функция S для расчета предельной прочности определяется как наибольшая величина внутреннего силового фактора в рассматриваемом элементе конструкции, следовательно, $S(F_d) = F_d$. Уравнение расчета предельной прочности приобретает вид:

$$\gamma_f \cdot F_k \leq \frac{1}{\gamma_m \gamma_n} \cdot f_k.$$

Для расчетной схемы ВЭС (рисунок 1) в виде системы с одной сте-

пению свободы равномерно распределенная нагрузка конструкции приводится к сосредоточенным весам по ее концам (конечным элементам) [2, 4]:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{g_{\delta} \cdot l}{2} = \frac{0,1182 \cdot 30}{2} = 1,773.$$

Приведенная сила на верхнем конце суммируется с сосредоточенной силой (весом) гондолы, в результате чего получается суммарный вес:

$$Q = Q_r + Q_{\text{пр}} = 15 + 1,773 = 16,773 \text{ кН.}$$

Определяем динамический коэффициент β_1 по значению периода T_1 собственных колебаний ВЭС. Период находится по круговой частоте колебаний системы:

$$T_1 = 2\pi / \omega_1,$$

а круговая частота – по значению массы $m_c = Q_c / g = 16,773 / 9,81 = 1,71$ т и коэффициенту податливости δ упругой консоли по формуле [4]:

$$\delta = l^3 / 3 \cdot E \cdot J.$$

Получаем $\delta = 3000^3 / 3 \cdot 20600 \cdot 6755,32 = 64,67$ см/кН = 0,6467 м/кН.

Находим круговую собственную частоту системы с одной степенью свободы:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{m_c \cdot \delta}} = \sqrt{\frac{g}{Q_c \cdot \delta}} = \sqrt{\frac{9,81}{16,773 \cdot 0,6467}} = 0,95 \text{ рад/с.}$$

Определяем период собственных колебаний системы с одной степенью свободы:

$$T_1 = 2\pi / \omega_1 = 6,28 / 0,95 = 6,61 \text{ с.}$$

Подсчитываем динамический коэффициент. Так как основание (железобетонный фундамент) считается жестким, относим его к грунту 1 категории. Тогда, согласно СНиП 2.23-81 [4], при $T > 0,4$ с:

$$\beta_1 = 2,5 \sqrt{0,4 / T_1} = 2,5 \sqrt{0,4 / 6,61} = 0,615.$$

Далее определяем нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки W_m на высоте z над поверхностью земли по формуле [2]:

$$W_m = W_0 \cdot k \cdot c, \quad (2)$$

где W_0 – нормативное значение ветрового давления, определяется по формуле:

$$W_0 = 0,61 \cdot V_0^2;$$

k – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте z для типа местности В (городские территории и т. д.) [3];

c – аэродинамический коэффициент;

V_0 – численно равно скорости ветра, м/с, на уровне 10 м над поверхностью земли для местности типа А [3], соответствующей 10-минутному интервалу осреднения, $V_0 = 37,22$ м/с.

Расчетная схема ветровой нагрузки представлена на рисунке 2.

