

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

РГКП «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ» КН МОН РК

КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.А. БУКЕТОВА

Танашева Н.К.

**АЭРОДИНАМИКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦИЛИНДРОВ В
ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Монография

Караганда, 2018

УДК 533.6.011:536.24

ББК 30.124Я73

Т 18

*Рекомендовано к опубликованию Ученым советом
КарГУ им. Е.А. Букетова*

*Рекомендовано к опубликованию Ученым советом
РГКП «Институт прикладной математики» КН МОН РК*

Рецензенты:

Т.Э. Көкетай, д-р.физ.-мат. наук, профессор Карагандинского государственного университета им. Е.А. Букетова

С.М. Мухамедин, д-р.тех. наук, профессор Кокшетауского государственного университета им. Ш. Уалиханова

Т 18 Танашева Н.К.

Аэродинамика вращающихся цилиндров в ветроэнергетике: монография. – Караганда: Изд-во «Полиграфист», 2018.

ISBN 978-9965-39-719-6

В работе изучена проблема рационального и эффективного использования энергоресурсов, внедрения технологий энергосбережения и поиска возобновляемых источников энергии.

Полученные результаты имеют прикладной характер и могут быть использованы при разработки многолопастной ветротурбины с вращающимися цилиндрами переменного и постоянного сечения для натурных испытаний. Результаты экспериментальных исследований показывают, что применение вращающихся цилиндров переменного сечения позволяет использовать возникающую при обтекании дополнительную движущую силу за счет эффекта Магнуса и преобразовывать энергию воздушного потока, начиная со скорости 3м/с.

Предназначена для студентов высших учебных заведений, преподавателей, магистрантов, докторантов PhD технических специальностей и научных работников.

УДК 533.6.011:536.24

ББК 30.124Я73

ISBN 978-9965-39-719-6

© Танашева Н.К., 2018

ВВЕДЕНИЕ

Монография посвящена экспериментальному исследованию аэродинамики системы вращающихся цилиндров переменного сечения.

Одной из важнейших особенностей развития современного мира является повышенное внимание мирового сообщества к проблемам рациональности и эффективности использования энергоресурсов, внедрения технологий энергосбережения и поиска возобновляемых источников энергии. Возрастание потребности человечества в энергетических ресурсах приводит к необходимости поисков альтернативных источников энергообеспечения и их более широкого использования.

В настоящее время энергия и ее источники являются наиболее актуальной проблемой не только в Республике Казахстан, но и во всем мире. Все чаще на самых высоких государственных и международных уровнях обсуждаются вопросы обеспечения все возрастающих потребностей во всех видах энергии, увеличения ее стоимости, истощения природных ресурсов, вредного воздействия на окружающую среду, опасности глобального потепления и т.д.

Без сомнения, одной из главных задач для современного этапа динамичного развития экономики Казахстана является рациональное использование энергетических ресурсов, при этом большая роль отводится внедрению возобновляемых источников энергии. По поручению Президента Н.А. Назарбаева, Правительство РК разработало Национальную программу развития ветроэнергетики Республики Казахстан на 2007–2015 гг. с перспективой до 2024 г. [1]. Данная программа подготовлена в рамках совместного проекта Министерства энергетики и минеральных ресурсов РК и Программы развития ООН «Казахстан – инициатива развития рынка ветроэнергии».

В настоящее время, одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики и решения экологических проблем Казахстана является использование возобновляемых энергетических ресурсов и реализация программ энерго- и ресурсосбережения. В Посланиях Президента Республики Казахстан – Лидера Нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана от 14 декабря 2012 г. «Стратегия «Казахстан – 2050» определяется новый политический курс состоявшегося государства, указывается на необходимость развития производства альтернативных видов энергии и активного внедрения технологий, использующих энергию солнца и ветра.

В Послании Президента РК народу Казахстана 2014 г. в качестве третьего приоритетного направления также отмечаются проблемы развития энергетической инфраструктуры. Указывается, что «ограниченность магистральных сетей вызывает дефицит электроэнергии...» во многих регионах страны. Отмечается необходимость

создания «сбалансированного энергообеспечения казахстанскими электростанциями всех регионов страны».

