

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.
САТПАЕВА

ОТЗЫВ

на магистерскую диссертацию

Аманбасва Айтүмар Айбарұлы

7M07113 – Электротехника и энергетика

на тему «Анализ установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией»

В данной работе представлен анализ установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией. В последнее время с увеличением производительности компьютеров актуализировался вопрос обработки больших данных и применение новых технологий в энергетике получило широкое распространение. В сфере возобновляемых источников энергии, в частности, безопасных ветряных турбин, на текущий момент проведено недостаточное количество исследований, что говорит об актуальности данной работы.

Актуальность применения данного подхода вызвана тем, что в условиях частных домов и малых хозяйств необходимо находить эффективные и экологически чистые решения для энергоснабжения. Безопасные ветряные турбины представляют собой перспективное направление благодаря низкому уровню шума, безопасности и простоте установки.

В результате проведенных работ были подготовлены модели безопасных ветряных турбин с различными параметрами и условиями эксплуатации. Произведены расчеты эффективности использования турбин в реальных условиях.

По результатам изучения опыта использования аналогичных систем в других странах и компаний, таких как Vortex Bladeless, было выявлено, что безопасные ветряные турбины обладают высоким потенциалом для использования в частных домах, особенно в районах с низкими и средними скоростями ветра.

Данная работа проведена в целях проектирования, моделирования и экспериментальной оценки эффективности данной технологии, а также разработку бизнес-модели для её коммерциализации.

Необходимо отметить значительный интерес крупных энергетических компаний к данному направлению, что подтверждается участием автора в различных конкурсах и публикацией статьи в научных журналах.

В целом, магистерская диссертационная работа выполнена на должном научном уровне, содержит результаты решения поставленной научной проблемы, удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, работа оценивается на «отлично» (95%) и может быть допущена к защите для присуждения квалификации и соискания академической степени магистра техники и технологии по специальности 7M07113 – Электротехника и энергетика.

Научный руководитель
PhD, ассоциированный профессор

 Оинпар Б.

24.06.2024 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.
САТПАЕВА

РЕЦЕНЗИЯ

на диссертацию Аманбаева А.А.
на тему «Анализ установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения
дома электроэнергией»
представленную на соискание степени магистра
7М07113 – Электротехника и энергетика

Рецензируемая работа посвящена анализу установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией. В последнее время с увеличением потребности в возобновляемых источниках энергии, актуализировался вопрос использования инновационных технологий для энергообеспечения. В сфере домашних энергетических систем на текущий момент проведено недостаточное количество исследований с использованием безопасных ветряных турбин, что говорит об актуальности данной работы.

Актуальность применения данного подхода вызвана тем, что в условиях частных домов необходимо находить эффективные и экологически чистые решения для энергоснабжения. Безопасные ветряные турбины представляют собой перспективное направление благодаря низкому уровню шума, безопасности и простоте установки.

Цель данной работы - исследование актуальности и возможностей использования малых безопасных ветряных турбин для обеспечения частных домов электроэнергией, анализ существующих технологий безопасных ветряных турбин и оценка их применимости в условиях домашних хозяйств. Также важными целями являются разработка и моделирование различных вариантов малых безопасных ветряных турбин для оптимизации их эффективности и экономической целесообразности, проведение экспериментальных исследований для оценки эффективности работы безопасных ветряных турбин в реальных условиях эксплуатации. Помимо этого, работа направлена на определение ключевых факторов влияния на эффективность работы малых безопасных ветряных турбин и разработку рекомендаций по их оптимизации.

Проделанная работа выполнена на высоком уровне и заслуживает высокой оценки. Выбранный подход заслуживает одобрения, так как соответствует имеющимся мировым практикам и методологиям.

Из недостатков следует отметить недостаточное внимание экономическим аспектам использования малой безопасной ветряной турбины, таким как стоимость установки и срок окупаемости, а также ограниченное количество проведенных экспериментов, что может сказываться на обобщаемости полученных результатов.

Магистерская диссертация по теме «Анализ установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией» имеет научно-практическую значимость и рекомендуется к защите, работа оценивается на оценку «отлично» (95%).

Рецензент:

к.т.н., доцент кафедры «ТЭУ»
АУЭС им. Г. Даукеева,

Туманов М.Е.



« 24 » 06 2024 г.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Аманбаев Айтүмар Айбарұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Анализ установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией

Научный руководитель: Булбул Онгар

Коэффициент Подобия 1: 1.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 15

Знаки из других алфавитов: 6

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 25.06.2024

Заведующий кафедрой Журетчи

Саралибаев Е А

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Аманбаев Айтүмар Айбарұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Анализ установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией

Научный руководитель: Булбул Оңгар

Коэффициент Подобия 1: 1.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 15

Знаки из других алфавитов: 6

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 13.06.2024г

Оңгар Б

проверяющий эксперт

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Аманбаев Айтұмар Айбарұлы

Анализ установки малой безопасной ветряной турбины для обеспечения дома
электроэнергией

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M07113 – Электротехника и энергетика

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

УДК 681.5

На правах рукописи

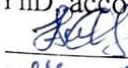
Аманбаев Айтұмар Айбарұлы


МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

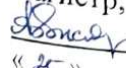
На соискание академической степени магистра

Название диссертации Анализ установки малой безлопастной ветряной турбины
для обеспечения дома электроэнергией


Направление подготовки Специальность 7М07113 – Электротехника и энергетика

Научный руководитель
PhD, ассоциированный профессор
 Онгар Б.
«24» 06 2024 г.

Рецензент
Алматинский университет энергетики
и связи им. Г. Даукеева. к.т.н.,
доцент кафедры "ТЭУ"
 Туманов М.Е.
«25» 06 2024 г.

Нормоконтроль
Магистр, старший преподаватель
 Бердибеков А.О.
«25» 06 2024 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Институт энергетики
и машиностроения

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедры, PhD,
ассоциированный профессор
кафедры «Энергетика»
 Сарсенбаев Е.А.
«25» 06 2024 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

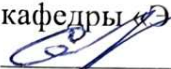
Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

7M07113 – Электротехника и энергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедры, PhD,
ассоциированный профессор
кафедры «Энергетика»


Сарсенбаев Е.А.
« 25 » 01 2024 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Аманбаеву А.А.

Тема «Анализ установки малой безлопастной ветряной турбины для обеспечения дома
электроэнергией»

Утвержден приказом ректора Университета № 408-П/от «23» 11.2022 г.

Срок сдачи законченной работы: «25» 06 2024 г.

Исходные данные магистерской диссертации:

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) разработка конструкции малой безлопастной ветряной турбины;
- б) численное моделирование и экспериментальные исследования;
- в) исследование систем накопления энергии;
- г) концептуальный дизайн генератора мощности;
- д) бизнес-модель и коммерциализация технологии.

Рекомендуемая основная литература:

1 Wang, J.; Geng, L.; Ding, L.; Zhu, H.; Yurchenko, D. Обзор текущего состояния дел по сбору энергии от вибраций, вызванных потоком. Appl. Energy 2020, 267, 114902.

2 Kawai, H. Вибрации, вызванные вихрями, цилиндрического тела. В материалах 1-го Международного симпозиума по вычислительной аэродинамике (CWE 92), Токио, Япония, 21–23 августа 1992 г.; стр. 605–610.





3 Dol, S.S.; Chan, H.B.; Wee, S.K.; Perumal, K. Влияние гибкого генератора вихрей на структуры потока для улучшения турбулентности. В IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Бристоль, Великобритания, 2020; том 715, стр. 012070.

ГРАФИК
Подготовки магистерской диссертации

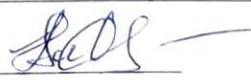
Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Современные технологии безопасных ветряных турбин	20 мая 2023 г.	н/м
Конструкция, моделирование и экспериментальные методы	10 февраля 2024 г.	н/м
Переходное структурное моделирование безопасных турбин	10 мая 2024 г.	н/м'

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Современные технологии безопасных ветряных турбин	Ph.D., ассоциированный профессор кафедры «Энергетика» Б. Онгар	13.06.2024	
Конструкция, моделирование и экспериментальные методы	Ph.D., ассоциированный профессор кафедры «Энергетика» Б. Онгар	13.06.2024	
Переходное структурное моделирование безопасных турбин	Ph.D., ассоциированный профессор кафедры «Энергетика» Б. Онгар	13.06.2024	
Нормоконтролер	Магистр, старший преподаватель кафедры «Энергетика» А.О. Бердибеков	25.06.2024	

Научный руководитель


подпись

Онгар Б.

Задание принял к исполнению обучающийся


подпись

Аманбаев А.А.

Дата

« 25 » 06 2024 г.

АНДАТПА

Энергияға сұраныстың артуы жағдайында жел энергиясы генераторлары сияқты жаңартылатын энергия көздері барған сайын өзекті бола түсуде. Бұл ғылыми жұмыстың мақсаты – үйді электр энергиясымен қамтамасыз ету үшін шағын жел энергиясы генераторын орнатуды талдау. Жұмыста аэродинамикалық сипаттамаларды және энергия жинау тиімділігін арттыру үшін вихрь генераторларын қамтитын жаңа жел энергиясы генераторының дизайны әзірленді.

Зерттеу әдістемесі турбина құрылымымен ауа ағынының өзара әрекетін модельдеу үшін екі жақты сұйықтық-қатты дене байланысын (СҚДБ) пайдалана отырып, сандық модельдеуді және эксперименттік зерттеулерді қамтиды. Сандық модельдеулер мен эксперименттердің нәтижелері ұсынылған дизайнның жоғары тиімділігі мен өнімділігі бар екенін көрсетті.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы жел энергиясы генераторының жаңа дизайнын әзірлеуде, нақты модельдеу үшін екі жақты СҚДБ қолдануда, аэродинамикалық құбырда эксперименттік зерттеулер жүргізуде және магнитострикциялық генератордың концептуалды дизайнын жасауда жатыр.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время безлопастные турбины становятся все актуальнее. Цель данной научной работы заключается в проведении анализа установки малой безлопастной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией. В работе разработана новая конструкция БВТ, включающая генераторы вихрей для повышения аэродинамических характеристик и эффективности энергосъема.

Методология исследования включает численное моделирование и экспериментальные исследования, использующие двустороннюю жидкостно-твердотельную связь (ЖТС) для моделирования взаимодействия потока воздуха с конструкцией турбины. Результаты численных моделирований и экспериментов показали, что предлагаемая конструкция имеет высокую эффективность и производительность.

Научная новизна работы заключается в разработке новой конструкции безлопастной ветряной турбины, использовании двусторонней ЖТС для точного моделирования, проведении экспериментальных исследований в аэродинамической трубе и создании концептуального дизайна магнитострикционного генератора мощности.

ABSTRACT

In the context of growing energy demand, renewable energy sources such as bladeless wind turbines (BWT) are becoming increasingly relevant. The aim of this scientific work is to analyze the installation of a small bladeless wind turbine to supply electricity to a home. A new design of the BWT has been developed, incorporating vortex generators to improve aerodynamic characteristics and energy capture efficiency.

The research methodology includes numerical modeling and experimental studies using two-way fluid-structure interaction (FSI) to model the interaction of the airflow with the turbine structure. The results of the numerical simulations and experiments showed that the proposed design has high efficiency and performance.

The scientific novelty of the work lies in the development of a new design for the bladeless wind turbine, the use of two-way FSI for precise modeling, conducting experimental studies in a wind tunnel, and creating a conceptual design for a magnetostrictive power generator.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Современные технологии безлопастных ветряных турбин	10
2 Конструкция, моделирование и экспериментальные методы	15
2.1 Конструкция и компоненты безлопастных вихревых ветряных турбин	15
2.2 Выбор и проектирование пружинной системы	17
2.3 Модель симуляции	19
2.4 Экспериментальные методы	25
3 Результаты и обсуждение	29
3.1 Результаты двухстороннего ЖТС для модели 1	29
3.2 Результаты двухстороннего ЖТС для модели 2	35
3.3 Расчет мощности	40
3.4 Экспериментальные результаты	43
3.5 Системы накопления энергии	46
3.6 Концептуальный дизайн генератора мощности	49
3.7 Бизнес-модель и коммерциализация	51
Заключение	53
Список использованной литературы	54
Приложение А	57
Приложение Б	58
Приложение В	59

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Возобновляемые источники энергии становятся всё более важными в современном мире из-за растущего спроса на энергию и необходимости уменьшить зависимость от ископаемых топлив. Безлопастные ветряные турбины (БВТ) представляют собой одну из перспективных технологий, обеспечивающих экологически чистую и стабильную энергию. Эта технология особенно актуальна для использования в частных домах и городских условиях благодаря своей бесшумности, компактности и меньшим эксплуатационным затратам.

Цель работы. Цель данной работы заключается в проведении анализа установки малой безлопастной ветряной турбины для обеспечения дома электроэнергией. Это включает в себя проектирование, моделирование и экспериментальную оценку эффективности данной технологии, а также разработку бизнес-модели для её коммерциализации.

Основные задачи

- 1) Провести обзор существующих технологий безлопастных ветряных турбин и определить их преимущества и недостатки.
- 2) Разработать конструкцию малой безлопастной ветряной турбины, включая выбор и проектирование пружинной системы.
- 3) Выполнить численное моделирование и экспериментальные исследования для оценки эффективности предлагаемой конструкции.
- 4) Исследовать различные системы накопления энергии и определить наиболее подходящую для использования с БВТ.
- 5) Разработать концептуальный дизайн генератора мощности, интегрированного с БВТ.
- 6) Разработать бизнес-модель для коммерциализации технологии БВТ.

Научная новизна работы

- 1) Разработка новой конструкции безлопастной ветряной турбины с использованием генераторов вихрей для улучшения аэродинамических характеристик и повышения эффективности энергосъема.
- 2) Применение двусторонней жидкостно-твердотельной связи (ЖТС) для более точного моделирования взаимодействия потока воздуха с конструкцией турбины.
- 3) Проведение экспериментальных исследований в аэродинамической трубе для верификации численных результатов и оценки реальной производительности БВТ.
- 4) Разработка концептуального дизайна магнестрикционного генератора мощности для повышения эффективности преобразования механической энергии в электрическую.
- 5) Анализ различных систем накопления энергии и их интеграция с БВТ для обеспечения стабильного электроснабжения.

Практическая значимость полученных результатов

- 1) Повышение энергоэффективности и экологичности частных домов: Разработка и внедрение малых безлопастных ветряных турбин (БВТ) позволяет

обеспечить экологически чистую и стабильную энергию для частных домов. Это способствует уменьшению зависимости от ископаемых топлив и снижению выбросов углекислого газа, что особенно важно в условиях глобального изменения климата.

2) Снижение затрат на электроэнергию: Использование БВТ в домах может значительно снизить затраты на электроэнергию для домовладельцев, предоставляя возможность генерации собственной электроэнергии. Это делает дома более энергонезависимыми и устойчивыми к изменениям цен на электроэнергию.

3) Инновационные решения в энергетике: Разработка новой конструкции БВТ с использованием генераторов вихрей и внедрение двусторонней жидкостно-твердотельной связи (ЖТС) для моделирования взаимодействия потока воздуха с конструкцией турбины представляют собой значительный шаг вперед в области возобновляемых источников энергии. Это способствует развитию и внедрению передовых технологий в энергетическом секторе.

4) Развитие и поддержка малых и средних предприятий: Внедрение и коммерциализация технологии БВТ открывает возможности для создания новых рабочих мест и поддержки малых и средних предприятий, занимающихся производством, установкой и обслуживанием ветряных турбин.

5) Улучшение качества жизни в городских условиях: Бесшумность и компактность БВТ делают их идеальными для использования в городских условиях, где традиционные ветряные турбины могут быть неприменимы из-за шума и больших размеров. Это способствует улучшению качества жизни горожан и развитию устойчивой городской инфраструктуры.

6) Образование и научные исследования: Полученные результаты могут быть использованы в образовательных целях для подготовки специалистов в области возобновляемых источников энергии и энергосбережения. Это способствует развитию научных исследований и инноваций в данной области.

7) Интеграция с другими возобновляемыми источниками энергии: Исследование различных систем накопления энергии и определение оптимальной системы для интеграции с БВТ позволяет создавать комплексные решения для стабильного электроснабжения, сочетая ветряные турбины с другими источниками возобновляемой энергии, такими как солнечные панели.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре «Энергетики» в Satbayev University.

Публикации

В период исследования по теме данной магистерской диссертации:

- опубликована статья в Научно-практическом журнале «Journal of Energy, Mechanical Engineering and Transport» №1 (1) 2023, на тему «Analysis of characteristics of bladeless turbines in Kazakhstan» (смотри приложение А)
- опубликована статья в Научно-практическом журнале «Вестник КазАТК» 128(5) 2023, на тему «Аэродинамические характеристики безлопастного ветряка vortex» (смотри приложение Б)

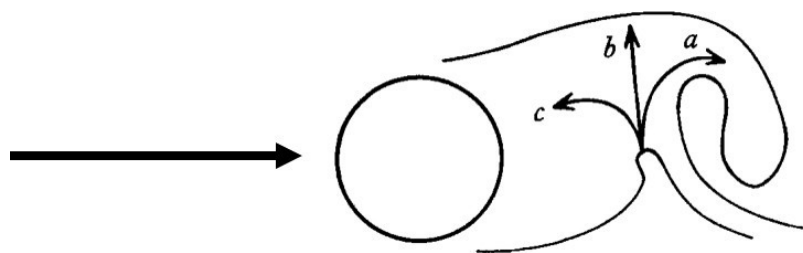
- опубликована статья в Научно-практическом журнале «International Satbayev Conference» 3(54-63) 2023, на тему «Анализ безлопастных ветряных турбин Vortex Wind» (смотри приложение В)

1 Современные технологии безопасных ветряных турбин

Растущий спрос на возобновляемые источники энергии вдохновил исследователей и инженеров на изучение новейших технологий для достижения высокоэффективных применений возобновляемой энергии. Энергия ветра является одним из наиболее распространенных возобновляемых источников энергии, используемых в промышленности. Это возобновляемый и устойчивый источник энергии, который на протяжении многих лет использовался с помощью множества технологий и устройств. Наиболее распространенными методами сбора энергии ветра являются вращательный и колебательный сбор энергии ветра. Вращательный сбор ветра включает в себя традиционные лопасти с большим размахом, которые вращаются и генерируют электроэнергию при различных скоростях ветра, такие как традиционные ветряные турбины с горизонтальной осью и ветряные турбины с вертикальной осью, чтобы оптимизировать их и понять их работу в различных условиях, но факт остается фактом: для работы этих двух конфигураций требуется достаточная скорость ветра. В новом методе небольшой порыв ветра, обтекающий тело, нарушается телом, создавая турбулентность вниз по течению. Таким образом, тело начинает испускать вихри, которые вызывают неравномерное распределение давления, что заставляет тело колебаться или вибрировать из-за изменения аэродинамических сил [1]. В конце концов, когда собственная частота тела совпадет с частотой образования вихрей, тело начнет резонировать. Это усилит его движение, т.е. вибрацию. Это явление называется резонансом, который лежит в основе принципа работы безопасных ветряных турбин Vortex (БВТВ). Эта технология была предметом исследований и разработок во всем мире. Тем не менее, для будущего развития по-прежнему важно понимать основные механизмы и принципы, которые управляют ее движением. Основным принципом работы БВТВ являются явления вихревой вибрации [2]. Кроме того, технология БВТВ выделяется как революционный подход к энергии ветра, где она использует вибрации, создаваемые колебаниями системы, для преобразования энергии ветра в полезную энергию. Как описано ранее, колебания турбины возникают из-за явления образования вихрей. Однако, когда частота потери выравнивается с собственной частотой БВТВ, наблюдается явление, известное как область синхронизации. В этой области система колеблется синхронно с частотой сброса системы. Таким образом, возникновение этого явления расширяет вибрационную полосу БВТВ. Можно с уверенностью предположить, что в зоне блокировки из турбины можно извлечь максимальную энергию. Однако также важно понимать влияние и теорию, лежащую в основе основного явления, способствующего технологии БВТВ, а именно вибрации, вызванной вихрями (ВВВ) и образования вихрей [3].

