

Проектирование модульных опорных конструкций арктической ветроэнергетической установки

И.В. Ригель

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Аннотация: В статье рассматриваются опорные конструкции ветроэнергетической установки, предназначенной для эксплуатации в условиях Крайнего Севера. Актуальность исследования определяется стратегическими целями развития арктической зоны России и необходимостью учёта особых природно-климатических условий при проектировании энергетических сооружений. Предложена модульная опорная конструктивная система, учитывающая транспортные и технологические требования к арктическим ВЭУ. Разработана модель конструктивной системы средствами автоматизированного проектирования, включающая трубчатую конусную башню, состоящую из трёх секций и составной балочный ростверк с трёхточечным опиранием. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния и оценка несущей способности конструкций при экстремальных нагрузках методами компьютерного инжиниринга. Результаты показали, что предложенное конструктивное решение удовлетворяет транспортным ограничениям, а также обеспечивает прочность и устойчивость арктической ВЭУ при экстремальной комбинации нагрузок. Предложенное конструктивное решение может быть использовано для упрощения доставки и монтажа арктических ВЭУ на объектах энергетики в труднодоступных северных регионах.

Ключевые слова: арктическая ветроэнергетическая установка, модульные конструкции, опорные конструкции, автоматизированное проектирование, компьютерный инжиниринг, многолетнемёрзлые грунты.

Введение

1. Арктические ветроэнергетические установки (ВЭУ) представляют собой перспективное решение для энергоснабжения удалённых регионов, где энергоснабжение осуществляется, в основном, за счет дизельных электростанций, имеет высокую стоимость в связи с трудностями завоза топлива и оказывает неблагоприятное влияние на экологическую ситуацию [1]. Реализация проектов по развитию арктической ветроэнергетики соответствует стратегическим задачам России, направленным на освоение и использование пространства Арктики, что предусмотрено в национальных стратегиях и планах (Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»).

. Однако строительство ВЭУ в условиях Крайнего Севера сопряжено с рядом инженерных вызовов, среди которых одним из ключевых является проектирование опорных конструкций, устойчивых к экстремальным климатическим условиям и деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ) [2, 3].

Специфика возведения и эксплуатации ВЭУ на удалённых территориях в северных условиях накладывает ряд требований на их опорные конструкции:

- конструкция башни должна иметь минимально возможную площадь поверхности для сведения к минимуму обледенения её поверхности;
- все основные узлы (болтовые соединения, система передачи мощности и информации) должны быть максимально защищены от внешних условий;
- конструкция фундамента должна учитывать принципы строительства на многолетнемерзлых грунтах;
- конструктивная система должна быть модульного исполнения обеспечивая удобство доставки и монтажа, минимизируя такие работы как: сварка, бетонирование, сборка мелких узлов и компонентов при возведении.

Наиболее распространенной практикой при строительстве в зонах распространения ММГ является возведение зданий и сооружений на свайных фундаментах, обеспечивающих сохранение мерзлого состояния грунта [4, 5]. Примером реализации аналогичного подхода для арктических ВЭУ являются опорные конструкции на свайных фундаментах с трехточечным опиранием, примененные при строительстве Воркутинской, Анадырской ВЭС и ВЭУ в пос. Амдерма [6], а также на свайных кустах на Аляске [7, 8].

Однако, существующие конструктивные решения не являются модульными, что ограничивает их применение в удаленных северных регионах.

Целью статьи является разработка модульных опорных конструкций арктической ВЭУ мощностью 100 кВт.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработана компьютерная модель модульных опорных конструкций ВЭУ, включающая секционную башню и составной балочный ростверк;
- проведена оценка прочности и устойчивости разработанных решений опорных конструкций ВЭУ с использованием методов компьютерного инжиниринга.