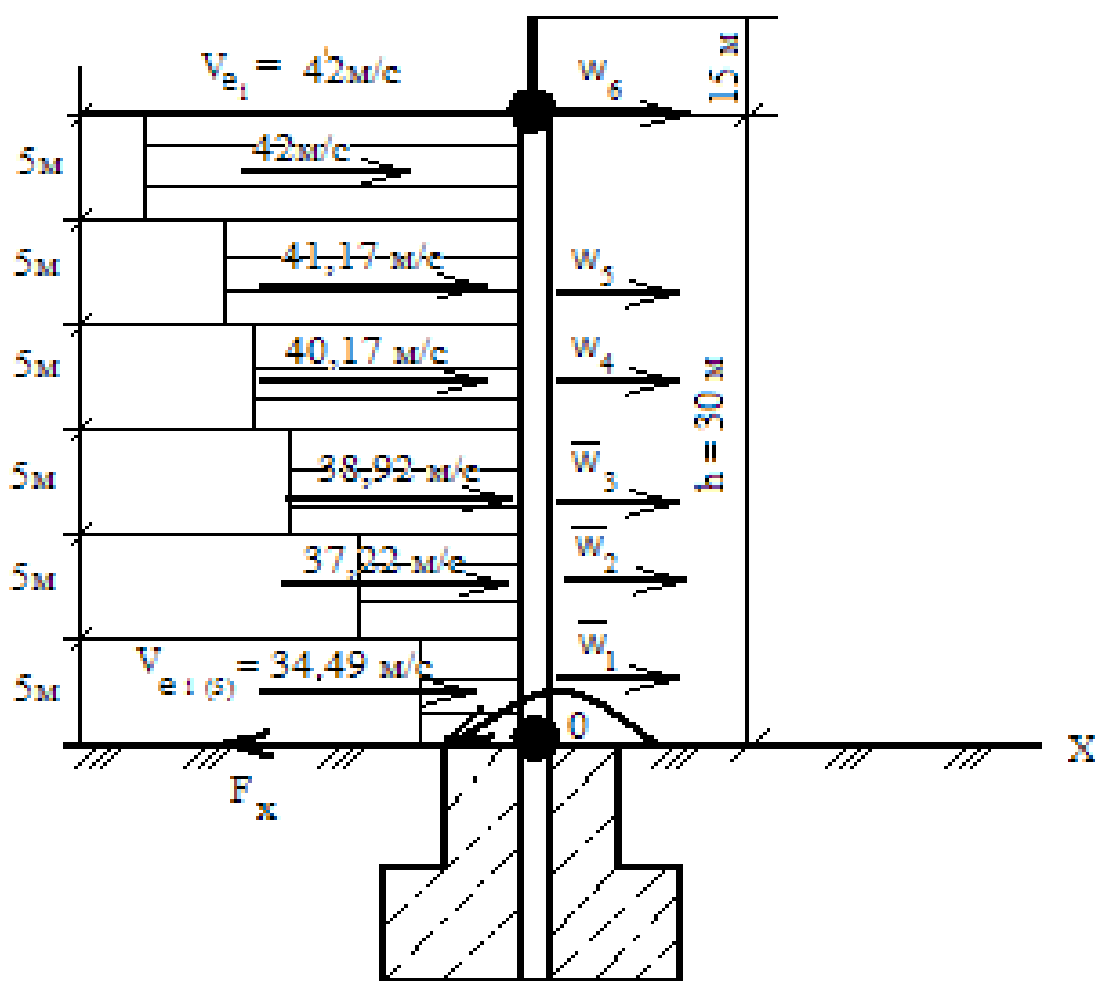


Рисунок 2 – Схема ветровой нагрузки на конструкцию ветроэлектрической станции

Значения коэффициентов принимаем: $k_1 = 0,5$; $k_2 = 0,65$; $k_3 = 0,75$; $k_4 = 0,85$; $k_5 = 0,90$; $k_6 = 0,98$; $C = 0,8$ [2].

Определяем нормативные значения ветрового давления. Согласно расчетам, они будут в диапазоне 725,63-1076,04 Па.

Находим нормативные значения средней составляющей ветровой нагрузки W_{mi} по формуле (2). Расчетные значения лежат в диапазоне 290,25-843,62 Па.

Определяем нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p на высоте z по формуле:

$$W_{pi} = W_{mi} \cdot \xi \cdot v, \quad (3)$$

где W_{mi} – определяются по формуле (2);

ξ – коэффициент пульсации давления ветра на уровне z , принимаемый в пределах 0,8-1,22 [2];

v – коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра (при $\chi = h = 30$ м и $P = 0,4 \cdot d = 0,24$ м $v = 0,83$ [2]).

Подставив эти значения в формулу (3), получим нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p на высоте z в диапазоне 293,91-602,18 Па.

Вычисляем расчетные величины ветровой нагрузки на сооружение, согласно рисунку 2, с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,4$. Они будут находиться в интервале значений 406,35-1181,07 Па.

Определяем усилия, возникающие в опоре (фундаменте) на уровне поверхности земли. Согласно расчету, предельные усилия, возникающие в фундаменте на уровне поверхности земли, составляют 263 кН·м.

Прочность трубы проверяем по первой группе предельных состояний по формуле (1):

$$\frac{M \cdot \gamma_n}{W_x \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1. \quad (4)$$

Из этой формулы находим требуемый момент сопротивления:

$$W_r \geq \frac{M \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{26300 \cdot 1,3}{22,5 \cdot 0,9} = 1688,4 \text{ см}^3,$$

где $R_y = 225 \text{ МПа}$ – расчетное сопротивление материала трубы [3];

$\gamma_c = 0,9$ – коэффициент надежности по условиям работы для сооружения 3 класса.