В последнее десятилетие существенно изменились требования к производству энергии. В то же время и глобальные экологические проблемы не остаются без внимания, так как практически все электростанции построены в 70-х годах прошлого века, а имеющееся оборудование и используемые технологии требуют полной или частичной замены или реконструкции.

Потенциал возобновляемых энергетических ресурсов (гидроэнергия, ветровая и солнечная энергия) в Казахстане весьма значителен. К их числу относится в первую очередь ветроэнергетика, для развития которой чрезвычайно важно иметь достоверную информацию о режиме ветра на территории предполагаемого размещения ветроэнергетических установок. Следует отметить, что ветровая энергия не загрязняет окружающую среду и способна производить чистую, неиссякаемую энергию в локальной местности.

Но, несмотря на это, процент выработки альтернативной энергии в Казахстане лишь около 1% от общего количества. Это связано с тем, что на большей части территории Казахстана расположены зоны с низкими значениями среднегодовых скоростей ветра. Имеющиеся ветродвигатели различной конструкции при малых скоростях ветра не всегда обладают достаточной эффективностью. Работоспособность некоторых конструкций ветродвигателей в настоящее время мало исследована. Одним из малоисследованных перспективных ветродвигателей является ветроустановка с лопастями в виде вращающихся цилиндров переменного сечения.

В связи с этим создание ветроэнергетических установок с цилиндрическими лопастями переменного сечения, эффективно работающих в условиях низких среднегодовых скоростей ветра, является весьма актуальным и соответствует приоритетам развития науки в Республике Казахстан. Данная проблема на современном этапе развития науки в нашей республике приобрела еще большую актуальность связи с подготовкой Казахстана к всемирной выставке достижений науки и техники «EXPO-2017». Основные тематические направления «EXPO-2017» – «Энергетика будущего» и «Экологически чистая энергетика».

Автор монографии надеется, что приведенные материалы могут быть полезны научным сотрудникам, инженерно-техническим работникам при разработке ветроэнергетических установок для малых скоростей ветра. Также книга полезна для студентов, магистрантов и докторантов при изучении аэродинамики возобновляемых источников энергии.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования ИРН AP05131520 Разработка и создание опытного образца ветроэнергетической установки для альтернативного электроснабжения с применением электрогенератора отечественного производства

1 АЭРОДИНАМИКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОПЕРЕЧНЫМ И ПРОДОЛЬНОМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА И ПРИЛОЖЕНИЯ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

В течение последних лет возобновляемые источники энергии (ВИЭ) позиционируются Казахстаном как один из векторов развития энергетического комплекса. Ветроэнергетика – это не только экологически «чистый» источник энергии, она также поддерживает социально-экономическое развитие, энергетическую безопасность и снижает зависимость электроэнергетики от цен на топливо [2].

Перспективы использования ветроэнергетики определяются наличием соответствующих ветроэнергетических ресурсов. Казахстан исключительно богат ветровыми ресурсами. Порядка 50 % территории Казахстана имеет среднегодовую скорость ветра 4-5 м/с, а ряд районов – 6 м/с и более, что предопределяет очень хорошие перспективы для использования ветроэнергетики. По оценкам экспертов, Казахстан – одна из стран мира, с наиболее подходящими условиями для развития ветроэнергетики [3-6].

Основными преимуществами ветроэнергетики являются отсутствие загрязнения окружающей среды – производство энергии из ветра не приводит к выбросам вредных веществ в атмосферу или образованию отходов; простое обслуживание, быстрая установка, низкие затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию [7].

В Центральной зоне, куда входит Карагандинская область, складывается дефицит мощности в размере 619 МВт, который в перспективе возрастет до 1050 МВт. Планируется ввод новых мощностей на угле в г. Караганде в размере 980 МВт, поэтому, за исключением энергоизбыточной северной зоны, будет сохраняться региональный дефицит мощности и электроэнергии [8].