Описание рассматриваемой ВЭУ

В работе рассматривается ВЭУ арктического исполнения мощностью 100 кВт, с высотой башни 30 м, размеры гондолы – 2х1.3х1.5 м, ветроколесом диаметром 24 м с оптимизированной формой лопасти, разработанной СПБПУ для эксплуатации в арктических условиях [9]. Схема исследуемой ВЭУ приведена на рис. 1.

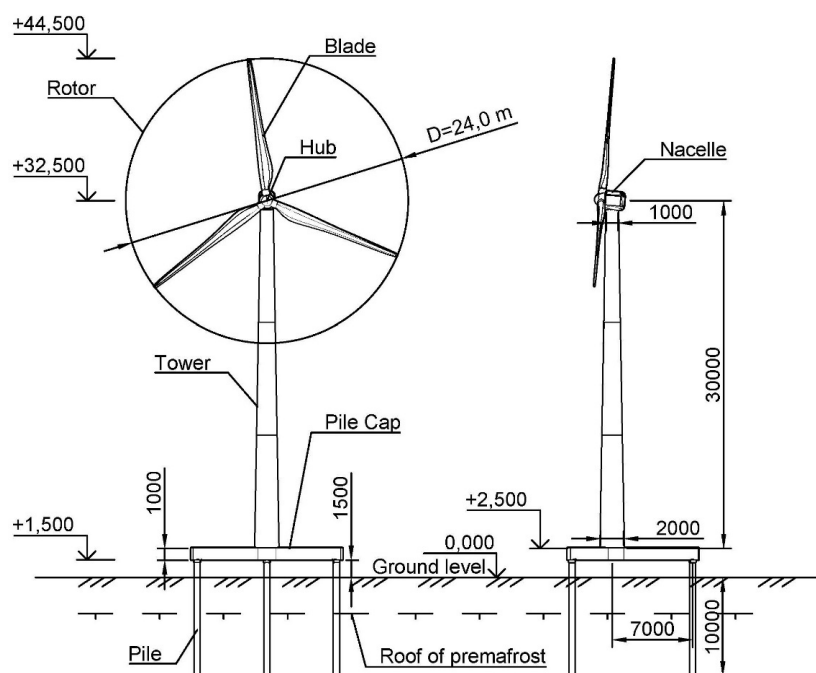


Рис. 1. - Схема исследуемой ВЭУ

Опорные конструкции ВЭУ выполнены из стали С355, компоновочное решение конструктивной системы включает стальную трубчатую конусную башню и конструкцию ростверка с трехточечным опиранием для передачи нагрузок на основание. Верхний диаметр башни составляет 1 м, диаметр нижнего сечения – 2 м, толщина стенки 10 мм. Нагрузка от башни передается на сваи посредством балок ростверка длиной 7 метров с коробчатым сечением размерами 1000х320 мм, выполненных из горизонтальных пластин толщиной 40 мм и вертикальных пластин толщиной 30 мм. Ростверк высокий, для строительства на ММГ по I принципу, балки ростверка опираются на буроопускные стальные круглые сваи сечением 426х8 мм. Параметры режимов работы ВЭУ представлены в табл. 1.

Таблица 1- Параметры режимов работы ВЭУ

Номинальная скорость ветра V_r	8 м/с
Номинальная быстроходность λ_r	8
Частота вращения ротора	переменная от 0 до 75 об/мин
Номинальная мощность ВЭУ P_r	100 кВт
Рабочий диапазон скоростей ветра $V_{in} - V_{out}$	2–25 м/с
Ориентация на ветер (рыскание)	активная, против ветра
Регулирование мощности	активное, поворотом лопастей (pitch-контроль)
Управление при экстремальной скорости ветра	останов ротора, флюгерное положение лопастей

Методы проектирования опорных конструкций

Проектирование модульных опорных конструкций ВЭУ включает 2 этапа:

1. Создание компьютерной модели конструкций ВЭУ с применением средств автоматизированного проектирования, включающее компоновку конструктивных модулей и их соединений с учетом, заданных транспортных, эксплуатационных и технологических ограничений.
2. Анализ напряженно-деформированного состояния конструкций на основе компьютерного инжиниринга, включающий оценку прочности и

устойчивости для подтверждения несущей способности принятых конструктивных решений.