Вибрация, вызванная вихрем (ВВВ), наблюдается, когда обтекаемое тело вызывает вибрации или колебательное движение из-за образования вихрей. При анализе влияния этого явления следует учитывать два важнейших фактора: частоту образования вихрей (f_s) и образование вихревого следа. Принцип образования следа за обтекаемым телом впервые был предложен Карманом [4].

В его исследованиях было замечено, что идеальное расположение бесконечного двойного ряда вихрей при невязком течении стабильно для любого диапазона перемещений. Аналогичным образом, Берман и др. [5] характеризуют обтекаемое тело как тело, создающее отрывное течение на значительной площади своей поверхности внутри потока жидкости. Кроме того, механику образования вихрей и вихревых областей описал Джеррард [6]. В его модели взаимное взаимодействие между слоями сдвига является критическим фактором в стимулировании и образовании вихревой улицы. Он постулировал три условия, при которых частицы в противоположном сдвиговом слое притягиваются к области следа. Это наблюдается на рисунке 1.



- (a) Частицы могут быть введены в растущую область и уменьшить свою силу.
- (b) Они могут войти в слой сдвига и иметь завихренность с положительным и отрицательным знаком.
- (c) Они могут быть повторно введены в ближнюю область следа

Рисунок 1 - Условия, при которых частицы жидкости втягиваются в область следа.

Несколько факторов влияют на поток воздуха вокруг цилиндрического тела. Эти факторы включают шероховатость поверхности (ϵ), возмущение потока, число Рейнольдса (Re) и геометрию тела в целом. Геометрия тела существенно влияет на отрыв потока при различных углах тела. Например, чем более обтекаемое тело, тем большее сопротивление оно будет вызывать, и, следовательно, будет наблюдаться более низкая частота образования вихрей. В анализе обтекаемых тел Су и др. [7] сообщили о галопирующих вибрациях на асимметричных поперечных сечениях. Более того, исследования подчеркнули значимость этого явления в сочетании с вибрациями, вызванными вихрями (ВВВ), для создания больших колебаний [8]. Также была установлена важная связь между шириной следа и частотой образования вихрей, известная как универсальное число Струхала (St), которое имеет значение 0,2. Однако математическое соотношение, определяющее его, можно записать как:

$$S_t = \frac{f_s D}{U} \quad (1)$$

где f_s , D и U - частота срыва вихрей, диаметр тела и скорость на входе соответственно; таким образом, из соотношения в уравнении (1) важно подчеркнуть концепцию срыва вихрей. Как обсуждалось ранее, срыв вихрей имеет значительное значение в области механики жидкости. Это наблюдается

при обтекании потоком обтекаемого или цилиндрического тела, вызывая колебания потока по обе стороны тела и сброс чередующихся вихрей. Этот срыв наблюдается в виде рисунка, известного как «Вихревая улица фон Кармана». Кроме того, картина вихрей в потоке зависит от числа Рейнольдса. Чистая картина улицы Кармана наблюдается при числах Re в диапазоне от 80 до 300 [9]. Поэтому в этом исследовании мы рассмотрим влияние геометрии на характер картины потока, учитывая зависимость числа Рейнольдса от диаметра D цилиндрического тела. Однако другие характеристики турбулентности все еще можно исследовать, чтобы понять обтекание гибкой цилиндрической или полуцилиндрической структуры, такие как неравномерность, диффузионная способность и рациональность потока, что ранее исследовалось Доллом и др. [10], чтобы понять перемешивание жидкостей вокруг гибких цилиндрических конструкций.

Внедрение этих концепций важно при проектировании безлопастных ветряных турбин (БВТ), особенно конструкций цилиндрической формы. Как сообщили Халак и Уильямсон [11], снижение скорости существенно влияет на динамический отклик гибкого цилиндра. Кроме того, изменение числа Рейнольдса оказывает значительное влияние на максимальную амплитуду жесткого цилиндра из-за изменений, которые оно диктует режиму потока, окружающему тело. По мере увеличения числа Re поток переходит от ламинарного к турбулентному, как это описано в классической механике жидкости. Таким образом, это вызывает более широкий спектр частот срыва вихрей, что вызывает более сильное взаимодействие с собственной частотой цилиндра, в конечном итоге увеличивая амплитуду вибраций тела. На рисунке 2 показан один из многих дизайнов систем безлопастных ветряных турбин, где большинство выбирают цилиндрическую форму, поддерживаемую механизмом с гибким стержнем. Этот подход к проектированию в последнее время рассматривается как полустандартный способ проектирования БВТ; однако улучшения в работе БВТ можно внести не только путем изучения изменений в конструкции, но и путем внедрения или добавления структур или механизмов на поверхность БВТ для улучшения аэродинамики, что повышает потенциал выработки энергии системой.

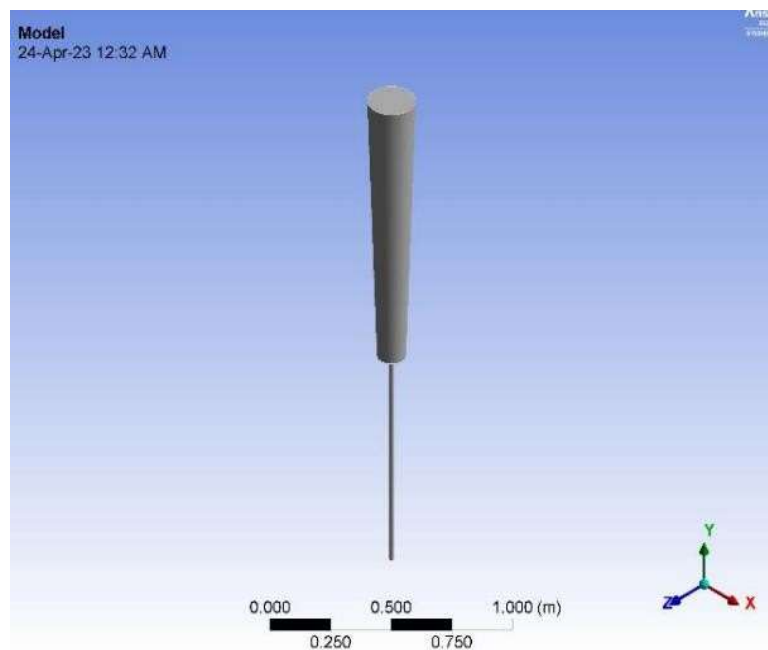


Рисунок 2 - Существующий дизайн и работа над системой безлопастной ветряной турбины, выполненные [12]

Размер создаваемого следа за телом важен в приложениях вихревой безлопастной ветряной турбины (БВВТ). Это связано с тем, что для выработки значительного количества энергии с помощью БВВТ требуется несколько систем БВВТ, расположенных в виде массива с рассчитанным расстоянием, чтобы след одной системы не мешал восходящему потоку других систем. Расположение нескольких цилиндров и расстояние между центрами являются ключевыми факторами при проектировании нескольких колебательно-цилиндрических систем, как описано в [13].

В последнее время отрасль БВВТ начала испытывать значительный рост как в исследованиях, так и в разработках. Однако в этой области еще предстоит решить множество проблем. Гохате и др. [14] выделили концепцию вибрации, вызванной вихрями (ВВВ), как метод сбора энергии ветра, в котором можно наблюдать детальное описание всех связанных с ним физических концепций. Кроме того, различные концепции, связанные с технологией БВВТ, были объяснены в [15], проливая свет на несколько типов резьбы, прикрепляемой к моделям мачт. Агазде и др. [16] подчеркнули коэффициент конусности конических цилиндрических мачт, который может максимизировать наведенную завихренность в системах БВВТ. Также, Сэми и др. [17] выполнили полное проектное исследование по использованию вихревых генераторов для усиления эффектов ВВВ в БВВТ. Более того, Эльсаед и Фаргалы [18] представили теоретический и численный анализ и проектирование БВВТ, в котором они рассчитали силы, влияющие на производительность турбины, и пришли к выводу, что результаты, полученные с помощью их численного подхода, могут быть использованы для практического проектирования БВВТ при низких скоростях ветра. Кроме того, было проведено множество исследований по оптимизации конструкции БВВТ. Простой дизайн был представлен Акайдином и др. [19]. В их конструкции модель представляла

собой цилиндр высотой 0,203 м и диаметром 0,0198 м. Эта простая модель могла генерировать 0,1 мВт электрической мощности. С другой стороны, Сальватор и др. [20] проанализировали возможность использования маятников в форме дуги и диска для БВВТ, которые генерировали мощность около 1,5 Вт при скорости ветра 4,63 м/с. Аналогичным образом, более поздние исследования [21] подчеркнули преимущества контроля колебаний цилиндров для улучшения характеристик БВВТ при различных низких скоростях ветра. Фрэнсис и др. [22] представили сравнительный анализ смещения и частоты вибрации цилиндрических БВВТ с различными строительными материалами. Таким образом, можно наблюдать постоянные усилия по анализу и оптимизации производительности и общей выработки электроэнергии БВВТ.

В этом исследовании мы проводим тщательный анализ поведения потока в новой конструкции вихревой безлопастной ветряной турбины (БВВТ). В конструкции использованы генераторы вихрей особой формы, распределенные определенным образом по поверхности мачты. Кроме того, анализ вычислительной гидродинамики (АВГ) использовался для изучения поведения потока жидкости вокруг структуры БВВТ, а переходный структурный анализ был проведен с помощью двусторонней жидкостно-твердотельной связью (ЖТС) для наблюдения за образованием вихрей и индуцированной вибрацией предлагаемой конструкции БВВТ; здесь обе реализованные модели (АВГ и ЖТС) используются вместе, чтобы понять силу структур следа и циркуляцию жидкости, что было исследовано в предыдущем исследовании Дола и Чана [23]. Кроме того, были проанализированы две разные конфигурации моделей БВВТ при одинаковых условиях потока, чтобы выявить оптимальные конструкции. Также были проанализированы структура потока жидкости, завихренность и характеристики следа, а также анализ скорости и смещения. Предлагаемые структуры обсуждаются далее в главе 2.

2 Конструкция, моделирование и экспериментальные методы

Проектирование точного исследования с использованием анализа вычислительной гидродинамики (АВГ) требует следования соответствующим процедурам и стратегиям моделирования. В этом разделе представлено всестороннее изложение аналитических техник и подходов, используемых в этом исследовании. Методология моделирования включает в себя АВГ и переходный структурный анализ, которые связаны и осуществляются через двустороннюю жидкостно–твердотельную связь (ЖТС). Этот подход используется для обеспечения точного представления взаимодействий между потоком воздуха и вихревой безлопастной ветряной турбиной (БВВТ). Этот раздел в основном состоит из трех отдельных фаз исследования моделирования, а именно АВГ, переходного структурного исследования и анализа ЖТС. В этих фазах мы подробно обсуждаем использованные настройки, граничные условия и уравнения, управляющие каждой фазой.

2.1 Конструкция и компоненты безлопастных вихревых ветряных турбин

Типичная безлопастная вихревая ветряная турбина (БВВТ) состоит из около шести основных компонентов, что делает ее полноценной системой выработки энергии. Для увеличения жесткости предлагаемой БВВТ предлагается линейно сужающаяся мачта. Это делается для создания неравномерного распределения массы вдоль продольной оси БВВТ. Причина, по которой мы сосредоточились на увеличении жесткости мачты, заключается в том, что мачта с высокой жесткостью может производить более высокие собственные частоты, как предложено в [24]. В литературе можно наблюдать различные типы сужающихся мачт. Однако наш предлагаемый дизайн соответствует перевернутой версии моделей, исследованных в [24].

Наша модель использует перевернутую версию моделей, изученных в [24], с большим диаметром в верхней части и меньшим диаметром в нижней части мачты. Это делается для того, чтобы обеспечить большую поверхность для воздействия потока воздуха, максимизируя срыв вихрей и увеличивая колебания, создаваемые мачтой. Эффект увеличенного срыва создает более мощную силу ЖТС между потоками ветра и БВВТ. Эти силы затем передаются вниз к нижней части мачты, где размещен механизм преобразования энергии. Кроме того, относительно меньший диаметр мачты внизу стабилизирует турбину и эффективно фокусирует передачу нагрузки. В конечном итоге эффективная передача нагрузки внутри мачты может усилить эффект резонанса вдоль мачты. Предлагаемые конструкции иллюстрированы на рисунке 3.

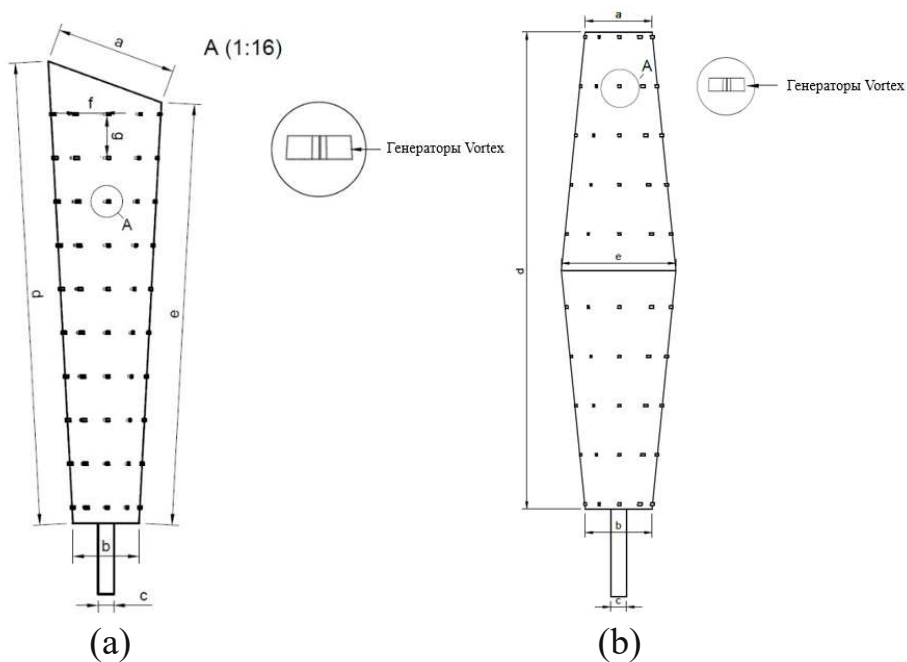


Рисунок 3 - Предлагаемые конструкции БВВТ с генераторами вихрей для данного исследования: (а) - Модель 1, (б) - Модель 2

Второй особенностью предлагаемой модели является детальная проекция генераторов вихрей (ГВ), как это показано на обеих моделях на рисунке 3. Эти ГВ размещены с определенным интервалом вдоль поверхности мачты и распределены так, чтобы охватить всю мачту. Эти ГВ внедрены для усиления эффекта срыва вихрей и формирования завихренности вокруг вихревой безлопастной ветряной турбины (БВВТ). Наконеч, основание выполнено в виде квадратной структуры для обеспечения стабильности и поддержки нижней части мачты. Типичная система БВВТ состоит из всех компонентов, показанных на рисунке 4, взятом из [25].

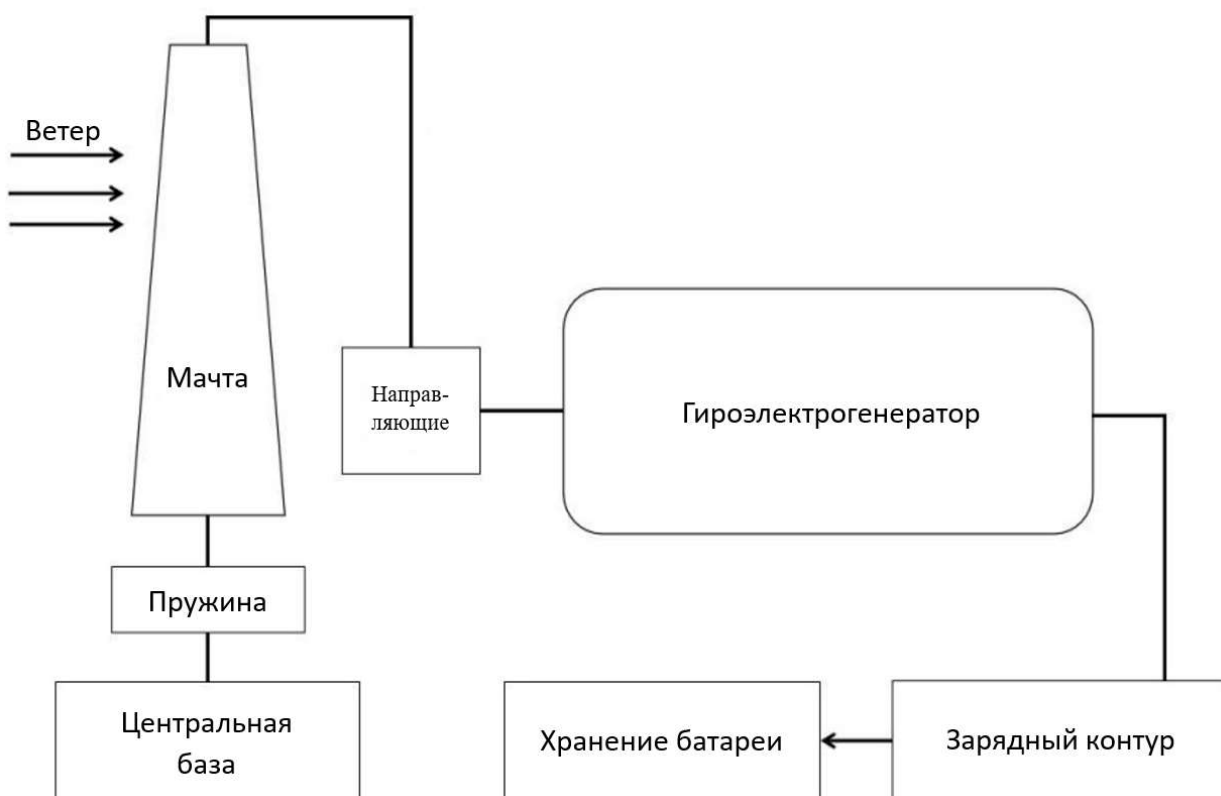


Рисунок 4 - Схема системы сбора энергии ветра с помощью БВВТ

2.2 Выбор и проектирование пружинной системы

Пружины часто изготавливаются для уменьшения или демпфирования вибраций. Однако в безлопастных ветряных турбинах цель состоит в том, чтобы усилить вибрации, а не уменьшать их. При проектировании идеальной пружины для безлопастной ветряной турбины необходимо тщательно учитывать желаемое отклонение, приложенную нагрузку, материал пружины, жесткость и конфигурацию пружинной системы. Среди различных доступных пружинных компоновок, включая параллельную компоновку пружин, торсионную пружинную конструкцию и консольную компоновку, система масса-пружина и консольная компоновка выделяются как практичные возможности. Поскольку в них мало движущихся частей, эти компоновки используются из-за их простоты и надежности. Это способствует большей долговечности и меньшему объему технического обслуживания. Кроме того, благодаря своей адаптируемости, система масса-пружина и консольная компоновка могут быть изменены для удовлетворения различных рабочих условий и требований к производительности. Эти пружинные конфигурации можно спроектировать для каждой установки, будь то меньшая бытовая безлопастная ветряная турбина или большая коммерческая, чтобы обеспечить оптимальную производительность. Одним из преимуществ системы масса-пружина и консольной компоновки является их способность регулировать частоты вибрации. Определенную частоту можно согласовать, изменяя

жесткость пружины. Для максимизации процесса преобразования энергии и оптимизации выработки энергии турбины необходимо контролировать частоты вибрации. Расположение пружины можно осуществить таким образом, чтобы усилить деформацию на максимально длительное время и уменьшить угол деформации для увеличения производимой мощности. Следующие уравнения управляют принципами проектирования и выбора конкретной пружинной системы для БВВТ. Уравнения основаны на формулах, предложенных Бахадуром [26] и Теином и др. [27]. В любой пружинной системе первым понятием является закон Гука, который позволяет определить силу, необходимую для растяжения или сжатия пружины, или, зная другие переменные, определить жесткость пружины.

$$F = Kx \quad (2)$$

где F – сила;

K - жесткость пружины;

x - удлинение или сжатие пружины.

