

На правах рукописи

ПАНФИЛОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ

**МЕТОДИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЁТОВ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

Специальность 05.14.08 – "Энергоустановки на основе
возобновляемых видов энергии"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена на кафедре "Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика" ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Елистратов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
Безруких Павел Павлович
– кандидат технических наук,
Кузнецов Михаил Васильевич.

Ведущая организация: ОАО "ИЦ ЭЭС" институт
"Ленгидропроект"

Защита состоится 13 ноября 2007 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Гидрокорпус-2, ауд.411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Орлов В.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы определяется современным состоянием развития российской ветроэнергетики и, связанной с этим необходимостью разработки методик решения целого ряда задач, по поиску оптимального размещения ветроэлектрических установок (ВЭУ) в составе ветроэлектростанций (ВЭС) в конкретных условиях, оценкой расчётной выработки проектируемой ВЭС, подсчётом нагрузок и выбором основных параметров инженерно-строительных конструкций. Современная российская ветроэнергетика отстает от мировой в опыте реализации крупных ВЭС. Ситуация усложняется тем, что почти треть пригодных для задач ветроэнергетики территорий России расположены в условиях вечной мерзлоты и (или) сейсмической активности.

Целью диссертации является методика проведения энергетических и прочностных расчётов ВЭУ в зависимости от природно-климатических характеристик регионов России.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- создана классификация природно-климатических факторов окружающей среды, определяющих выбор параметров ВЭУ;
- разработана методика энергетических расчётов ВЭУ, учитывающая особенности места её возведения;
- разработана методика прочностных расчётов ВЭУ на основе комплексного учёта основных сочетаний нагрузок, действующих на инженерные конструкции ВЭУ, и их передачи на грунтовое или свайное основание, в том числе для условий сейсмической активности и вечной мерзлоты;
- разработан комплекс прикладных программ, с помощью которых выполнены расчёты основных параметров и сооружений Чукотской ВЭС мощностью 1 МВт.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- систематизированы и классифицированы факторы взаимодействия природной среды и ВЭУ;
- предложена методика определения энергетических параметров ВЭУ на основе комплексного учета природно-климатических факторов, таких как метеорологические, геологические и орографические условия местности;
- разработаны методики и алгоритм расчёта нагрузок, действующих на ВЭУ, её элементы, фундамент и основание, создан комплекс программ для расчета фундаментов ВЭУ различных типов.

Личный вклад автора. Диссертация является результатом законченных исследований автора, которые проводились в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (ГОУ ВПО "СПбГПУ") в ходе хоздоговорных работ, где автор выступал в роли ответственного исполнителя и соисполнителя. Приведенные в диссертационной работе результаты исследований были получены автором лично. Доля участия автора в публикациях определяется в 60%.

Практическая значимость работы. В результате проведенных исследований была предложена методика оптимизации энергетических параметров ВЭС и прочностных расчётов инженерно-строительных конструкций ВЭУ в зависимости от природно-климатических условий, обеспечивающая учет значительного числа факторов взаимодействия ВЭУ с окружающей средой. Разработаны прикладные программы для проектирования фундаментов ВЭУ. Разработаны практические рекомендации по размещению ВЭУ на местности для ТЭО Чукотской ВЭС мощностью 1 МВт.

Результаты теоретических исследований использованы в учебном процессе кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики (ВИЭГ) ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" при подготовке инженеров по специальности

140202 "Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии" и магистров по программе 551706 "Преобразование возобновляемых видов энергии, установки и комплексы на их основе" в виде учебных методик и методических рекомендаций для курсового, дипломного проектирования и подготовке магистерских диссертаций.

