



Н.К. Танашева, А.Р. Бахтыбекова

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМОЙ ЛОПАСТЕЙ



Караганда, 2025

НАО «КАРАГАНДИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.А. БУКЕТОВА»

Н.К. Танашева, А.Р. Бахтыбекова

**АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ
ФОРМОЙ ЛОПАСТЕЙ**

Монография

Караганда
2025

УДК 621.548
ББК 31.62
T18

Рецензенты:

Д.А. Афанасьев, PhD, ассоц. профессор
Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова;
Г.С. Омарова, PhD, ассоц. профессор
Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова;
Х.Ж. Байшагиров, д-р техн. наук,
профессор Кокшетауского университета имени Ш. Уалиханова

*Рекомендовано к печати Ученым советом
Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова
(Протокол № 13 от 25 апреля 2025 г.)*

Танашева Н.К.

T18 Аэродинамическое моделирование и экспериментальные исследования ветроэнергетических установок со сложной геометрической формой лопастей: монография / Н.К. Танашева, А.Р. Бахтыбекова. — Караганда : Издательство Карагандинского университета имени академика Е.А. Букетова, 2025. — 248 с.

ISBN 978-601-362-340-5

Монография содержит результаты численного и экспериментального исследования ветроэнергетических установок со сложной геометрией лопастей и ротационными элементами-дефлекторами. Изучены турбулентные течения вокруг цилиндрических рабочих элементов, их влияние на подъёмную силу и аэродинамическую эффективность. Разработаны универсальные численные зависимости аэродинамических характеристик установок с различным числом лопастей, подтверждённые экспериментально.

Предназначена для студентов, преподавателей, докторантов технических специальностей и научных работников в области ветроэнергетики.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23483857 «Разработка и создание новой конструкции опытного образца ветроэнергетической установки со сложной геометрической формой лопастей»).

УДК 621.548
ББК 31.62

ISBN 978-601-362-340-5

© Карагандинский университет
имени академика Е.А. Букетова, 2025
© Танашева Н.К., Бахтыбекова А.Р., 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 СОСТОЯНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА.....	13
1.1 Ветроэнергетика: глобальные тенденции, вызовы и перспективы развития.....	13
1.2 Проблемы и перспективы устойчивого развития энергетического сектора Казахстана.....	18
1.3 Стратегические направления Казахстана в области развития возобновляемых источников энергии.....	22
1.4 Потенциал и перспективы развития ветроэнергетики в Казахстане как ключевого направления перехода к "зелёной" экономике.....	29
1.5 Эволюция, принципы работы и перспективы развития ветроэнергетических установок.....	36
1.6 Численные исследования обтекания цилиндрических тел воздушным потоком.....	53
1.7 Методы численного моделирования и оптимизации ветроэнергетических установок	71
1.8 Постановка цели и задачи исследования.....	80
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕ- ТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕ- СКОЙ ФОРМОЙ ЛОПАСТЕЙ.....	82
2.1 Математическое моделирование лопасти с активным элементом- дефлектором.....	89
2.1.1 Геометрическое моделирование лопасти.....	89
2.1.2 Система уравнений, описывающая течение воздуха вокруг исследуемого объекта	92
2.1.3 Граничные условия.....	94
2.1.4 Результаты математического моделирования лопасти с активным элементом-дефлектором	95

2.2 Математическое моделирование ветроэнергетической установки с двумя лопастями	107
2.2.1 Геометрия ветроэнергетической установки с двумя лопастями...	108
2.2.2 Результаты математического моделирования ветроэнергетической установки с двумя лопастями.....	113
2.3 Математическое моделирование трехлопастной ветроэнергетической установки.....	124
2.3.1 Геометрия трехлопастной ветроэнергетической установки.....	124
2.3.2 Результаты математического моделирования трехлопастной ветроэнергетической установки.....	127
2.4 Выводы по главе.....	134
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛОПАСТЕЙ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМОЙ.....	136
3.1 Трехкомпонентные аэродинамические весы, методика измерения действующих сил.....	139
3.2 Измерение скорости потока воздуха.....	140
3.3 Измерение угловой скорости вращения цилиндров.....	142
3.4 Измерение силы и момента силы.....	144
3.5 Измерение электрофизических параметров.....	145
3.6 Использование элементов теории подобия для анализа результатов измерений аэродинамических характеристик.....	146
3.7 Анализ неопределенности измерений.....	151
3.8 Лабораторный образец лопасти с активным элементом-дефлектором.....	152
3.9 Описание лабораторных макетов ветроэнергетических установок с двумя и тремя лопастями.....	158
3.10 Выводы по главе.....	159
4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДУЕМЫХ МАКЕТОВ.....	160

4.1 Сравнительный анализ численных и экспериментальных аэродинамических характеристик.....	160
4.1.1 Анализ аэродинамических характеристик экспериментальной цилиндрической лопасти с дефлектором в зависимости от материала дефлектора.....	165
4.1.2 Сравнительный анализ численных и экспериментальных характеристик цилиндрической лопасти с дефлектором при различных условиях обтекания.....	171
4.2 Исследование аэродинамических характеристик аэродинамических параметров двухлопастного макета ветроэнергетической установки.....	177
4.2.1 Сравнительный анализ численных и экспериментальных аэродинамических характеристик ветроэнергетической установки с двумя лопастями.....	177
4.2.2 Исследование влияния угла атаки на аэродинамические характеристики двухлопастной ветроэнергетической установки.....	180
4.3 Исследование аэродинамических характеристик макета трехлопастной ветроэнергетической установки.....	186
4.3.1 Сравнительный анализ численных и экспериментальных аэродинамических характеристик ветроэнергетической установки с тремя лопастями.....	186
4.3.2 Исследование влияния угла атаки на аэродинамические характеристики трехлопастной ветроэнергетической установки.....	190
4.4 Выводы по главе.....	195
5 ПОЛИГОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМОЙ ЛОПАСТЕЙ.....	197
5.1 Разработка и создание лопастей со сложной геометрической формой.....	197
5.2 Сборка и наладка опытного образца ветроэнергетической установки.....	199
5.3 Разработка электрической части трехфазного электрогенератора...	201
5.4 Результаты исследования электрофизических параметров ветроэнергетической установки.....	206
5.5 Климатические испытания опытного образца ветроэнергетической установки со сложной геометрической формой лопастей.	

Исследование силы тяги ВЭУ с учетом изменяющихся от температуры теплофизических параметров воздуха.....	213
5.6 Экономическое обоснование применения ВЭУ с активными дефлекторами.....	226
5.7 Выводы по главе.....	230
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	232
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	235
ПРИЛОЖЕНИЯ А.....	246
ПРИЛОЖЕНИЯ Б.....	247