Кроме того, учитывая, что принцип работы пружины основан на пружинно-массовой системе, нам необходимо определить собственную частоту этой системы (f_n):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

где m - масса мачты;

Кроме того, поскольку предлагаемую геометрию можно описать как консольную, учитывая, что нижний конец фиксирован, а верхняя часть мачты свободна, отклонение консольной балки можно описать следующим образом:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (4)$$

где F - приложенная сила;

L – длина;

E – модуль упругости

I - момент инерции поперечного сечения балки.

Учитывая, что материал мачты, используемый в симуляции, — алюминий 2700, с весом 18 кг, мы можем начать оценивать общую силу, действующую на каждую пружину, следующим образом:

$$F_{total} = F_{gravity} + F_{wind} \quad (5)$$

где $F_{gravity} = 176,58$ Н;

$F_{wind} = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 = 100,8$ Н;

где C_d - коэффициент сопротивления, полученный с помощью АВГ симуляций;

A - площадь поверхности мачты;

ρ - плотность воздуха при комнатной температуре ($1,2 \text{ кг/м}^3$);

v - скорость ветра (в данном случае 10 м/с).

Таким образом, общая приложенная сила составляет 277.38 Н . Кроме того, из уравнения (4) отклонение мачты $\delta = 0.3 \text{ м}$, и мы можем определить жесткость каждой пружины следующим образом:

$$K = \frac{F_{total}}{\delta} \quad (6)$$

Приблизительно, $K = 925 \text{ Н/м}$ для каждой пружины, как показано на рисунке 5.

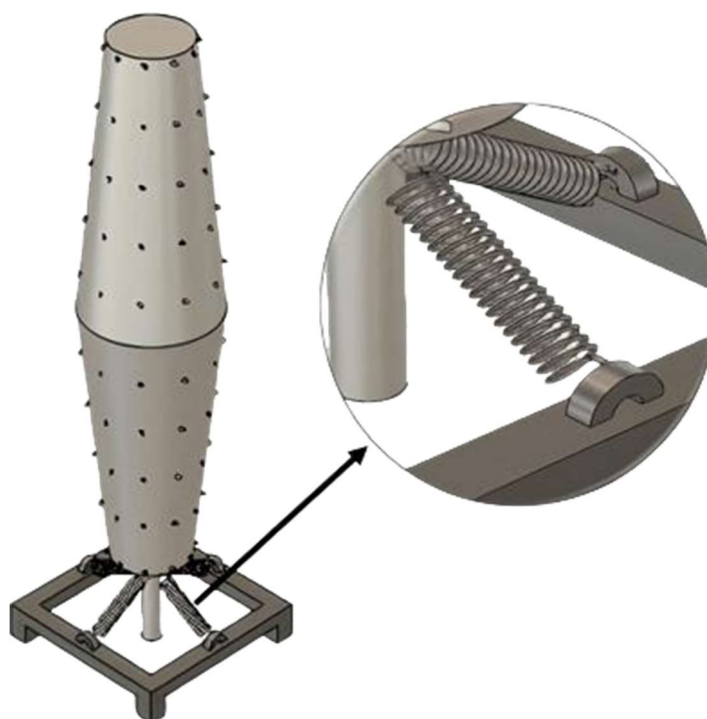


Рисунок 5 - Схема системы БВВТ с основанием и пружинной конструкцией. Данная система используется для обеих моделей

2.3 Модель симуляции

Численное моделирование является одним из инструментов, используемых для понимания поведения структуры и аэродинамики вокруг нее. Чтобы иметь возможность смоделировать случай, была использована двусторонняя жидкостно-твердотельная связь (ЖТС), чтобы обеспечить передачу решения и данных между двумя моделями. Для выполнения АВГ и получения приближенного поведения использовалось приложение Ansys Workbench. Использование ЖТС требует дискретизации твердого домена от жидкого домена. Переходный структурный и флюидный модули - это два

модуля, используемые для моделирования случая. Было смоделировано два разных случая, чтобы увидеть, как модификация влияет на срыв вихрей и поведение потока. Две разные конструкции мачт были сгенерированы с помощью Fusion 360, как показано на рисунке 6. Каждая геометрия была смоделирована полый, с толщиной 1 мм, поскольку исследование зависит от массы структуры. В таблице 1 приведены размеры предлагаемых конструкций.



Рисунок 6 - Схема конфигурации системы БВВТ, использованной в моделировании

Таблица 1 - Размеры различных секций в предлагаемых моделях БВВТ в мм

Часть	Модель 1, мм	Модель 2, мм
a	760	420
b	420	420
c	100	100
d	3000	3000
e	2670	720
f	160	135
g	260	290

2.3.1 Настройка АВГ моделирования и уравнения управления

Проектирование и анализ системы БВВТ в значительной степени зависят от настройки АВГ-моделирования, так как это позволяет предсказать и понять поведение потока воздуха вокруг БВВТ и установить понимание срыва вихрей, происходящего из-за тела. В этом исследовании мы использовали ANSYS Fluent для моделирования воздушного потока вокруг БВВТ. Уравнениями

управления модели были уравнения Навье-Стокса (Н-С) для сжимаемой жидкости. Эти уравнения являются переходными, связаны и нелинейны, поскольку выражают корреляцию между скоростью, плотностью и давлением системы [28].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (8)$$

где ρ - плотность воздуха;

u - компоненты скорости.

σ_{ij} - это тензор вязкого напряжения, определяемый следующим образом:

$$\sigma_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (9)$$

Назначение граничных условий для любой задачи метода конечных элементов является критическим шагом, который может определить функциональность и надежность полученных результатов. Таким образом, для этого исследования в АВГ БВВТ были введены следующие граничные условия, а также схема сетки для модели. В этом модуле твердое тело подавляется, и используется только жидкое тело. Граничные условия, примененные к модели, включали входной поток с скоростью 10 м/с и выход, а остальные были выбраны как стены. Верхняя и боковая части были выбраны как имеющие скользящее условие. На рисунке 7 показаны граничные условия.

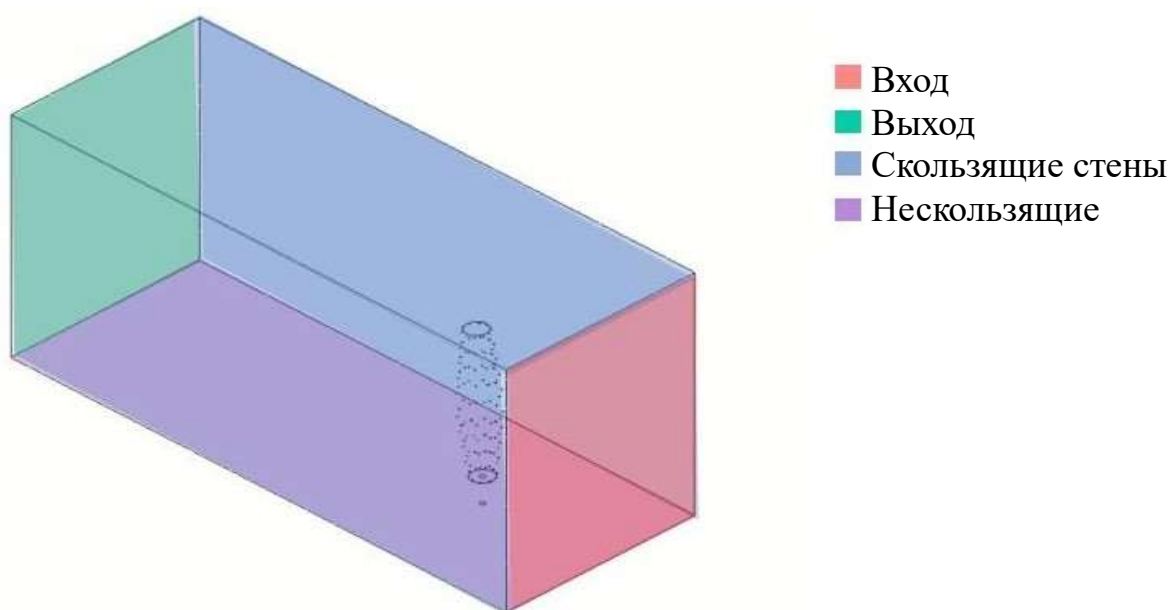


Рисунок 7 - Граничные условия модели Fluent Simulation

Следующим шагом является создание сетки для жидкостного домена. Значение $y^+ \approx 1$ поддерживалось для лучшего захвата поведения рядом со структурой. Более плотные элементы были применены к генераторам вихрей и за структурой, чтобы захватить поток вокруг них и поведение в области следа. Было определено в общей сложности 1 500 000 элементов. Детальный вид созданной сетки показан на рисунке 8.

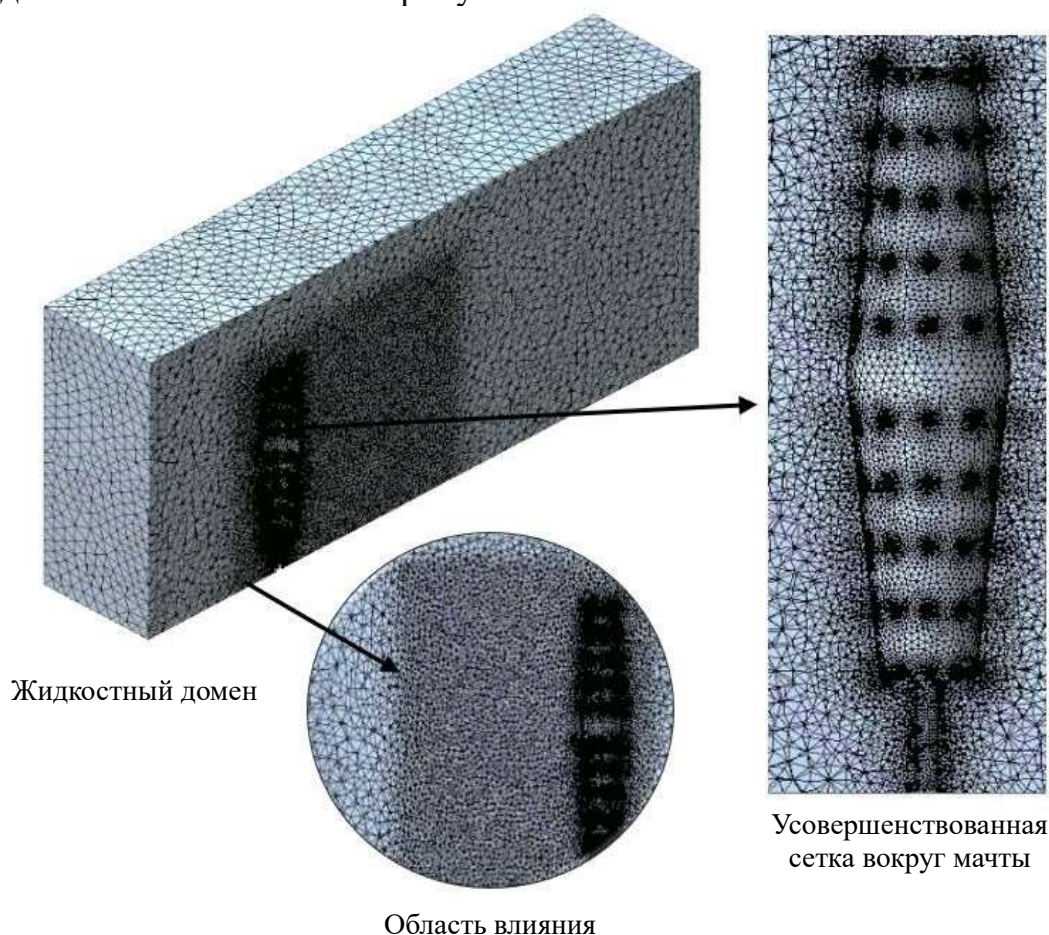


Рисунок 8 - Детальный вид схемы сетки, созданной для исследования АВГ

Чтобы захватить явления за структурой, количество элементов должно быть более плотным; таким образом, была использована область влияния для увеличения числа элементов в этой конкретной области. Эффект гравитации был применен к мачте в переходном состоянии. Использовалась модель $k-\omega$ SST, так как она сочетает в себе как модели $k-\omega$, так и $k-\varepsilon$, что означает, что она позволяет захватывать эффекты как рядом с поверхностью, так и вдали от нее. Уравнения управления для модели $k-\omega$ SST получены из формулировки Ментера [29].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (10)$$

$$\rho(V \cdot \nabla V) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + S \quad (11)$$

$$(\nabla \cdot \rho V) = 0 \quad (12)$$

Вкратце, следующие параметры были использованы в расчетной процедуре и приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Обзор параметров, использованных в настройке моделирования

Параметр	Значение
Размер шага времени (с)	7.5×10^{-4}
Количество шагов	6667
Элементы сетки	1,500,000
Продолжительность сохранения	Каждые 15 шагов времени
Время потока (с)	5

2.3.2 Переходное структурное моделирование

В этом модуле жидкостное тело подавляется, и используется только твердое тело. В качестве материала структуры был выбран алюминий с массой 18 кг. Переходный структурный анализ использует решатель ANSYS APDL, который определяется как неявный решатель, в отличие от решателя жесткой динамики, который моделируется как явный решатель. Кроме того, уравнение управления для переходного структурного исследования принимает входные нагрузки как функцию времени и учитывает инерционные эффекты, в отличие от статических исследований.

$$[M]\{X''\}(t) + [C]\{X'\}(t) + [K]\{X\}(t) = \{f\}(t) \quad (13)$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ - это матрицы массы, демпфирования и жесткости системы соответственно, которые получены с использованием метода Галеркина:

$$[M] = \int_V \rho N^T N dV \quad (14)$$

$$[K] = \int_V B^T DB dV \quad (15)$$

$$[C] = \int_V \mu N^T N dV \quad (16)$$

Следующим шагом является создание сетки для структуры, что означает дискретизацию модели на мелкие элементы, чтобы решатель мог применить граничные условия и получить решение на ячейках. Всего было определено 150 000 элементов, как показано на рисунке 9. Фиксированная опора была применена к нижней грани структуры, и все грани, исключая внутренние грани и нижнюю грань, были выбраны для интерфейса жидкость–твердое тело. Это позволяет передавать деформацию, движение или любой параметр жидкости.

Решение было настроено на выполнение в течение 5 секунд, а размер шага времени составил 0,00075 секунд.

Кроме того, были определены следующие граничные условия для структуры: фиксированная опора была задана в нижней части мачты, а ЖТС граничные условия были определены на поверхностях мачты, как показано на рисунке 10.

Наконец, взаимодействие между обоими исследованиями было смоделировано через связь двухсторонних ЖТС моделирований, как показано на рисунке 11.

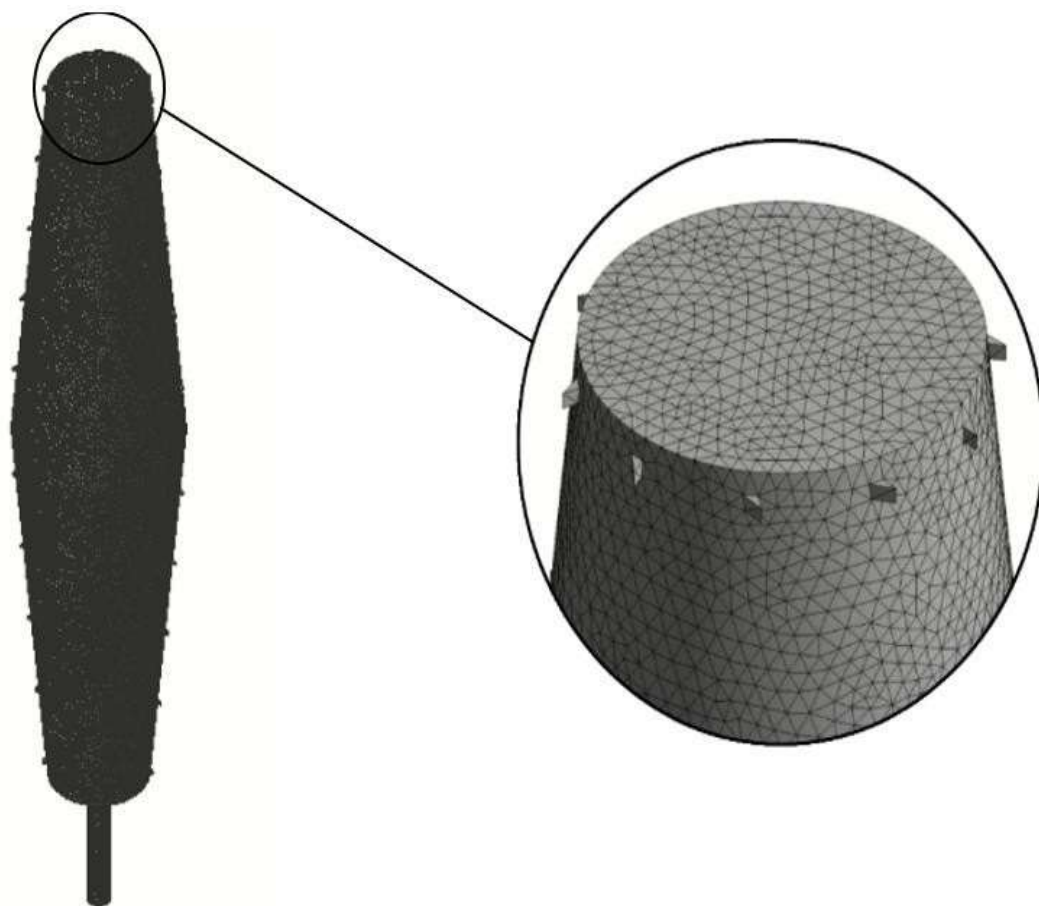


Рисунок 9 - Детальный вид схемы сетки, созданной для исследования переходного структурного состояния