Апробация работы проведена на российских и международных научно-технических конференциях. Основные положения диссертационной работы докладывались автором на научно-практической конференции аспирантов, молодых ученых РАН и высшей школы "Социально-экономическое развитие и экологическая безопасность регионов России" (Санкт-Петербург, 1999), 3-м международном форуме Экобалтика 2000 (Санкт-Петербург, 2000), Политехническом симпозиуме "Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона"(Санкт-Петербург, 2003), научных семинарах кафедры "Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика", а так же при составлении технико-экономического обоснования проекта по строительству на Чукотке (в районе г. Анадырь) ветровой электрической станции мощностью 1 МВт.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- предлагается рассматривать ВЭС как часть природно-технической системы (ПТС);
- предлагается методика оценки выработки электроэнергии ВЭС для конкретных условий местности, в которой размещение ВЭУ производится с учётом инженерно-геологических условий;
- предлагается методика сбора статических и динамических нагрузок, действующих на ВЭУ и передачи их на различные типы основания, реализованная в виде комплекса программ.

Достоверность научных положений и выводов обусловлена корректным использованием основных положений ветроэнергетики, применением научно апробированных методов математического моделирования и подтверждается практическими результатами.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, в том числе 4 учебно-методические работы.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 167 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 17 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Установленная мощность ВЭУ в мире за период с 1995 по 2006 гг. выросла с 4 ГВт до 74 ГВт. Это говорит о возросшем интересе к ветроэнергетике, как источнику промышленного получения электроэнергии. Российской ветроэнергетике не хватает опыта возведения крупных ВЭС. Помимо экономических и политических причин отставания современной российской ветроэнергетики от мирового уровня, существенным тормозом внедрения, как крупных ВЭС, работающих в единой электрической системе, так и ВЭС (состоящих иногда из одной ВЭУ), работающих на изолированного потребителя является отсутствие методик предварительной оценки основных энергетических параметров, а также решения инженерно-строительных задач при проектировании ВЭС. Природно-климатическое разнообразие нашей страны усложняет задачу широкого внедрения крупных ВЭС, поскольку значительная часть благоприятных, с точки зрения ветроэнергетики, областей расположены в условиях вечной мерзлоты и сейсмической активности.

К настоящему времени российская ветроэнергетика располагает исследованиями и разработками целого ряда (Н.Е. Жуковский, В.П. Ветчинкин, Г.Х. Сабинин, В.Р. Вашкевич, Е.М. Фатеев, В.Н. Андрианов, П.П. Безруких., Д.Н. Быстрицкий, Я.Б. Данилевич, Г.И. Денисенко, В.А. Минин, Е.И. Куклин, М.В. Кузнецов, В.В. Елистратов, В.И. Виссарионов, В.В. Харитонов, Я.И. Шефтер, и другие) отечественных и зарубежных (С.А. Кудря, E.L. Petrsen, I. Troen, J. W. Twidell, A. D. Weir, и другие) авторов.

Однако анализ литературных источников показал, что задачам, которые поставил автор в диссертационной работе, в российской ветроэнергетике до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

По мнению автора, при проектировании ВЭС необходимо рассматривать её как часть ПТС, разбитой по виду взаимодействий на ряд подсистем. Данный подход используется в других областях энергетики, в частности гидроэнергетике, где известны исследования Ю.С. Васильева, М.П. Федорова, Н.И. Хрисанова, и других авторов. Однако ВЭС обладает определенной спецификой, требующей дополнительной проработки.

На основе обобщения мирового опыта оптимизации параметров ВЭУ выделяется два крупных класса задач, актуальных при разработке ВЭС:

- к прямой задаче относится задача, в которой исходными данными являются параметры ветра, а требуется определить, какой тип ВЭУ достигает при данных параметрах ветра максимальной эффективности;
- решение обратной задачи характерно в случаях, когда заранее известны параметры ВЭУ, а требуется определить, где в пределах заданной местности данная установка (или несколько установок) могла бы достичь максимальной эффективности.

Как правило, на стадии технико-экономического обоснования уже известны марки ВЭУ, предлагаемых в состав ВЭС, а также участок возведения ВЭС. Поэтому в диссертационной работе автора рассматривается обратная задача.

Известны ВЭУ с горизонтальной и вертикальной осью вращения. Каждый из этих типов в свою очередь подразделяется по способу преобразования энергии ветрового потока на использующие подъемную силу и использующие силу сопротивления. Рынок современных ВЭУ средней и большой мощности, представляющих интерес для промышленного использования ветроэнергетики, на 90% представлен агрегатами с горизонтальной осью вращения, использующих подъемную силу ротора. Таким образом, задачи, поставленные автором в диссертационной работе, решались применительно к этому типу ВЭУ.