На этапе 1 формируются основные размеры модулей и создается трехмерная геометрическая модель опорных конструкций ВЭУ. Ключевым условием при разработке компоновочного решения опорных конструкций, являются ограничения по массе и габаритам для обеспечения возможности транспортировки отдельных модулей в контейнерах. Размеры стандартного контейнера указаны в табл. 2.

Таблица 2 - Размеры стандартного контейнера

Характеристика	Контейнер 40' x 8' x 8'8	
	Внутренние размеры	Дверной проем
Длина, м	11,98	
Ширина, м	2,33	2,28
Высота, м	2,35	2,26
Вес груза, кг	26 500	

После формирования основных размеров модулей, определяются типы и компоновка их соединений. Учитывая эксплуатацию опорных конструкций ВЭУ под действием динамических нагрузок, применяются фрикционные болтовые соединения на высокопрочных болтах, которые конструируются и рассчитываются соответствии с требованиями СП 16.13330.2017 с учетом действия изгибающих моментов от внешних нагрузок, вызывающих растяжение в болтах.

Нагрузки от ветроагрегата на верхнюю точку башни определены из аэросервоупругого моделирования в [10] в соответствии с ИЕС 64100-1 и приведены в таблице 3. Рассматривается экстремальная комбинация нагрузок, соответствующая режиму останова с флюгерным положением лопастей при экстремальной скорости ветра с 50-летней повторяемостью $V_{ref} = 60$ м/с в на отметке ступицы ветроколеса.

Таблица 3 - Нагрузки на верхнюю точку башни

Комбинация нагрузок	F_x^t , кН	F_y^t , кН	F_z^t , кН	M_x^t , кНм	M_y^t , кНм	M_z^t , кНм	F_{xy}^t , кН	M_{xy}^t , кНм
Экстремальная	22.07	-12.25	-80.69	238.43	-10.72	-0.06	25.24	238.67

Нагрузка по высоте башни задается переменной с учетом высотного профиля ветра, согласно СП 20.13330.2016.

Таким образом, на этапе 1 формируется модель опорных конструкций, в которой определены основные размеры и параметры конструктивных модулей и их соединений.

На этапе 2 на основе разработанной модели формируется расчетная модель для анализа напряженно-деформированного состояния конструктивной системы при экстремальной комбинации нагрузок (табл. 3) методами компьютерного инжиниринга. Для этого используется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Ansys Mechanical [11].

Конструктивная система моделируется с помощью квадратичных оболочечных конечных элементов. При дискретизации модели для КЭ-оболочки используется шаг 0.1 м с локальным сгущением до 0.01 м в узлах соединения модулей.

На основе созданной КЭ-модели производятся расчетные исследования, которые включают:

- анализ напряженно-деформированного состояния при действии экстремальной комбинации нагрузок для оценки прочности конструктивных элементов;
- анализ устойчивости при действии экстремальной комбинации нагрузок для оценки общей и местной устойчивости конструктивных элементов.

По результатам расчетов методами компьютерного инжиниринга определяются точки локализации и максимальные значения эквивалентных

напряжений в конструктивных элементах, а также коэффициенты запаса устойчивости при действии экстремальной комбинации нагрузок. Несущая способность считается обеспеченной, если напряжения не превышают предела текучести стали и значения коэффициентов запаса устойчивости не ниже 10.

Результаты и обсуждение

По результатам 1 этапа сформирована модель опорных конструкций ВЭУ, состоящая из 7 модулей:

- 3 секции башни;
- опорная корзина;
- 3 балки ростверка.

Схема отдельных модулей конструктивной системы с габаритными размерами и ВЭУ в сборе представлена на рис. 2.