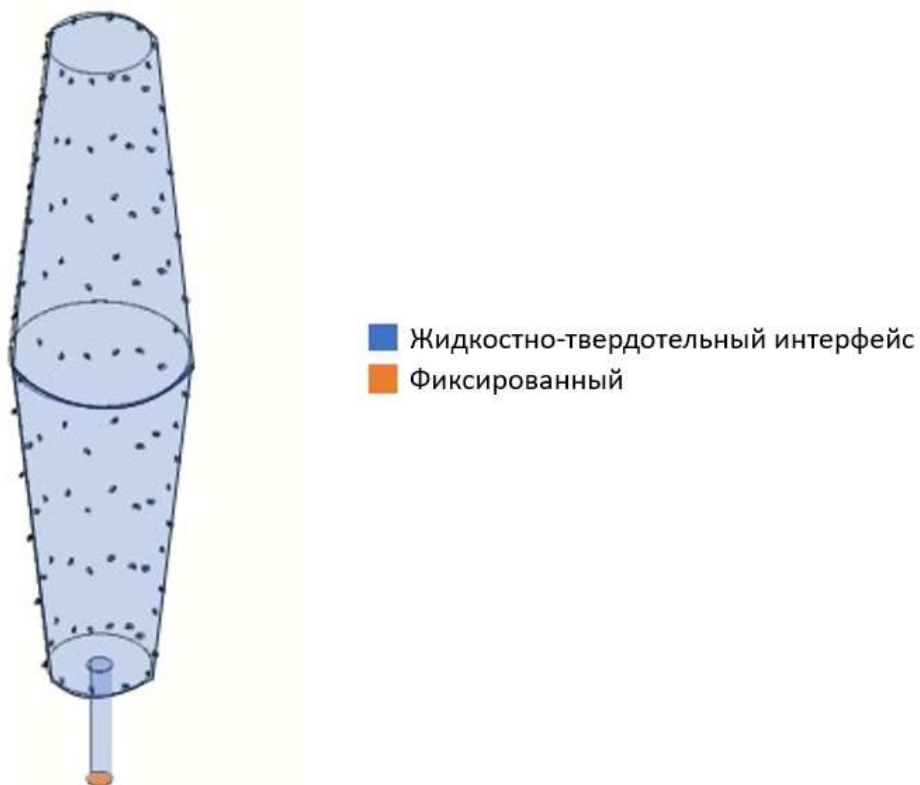


Рисунок 10 - Предельные условия для исследования переходного структурного состояния

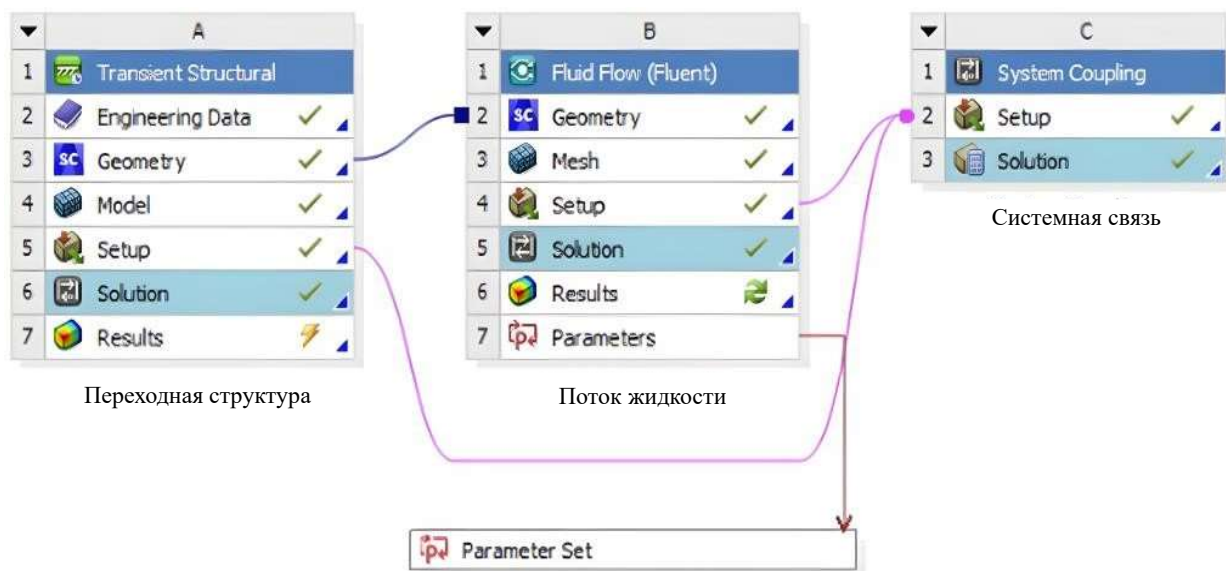


Рисунок 11 - Финальная система моделирования для двухсторонней жидкостно-твердотельной связи (ЖТС)

2.4 Экспериментальные методы

Экспериментальные работы необходимы для дальнейшего понимания численно полученных результатов и их проверки, где это необходимо. На рисунке 12 показан план и схема экспериментальной установки, определяющая процедуру, которой следует придерживаться при проведении экспериментальных работ на БВВТ, в рамках которых будет проведена серия испытаний в аэродинамической трубе для записи значений, связанных с потоком, и значений, связанных со структурой, с использованием набора инструментов и датчиков. На рисунке 13 показана фактическая установка для исследований в аэродинамической трубе, используемая в лаборатории машиностроения в Абу-Дабийском университете.

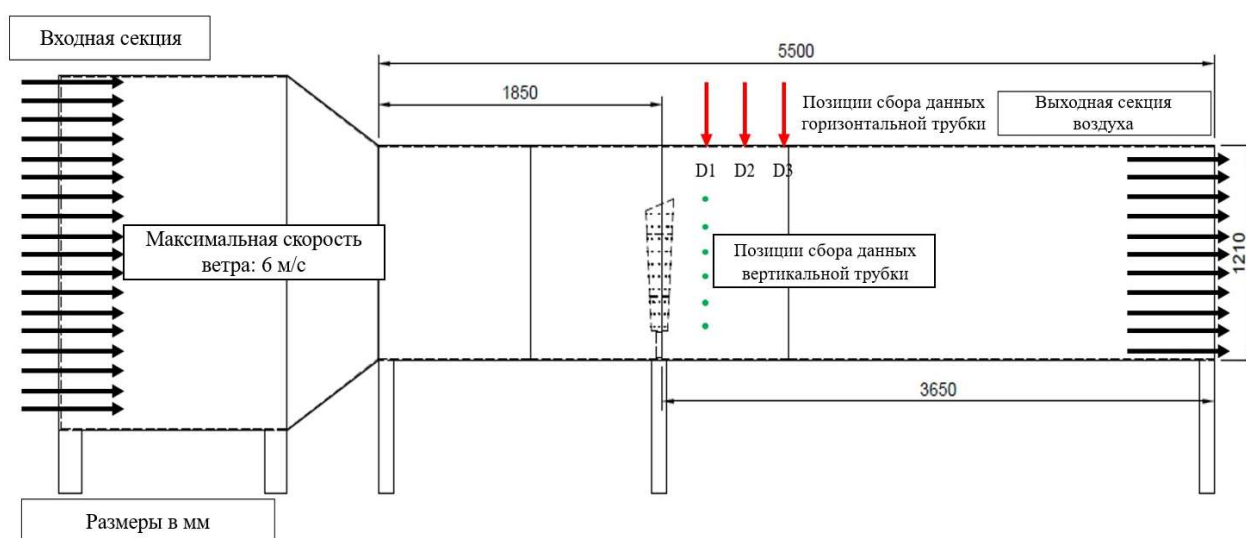


Рисунок 12 - Настройка эксперимента в аэродинамической трубе: размеры, габариты, точки размещения датчика потока и максимальная скорость потока воздуха



Рисунок 13 - Установка для испытаний в аэродинамической трубе, использованная для проведения экспериментального анализа

Для получения данных, необходимых для дальнейшего анализа, понимания и верификации численных данных, используется набор инструментов, включая измеритель скорости потока и ультразвуковой датчик движения, показанные на рисунке 14. Измеритель скорости потока (трубка Пито) — это цифровой датчик, используемый для измерения мгновенной и средней скорости ветра, обтекающего БВВТ, что дает представление о картине потока. С другой стороны, ультразвуковой датчик движения — это цифровой датчик, который фиксирует смещение, скорость и ускорение БВВТ за определенный период времени, что помогает зафиксировать амплитуды и скорости колебаний.



Рисунок 14 - Ультразвуковые датчики обнаружения движения и измерительные приборы используются для измерения смещения, скорости и ускорения БВВТ

3 Результаты и обсуждение

В этом разделе представлены результаты двух смоделированных систем безопасных ветряных турбин при времени потока 5 с. Основной целью этих запусков было получение информации о структуре турбины, схемах вибрации и связанных с ними явлениях потока, особенно в отношении ее движения. Результаты, которые мы получили, дают нам приближенную картину того, как турбина ведет себя в различных сценариях. В этом разделе представлены информационные графики и контуры, которые графически представляют эти результаты.

3.1 Результаты двухстороннего ЖТС для модели 1

Первый и основной случай, проанализированный в этом исследовании, это модель 1, показанная на рисунке 3. Для этого случая общее время потока составило 5 с, и нам удалось получить ценные сведения о колебательном поведении и схемах потока вокруг нее. Рисунок 15 ниже иллюстрирует контуры скорости для первой трети времени потока, наблюдаемые на 1,5 с.

На начальном этапе потока мы начинаем наблюдать характерный паттерн через иллюстрированные контуры скорости. Желтые пятна наблюдаются за областью следа мачты, что означает присутствие следовых вихрей за мачтой в результате взаимодействия потока ветра и мачты БВВТ. Малые вихри за мачтой иллюстрируют начало срыва вихрей. Для дальнейшего наблюдения направлений потока мы построили векторную поверхность над контуром, что дополнительно прояснило начало процесса срыва. Анализируя результаты при большем времени потока, т.е. 4,5 и 5 с, мы смогли увидеть схему срыва вихрей, которую можно охарактеризовать как переход в критический режим, где может наблюдаться область синхронизации, когда собственная частота мачты начинает совпадать с частотой срыва вихрей. Таким образом, можно наблюдать большие вихри, как это показано на контурах и векторных поверхностях на рисунке 16.

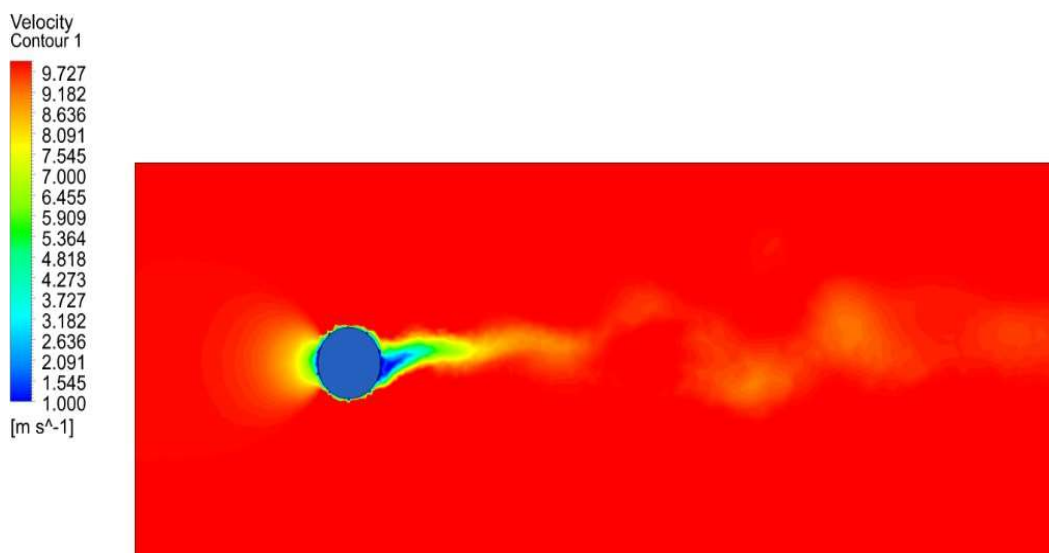


Рисунок 15 - Контуры скорости для модели 1 в течение первых 1,5 с времени потока, подчеркивающие рост вихрей ниже по течению жидкостного домена

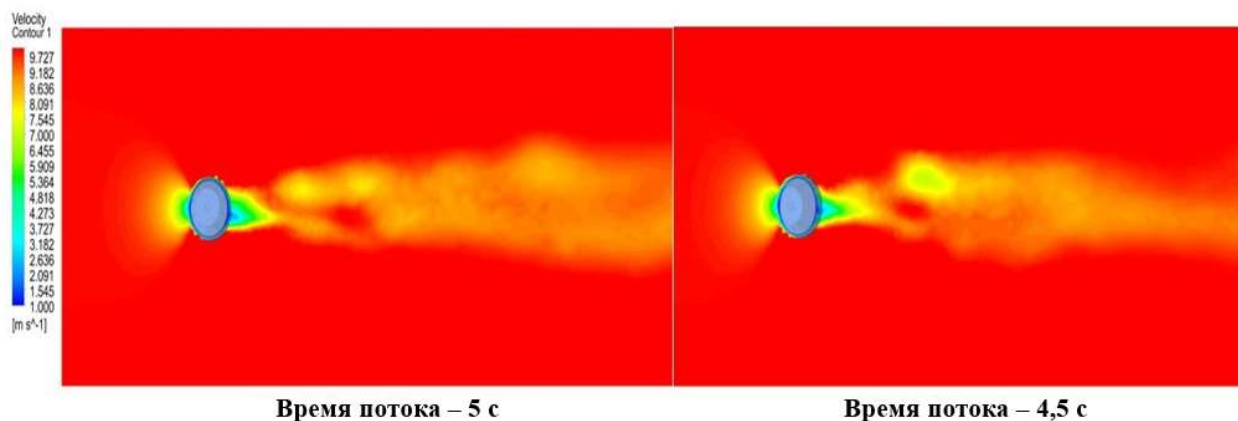


Рисунок 16 - Контуры скорости для модели 1 в течение первых 4,5 и 5 с времени потока, подчеркивающие область синхронизации ниже по течению жидкостного домена

Кроме того, построив трехмерные линии тока, мы смогли наблюдать вихревые паттерны за мачтой; однако они не показали очень высокой силы, и поэтому мы можем исследовать дальнейшие области для оптимизации структуры. С другой стороны, присутствие вихревых паттернов обозначает образование вихрей и срыв вихрей за мачтой, что является результатом, который нас интересует при проектировании БВВТ. При дальнейшем изучении поведения потока вокруг мачты мы сгенерировали объемный рендеринг с использованием критерия инварианта Q и силы завихренности скорости. Эти методы позволяют визуализировать и понимать детализированные характеристики вихрей в поточном поле, как это показано на объемном рендеринге на рисунке 17.

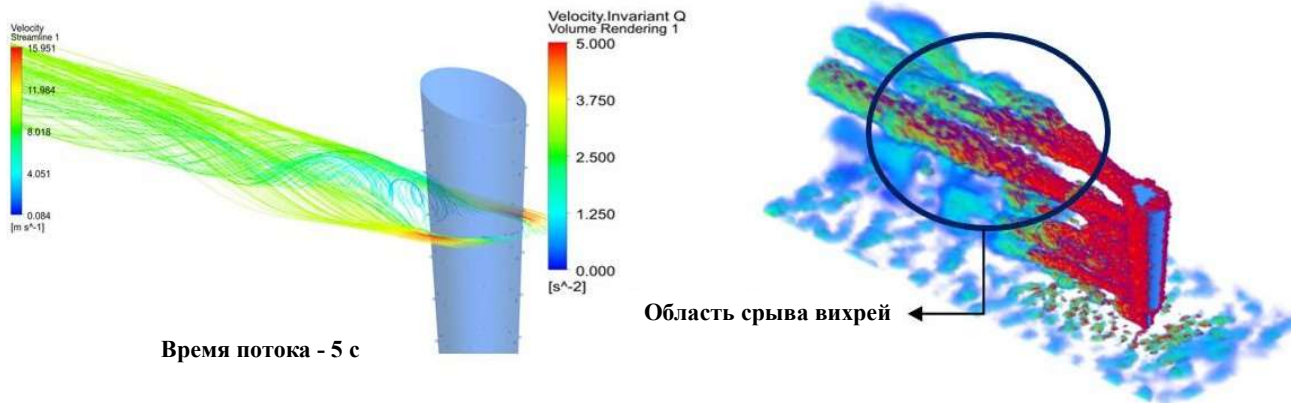


Рисунок 17 - Трехмерные линии тока скорости подчеркивают вихревой паттерн и образование вихрей, в дополнение к объемному рендерингу, который позволяет определить, где начинаются срывы вихрей

Чтобы понять динамическое поведение предлагаемой модели БВВТ, мы проанализировали графики скорости по времени в различных точках за мачтой, т.е. на расстоянии 1,5 и 3 м по горизонтали. Однако были выбраны шесть точек на разных вертикальных высотах, чтобы визуализировать колебательное поведение в различных областях, что важно для наблюдения временных изменений скорости воздуха за БВВТ. Это может дать нам представление о том, как изменения скорости влияют на колебательное поведение турбины, и раскрыть детали о периодичности вихрей. Точки анализа показаны и иллюстрированы на рисунке 18 ниже.

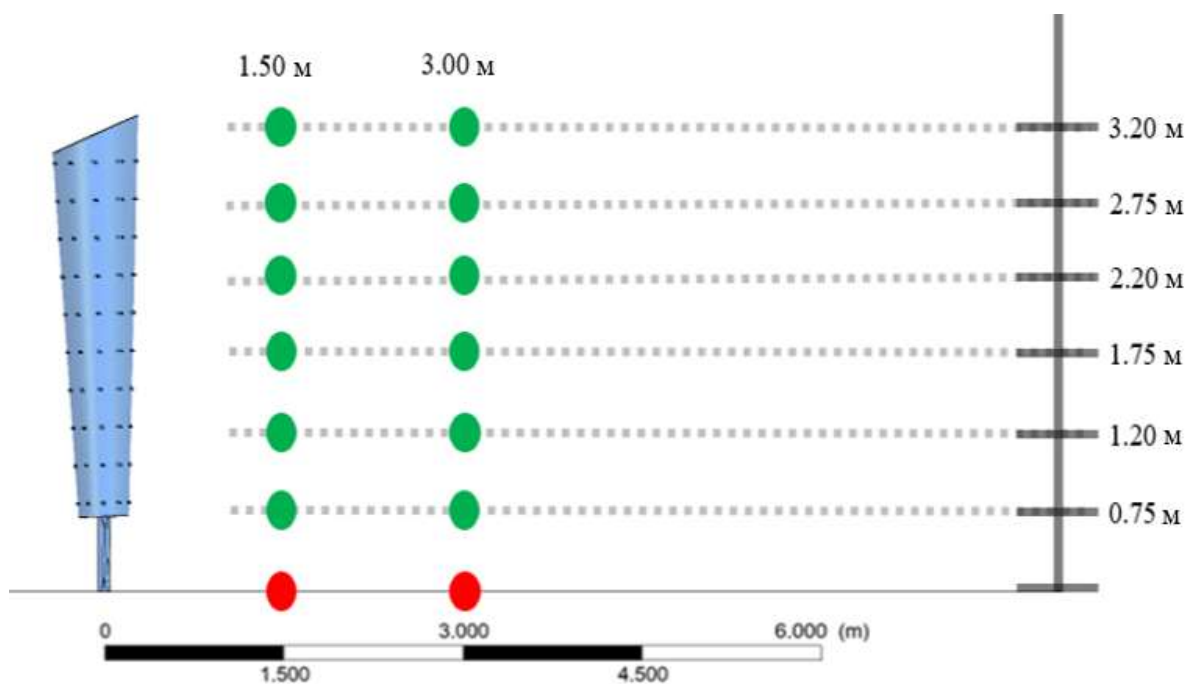


Рисунок 18 - Графики скорости по времени, иллюстрированные на жидкостном домене

Основываясь на наблюдениях по рисунку 19 для графиков скорости по времени, можно сделать следующие выводы:

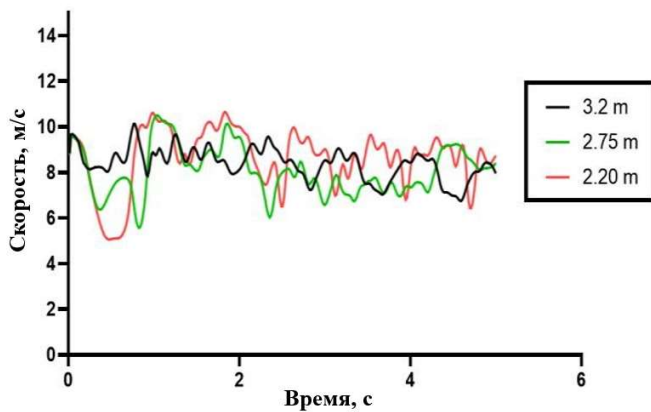
1) В точках, расположенных ближе к земле, наблюдаются более высокие амплитуды в профиле скорости. Это можно объяснить более интенсивным срывом вихрей из-за близости к земле. Таким образом, поведение потока может быть более хаотичным и турбулентным.