9 февраля 2011 г., в г. Астане в рамках Программы развития ООН в Казахстане и ОЮЛ «Казахстанская электроэнергетическая ассоциация» подписан Меморандум о сотрудничестве в области развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Казахстане. Эту дату можно считать отправной точкой, началом деятельности Комитета по возобновляемым источникам энергии ОЮЛ «Казахстанская Энергетическая Ассоциация».

Главная цель карты ветров — создание основы для системного подхода по изучению ветровых ресурсов страны, их качественному анализу и подготовке рекомендаций по выбору мест размещения ветроэлектростанций для получения электроэнергии. Ветровая карта представляет собой карту местности с распределением долгосрочной скорости ветра на высоте 80 метров (м) над поверхностью земли в

соответствии со шкалой скорости ветра. Ветровая карта для всей территории Казахстана подготовлена со степенью разрешения 9 км. Для ряда районов Республики Казахстан подготовлены ветровые карты со степенью разрешения 100 м [9].

Ниже представлена карта ветров Казахстана за 2013 г. составленная по данным аналитических институтов (рисунок 1.1).

Ветряные электростанции строятся в местах с высокой средней скоростью ветра — от 4,5 м/с и выше.

По приведенным ниже данным видно (таблица 1, рисунок 1.2), что самым подходящим местом для установки ветроэлектростанций в Казахстане являются Джунгарские ворота в Южно-Казахстанской области – природная аэродинамическая труба. Уже много лет ученые рассматривают вопрос об использовании ветровой энергии в данном регионе. Научный проект в ветровой энергетике получил название «Джунгарские ворота», но, к сожалению, 2 ветрогенератора в Джунгарских воротах, которые были сданы в эксплуатацию в конце 2010 г., простаивают по нескольким причинам. Одна из основных причин – техническая. Из-за сильного ветра обычные ветроустановки не выдерживают нагрузки. По некоторым данным потенциал Джунгарских ворот составляет 1 трлн кВт·ч/г. Прогнозные сценарии по выработке ветровой энергии предусматривают выработку около 250 МВт в год в 2015 г. и около 2000 МВт – к 2030 г. [10].

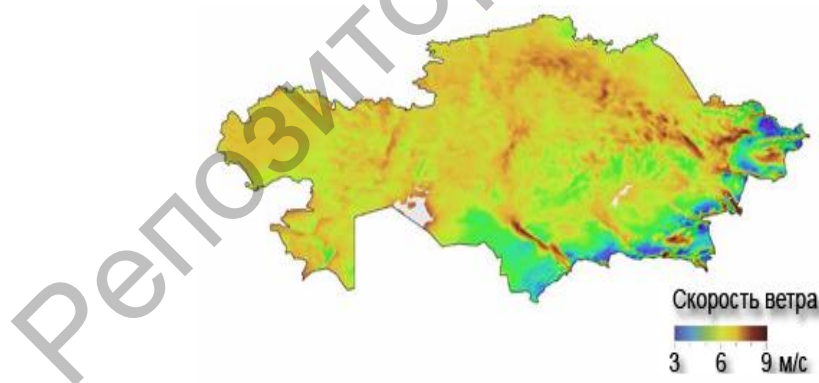


Рисунок 1.1 – Карта ветров на территории Казахстана [9, с.1]

В последнее время интерес альтернативных источников энергии в мире стал особенно актуален. Для снижения негативного влияния органического топлива на окружающую среду, экономии топливно-энергетических ресурсов, обеспечения электроэнергией особенно труднодоступных и отдаленных регионов требуется развитие возобновляемых источников энергии. Одним из основных развивающихся видов возобновляемых в мире источников энергии является ветроэнергетика [11].

Таблица 1 – Перечень исследованных площадок для строительства ВЭС [10, с.3]

Наименование места площадки	Область	Скорость воздушного потока (м/с) на высоте 50 м.	Предполагаемая мощность ветроэлектростанции, МВт
Джунгарские ворота	Алматинская	9,7	50
Шелекский коридор	Алматинская	7,7	100
Кордай	Жамбылская	6,1	10-20
Жузымдык – Чайан	Южно-Казахстанская	6,7	10-20
Астана	Акмолинская	6,8	20
Ерейментау	Акмолинская	7,3	50
Каркаралинск	Карагандинская	6,1	10-20
Аркалык	Костанайская	6,2	10-20
Атырау	Атырауская	6,8	100
Форт-Шевченко	Мангыстауская	7,5	50

Ниже на рисунке 1.2 представлена диаграмма средней скорости ветров регионов Казахстана.