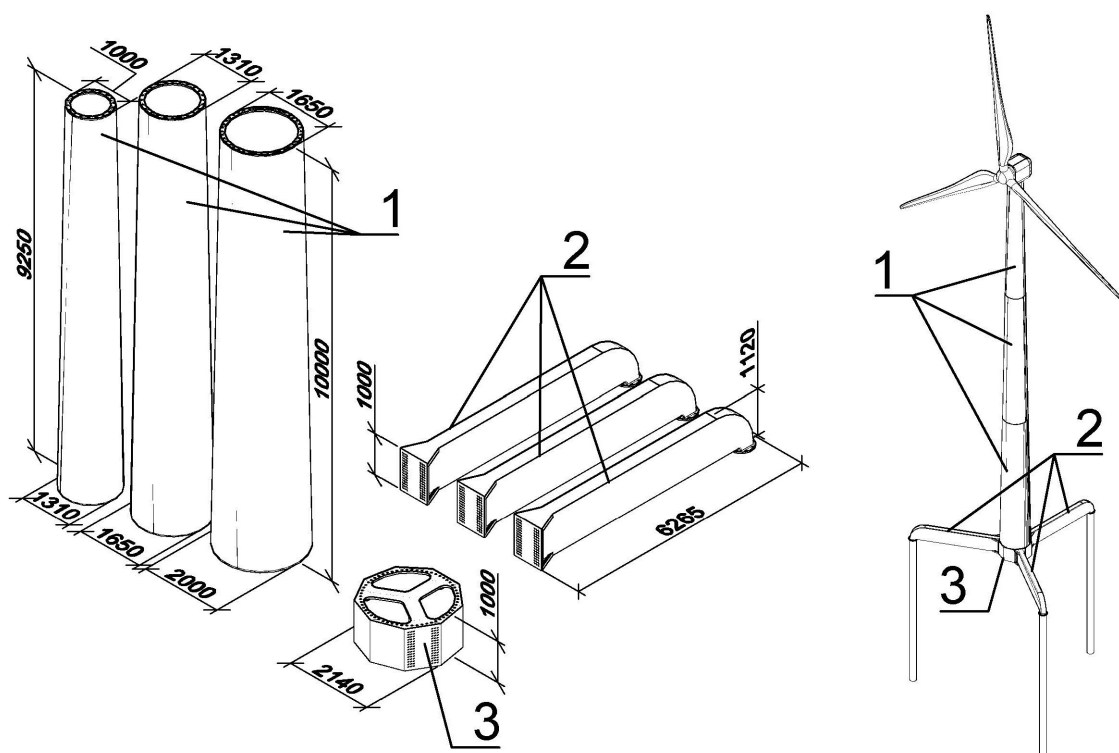


Рис. 2. – Схема модулей и ВЭУ в сборе: 1 – секции башни, 2 – балки ростверка, 3 – опорная корзина

Секции башни (1) соединяются с помощью фланцев, расположенных во внутреннем объеме башни. Башня устанавливается на опорную корзину (2), имеющую форму правильного 9-угольника в плане, по трем сторонам которой монтируются балки ростверка.

Наибольшие габаритные размеры имеют нижняя секция башни – 2 x 2 x 10м и опорная корзина – 2,14 x 2,14 x 1м. Масса наиболее тяжелого элемента (нижняя секция башни) – 4600 кг. Таким образом, предложенное конструктивное решение соответствует транспортным и технологическим требованиям.

На 2 этапе на основе разработанного конструктивного решения создана КЭ-модель конструктивной системы ВЭУ. Общее количество конечных элементов в модели составило 67 тысяч.

По результатам расчетов методами компьютерного инжиниринга определено напряженно-деформированное состояние опорных конструкций при экстремальной комбинации нагрузок. Распределение эквивалентных напряжений в опорных конструкциях представлено на рис. 3.