2) Более того, мы можем связать вышеуказанное поведение с профилем ветра. Возвращаясь к классической механике жидкости, на больших высотах ветер обычно быстрее и более постоянен. Поэтому в профиле скорости для первых трех точек наблюдается меньше турбулентности.

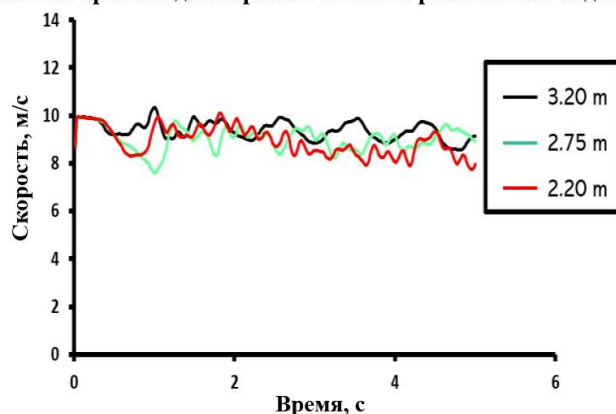
3) Как описано структурой мачты, у основания наблюдается больше вибраций, которые уменьшают волны, распространяющиеся к вершине мачты. Следовательно, на вершине наблюдается меньший срыв вихрей.

Кроме того, мы смогли наблюдать наибольшую концентрацию величин в диапазоне от 0 до 5 Гц в анализе БПФ коэффициента подъемной силы, показанном на рисунке 20. Это можно описать высокой концентрацией энергии и колебательным поведением, возникающим в этом частотном диапазоне. Заметная концентрация величин в диапазоне от 0 до 5 Гц в анализе БПФ коэффициента подъемной силы раскрывает важный частотный диапазон, в котором турбина демонстрирует повышенную концентрацию вибрационной энергии и колебательную активность. Колебательное поведение в этом частотном диапазоне отражает явление внутреннего резонанса БВВТ, что имеет решающее значение для его способности к сбору энергии. Резонансные условия, возникающие в результате взаимодействия воздушного потока и конструкции турбины, могут потенциально привести к увеличению подъемных сил, тем самым увеличивая способность турбины к сбору энергии от ветра. Более того, понимание поведения коэффициента подъемной силы в частотной области закладывает значительную основу для совершенствования конструкции и эксплуатационных параметров турбины. Тщательно настраивая эти параметры для эффективного использования выявленного резонансного поведения, появляется многообещающий путь к увеличению эффективности генерации энергии БВВТ. Это понимание также расширяет горизонты для изучения творческих изменений в конструкции или стратегий управления, направленных на использование выявленных частотно-зависимых динамик, тем самым еще больше увеличивая потенциал БВВТ по производству возобновляемой энергии.

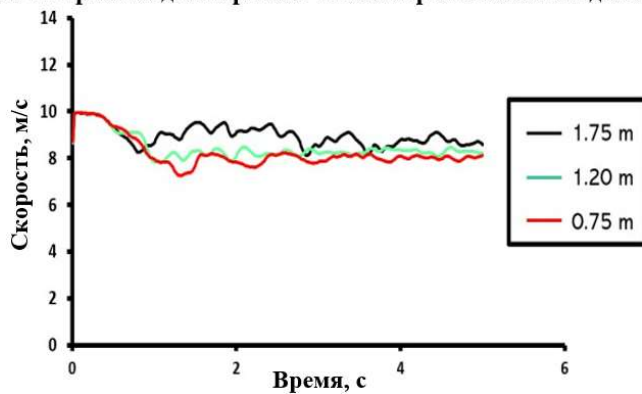
Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 1,5 м для модели 1



Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 3 м для модели 1



Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 3 м для модели 1



Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 1,5 м для модели 1

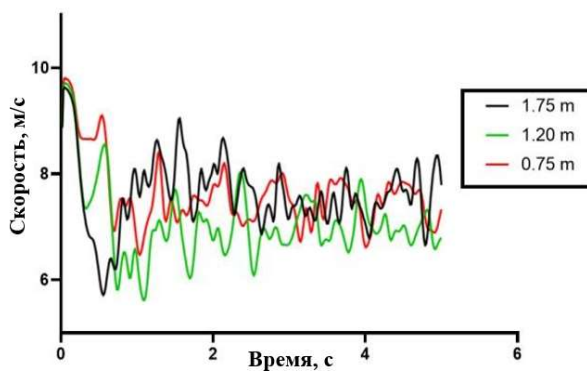


Рисунок 19 - Графики скорости по времени в различных вертикальных точках на расстоянии 1,5 и 3 м за мачтой безлопастной вихревой ветряной турбины (БВВТ)

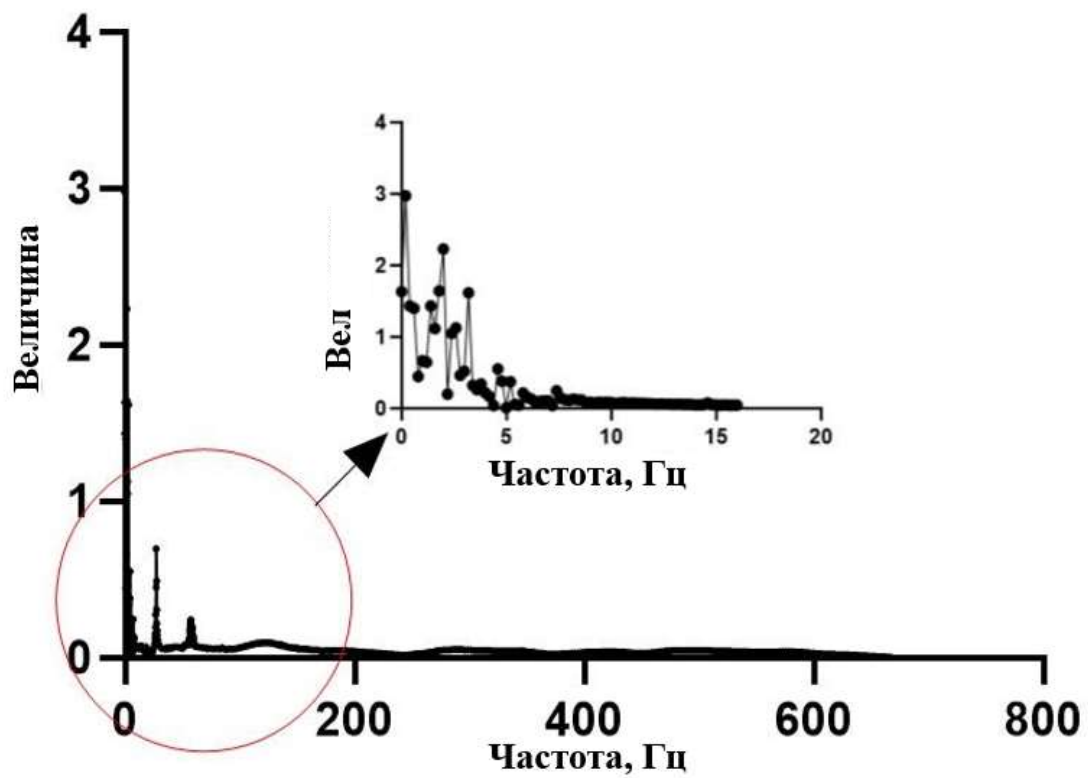


Рисунок 20 - Преобразование БПФ коэффициента подъемной силы C_l из временной области в частотную

3.2 Результаты двухстороннего ЖТС для модели 2

Модель 2, показанная на рисунке 3, была вторым случаем, рассмотренным в этом исследовании. В данном случае общее время потока составляло пять секунд, и за это время мы смогли получить важную информацию о колебательном поведении и картинах потока вокруг нее. Контуры скорости в течение первой трети времени потока, записанные на 1,5 с, показаны на рисунке 21 ниже.

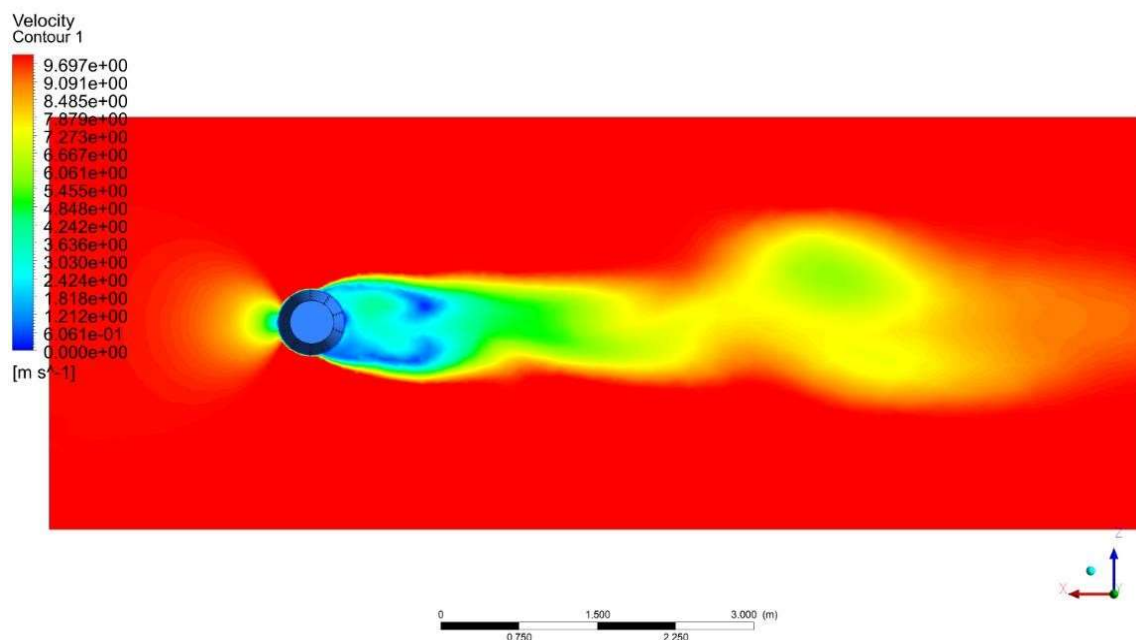


Рисунок 21 - Контуры скорости для модели 2 в течение первых 1,5 с времени потока, подчеркивающие рост вихрей ниже по течению жидкостного домена, начатый в области следа

Анализируя эту модель, мы смогли наблюдать более четкую завихренность на начальных стадиях потока, т.е. на 1,5 с. Кроме того, контур скорости представляет более четкое начало явления вихревой улицы фон Кармана, что позволяет предположить, что эта модель вызывает более интенсивный срыв вихрей благодаря своей сужающейся и расширяющейся структуре. Появление завихренности на ранней стадии потока может свидетельствовать о том, что эта конструкция может начать сбор энергии быстрее, чем предыдущая модель после начала ветрового потока. Кроме того, исходя из наблюдаемого контура скорости на рисунке 21, мы можем продемонстрировать заметное начало явления вихревой улицы Кармана. Это описывается как паттерн вихревых вихрей. Более того, тот факт, что паттерн потока вихревой улицы наблюдается на ранней стадии, свидетельствует о том, что модель успешно вызывает неустойчивое разделение потока и индуцирует срыв вихрей. Это может быть чрезвычайно полезным для генерации энергии с этой модели и может быть эффективным, так как срыв вихрей происходит при самом раннем начале потока. Кроме того, при увеличении времени потока мы

можем наблюдать более интенсивный срыв вихрей и более сильное проявление явления вихревой улицы фон Кармана. Рисунок 22 подчеркивает срыв вихрей при времени потока 4,5 и 5 секунд.

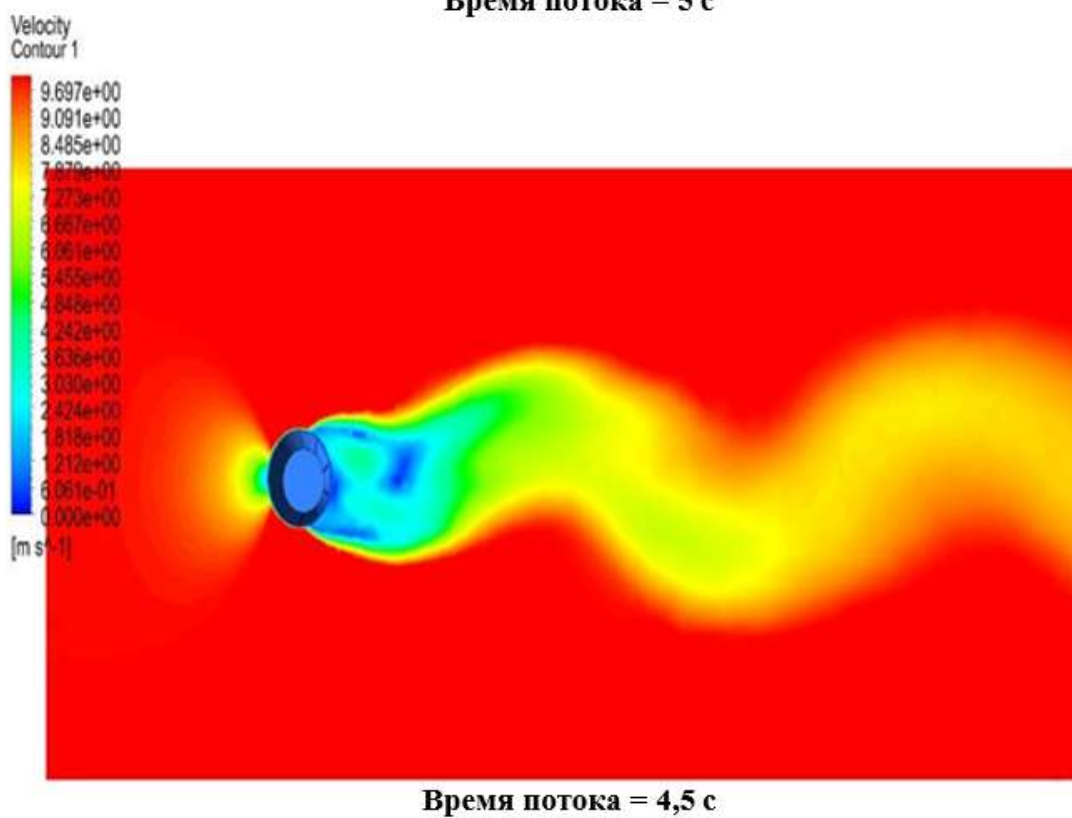
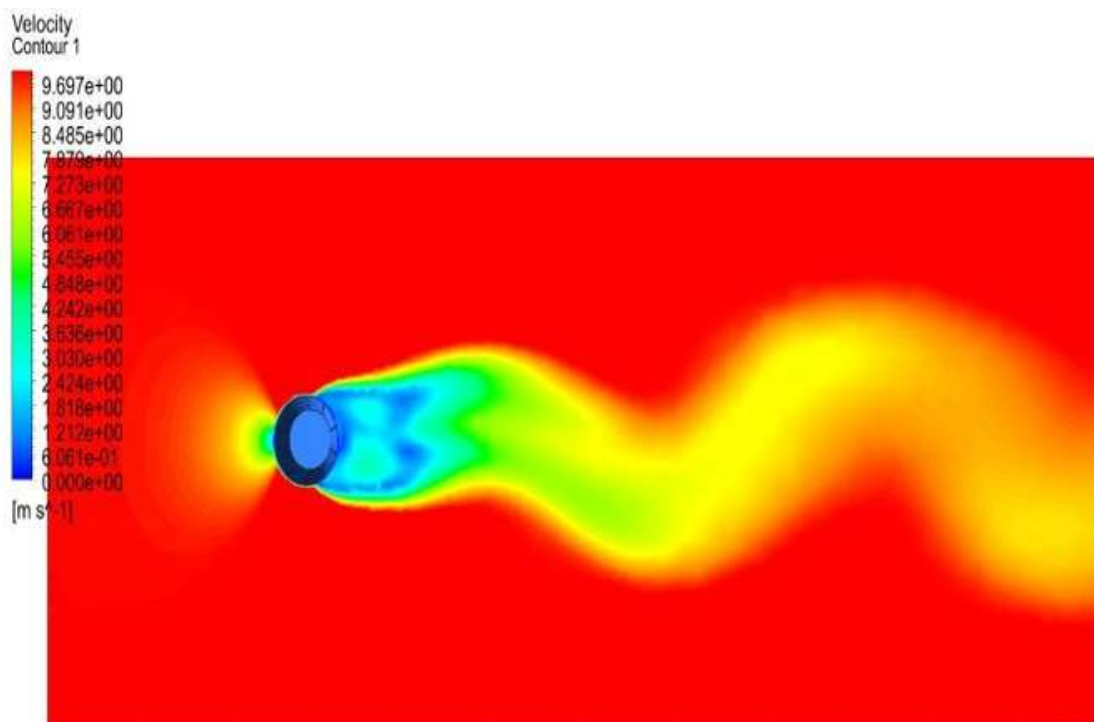


Рисунок 22 - Контуры скорости для модели 2 в течение 5 и 4,5 секунд времени потока, подчеркивающие область синхронизации ниже по течению жидкостного домена и паттерн потока вихревой улицы фон Кармана

Для дальнейшего понимания доминирования срыва вихрей и силы завихренности в поточном поле модели мы смогли создать следующие объемные рендеринги, чтобы подчеркнуть явление срыва вихрей на рисунке 22. Более того, мы можем приписать более сильные вихри и завихренность в этой модели к сужающейся и расширяющейся конструкции мачты. Можно предположить, что форма способствует более выраженным областям перепада давления вокруг поточного поля мачты. Таким образом, геометрия начинает вызывать постоянное увеличение и уменьшение скорости входящего ветра, тем самым способствуя более высокому перепаду давления, который является критическим фактором для инициирования паттернов срыва вихрей. Однако важно анализировать структурное влияние этих сильных вихрей на целостность мачты. Более того, мы построили трехмерные линии тока вдоль поточного поля второй модели БВВТ. Проанализировав линии тока, иллюстрированные на рисунке 23, мы смогли идентифицировать большой вихрь в следе мачты. Это может указывать на присутствие либо серии срывающихся вихрей, либо одного вихря. Мы можем заключить, что эта геометрия демонстрирует гораздо большее начало срыва вихрей и может генерировать больше энергии как возобновляемый источник энергии.