На эффективность ВЭС, наряду с аэродинамическими и энергетическими характеристиками составляющих её ВЭУ, оказывает влияние совокупность природно-климатических факторов и местных условий предполагаемого района размещения. К ним отнесены ветровые характеристики района, характер подстилающей поверхности, инженерно-геологические и сейсмические условия.

По мнению автора, необходимо рассматривать процесс оптимизации параметров ВЭУ, вычленив несколько ключевых подсистем взаимодействия природной и технической составляющих ПТС (Рис. 1):

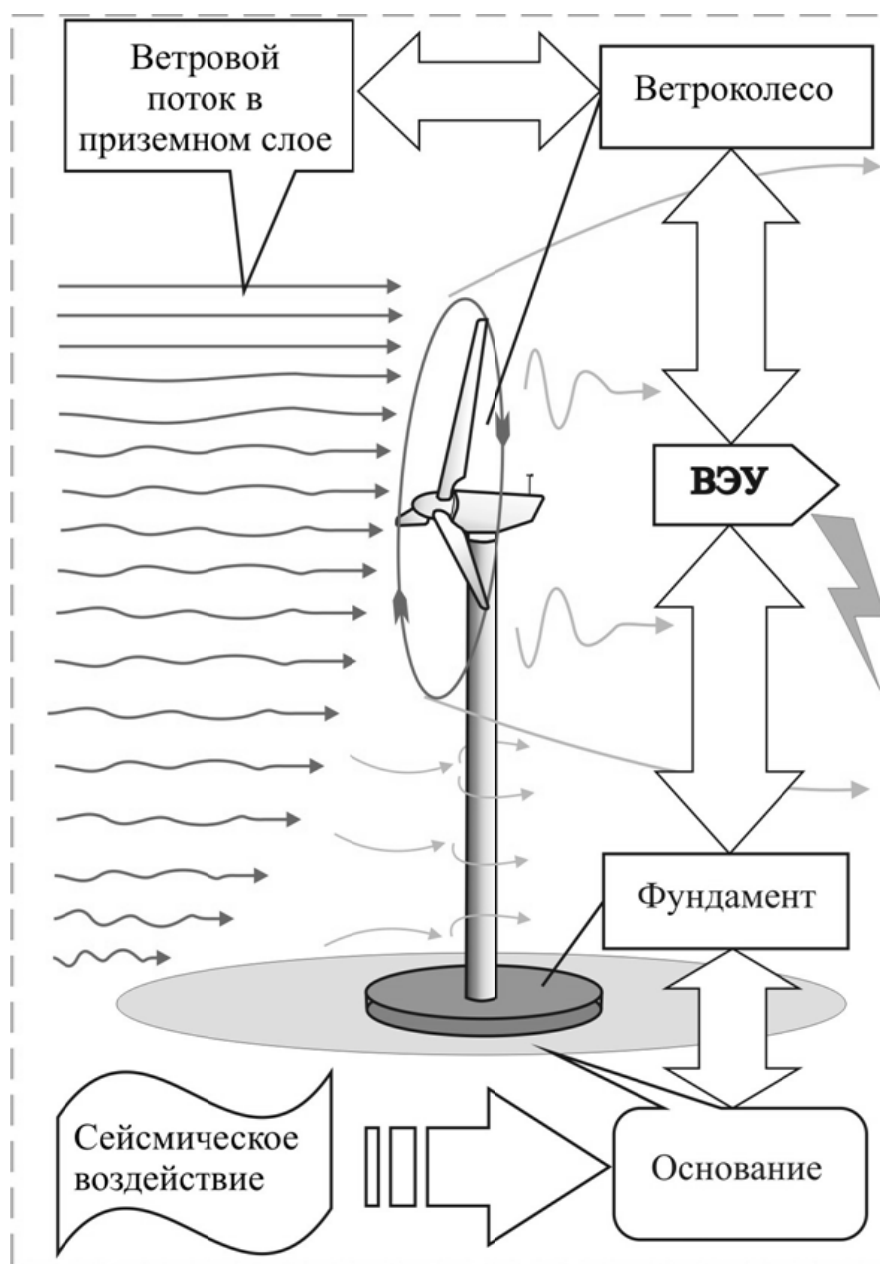


Рис. 1. Подсистемы ПТС с ВЭУ

- ветровой поток, взаимодействуя с ветроколесом (ВК), передает ему часть своей мощности и, как следствие, воздействует на него с определенными аэродинамическими усилиями, образуя подсистему ВЕТРОВОЙ ПОТОК-ВЕТРОКОЛЕСО;
- ВК в свою очередь, взаимодействуя с ветроэлектрическим агрегатом (ВЭА) и опорной башней, образует подсистему ВК-ВЭА-БАШНЯ, являющуюся основным элементом ВЭУ;
- ВЭУ взаимодействует с основанием посредством фундамента и образует подсистему ВЭУ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВАНИЕ, в которой рассматривается задача передачи нагрузок, вызванных взаимодействием окружающих факторов с ВЭУ на фундамент и основание.

Для моделирования энергии ветрового потока автором применены модели, описывающие:

- мощность, передающуюся ВК от ветрового потока, имеющего скорость $V(t)$;
- повторяемость определенных значений скоростей ветрового потока $f(V)$.

В случаях сложного рельефа и подстилающей поверхности в пункте моделирования, а так же отсутствия в непосредственной близости от места предполагаемой установки ВЭС метеорологической станции, функцию распределения $f(V)$ аппроксимируют аналитическими зависимостями или табулированными распределениями, получаемыми в результате массовой статистической обработки метеорологических данных. При этом за основу моделирования берется, как правило, значение среднемесячных скоростей ветрового потока. В этой области работали и предложили свои распределения М.С. Поморцев, М.В. Колодин, Г. Гуллен, Вейбулл, Р.Д. Гудрич, Ю.А. Гринцевич, Г.А. Гриневич, и другие.