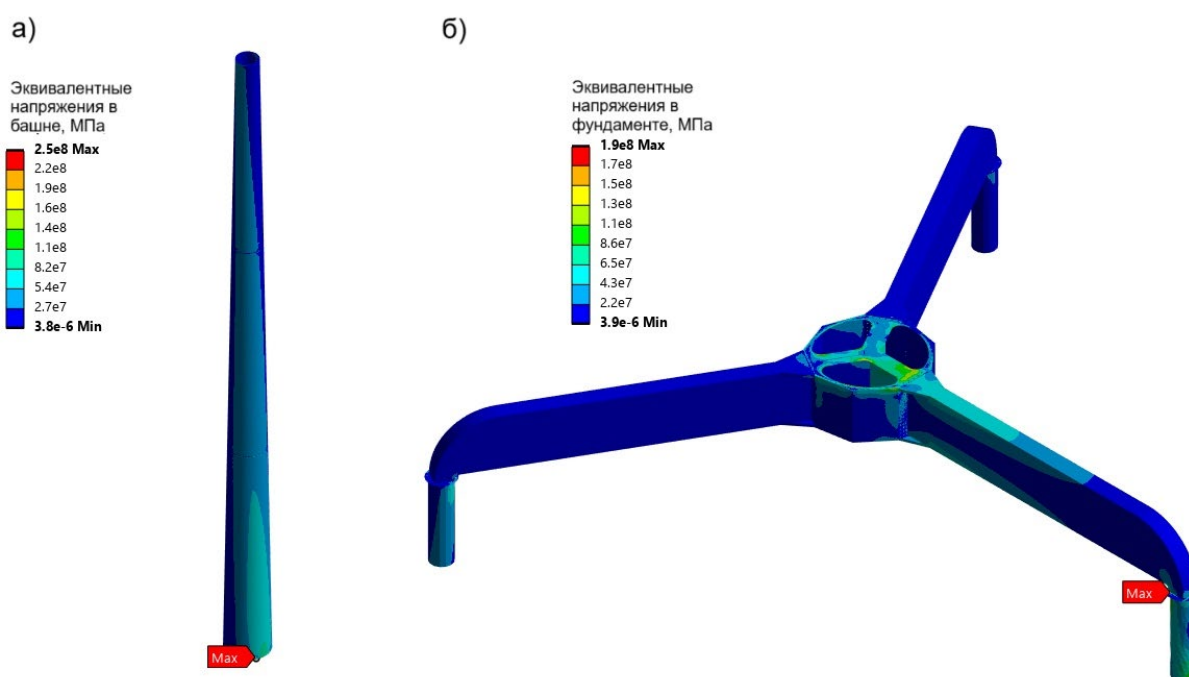


Рис. 3. – Распределение напряжений в: а) башне, б) фундаменте

Из рис. 3 видно, что наибольшие напряжения локализуются в нижнем фланце башни и составляют 250 МПа. Максимальные напряжения в конструкции фундамента не превышают 190 МПа, локализуются преимущественно в опорной корзине и оголовках свай. Значения напряжений не превышают предела текучести стали С355.

Установлено, что устойчивость конструктивной системы при действующих экстремальных нагрузках обеспечена. Устойчивость по наиболее вероятной форме потери устойчивости (локальная потеря устойчивости стенки нижней секции башни) обеспечена с коэффициентом запаса 16.

Таким образом, несущая способность разработанных конструктивных решений считается обеспеченной, реализация экстремальной комбинации нагрузок не приведет к разрушению опорных конструкций.

Выводы

1. Разработана модульная система опорных конструкций арктической ВЭУ мощностью 100 кВт, состоящая из 7 модулей (3 секции башни, опорная корзина и 3 балки ростверка), что обеспечивает удобство транспортировки и монтажа в удалённых северных регионах.

2. Разработана модель опорных конструкций ВЭУ с применением средств автоматизированного проектирования, на основе которой сформированы основные геометрические параметры модулей и их соединений, подтверждено соответствие массогабаритных характеристик модулей транспортным ограничениям.