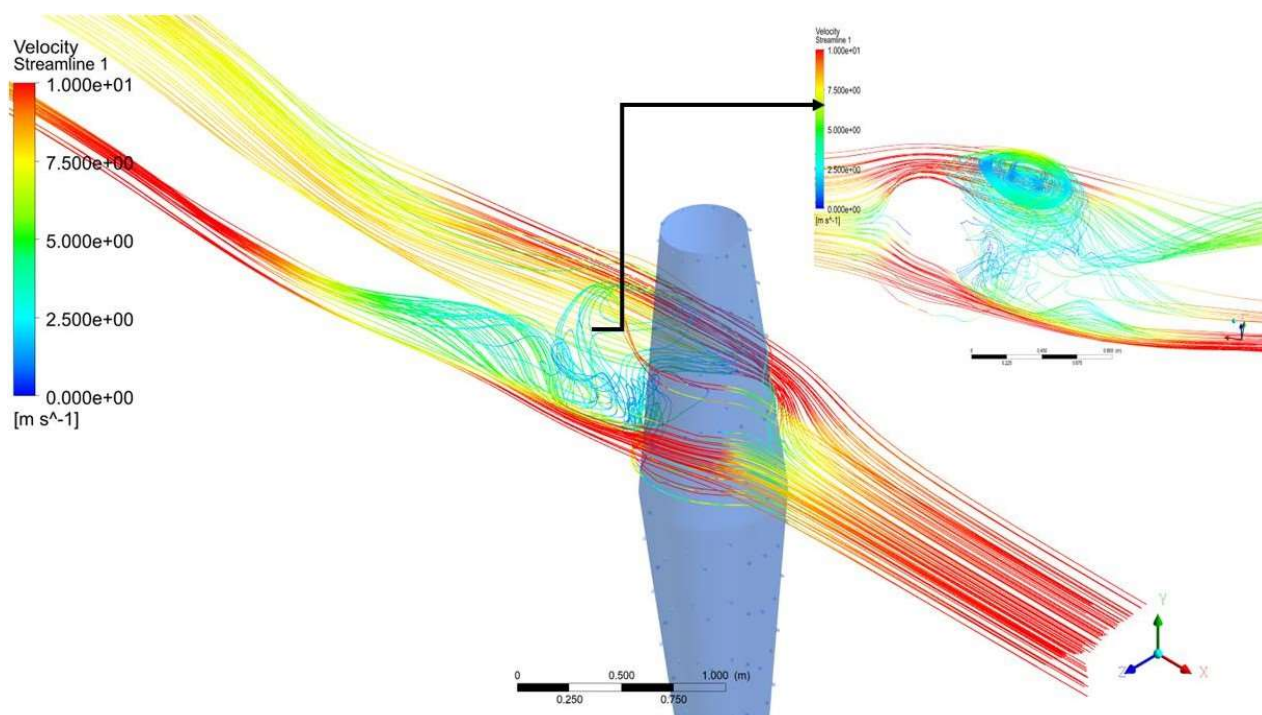
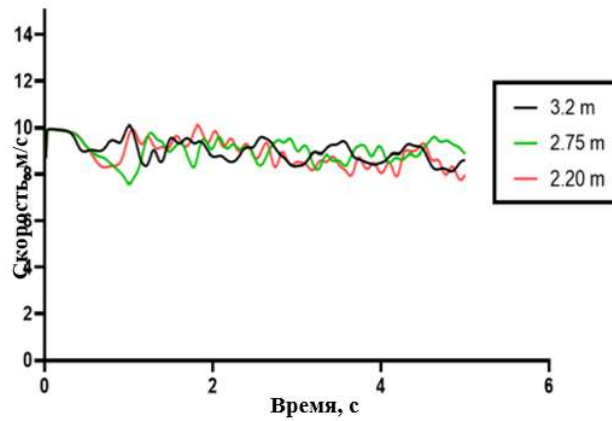


Рисунок 23 - Трехмерные линии тока скорости подчеркивают формирование вихрей в области следа модели

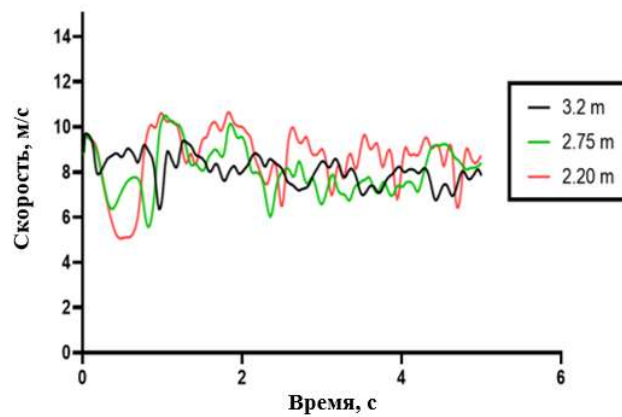
Мы повторили процедуры, использованные для первой модели, чтобы понять динамическое поведение предлагаемой модели БВВТ. Это включало создание графиков скорости по времени на расстоянии 1,5 и 3 метра по горизонтали за мачтой, изображенных на рисунке 24. Однако для показа колебательного поведения в различных областях были выбраны шесть точек на

разных вертикальных высотах. Это важно для анализа временных колебаний скорости воздуха за БВВТ. Это может помочь нам понять, как изменения скорости влияют на колебательное поведение турбины и выявить периодичность вихрей.

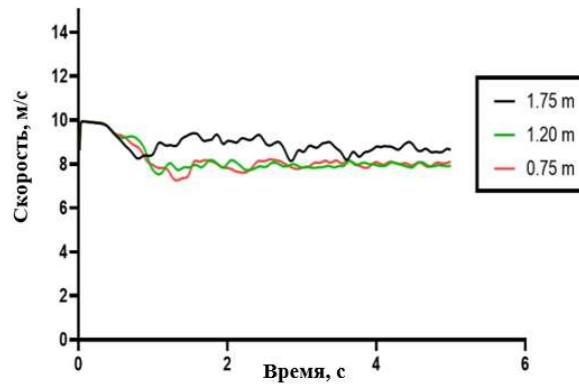
Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 3 м для модели 2



Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 1,5 м для модели 2



Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 3 м для модели 2



Скорость по времени для первых 3 точек на расстоянии 1,5 м для модели 2

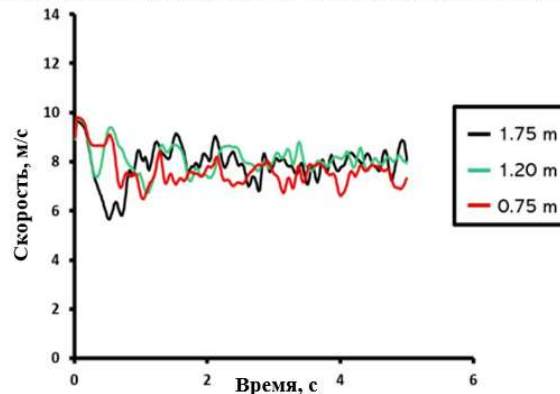


Рисунок 24 - Графики скорости по времени в различных вертикальных точках на расстоянии 1,5 и 3 м за мачтой БВВТ, для модели 2

Основываясь на вышеуказанных наблюдениях для графиков скорости по времени, мы можем сделать следующие выводы. Снижение амплитуд скорости в более удаленных точках от мачты можно объяснить механизмом рассеивания энергии модели БВВТ по мере удаления от мачты.

1) На более близком расстоянии, т.е. 1,5 м, поток сильно влияет на срыв вихрей, происходящий ниже по течению от БВВТ, что вызывает большие колебания скорости, что выражается в более высоких амплитудах, наблюдаемых на вышеуказанных графиках.

2) На более удаленном расстоянии, т.е. 3 м, колебания начинают затухать, потому что энергия от срыва начинает рассеиваться, смешиваясь с окружающим потоком воздуха и условиями окружающей среды, такими как давление.

Кроме того, мы смогли наблюдать наибольшую концентрацию величин в диапазоне от 0 до 9 Гц в анализе БПФ коэффициента подъемной силы, что видно на рисунке 25. Это можно объяснить высокой концентрацией энергии и колебательным поведением, возникающим в этом частотном диапазоне. Однако, по сравнению с первой моделью, эта модель имела более высокие амплитуды на аналогичных частотах. Это можно объяснить структурными изменениями, которые могли повлиять на подъемные силы, что привело к изменению амплитуды. Кроме того, более высокая завихренность, создаваемая этой моделью, может указывать на уменьшенное демпфирование; это уменьшенное демпфирование может приводить к более высоким пиковым амплитудам на резонансных частотах, как видно на увеличенной части графика БПФ.

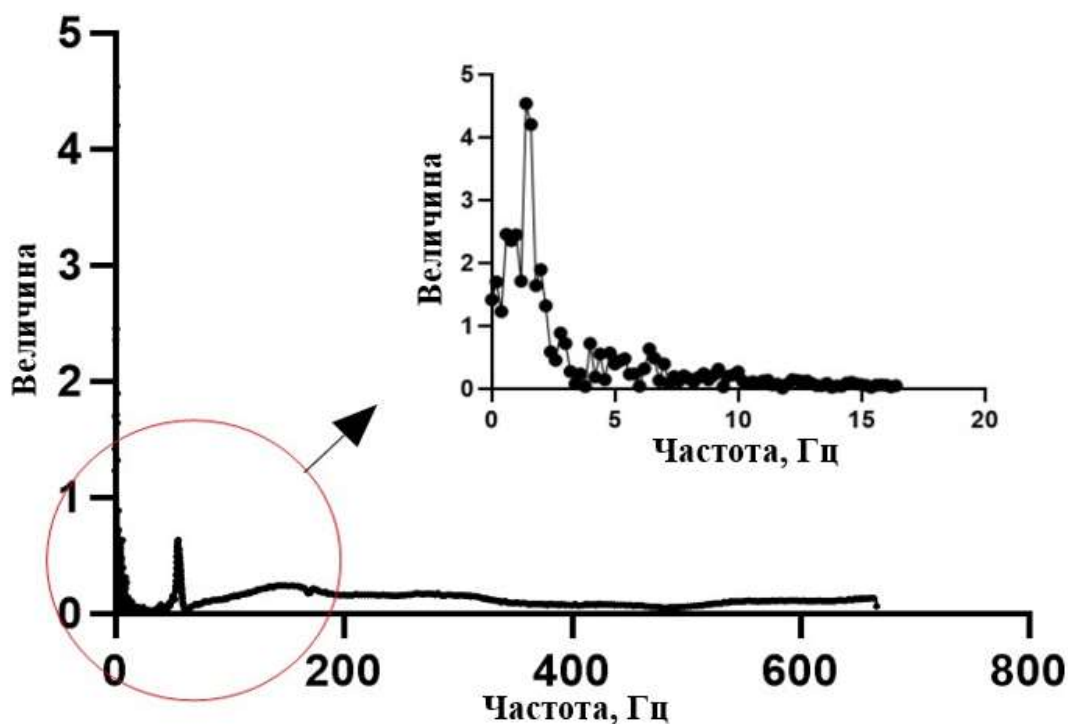


Рисунок 25 - Преобразование БПФ коэффициента подъемной силы C_l из временной области в частотную для модели 2

3.3 Расчет мощности

Процесс расчета мощности проводится как для экспериментальных, так и для симуляционных данных. Формулировка анализа мощности является сильно нелинейной из-за изменений условий потока, которые, в свою очередь, изменяют силы, действующие на ветряную турбину (подъемная сила, сопротивление, вибрация и т.д.). Для упрощения мы применяем линейную форму для оценки мощности, так как силы не измеряются полностью экспериментально, и уравнение суммировано ниже.

$$P_{out} = F_{wind} * (v_{mast}) \quad (17)$$

где P_{out} - линейная приближенная форма выходной мощности БВВТ;

F_{wind} - сила, непосредственно прикладываемая ветром к поверхности мачты, обращенной ко входу;

v_{mast} - скорость мачты, усредненная по времени.

Приложенная сила показана ниже:

$$F_{wind} = P_{app} * (A_s) \quad (18)$$

где P_{app} - приложенное ветровое давление на поверхность мачты;

A_s - площадь поверхности мачты.

Приложенное ветровое давление находится по следующему уравнению:

$$P_{app} = 0,5 * \rho_{wind} * (v_{flow})^2 \quad (19)$$

Затем мощность находится следующим образом для анализа моделирования. Скорость потока отмечена как 10 м/с, плотность воздуха в условиях комнатной температуры составляет примерно 1,204 кг/м³ согласно международному стандарту, и таким образом, P_{app} находится как 60,2 Па.

Площадь поверхности мачты составляет 5,0255 м² для полноразмерной модели, которая была смоделирована, и таким образом, F_{wind} оказывается равной 302,5351 Н. Скорость мачты записывается в моделировании в виде временного ряда в течение 5 секунд; мы используем это для получения мощности во времени. Таким образом, P_{out} оказывается, как показано на рисунке 26 ниже, что находится с помощью поэлементного умножения силы на скорость мачты, и выполняется с помощью простого скрипта MATLAB для повышения эффективности процесса.

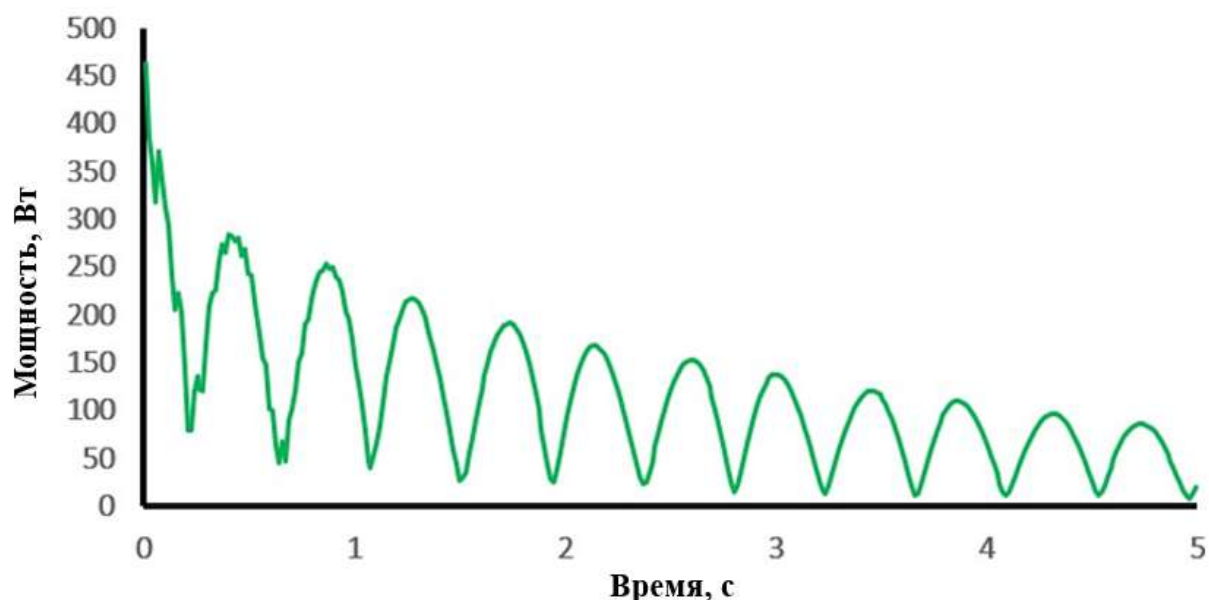


Рисунок 26 - Выходная мощность БВВТ по данным моделирования за 5 секунд

Для экспериментальных данных модель была уменьшена до 25% для соответствия установке в аэродинамической трубе, площадь поверхности составила $0,3241974 \text{ м}^2$, а скорость ветра — 6 м/с ; таким образом, давление ветра составляет $21,672 \text{ Па}$, и соответствующая сила равна $7,026 \text{ Н}$, и, таким образом, выходная мощность показана на рисунке 27 ниже. Шумное поведение на рисунке можно объяснить возмущениями и несовершенствами в поведении потока внутри аэродинамической трубы. Кроме того, выходную мощность можно увеличить, просто используя массив из нескольких безлопастных ветряных турбин.

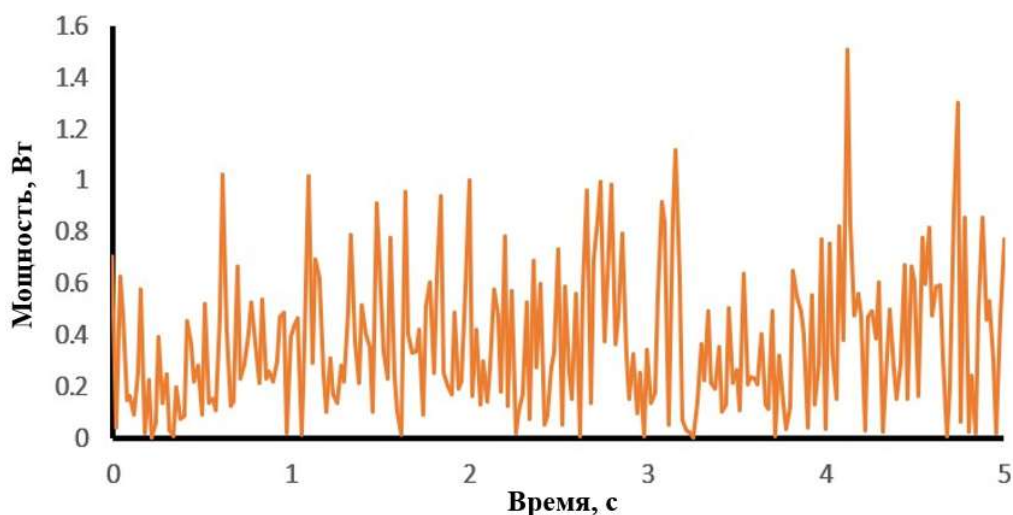


Рисунок 27 - Выходная мощность БВВТ по экспериментальным данным за 5 секунд

3.4 Экспериментальные результаты

Экспериментальные работы проводились для сопоставления результатов моделирования с фактическими физическими результатами. Это иллюстрируется на рисунке 12 в разделе 2.4, где показано размещение БВВТ на расстоянии 1850 мм после сужающего канала аэродинамической трубы. Это также показано на рисунке 28, который иллюстрирует фактические экспериментальные условия. После размещения БВВТ, как указано, различные показания были записаны с помощью двух различных датчиков; один — это датчик скорости потока трубки Пито, а другой — ультразвуковой датчик движения. Записи трубки Пито были сделаны в различных горизонтальных и вертикальных положениях, чтобы примерно захватить картину потока за мачтой; эти точки показаны и проиллюстрированы на рисунке 12, где горизонтальные точки взяты как диаметры мачты ($D_1 = 10,7$ см, $D_2 = 21,4$ см, $D_3 = 32,1$ см), а вертикальные точки взяты вдоль длины мачты (от 30 см до 90 см). Однако для ультразвукового датчика движения наиболее подходящим положением является размещение за мачтой с примерным расстоянием 1 м. Показания трубки Пито и показания ультразвукового датчика движения показаны на рисунках 29–31 соответственно.