Наибольшее распространение в мировой практике получило семейство аналитических зависимостей Вейбулла, из которых автором использована двухпараметрическая зависимость вида:

$$f(V) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{\beta}\right)^\gamma\right] \quad (1)$$

Параметры распределения Вейбулла (γ – безразмерный параметр формы, β – параметр масштаба, м/с), определяются местными условиями.

Различие ветровых условий в произвольной точке местности и у ближайшей метеостанции определяются факторами местного характера:

- особенностями рельефа и шероховатости подстилающей поверхности, определяющими местную циркуляцию ветрового потока в приземном слое;
- наличие искусственных элементов затенения, экранирующих ВЭУ от воздействия прямого ветрового потока.

Ветровой поток, проходя через плоскость ВК, отдает ему часть своей энергии. Мощность ветрового потока, передаваемая ВК, выражается через среднюю скорость ветрового потока V , радиус R и определяется известной формулой:

$$P_{BK} = \pi \rho \frac{V^3 R^2}{2} \xi \quad (2)$$

где ξ - коэффициент использования энергии ВЕТРОВОГО ПОТОКА ВК, зависящий от аэродинамических особенностей и конструкции ВК и ВЭУ; ρ – плотность воздуха при нормальных условиях.

Подсистема ВЭУ характеризуется своими энергетическими параметрами, наиболее важными из которых для поставленной задачи являются электрическая мощность и выработка электроэнергии. Электрическая мощность ВЭУ определяется отобранной у ветрового потока в подсистеме ВЕТРОВОЙ ПОТОК-ВЕТРОКОЛЕСО мощности:

$$P = P_{BK} \eta_{СУМ} \quad (3)$$

где $\eta_{СУМ}$ – общее КПД ВЭА, определяемое как произведение КПД генератора (или генераторов), редуктора, механического КПД, и другие.