Рисунок 1.2 – Диаграмма – анализ средней скорости ветров регионов Казахстана [10, с.2]

Для крупномасштабного использования ветроэнергетики с географической и метеорологической точки зрения Казахстан является благоприятной страной.

В Концепции перехода Республики Казахстан к устойчивому развитию на 2007-2024 гг. предполагается, что доля альтернативных источников энергии должна составить 5% в общем энергетическом балансе страны к 2024 г. [12-16].

Но, несмотря на это, практически не осваиваются в условиях существующего дефицита рынка электроэнергии ветроэнергетические ресурсы Казахстана. Главной причиной является неконкурентность ветроэнергетики на рынке электроэнергии. Стоимость за электроэнергию

от ВЭС с учетом возврата инвестиций может составлять порядка 8-12 тг/кВтч [15, с.180].

Таким образом, разработка и внедрение ветроэлектростанции при малых ветровых потоках для производства электроэнергии в настоящее время являются одной из главных целей промышленности.

1.1 Актуальность исследуемой темы

В перспективе развитие ветроэнергетики в Казахстане обусловлено высоким потенциалом ветровой энергии в РК и «Стратегией территориального развития Республики Казахстан до 2024 года», согласно которой намечены мероприятия по проработке вопроса развития ветроэнергетики в регионах, обладающих значительным потенциалом ветровой энергии. В настоящее время работы по использованию энергии ветра ведутся преимущественно на территориях с хорошими ветровыми условиями.

Для разработки и создания ветроэлектрических установок (ВЭУ) для большей части территории Казахстана со среднегодовой скоростью ветра менее 6 м/с, при частых перепадах скорости воздушного потока с политропной розой ветров, требуется поиск новых технических решений, которые могут обеспечивать энергоэффективность ВЭУ в купе с их невысокой стоимостью и небольшими массогабаритными размерами [17].

Учёными Казахстана созданы ВЭУ, учитывающие некоторые особенности климата республики, такие как скорость ветра более 25 м/с и резкие порывы. В основном они представляют собой вертикально-осевые ветровые турбины [18-27].

Так, на основе изобретения Майлабаева М.М., в 2000 г. разработана конструкция ветроустановки, работающая в диапазоне 3-60 м/с, имеющая низкую себестоимость электроэнергии (1,5 тг/ кВт·ч) и превосходящая другие ВЭУ в экологическом аспекте (частота вращения двигателя до 40 оборотов в минуту исключает низкочастотные колебания и шум) [28].

Однако преимущества наблюдаются лишь при мощности не более 5 кВт, а при увеличении мощности снижается эффективность ВЭУ вследствие необходимого увеличения диаметра ВК, что приводит к снижению угловой скорости и смыканию лопастей полуцилиндрической формы при повороте к направлению ветра параллельно рабочей ометаемой поверхности.

В Институте горного дела им. Д.А. Кунаева под руководством Буктукова Н.С. разработана перспективная конструкция «ВЭС Буктукова» [29], в которой изменение площади ометаемой поверхности происходит не сдвигом полуцилиндров, а поворотом, что позволяет значительно увеличить мощность.

На рисунке 1.3 представлен фотоснимок ветроэлектростанции Буктукова.



Рисунок 1.3 – ВЭС Буктукова [29, с.2]