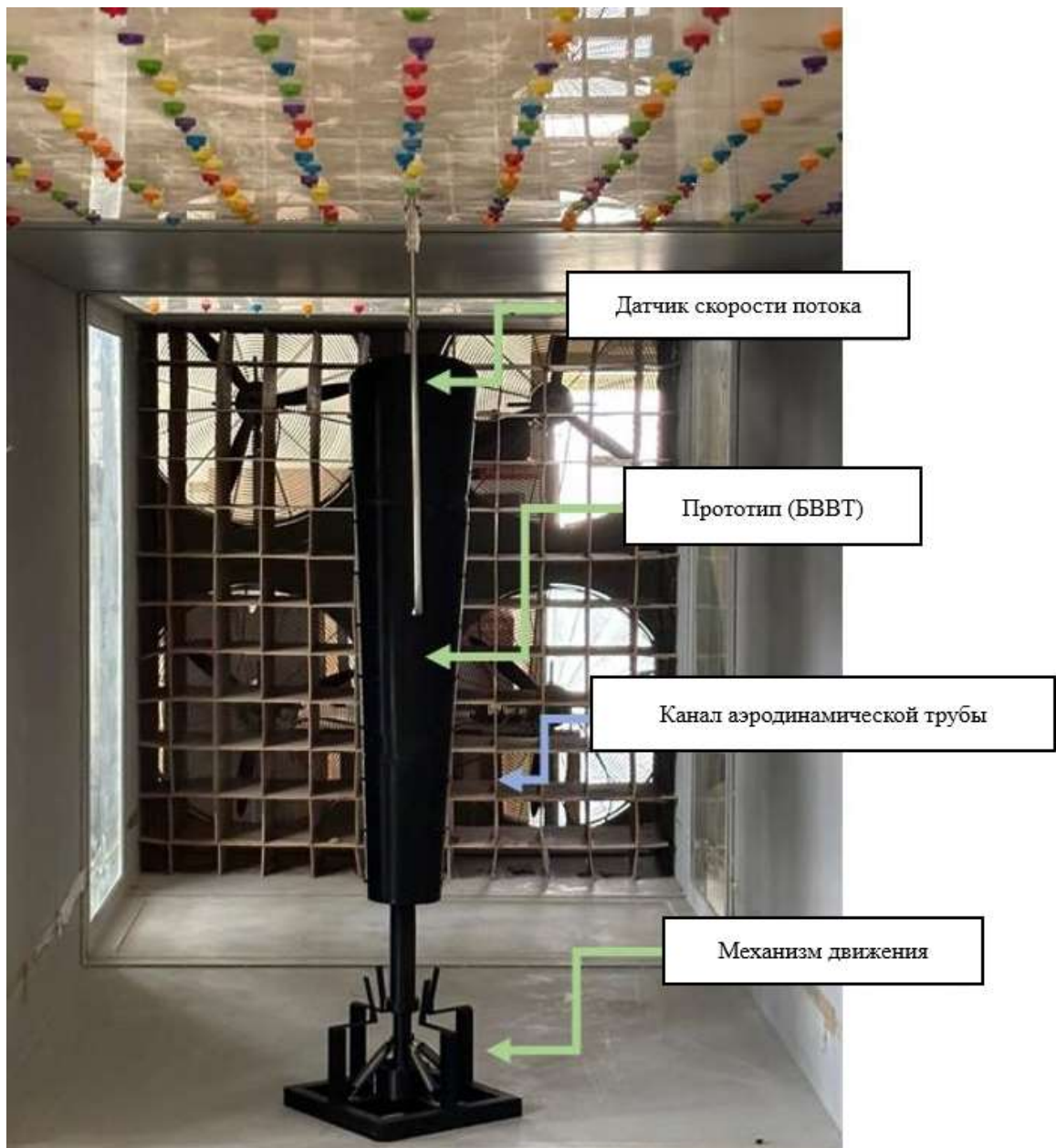


Рисунок 28 - Размещение БВВТ в аэродинамической трубе и установка датчика скорости потока

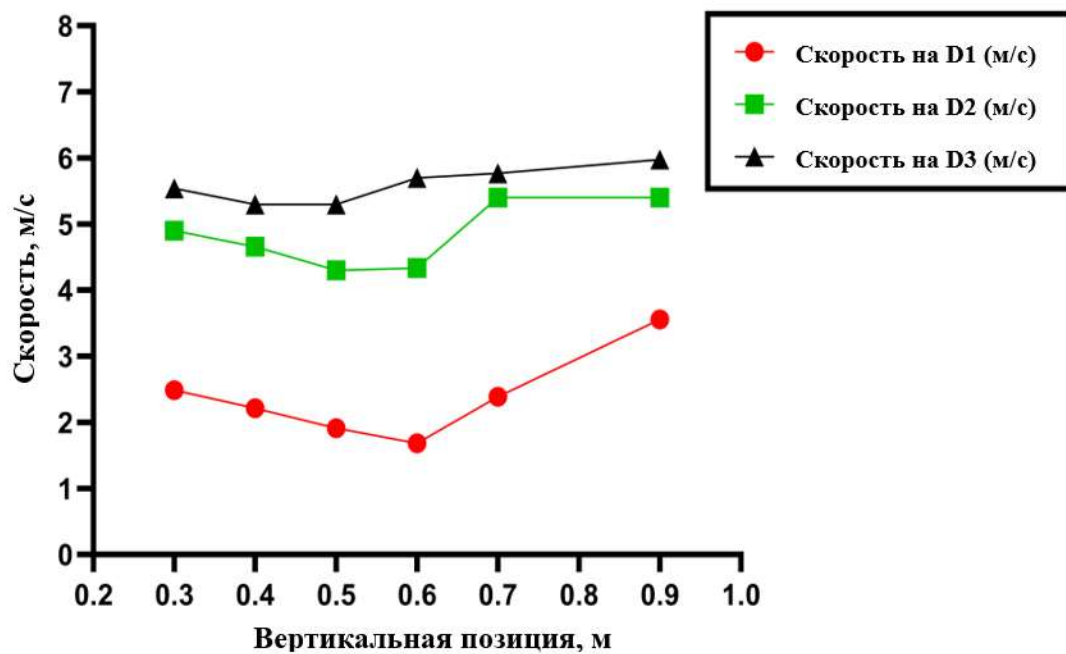


Рисунок 29 - Показания скорости потока трубки Пито в зависимости от вертикальных положений

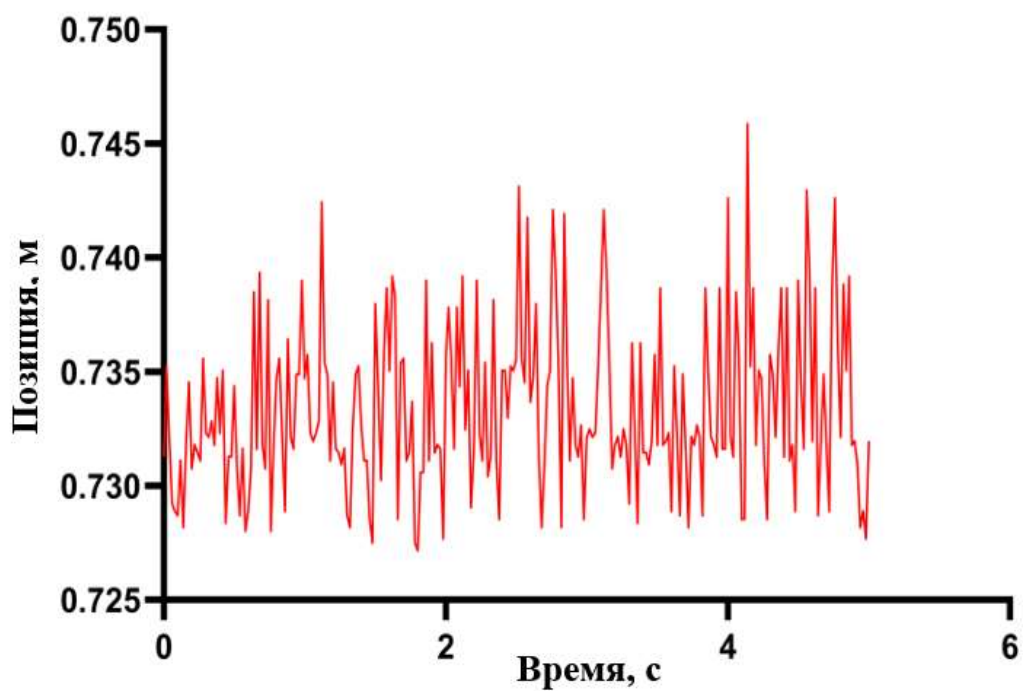


Рисунок 30 - Данные датчика движения, положение БВТ по времени

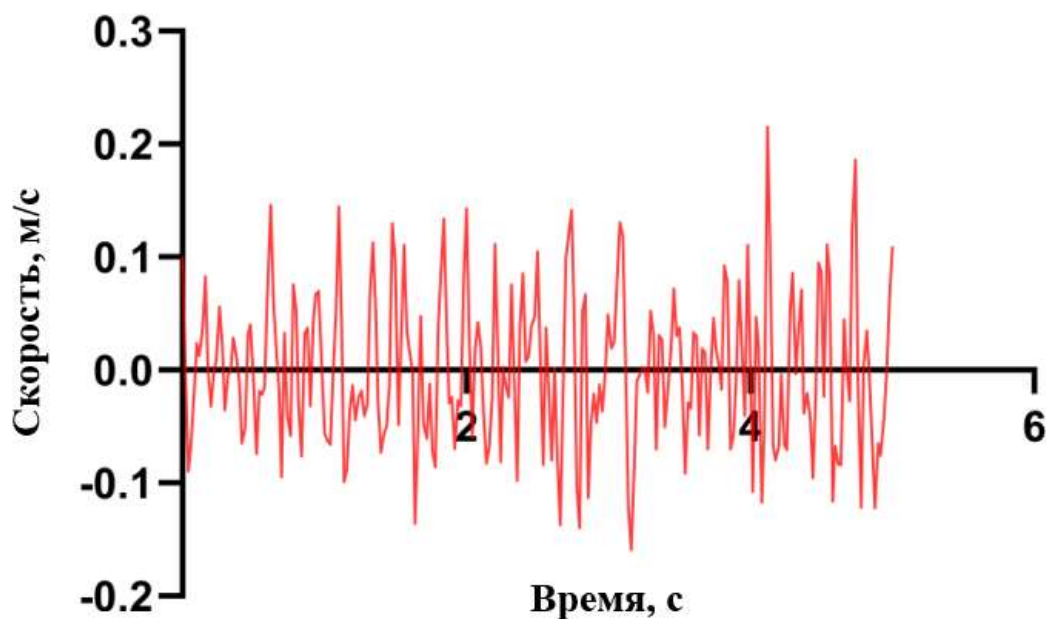


Рисунок 31 - Данные датчика движения, скорость БВВТ по времени

Как упоминалось ранее, показания трубки Пито записывались для оценки условий потока за мачтой. Чтобы понять рисунок 29, сначала нужно вернуться к рисунку 12, чтобы использовать горизонтальные и вертикальные точки в качестве ориентира. На высоте 0,3 м скорость должна быть относительно выше из-за меньшего сечения мачты на этой высоте, при этом поддерживая более низкое значение из-за близости к мачте (на D_1). Затем мы замечаем снижение значения скорости по мере подъема на вертикальных позициях, пока не достигнем вершины мачты, которая показывает более высокую скорость, чем другие точки. Эта картина наблюдается и в других горизонтальных положениях (D_2 и D_3). Логично, что средняя скорость на D_2 будет ниже, чем на D_3 , и выше, чем на D_1 ; однако на графике в этой горизонтальной позиции замечена некоторая неравномерность потока, что может указывать на наличие турбулентных вихрей. Для показаний датчика движения начнем с рисунка 30, который показывает изменение положения мачты во времени, где мы отмечаем, что мачта в среднем отклоняется на 15 м, не учитывая неравномерность движения, возникающего из-за возмущений в потоке. На рисунке 31 мы замечаем, что БВВТ движется в среднем со скоростью 0,15 м/с. При скорости потока 6 м/с меньшие значения отклонения и скорости движения мачты связаны с жесткостью пружин и общей конструкцией, и в таких системах более низкие скорости и отклонения предпочтительны из-за увеличения частоты движения, что коррелирует с более высокой общей выходной мощностью.

3.5 Системы накопления энергии

В литературе [30-31] существуют различные технологии и механизмы накопления энергии, каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны; однако, поскольку цель предлагаемой системы состоит в том, чтобы представить компактную ВИЭ, выбор системы накопления энергии должен учитывать два фактора: сложность и эффективность. Существуют четыре основные категории систем накопления энергии: механические, электрохимические, электрические и гибридные системы накопления энергии. Механические системы накопления энергии, такие как гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭ), очень эффективны, поскольку они накапливают избыточную энергию путем перекачки воды как гравитационной потенциальной энергии, что делает их очень эффективными при низкой выработке возобновляемой энергии [30]. Однако такие системы требуют большого географического следа и могут быть очень дорогими и сложными для установки. С другой стороны, электрические системы накопления энергии (ЭСНЭ), такие как суперконденсаторы, предлагают быстрые скорости зарядки и разрядки, но имеют низкую плотность энергии, и поэтому их применимость для долгосрочного накопления энергии становится очень ограниченной [32]. Гибридные системы могут обычно сочетать механические и электрохимические системы, что предлагает значительную универсальность, но часто требует высокой стоимости. Поэтому оставшимся вариантом является электрохимическая система накопления энергии. Эти системы делятся на две категории: системы накопления энергии на батареях и топливные элементы для накопления водорода. Системы накопления энергии на водороде могут быть очень эффективными, поскольку энергия может храниться долгое время и может быть произведена с использованием ВИЭ. Однако это связано с рядом ограничений, таких как необходимость инфраструктуры, такой как трубопроводы и топливные элементы.

Следовательно, наиболее подходящей системой являются системы накопления энергии на батареях; в частности, литий-ионные батареи, учитывая их высокую эффективность и высокую плотность энергии. Высокая плотность энергии, связанная с литий-ионными батареями, позволяет значительно накапливать энергию в компактной форме. Их длительный срок службы обеспечивает долговечность, что максимизирует полезность накопленной энергии от БВВТ. Более того, модульная природа литий-ионных батарей делает их легкими для интеграции в существующие установки, снижая сложность всей системы. В таблице 3 также показано, как литий-ионные батареи сравниваются с различными химическими составами батарей с точки зрения стоимости, мощности, энергии и эффективности [33].

Таблица 3 - Характеристики наиболее распространенных батарей

Химический состав батареи	Стоимость	Удельная мощность, Вт/кг	Удельная энергия, Вт·ч/кг	Эффективность, %
Литий-ионная	Высокая	150–315	75–250	95–98
Свинцово-кислотная	Низкая	75–300	30–50	70–80
Натрий-сера	Высокая	150–200	150–240	80–90
Ванадий-редокс	Высокая	100–166	10–35	65–85
Никель-кадмиевая	Умеренная	150–300	70–75	70–80
Никель-металл-гидридная	Умеренная	200–300	70–100	60–70

Размер батареи - это важный шаг при проектировании полностью функциональной системы возобновляемых источников энергии (ВИЭ); это обеспечивает эффективное хранение и использование избыточной энергии, вырабатываемой БВВТ, и надежное питание в периоды низкой выработки энергии. Два основных фактора, которые следует учитывать при определении размера батареи, - это требуемая емкость батареи Q_{batt} и количество батарей N_{batt} . Эти параметры зависят от нескольких факторов, таких как напряжение батареи, глубина разряда, дни автономной работы и эффективность выбранной батареи. Емкость батареи можно рассчитать с использованием уравнения (20) [34]:

$$Q_{batt} = \frac{31(E_{system}) \cdot X}{V_{batt} \cdot DoD \cdot \eta} \quad (20)$$

где E_{system} , V_{batt} , DoD , X и η - это ежемесячная нагрузка системы, номинальное напряжение батареи, глубина разряда, дни автономной работы (количество дней, в течение которых батарея может работать после зарядки от системы) и эффективность батареи соответственно. Аналогично, определив требуемую емкость батареи, количество батарей можно рассчитать с использованием уравнения (21).

$$N_{batt} = ENT \left(\frac{Q_{batt,min}}{Q_{batt,unit}} \right) \quad (21)$$

3.6 Концептуальный дизайн генератора мощности

Для выработки электрической энергии с помощью механического движения безлопастной ветряной турбины можно использовать простую электромагнитную индукцию для создания переменного электрического тока, который затем можно выпрямить до постоянного типа. Этот процесс надежен и прост; однако его можно еще больше улучшить, используя магнитострикционную генерацию энергии. Магнитострикционная генерация энергии использует механические вибрации, преобразуя их в электрическую энергию благодаря уникальным свойствам магнитострикционных материалов, которые изменяют свои магнитные характеристики под механическим воздействием [35]. Распространенная конструкция воплощает архитектуру параллельного луча, включающую стержень, изготовленный из железо-галлиевого сплава, окруженный катушкой, и сопровождаемый постоянным магнитом, создавая условия для возникновения электромагнитной индукции [36]. Последующее изменение магнитного домена в магнитострикционном материале вызывает электродвижущую силу в прилегающей катушке, создавая электрический ток и таким образом преобразуя механическую энергию в электрическую. Этот инновационный путь преобразования энергии находит свое применение в различных областях, олицетворяя многообещающий путь для питания безбатарейных устройств и систем мониторинга, расширяя горизонт для автономных маломощных приложений в современных инфраструктурах [37]. Концептуальный дизайн представлен на рисунке 32, показывающем устройство, которое использует как уникальные особенности магнитострикционного генератора энергии, так и традиционного индукционного генератора энергии.

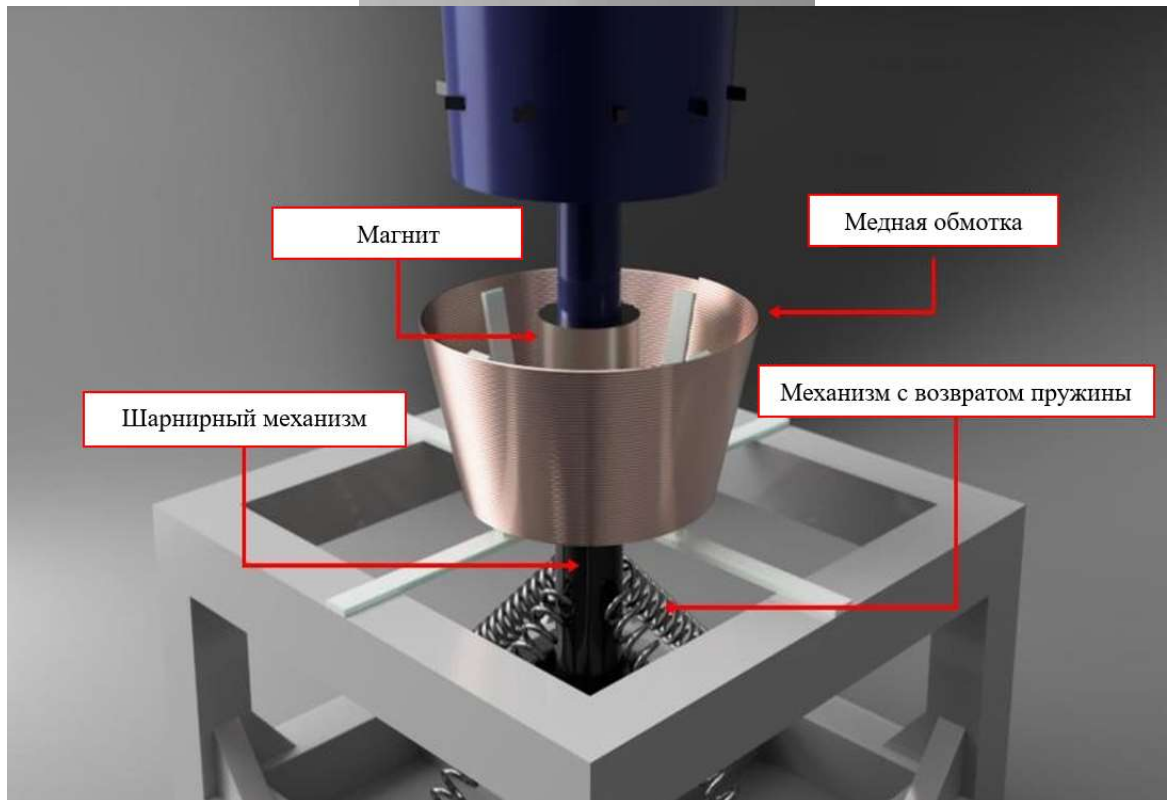


Рисунок 32 - Иллюстрация концепции системы генерации энергии, интегрированной в вихревую безлопастную ветряную турбину

3.7 Бизнес-модель и коммерциализация

Для коммерциализации системы БВВТ в первую очередь следует разработать бизнес-модель; этот процесс требует использования традиционного девяти структурной бизнес-модели:

Ключевые партнеры

- 1) Производители ветряных турбин для сотрудничества и производства.
- 2) Организации и исследовательские институты в области возобновляемой энергии для обмена знаниями и поддержки.
- 3) Инженерные и строительные компании для установки и обслуживания.
- 4) Операторы электрических сетей для интеграции и распределения вырабатываемой энергии.
- 5) Регулирующие органы для соблюдения энергетических и экологических нормативов.