3. Проведен анализ конструктивных решений методами компьютерного инжиниринга, результаты которого подтвердили прочность и устойчивость опорных конструкций при экстремальной комбинации нагрузок на арктическую ВЭУ:

- максимальные напряжения (250 МПа) не превышают предела текучести стали С355;
- коэффициент запаса устойчивости (16) выше нижнего предельного значения.

4. Предложенное конструктивное решение сочетает модульность, технологичность и надежность при экстремальных нагрузках и может быть рекомендовано при строительстве объектов арктической ветроэнергетики на удаленных территориях.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00497, rscf.ru/project/25-29-00497/.

Литература

1. Елистратов В.В. Научно-техническое обоснование и проектирование энергокомплексов на основе ВИЭ для сложных природно-климатических условий // Электричество. 2023. № 10. с. 4–21.
2. Юрченко В. А., Манько А. В. Вечная мерзлота: геокриологические опасности и региональная деградация мерзлых грунтов // Инженерный вестник Дона, 2023, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8586.
3. Yang, Z., Still, B.A., Wait, I., Chen, G. Dynamic Responses of a Wind Turbine Founded in Warm Permafrost. Journal of Cold Regions Engineering. 2018. 32(4). Article no. 04018011
4. Охлопкова Т. В., Гурьянов Г. Р., Плотников А. А. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5258.

5. Дмитриенко И. А., Перфилов В. А. Особенности строительства свайных фундаментов в зонах вечной мерзлоты на объектах нефтегазовой отрасли: обзор // Инженерный вестник Дона, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6122.
6. Елистратов В.В., Ригель И.В. Конструктивные решения и методы проектирования фундаментов ветроэнергетических установок для условий Арктики // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 43-55.
7. Zheng M., Yang Zh., Yang Sh., Still B. Modeling and mitigation of excessive dynamic responses of wind turbines founded in warm permafrost. Engineering Structures, Vol. 148. 2017. Pp. 36-46.
8. Dilley L. M., Hulse L. Foundation Design of Wind Turbines in Southwestern Alaska, a Case Study. The Arctic Energy Summit. Institute of the North. Anchorage, USA, 2008.
9. Voinov I.B., Elistratov V.V., Keresten I.A. et al. Profiling a Wind Wheel Blade Using Parametric Optimization and Computational Aerodynamics Methods. Therm. Eng. 71, 513–522 (2024).
10. Ригель И. В., Елистратов В. В. Оценка несущей способности опорных конструкций арктической ВЭУ на основе аэросервоупругого моделирования // Вестник МГСУ. 2025; 20(7) (в печати).
11. Ansys Mechanical, Ansys, Inc. URL: ansys.com/products/structures/ansys-mechanical.

References

1. Elistratov V.V. Elektrichestvo. 2023. No 10. pp. 4–21.
2. Jurchenko V. A., Man'ko A. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8586.
3. Yang, Z., Still, B.A., Wait, I., Chen, G. Journal of Cold Regions Engineering. 2018. 32(4). Article no. 04018011



4. Ohlopkova T. V., Gur'janov G. R., Plotnikov A. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5258.
5. Dmitrienko I. A., Perfilov V. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6122.
6. Elistratov V.V., Rigel I.V. Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva. 2024. Vol. 311. Pp. 43-55.
7. Zheng M., Yang Zh., Yang Sh., Still B. Engineering Structures, Vol. 148. 2017. Pp. 36-46.
8. Dilley L. M., Hulse L. The Arctic Energy Summit. Institute of the North. Anchorage, USA, 2008.
9. Voinov I.B., Elistratov V.V., Keresten I.A. et al. Therm. Eng. 71, 513–522 (2024).
10. Rigel I. V., Elistratov V. V. Vestnik MGSU. 2025; 20(7) (V pechaty).
11. Ansys Mechanical, Ansys, Inc. URL: ansys.com/products/structures/ansys-mechanical.

Дата поступления: 16.06.2025

Дата публикации: 26.07.2025