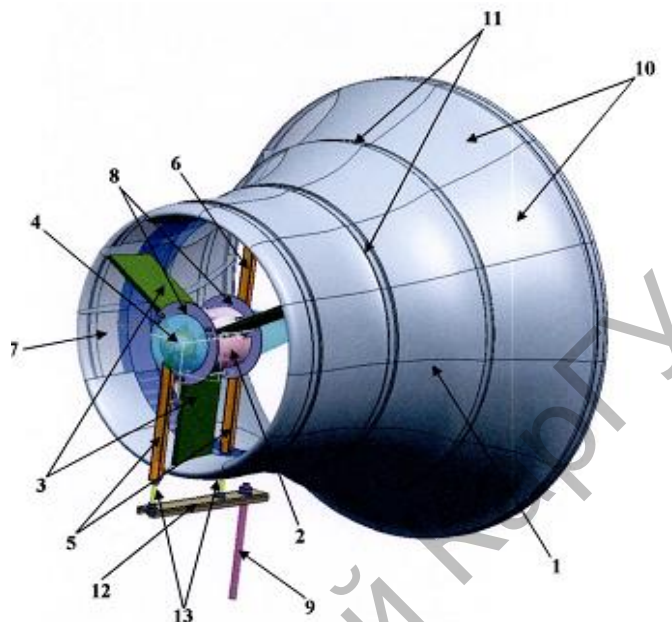
Ветроэлектростанция Буктукова стабильно вырабатывает электрическую энергию заданной проектной мощности и не разрушается при ураганных порывах. Ометаемая площадь поверхности лопастей автоматически снижается при повышении скорости ветра и возрастает при ее уменьшении, обеспечивая широкий диапазон скоростей используемого воздушного потока. При штормовой скорости ветра ВЭС принимает форму тора или трубы.

Однако существуют конструктивные сложности при регулировании угла установки лопастей, также эта конструкция малоэффективна при малых скоростях ветра.

В 2004 г. совместно с российскими специалистами удалось создать опытный образец композиционной ветроэнергетической установки с диффузором - ВЭУД [30]. Основные параметры: мощность 1 кВт, масса 95 кг, высота башни 4 метра, напряжение 220 В, ток 5 А, частота 50 Гц, срок эксплуатации - 20 лет, ориентировочная цена при серийном производстве 2500 долл. США, материал установки – стеклопластик. Установка напоминает по форме и структуре юрты, которая легко монтируется за 2-3 часа тремя рабочими без подъемных устройств и может быть перемещена вместе с ней в другую местность.

Известна также ветроэнергетическая установка диффузорного типа, разработанная доктором технических наук, профессором Байшагировым Х.Ж. [31].

На рисунке 1.4 представлена ветроэнергетическая установка, разработанная Байшагировым Х.Ж.



1– диффузор, 2 – двухконсольный генератор, 3 – лопасти, 4 – консоли, 5,6 – пилоны, 7 – силовое кольцо, 8 – ободы, 9 – мачта-опора, 10 – сегменты, 11 – стяжные ленты, 12 – плато поворотного устройства, 13 – нижние концы

Рисунок 1.4 – Ветроэнергетическая установка [31, с. 3]

Полезную модель (рисунок 1.4) могут использовать для получения электрической энергии за счет использования силы ветра. ВЭУД состоит из диффузора (1), генератора (2), лопастей (3), силового кольца (7), мачты-опоры (9), плато поворотного устройства (12). Согласно полезной модели в качестве генератора используется обращенный двухконсольный генератор, обе консоли (4) обращенного генератора с нижней стороны закреплены жестко посредством двух пилонов (5,6) через силовое кольцо на плато поворотного устройства, и одна из консолей дополнительно с верхней стороны жестко закреплена посредством третьего пилон на силовом кольце.

Работает модель следующим образом: при взаимодействии воздушного потока с поверхностью диффузора (1) с помощью плато поворотного устройства (12) происходит его «самоориентирование» так, что узкая часть диффузора будет направлена прямо на ветер. При скорости воздушного потока 10 м/с и более происходит «самопуск» установки, приводящий во вращение корпус обращенного генератора (2), вырабатывающего электрический ток.

Основными недостатками установки являются недостаточно высокая способность к самоориентации и то, что они начинают производительно работать при скоростях ветра больше 6 м/с.