Ключевые виды деятельности

- 1) Исследование и разработка технологии вихревой безлопастной ветряной турбины.
- 2) Производство и испытание вихревых безлопастных ветряных турбин.
- 3) Установка и обслуживание турбин.
- 4) Маркетинг и демонстрация технологии потенциальным клиентам.
- 5) Сотрудничество с партнерами для совместных проектов и инициатив.
- 6) Непрерывные инновации и улучшение технологии.

Ключевые ресурсы

- 1) Интеллектуальная собственность и патенты на технологию вихревой безлопастной ветряной турбины.
- 2) Квалифицированные инженеры и техники для исследований, разработки и обслуживания.
- 3) Производственные мощности и оборудование.
- 4) Доступ к испытательным площадкам для ветряных турбин.
- 5) Маркетинговая и сбытовая команда.
- 6) Финансовые ресурсы для исследований, производства и маркетинга.

Ценностные предложения

- 1) Экологически чистое и эстетически приятное решение для выработки энергии ветра.
- 2) Низкие затраты на обслуживание по сравнению с традиционными ветряными турбинами.
- 3) Бесшумная и безвибрационная работа, что делает её подходящей для городских и жилых районов.
- 4) Потенциал для интеграции с существующей инфраструктурой возобновляемой энергии.
- 5) Масштабируемость и адаптируемость к различным условиям ветра.

Отношения с клиентами

- 1) Консультативный подход для понимания потребностей клиентов и предложения индивидуальных решений.
- 2) Своевременная установка и ввод в эксплуатацию вихревых безлопастных ветряных турбин.
- 3) Непрерывная поддержка клиентов и услуги по обслуживанию.
- 4) Регулярное общение и обновления о новых разработках и улучшениях.

Каналы

- 1) Прямые продажи и дистрибуция компаниям, коммунальным предприятиям и бизнесу.
- 2) Сотрудничество с организациями и ассоциациями в области возобновляемой энергии.
- 3) Участие в отраслевых конференциях, выставках и торговых шоу.
- 4) Онлайн-присутствие через специализированный веб-сайт и цифровой маркетинг.
- 5) Сетевое взаимодействие с ключевыми заинтересованными сторонами в секторе возобновляемой энергии.

Сегменты клиентов

- 1) Энергетические компании и коммунальные предприятия, стремящиеся диверсифицировать свои портфели возобновляемой энергии.
- 2) Государственные учреждения и муниципалитеты, стремящиеся продвигать экологически чистые энергетические решения.
- 3) Промышленные и коммерческие предприятия, ищущие устойчивые энергетические альтернативы.
- 4) Застройщики недвижимости, заинтересованные в интеграции возобновляемой энергии в свои проекты.
- 5) Экологически сознательные потребители и сообщества.

Структура затрат

- 1) Затраты на исследования и разработки для непрерывных инноваций и улучшений.
- 2) Производственные и производственные расходы.
- 3) Маркетинговые и рекламные мероприятия.
- 4) Затраты на установку, обслуживание и сервисное обслуживание.
- 5) Затраты на соответствие нормативным требованиям и регулирование.
- 6) Административные и операционные расходы.

Источники доходов

- 1) Доход от продаж единиц вихревых безлопастных ветряных турбин.
- 2) Услуги по установке и обслуживанию турбин.
- 3) Лицензионные соглашения на использование технологии.
- 4) Гранты на исследования и разработки и партнерства.
- 5) Совместные предприятия и сотрудничество с другими компаниями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Это исследование изучало схемы вибраций, явления потока и возможности генерации мощности безлопастной ветряной турбины в трех симуляционных запусках. Результаты этого исследования предлагают полезные знания об эксплуатации и поведении безлопастных ветряных турбин. Для предотвращения чрезмерных вибраций, которые могут повлиять на структуру турбины, анализ схем вибраций показал, насколько важно учитывать собственные частоты и режимы вибраций. Безлопастные ветряные турбины могут работать безопаснее и эффективнее, если амплитуды и частоты вибраций понятны и управляемы. Изучение явлений потока, особенно срыва вихрей, предоставило информацию о силах и взаимодействиях между окружающим воздушным потоком и турбиной, вызванных аэродинамикой. Для оптимизации аэродинамических характеристик и извлечения энергии ветра улучшение конструкции можно направить, наблюдая за частотами срыва вихрей. Сравнение различных моделей турбин продемонстрировало влияние решений в области дизайна на производство энергии. Модель 2 превзошла Модель 1 с точки зрения аэродинамических характеристик, что подтверждается увеличением частоты срыва вихрей и оценкой генерации мощности. В целом, эта работа предлагает идеи для будущих исследований и оптимизации, а также лучшее понимание динамики безлопастных ветряных турбин. Проектирование и эксплуатация безлопастных ветряных турбин подчеркивают важность учета свойств вибраций, взаимодействий потоков и возможностей генерации мощности. Будущие исследования должны исследовать больше переменных, практические испытания и методы оптимизации для повышения эффективности и жизнеспособности безлопастных ветряных турбин как устойчивого источника энергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Wang, J.; Geng, L.; Ding, L.; Zhu, H.; Yurchenko, D. Обзор текущего состояния дел по сбору энергии от вибраций, вызванных потоком. *Appl. Energy* 2020, 267, 114902.
- 2 Kawai, H. Вибрации, вызванные вихрями, цилиндрического тела. В материалах 1-го Международного симпозиума по вычислительной аэродинамике (CWE 92), Токио, Япония, 21–23 августа 1992 г.; стр. 605–610.
- 3 Dol, S.S.; Chan, H.B.; Wee, S.K.; Perumal, K. Влияние гибкого генератора вихрей на структуры потока для улучшения турбулентности. В *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; IOP Publishing: Бристоль, Великобритания, 2020; том 715, стр. 012070.
- 4 von Kármán, T. О механизме сопротивления, который испытывает движущееся тело в жидкости. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen Math-Phys. Kl.* 1911, 1911, 509–517.
- 5 Bearman, P.W. Срыв вихрей с колеблющихся тупых тел. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003, 16, 195–222.
- 6 Gerrard, J.H. Механика области формирования вихрей за тупыми телами. *J. Fluid Mech.* 1966, 25, 401–413.
- 7 Su, Z.; Liu, Y.; Zhang, H.; Zhang, D. Численное моделирование вибраций, вызванных вихрями, квадратного цилиндра. *J. Mech. Sci. Technol.* 2007, 21, 1415.
- 8 Massai, T.; Zhao, J.; Jacono, D.L.; Bartoli, G.; Sheridan, J. Влияние угла атаки на вибрации, вызванные потоком, низкосторонних прямоугольных цилиндров. *J. Fluids Struct.* 2018, 82, 375–393.
- 9 Gao, D.; Deng, Z.; Yang, W.; Chen, W. Обзор механизма возбуждения и аэродинамического управления потоком вибраций, вызванных вихрями, главной балки для длиннопролетных мостов: Подход к вихревой динамике. *J. Fluids Struct.* 2021, 105, 103348.
- 10 Dol, S.S.; Yong, T.H.; Bin Chan, H.; Wee, S.K.; Sulaiman, S.A. Характеристики турбулентности гибкого кругового цилиндра. *Fluids* 2021, 6, 238.
- 11 Khalak, A.; Williamson, C.H.K. Силы жидкости и динамика гидроэластичной структуры с очень малой массой и демпфированием. *J. Fluids Struct.* 1997, 11, 973–982.
- 12 Vadri, N.; Peddolla, V.; Gottumukkala, H. Дизайн и анализ безлопастной ветряной турбины. В материалах 4-й Международной конференции по аспектам дизайна и производства для устойчивой энергетики (ICMED-ICMPC 2023), Хайдарабад, Индия, 19–20 мая 2023 г.
- 13 Kim, S.; Alam, M.M.; Sakamoto, H.; Zhou, Y. Вибрации, вызванные потоком, двух круглых цилиндров в тандемном расположении. Часть 1: Характеристики вибрации. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 2009, 97, 304–311.
- 14 Gohate, G.; Bobde, S.; Khairkar, A.; Jadhav, S. Исследование вибраций, вызванных вихрями, для сбора энергии. *IJRST-Int. J. Innov. Res. Sci. Technol.* 2016, 2, 374–378.

15 Rishabh, O.; Shubhankar, B.; Vishal, S.K. Производство энергии ветра без лопастей. *Int. J. Sci. Eng. Dev. Res.* 2017, 163–167.

16 Seyed-Aghazadeh, B.; Carlson, D.W.; Modarres-Sadeghi, Y. Влияние коэффициента конусности на вибрации, вызванные вихрями, конусных цилиндров в поперечном потоке. *J. Fluids Struct.* 2015, 53, 84–95.

17 Samy, C.K.; Ahmadi, H.B.; Atfah, Y.A.; Dol, S.S.; Alavi, M. Дизайн портативной безлопастной ветряной турбины: Предварительное исследование. *J. Adv. Res. Appl. Mech.* 2023, 102, 32–43.

18 Elsayed, A.M.; Farghaly, M.B. Теоретический и численный анализ вихревых безлопастных ветряных турбин. *Wind Eng.* 2022, 46, 1408–1426.

19 Akaydin, H.D.; Elvin, N.; Andreopoulos, Y. Характеристики самовозбуждающегося энергетического сборщика жидкости. *Smart Mater. Struct.* 2012, 21, 025007.

20 Salvador, C.S.; Teresa, J.A.; Martinez, J.M.; Vacasnot, M.C.; Orilla, K.V.; Cabana, R.J.; Ladaran, W.I. Дизайн и строительство дугообразного и дискообразного маятника для безлопастного генератора ветра. В материалах 25-й Международной конференции по системному инженерии, ICSEng, Лас-Вегас, Невада, США, 22–23 августа 2017 г.; стр. 363–369.

21 Maftouni, N.; Manshadi, M.D.; Mousavi, S.M. Влияние силы сопротивления на частоты тела и спектр мощности безлопастной ветряной турбины. *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.* 2021, 45, 604–611.

22 Francis, S.; Umesh, V.; Shivakumar, S. Дизайн и анализ вихревой безлопастной ветряной турбины. *Mater. Today Proc.* 2021, 47, 5584–5588.

23 Dol, S.S.; Chan, H.B. Симуляция взаимодействия жидкости и структуры вихрей за гибким генератором вихрей. В материалах 2019 8-й Международной конференции по моделированию, симуляции и прикладной оптимизации (ICMSAO), Манаме, Бахрейн, 15–17 апреля 2019 г.; стр. 1–5.

24 Vani-hani, A. Вибрации мачт, вызванные ветровым потоком. Докторская диссертация, Государственный университет Кливленда, Кливленд, Огайо, США, 2009.

25 Tandel, R.; Shah, S.; Tripathi, S. Обзор современных технологий безлопастных ветряных турбин. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1950, 012058.

26 Bahadur, I. Динамическое моделирование и исследование настраиваемой вихревой безлопастной ветряной турбины. *Energies* 2022, 15, 6773.

27 Thein, C.K.; Foong, F.M.; Shu, Y.C. Усиление пружины и моделирование динамического трения системы 2DOF/2SDOF в электромагнитном сборщике энергии вибрации – эксперимент, моделирование и аналитический анализ. *Mech. Syst. Signal Process* 2019, 132, 232–252.

28 Gatski, T.B.; Bonnet, J.P. Сжимаемость, турбулентность и высокоскоростной поток, 2-е изд.; Elsevier: Амстердам, Нидерланды, 2013; стр. 1–328.

29 Menter, F.R. Модели турбулентности с вязкостью вихрей на основе двух уравнений для инженерных приложений. *AIAA J.* 1994, 32, 1598–1605.

30 Ould Amrouche, S.; Rekioua, D.; Rekioua, T.; Vacha, S. Обзор накопления энергии в системах возобновляемой энергии. *Int. J. Hydrog. Energy* 2016, 41, 20914–20927.

31 Sridhar, S.; Salkuti, S.R. Развитие и перспективы возобновляемых источников энергии и систем накопления энергии. *Smart Cities* 2022, 5, 668–699.

32 Chavan, S.; Rudrapati, R.; Manickam, S. Обзор современных достижений в области теплового накопления энергии и их приложений. *Alex. Eng. J.* 2022, 61, 5455–5463.

33 Rekioua, D. Системы накопления энергии для фотоэлектрических и ветровых систем: обзор. *Energies* 2023, 16, 3893.

34 Rekioua, D.; Rekioua, T.; Elsanabary, A.; Mekhilef, S. Контроль управления мощностью автономной системы фотоэлектрических/ветровых турбин/батарей. *Energies* 2023, 16, 2286.

35 Liu, H.; Wang, S.; Zhang, Y.; Wang, W. Исследование метода генерации вибрационной мощности гигантского магнитострикционного элемента для системы мониторинга давления в шинах без батарей. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 2014, 229, 1639–1651.

36 Ueno, T. Производительность улучшенного магнитострикционного вибрационного генератора мощности, простого и с высокой выходной мощностью для практического применения. *J. Appl. Phys.* 2015, 117, 17A740.

37 Dey, S.; Roy, D.; Patra, S.; Santra, T. Производительность модифицированного магнитострикционного сборщика энергии в условиях механических вибраций. *Heliyon* 2019, 5, e01135.

38 СТ КазНИТУ-09-2023. Общее требование к построению, положениям, оформлению и содержанию текстового и графического материала. Работы учебные. Алматы: КазНИТУ имени К.И. Сатпаева, 2023 – 47с.

Приложение А

Статья «Journal of Energy, Mechanical Engineering and Transport» 2023 г.



**Journal of Energy,
Mechanical
Engineering and
Transport**

ISSN 2576-7856 (ONLINE)
ISSN 2576-7857 (PRINT)

Настоящим подтверждаю, что статья авторов А. Amanbayev, В. Ongar «**Analysis of characteristics of bladeless turbines in Kazakhstan**» принята для опубликования в № 1(1) 2023 года.

Ответственный секретарь редколлегии
Шаленов Е.О.
e.shalenov@satbayev.university

Приложение Б

Статья «Вестник КазАТК» 2023 г.

ALT
1931

Научный журнал
"Вестник КазАТК"

О НАС ▾ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ ▾ АВТОРАМ ▾ РЕДАКЦИЯ ТЕКУЩИЙ ВЫПУСК АРХИВЫ

ГЛАВНАЯ / АРХИВЫ / ТОМ 128 № 5 (2023): ВЕСТНИК КАЗАТК / Энергетика

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗЛОПАСТНОГО ВЕТРЯКА VORTEX

Булбул Онгар ✉
Satbayev University

Ерлан Сарсенбаев
Satbayev University

Айтумар Аманбаев
Satbayev University

DOI: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-128-5-463-473>

Ключевые слова: безлопастные турбины, альтернативная энергетика, вихревой ветер, ветряная турбина, аэродинамическая характеристика

АННОТАЦИЯ

Производство электроэнергии от ветряных генераторов получило широкое распространение. Он занимает большую долю на мировом рынке производства электроэнергии в качестве ветряной турбины. Существует несколько типов ветряных турбин: ветряные турбины с горизонтальной осью, ветряные турбины с вертикальной осью и безлопастные ветряные турбины. Вихревой безлопастный ветродвигатель представляет собой резонансную ветряную турбину, вызванную вихревой вибрацией, которая считается наиболее экологически чистой ветряной турбиной. Что касается стартапа в Испании, Vortex Bladeless Ltd экспериментирует с тем, как добиться максимальной эффективности преобразования энергии безлопастной ветряной турбины, поскольку это еще не полностью завершено с нулевой коммерциализацией. Следовательно, Целью

PDF 12

ОПУБЛИКОВАН

16.10.2023

КАК ЦИТИРОВАТЬ

Онгар, Б., Сарсенбаев, Е., & Аманбаев, А. (2023). АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗЛОПАСТНОГО ВЕТРЯКА VORTEX. *Вестник КазАТК*, 128(5), 463–473.
<https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-128-5-463-473>

Другие форматы

библиографических ссылок

ВЫПУСК

[Том 128 № 5 \(2023\): Вестник КазАТК](#)

РАЗДЕЛ

Энергетика

ЛИЦЕНЗИЯ

Приложение В

Статья «International Satbayev Conference» 2023 г.

International Satbayev Conference (2023)

Volume 3, 54-63

<https://doi.org/10.51301/ISC.2023.v3.10>

А. Аманбаев*, Б. Онгар
Satbayev University, Алматы, Казахстан
*e-mail: aitumar.amanbayev@gmail.com

АНАЛИЗ БЕЗЛОПАСТНЫХ ВЕТРЯНЫХ ТУРБИН VORTEX WIND

Аннотация. Цель данной статьи проанализировать ситуацию с новым развивающимся типом безопасных ветряных турбин Vortex. Принцип работы турбины, какую технологическую базу она использует, а также размер и физические характеристики, которые были бы выгодны для нынешнего рынка ветряных турбин малой мощности.

Технология Vortex Wind – это инновационный способ генерации электроэнергии из ветра, разработанный компанией Vortex Bladeless. Она основана на использовании вихревого эффекта, который возникает при обтекании ветром вертикальной стойки-генератора. В отличие от традиционных ветряных турбин, которые используют крыльчатки для захвата энергии ветра, Vortex Wind не имеет движущихся частей, что делает ее более простой и надежной в эксплуатации.

Суть технологии заключается в создании устойчивого вихревого движения воздуха, которое приводит к колебаниям стойки-генератора. Подобно тому, как волны на поверхности воды могут передаваться с одной части воды на другую, колебания стойки могут генерировать электроэнергию через электромагнитную индукцию.

Однако, технология Vortex Wind пока находится в стадии разработки и тестирования, и ее эффективность еще не сравнима с традиционными ветряными турбинами. В любом случае, Vortex Wind представляет собой интересный вариант для использования в будущем, как дополнение к существующим источникам возобновляемой энергии.

Ключевые слова: безопасные турбины, альтернативная энергетика, vortex wind, ветроэнергетика, ветряная турбина.

Введение. Эффективность возобновляемых источников энергии значительно выросла за последние годы, и энергия ветра стала одной из самых важных причин этого. Увеличение размеров ветряных турбин делает энергию ветра одним из наиболее важных источников энергии. Однако в секторе распределенной энергетики, где энергия вырабатывается рядом с точкой потребления, наиболее примечательной технологией может быть фотоэлектрическая солнечная энергия. Отсутствие подвижных механических частей позволяет собирать энергию солнца с минимальным обслуживанием и без воздействия шума на окружающую среду. Кроме того, общеизвестно, что совместное использование различных возобновляемых источников энергии имеет синергетический эффект за счет взаимной компенсации в периоды отсутствия ветра, солнечного света и т. д.

Ветряная энергетика - это один из наиболее перспективных видов возобновляемой энергии, который стремительно набирает популярность во всем мире. Она основывается на использовании ветра как источника энергии для производства электричества.

В этой статье мы рассмотрим безопасные ветряные турбины, ее принцип работы, характеристики и перспективы развития данной технологии в будущем.

Технология Vortex Wind имеет ряд преимуществ перед традиционными ветряными турбинами. Она более компактна, что делает ее подходящей для использования в городских условиях, и не имеет шумных и опасных вращающихся лопастей. Кроме того, Vortex Wind более эффективна при низких скоростях ветра, что является важным преимуществом в тех регионах, где ветер бывает слабым.

Материалы и методы. Одним из наиболее известных событий, вызванных аэродинамическим резонансом, является обрушение моста Tacoma Narrows [1]. Явление резонанса возникает, когда колебание усиливается периодическим движением. В