Фактический момент сопротивления для принятой трубы:

$$W_x = \frac{\pi \cdot D^4 - d^4}{32 \cdot D} = \frac{3,14 \cdot 60^4 - 59,84^4}{32 \cdot 60} = 225,18 \text{ см}^3.$$

Фактический момент сопротивления значительно меньше требуемого. Прочность не обеспечивается.

Для увеличения устойчивости и прочности всей конструкции есть возможность расчалить конструкцию в трех местах согласно рисунку 3.

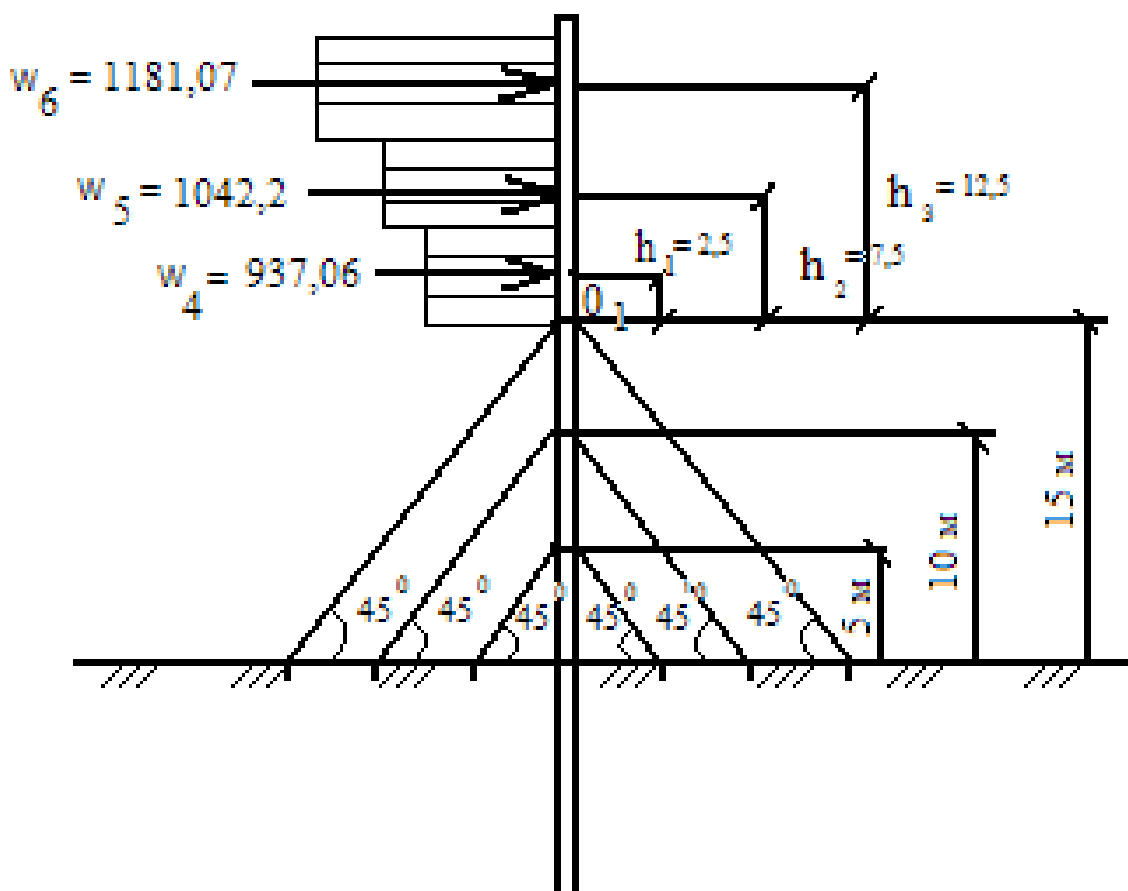


Рисунок 3 – Схема усиления конструкции ветроэлектрической станции

В этом случае нижнюю часть конструкции высотой 15 м можно считать условно закрепленной жестко и моментная точка переместится в положение O_1 .