К наиболее распространенному типу ветроэнергетической установки карусельного типа относится ветроагрегат Бидарье, разработанный группой учёных под руководством Ершина Ш.А. По словам авторов, с аномально высоким $K_{изв}$, в которой на двух соосных валах, связанных с двумя независимыми генераторами, укреплены две одинаковые по размерам ветротурбины Дарье с одинаковыми (или противоположными) направлениями вращения. Это даёт возможность с одной и той же ометаемой поверхности снять большее количество энергии ветра, так как каждый раз лопасти турбин, обходя наветренную сторону, снимут по 26 % энергии ветра с набегающего потока, а с подветренной стороны – только по 12,5 %, в итоге теоретический предел $K_{изв}$ доведён до 77 %, практически реализован коэффициент 0,63 [32–36].

Коэффициент использования энергии ветра у аппарата Бидарье на 40–60 % выше по сравнению со всеми известными в настоящее время ветроагрегатами, что позволяет снизить стоимость используемой энергии ветра и повысить конкурентоспособность аппарата Бидарье. Данное изобретение связано с созданием ветродвигателя карусельного типа с высокой удельной мощностью по сравнению со всеми известными. Техническим результатом является повышенное извлечение энергии из ветрового потока при одной и той же величине ометаемой лопастями двигателя площади. Таким образом, это приводит к существенному улучшению технико-экономических показателей предлагаемой ВЭУ [37–38]. Имеет достаточно высокий максимальный коэффициент использования ветровой энергии. Вследствие вертикально-осевого его расположения направление ветра не имеет значения [39–42]. Лопасти располагаются равномерно по кругу радиуса r_0 относительно центрального вертикального вала вращения и соединены с ним одним из двух вариантов: с помощью «махов» или «тропоскино». Вал вращения внутри башни центрируется подшипниками.

Махами называются горизонтально расположенные крылья размаха, к торцам которых крепятся рабочие лопасти буквой «Т» или «Г» так, чтобы хорда лопастей была направлена по касательной к окружности радиуса r_0 .

Крепление «тропоскино» заключается в том, что упругие рабочие лопасти сгибаются в виде лука, и оба конца прикрепляют к валу вращения. При работе двигателя лопасти приобретают форму принудительно вращаемой провисшей веревки – тропоскино. Как уже отмечалось выше, у двигателя Дарье максимальное значение равно 0,45. Несмотря на то, что это неплохой показатель эффективности работы двигателя, предлагаемый нами вариант конструкции ветродвигателя позволяет увеличить эффективное значение этого коэффициента в 1,6 раза.

На рисунке 1.5 показан ветроагрегат Бидарье.



Рисунок 1.5 – Ветроагрегат Бидарье с противоположным вращением турбин мощностью 7 кВт [32, с.42]

Конструкция представляет собой 2 совмещенных ветродвигателя Дарье, вследствие чего получила название «Бидарье». Наибольший эффект получается при использовании двухлопастных ветродвигателей, развернутых относительно друг друга на угол 90° . Тогда каждый раз лопасти обоих двигателей, обходя наветренную сторону, снимут по 26 % энергии с непрерывно натекающего невозмущенного потока и через собственные валы передадут ее каждой своему генератору тока. При этом, естественно, с подветренной стороны снимается уже энергия с вдвое ослабленного ветра.

Этот вид ветродвигателя хорошо освоен производством и выпускается во многих странах.

Однако находящаяся на значительной высоте горизонтальная ось вращения требует либо расположения генератора тока на такой же высоте с целью прямого соединения с валом, либо наличия передаточного узла на вертикальной вал, соединенный с генератором, расположенным на уровне земли.

Широко известна конструкция ветроэнергетического агрегата (ВЭА) Болотова А.В., постоянно восприимчивая к ветру любого направления и

скорости за счёт возникающего при вращении роторов гироскопического эффекта, в которых увеличение мощности турбины осуществляется за счёт наличия направляющего аппарата [43-50].

На рисунке 1.6 показан ветроэнергетический агрегат Болотова.