Теоретическая выработка ВЭУ за период T определена из следующей зависимости:

$$\mathcal{E}^T = T \int_{V_{MIN}}^{V_{MAX}} P(V) f(V) dV \quad (4)$$

Практическая выработка электрической энергии, учитывающая характер подстилающей поверхности, характер орографии поверхности, а также наличие вблизи ВЭУ элементов затенения, определена по формуле:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n k_i \mathcal{E}_i^T, \quad (5)$$

где n – количество азимутальных секторов, каждому из которых соответствует свой поправочный коэффициент k_i , зависящий от расстояния a до источника затенения, его конфигурации и размеров (b , h , k , l), а также высоты оси ВК h_m (рис. 2).

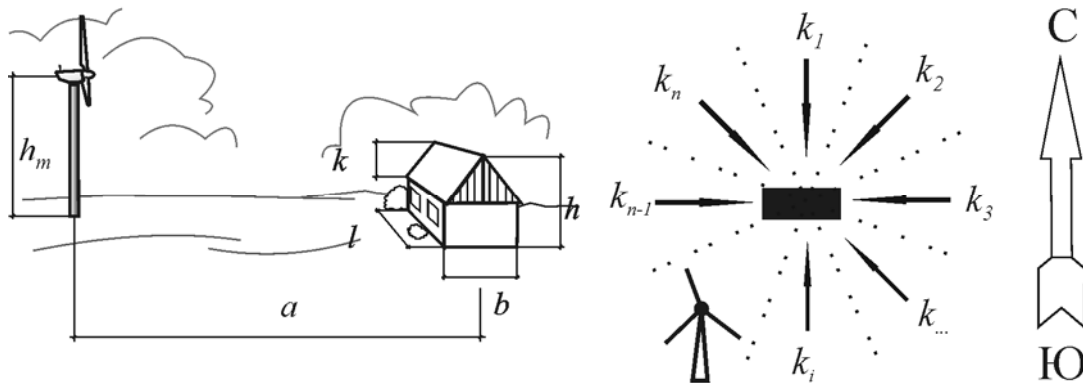


Рис. 2. Основные обозначения при определении k_i

Важной задачей, возникающей при проектировании ВЭС, является подсчёт нагрузок, действующих в подсистеме ВЭУ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВАНИЕ в заданных геологических и климатических условиях. Автором разработана методика подсчёта нагрузок, в которой все нагрузки, действующие на элементы подсистемы ВЭУ, приведены к собственной системе координат (x_p , y_p , z_p) и рассчитываются для основных расчетных случаев и сочетаний нагрузок. На рис. 3 изображена система координат и силовая схема ВЭА с ВК.

Нагрузка со стороны ВК на гондолу представляется в виде сосредоточенных сил P_{x_p} , P_{y_p} и P_{z_p} , действующих на ступицу ВК, и моментов: M_{x_p} , действующего относительно оси x_p , а также M_x , M_y и M_z , действующих относительно осей x , y и z .

Основными нагрузками, передающимися от ВЭУ на привалочную плоскость фундамента, являются:

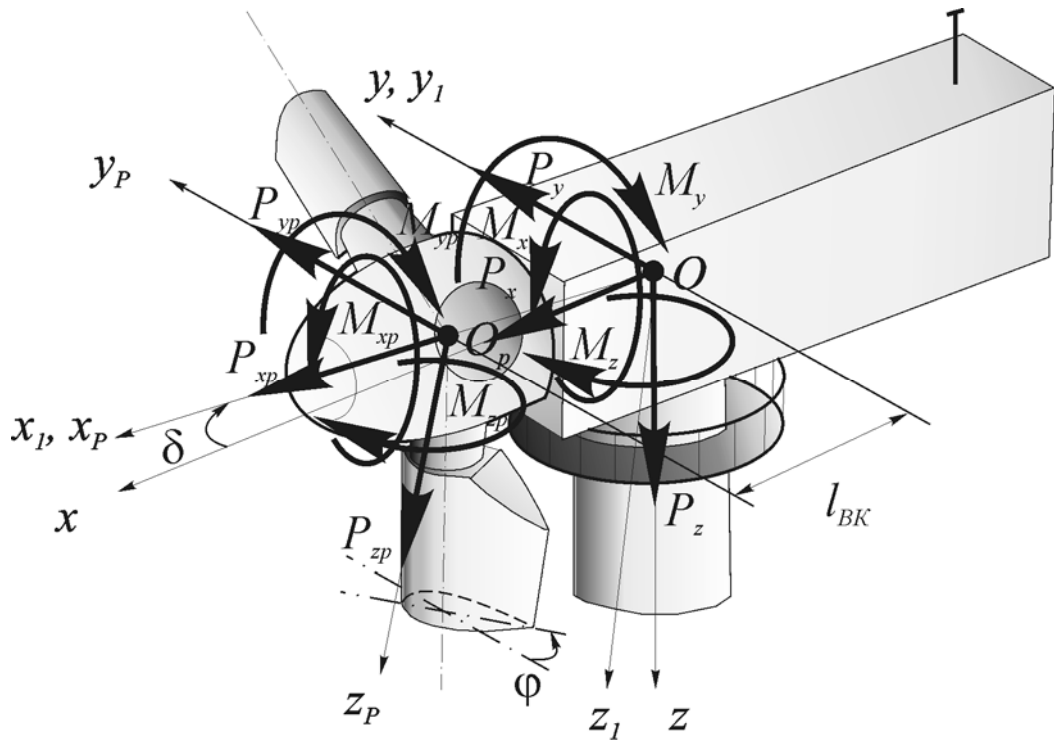


Рис. 3. Система координат и силовая схема ВЭА

$$\begin{aligned}
 P_x^\Phi &= f(c_{xp}, V, \varphi, h_m, S, R, \delta); & M_x^\Phi &= f(V, m_{xp}, \varphi, S, R); \\
 P_y^\Phi &= f(\omega, V); & M_y^\Phi &= f(M_{ГИР}, l_{БК}, P_{xp}^c); \\
 P_z^\Phi &= P_z^{БК} + P_z^{ВЭА} + P_z^B; & M_z^\Phi &= f(P_{yp}, l_{БК}).
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $P_{x_p}^c$ – равнодействующая лобового давления ветрового потока:

$$P_{x_p}^c = c_{x_p} q S \tag{7}$$

здесь c_{x_p} – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления ветроколеса, q – скоростной напор ветрового потока, S – ометаемая площадь ВК; m_{x_p} – аэродинамический коэффициент, R – радиус ВК, ω – круговая частота вращения ВК, φ – угол поворота лопасти ВК, δ – угол наклона оси ВК к горизонту, $l_{БК}$ – расстояние от оси опорной башни до центра тяжести ВК, инерционные нагрузки в виде гироскопического момента $M_{ГИР}$, и

центробежная сила, вызванная дисбалансом ВК P_{yp} , а также нагрузки от собственного веса ВЭА $P_z^{BЭА}$, ВК P_z^{BK} и опорной башни P_z^B .

При расчете подсистемы ВЭУ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВАНИЕ учтены требования действующих в России нормативных документов и специально разработанных методических указаний, в соответствии с которыми подсистема ВЭУ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВАНИЕ должна удовлетворять следующим условиям:

- статической прочности и устойчивости;
- выносливости;
- жесткости.

При расчёте данной подсистемы на жесткость автором была разработана методика определения собственных частот и форм собственных колебаний для учёта:

- резонансных явлений конструкций ВЭУ;
- динамики башни от обтекания ветровым потоком;
- сейсмических нагрузок.

Исследования показали, что на стадии предварительного проектирования при модулях деформации основания, превышающих 5000 тс/м^2 , при решении динамической задачи допустимо использовать приближенную расчетную схему с одной степенью свободы (в виде упругой консоли).

Для строительства ВЭС в зависимости от инженерно-геологических условий обычно в качестве фундамента используются два типа:

- монолитный железобетонный фундамент мелкого заложения;
- свайный фундамент, состоящий из монолитного железобетонного ростверка и свайного основания (как правило, железобетонные сваи, головы которых защемлены в ростверк).