Определяем F_x и M_{01} :

$$F_x = 1181,03 \cdot 3 + 1042,2 \cdot 3 + 937,06 \cdot 3 = 9489,99 \text{ Н} = 9,5 \text{ кН};$$

$$M_{01} = 1181,03 \cdot 3 \cdot 12,5 + 1042,2 \cdot 3 \cdot 7,5 + 937,06 \cdot 3 \cdot 2,5 = 74767,575 \text{ Н} \cdot \text{м} = \\ = 74,77 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Тогда по формуле (4):

$$W_{tr} \geq \frac{7477 \cdot 1,3}{22,5 \cdot 0,9} = 480 \text{ см}^3.$$

Расчеты показали, что и в этом случае условие прочности не выполняется, так как фактический момент сопротивления $W_x < W_{tr}$. Это свидетельствует о том, что толщина трубы $\delta = 0,8$ мм недостаточна и ее следует увеличить.

Примем $\delta = 2$ мм, тогда:

$$W_x = \frac{3,14}{32} \cdot \frac{60^4 - 59,6^4}{60} = 559,57 \text{ см}^3 > W_{tr} = 480 \text{ см}^3.$$

Прочность конструкции с применением растяжек обеспечена.

Глубину фундамента следует принимать на 1 м ниже глубины промерзания грунта [4, 5]. Для Ростовской области глубина промерзания принимается 1,25 м [2]. Тогда глубина фундамента для данной конструкции составит $H_{\phi} = 2,25$ м.

Размеры фундамента в плане определяются расчетами при наличии данных по грунтам в конкретном месте установки ВЭС.

Выводы

1 Результаты моделирования трубной конструкции ВЭС комбинированного типа без использования тросовых растяжек, выполненные методом динамического структурного моделирования, подтвердили математическую корректность используемой методики, достаточную точность рас-

четов и их сходимость с данными экспериментальных исследований.

2 Тем не менее в отдельных случаях, там, где это допустимо, для увеличения устойчивости и предельной прочности ВЭС все же следует использовать возможность расчаливать ее трубную конструкцию в трех местах растяжками, что также теоретически подтверждено приведенными результатами моделирования нормальных и экстремальных условий эксплуатации для метеоусловий Ростовской области.

Список использованных источников

1 Ветроэлектрическая станция для многоэтажных зданий и сооружений: пат. 2426004 Рос. Федерация: МПК(51) F03D3/02, F03D3/04 / Тахо-Годи А. З., Тахо-Годи Г. А., заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Донской государственный аграрный университет». – № 2009142366; заявл. 17.11.09; опубл. 10.08.11.

2 Константинов, И. А. Строительная механика. Расчет стержневых систем: учеб. пособие / И. А. Константинов, И. И. Лалина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 155 с.

3 Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85: утв. Гос. комитетом СССР по делам строительства 29.08.85: взамен СНиП II-6-74: введ в действие с 01.01.87. – М.: ЦПП, 2004. – 44 с.

4 Стальные конструкции: СНиП 2.23-81: утв. Госстроем СССР 14.08.81: взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67: введ в действие с 01.01.82. – М.: ЦПП, 2004. – 96 с.

5 Справочник по расчетно-конструктивному циклу для студентов технических вузов: учеб. пособие / В. А. Волосухин, С. И. Евтушенко, П. П. Гайджуров, И. А. Петров, В. Е. Федорчук, А. И. Тищенко, Т. Н. Меркулова, Т. Л. Ляпота, В. А. Кузнецов. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – 464 с.

Бухтоярова Екатерина Сергеевна – ассистент, Донской государственный аграрный университет, Персиановский, Российская Федерация.

Контактный телефон: 8-908-179-40-48.

E-mail: buht.kat.1988@yandex.ru

Bukhtoyarova Yekaterina Sergeevna – Assistant, Don State Agrarian University, Persianovskiy, Russian Federation.

Contact telephone number: 8-908-179-40-48.

E-mail: buht.kat.1988@yandex.ru

Тахо-Годи Аркадий Зямович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Донской государственный аграрный университет, Персиановский, Российская Федерация.

Контактный телефон: 8-928-107-97-20.

E-mail: dongau@mail.ru

Taho-Godi Arkadiy Zyamovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Chair, Don State Agrarian University, Persianovskiy, Russian Federation.

Contact telephone number: 8-928-107-97-20.

E-mail: dongau@mail.ru