Методические разработки автора использованы при оптимизации параметров ВЭС мощностью 1 МВт на Чукотке. Расчёты были выполнены для двух задач:

- определения оптимальных энергетических параметров ВЭС с учетом влияния затеняющих помех и рельефа;
- подсчёта нагрузок и определения параметров фундамента ВЭУ с учётом того, что место строительства ВЭС располагается в районе сейсмической активности с вечной мерзлотой.

Показано, что выработка электроэнергии ВЭС при расположении ВЭУ на более высоких отметках не всегда даёт лучший результат. Выработка ВЭУ, расположенной на отметке 20 м, превышает на 13% выработку той же ВЭУ на отметке 75 м (рис. 4). Здесь определяющим фактором является роза ветров, имеющая такую форму, что ВЭУ на отметке 20 м при преобладающих ветрах попадает в естественный концентратор в виде лощины.

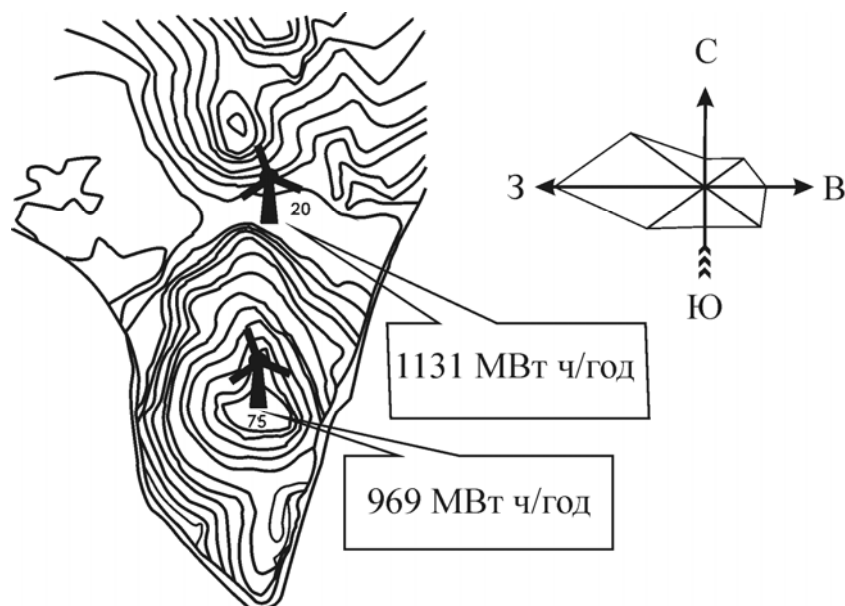


Рис. 4. Варианты размещения ВЭУ на местности

Путём многовариантных расчётов определены оптимальные габариты свайного фундамента ВЭУ мощностью 250 КВт, организуемого в условиях вечной мерзлоты, в том числе размеры ростверка и диаметра скважин $d_{скв}$, а также глубина погружения свай в вечномёрзлый грунт $h_{св\ OIT}$ (рис. 5). Показано, что при применении свайного фундамента для вечномёрзлых грунтов наиболее опасным случаем, является случай сжатия буроопускных свай. При этом увеличение диаметра скважины существенно влияет на глубину погружения сваи и габариты ростверка.

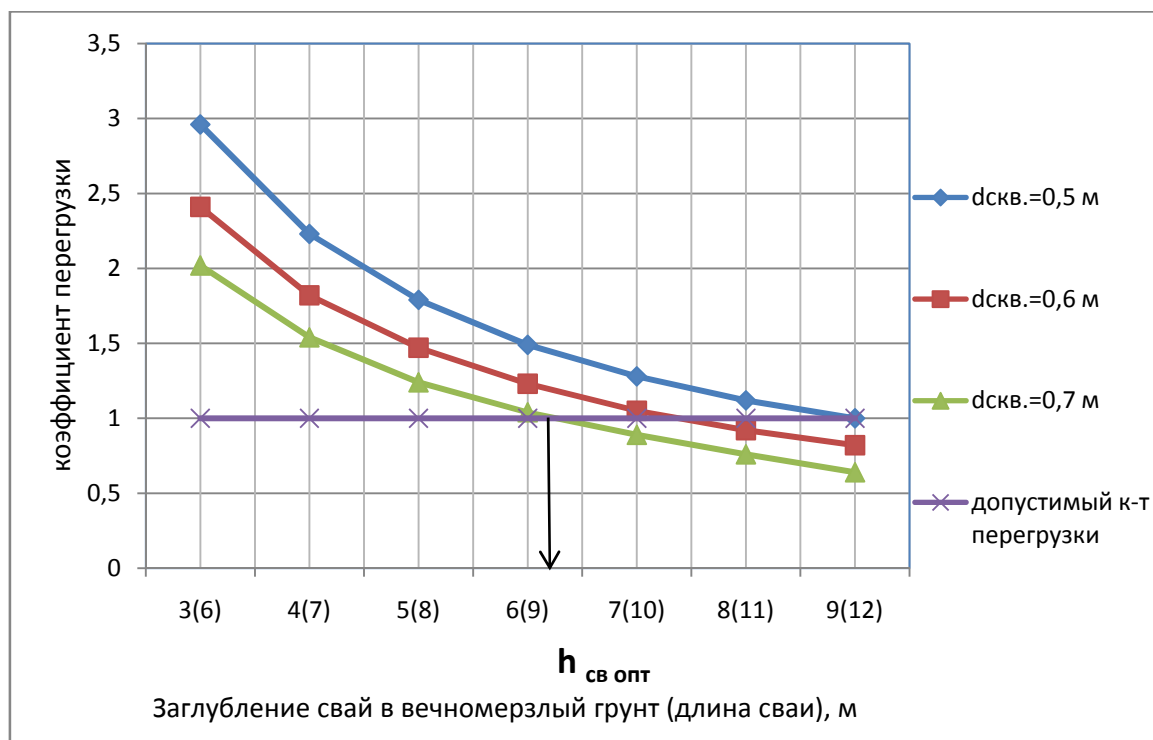


Рис. 5. Результаты расчёта ВЭУ 250 с ростерком 8x8 м и свай квадратного поперечного сечения 0.3x0.3 м

Основные результаты работы и выводы

1. Проведена классификация факторов взаимодействия ветроэлектрической установки с окружающей средой в составе природно-технической системы, показавшая необходимость рассмотрения ВЭУ как совокупности нескольких подсистем по типу взаимодействия с окружающей средой.
2. Разработана методика энергетических расчётов параметров ВЭС, обеспечивающая эффективное решение задач компоновки ВЭС с учётом метеорологических, орографических, инженерно-геологических условий предполагаемого места возведения.
3. Разработана методика подсчёта статических и динамических нагрузок, действующих на элементы ВЭУ, вызванных внутренними и внешними факторами, в том числе сейсмической составляющей.
4. Предложена методика определения основных параметров фундамента ВЭУ, в том числе для условий Крайнего Севера.

Публикации работы: По материалам диссертации опубликовано 7 работ:

1. *Елистратов В.В., Панфилов А.А.* Проектирование инженерных конструкций ветроэлектрических установок//Научно-технические ведомости СПбГПУ.-2007.-№3. –С. 159-164.
2. *Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А.* Нагрузки на элементы ветроэлектрической установки, ее фундамент и основание. Учеб.пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ,1999. 38с.
3. *Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А.* Динамические расчеты системы "Ветроэнергетическая установка–фундамент–основание". Учеб. пособие СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 54 с.
4. *Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А.* Расчет фундаментов ветроэнергетических установок. Часть 1. Монолитные железобетонные фундаменты мелкого заложения: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, 91 с.
5. *Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А.* Расчет фундаментов ветроэнергетических установок. Часть 2. Свайные фундаменты: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004, 94 с.
6. *Панфилов А.А.* Региональные особенности обоснования параметров ветроэлектрических станций в природно-технической системе // Региональная экология.-1999.-№4.- С.82-86.
7. *Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А.* Проектирование инженерных конструкций ВЭУ // Труды СПбГТУ.-2007.-№502.-С.144-160.