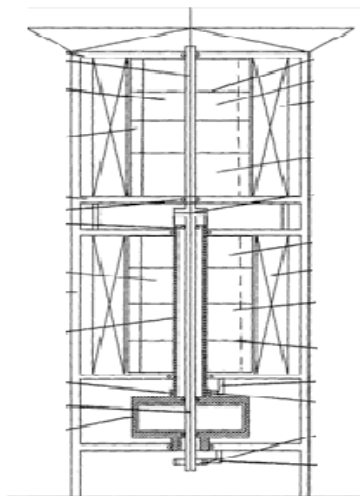


Рисунок 1.6 - Ветроэнергетический агрегат Болотова, содержащий два блока [51, с.3]

Изобретение [51] (рисунок 1.6) относится к энергетике, в частности, к использованию энергии ветра для выработки электроэнергии с применением вертикальных осевых ветровых турбин. ВЭА с вертикальной осью вращения ветровой турбины включает цилиндрические блоки со статорами, играющими роль направляющих аппаратов для ветра, поступающего с любой стороны, и роторами, преобразующими энергию ветра во вращательное движение их валов, и образуется двумя цилиндрическими блоками, разделенными на ярусы, одинаковые или разные по высоте и диаметрам. Роторы блоков выполнены с возможностью вращения в противоположных направлениях, причем вал ротора нижнего блока имеет трубчатое сечение и через него проходит вал ротора верхнего блока. Часть ярусов выполнена с возможностью иметь жесткую связь с валом при пуске ВЭА и отсутствие связи в рабочем режиме. Электрогенератор имеет подвижный статор, выполненный с возможностью вращения в противоположную от ротора сторону, снабженный трубчатым валом, механически соединяемым с трубчатым валом нижнего блока, а расположенный внутри трубчатого вала статора вал ротора генератора соединен с валом верхнего блока. Техническим результатом изобретения является повышение коэффициента использования энергии ветра, упрощение конструкции, снижение габаритов и веса применяемых генераторов [51, с.3].

Несмотря на преимущества, ВЭУ имеет существенные ограничения, препятствующие широкому распространению: низкий стартовый момент ветротурбины и необходимость моторизированного старта; специфика

геометрии турбины ведет к относительно быстрому разрушению лопастей вследствие усталостных нагрузок, а также малоэффективен при малых скоростях воздушного потока.

Как следует из всего изложенного выше, имеются объективные предпосылки для более интенсивного развития малой ветроэнергетики Казахстана и поиска новых технических решений для повышения эффективности работы разрабатываемых ВЭУ.

На сегодня конкурентоспособных на территории Казахстана ветроэнергетических установок малой мощности с горизонтальной осью вращения ветродвигателей от отечественных разработчиков практически нет, вследствие чего работа в области совершенствования ВЭУ именно с горизонтальной осью вращения ВД представляется достаточно актуальной.

Далее для большего понимания аэродинамики вращающихся цилиндров рассмотрим исследование аэродинамических характеристик коротких цилиндров.

1.2 Аэродинамика коротких цилиндров в поперечном и продольном потоке воздуха

Исследования аэродинамики и установление закономерностей течения вокруг цилиндров конечной длины с различными формами торцов в свободном безграничном потоке воздуха при продольном и поперечном обтекании в широком диапазоне геометрических и режимных параметров носят отрывочный характер и не имеют широкого диапазона изменения геометрических и режимных параметров. Как правило, при расчетах пользуются зависимостями, которые получены до бесконечно длинных цилиндров, но практика показывает, что отношение длины цилиндра к его диаметру необходимо обязательно учитывать при практических расчетах. Установление зависимостей для коротких цилиндров с различной геометрией торцов с учетом изменения относительной длины необходимо для многих инженерных расчетов, подробно изучены в работах С.И. Исатаева и О. Жангунова [53].

Действительно, вблизи концов цилиндра конечной длины наблюдается значительное отступление от картины плоского течения – преобладает пространственное течение. Это, в свою очередь влияет на всю аэродинамику обтекаемого тела. Существенное влияние на коэффициенты аэродинамического сопротивления цилиндра ограниченной длины показано в работе [54], в которых исследованы цилиндры с плоскими торцами. При относительной длине $L/D = 40$ значение этого коэффициента на 18 % отличается от данных для бесконечного цилиндра.

Уменьшение относительной длины цилиндра приводит к существенному снижению подъемной силы и лобового сопротивления [55]. Показано, что при $L/D = 1,0$ сопротивление короткого цилиндра в 1,3 раза выше, чем шара того же размера. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о существенном влиянии формы торцов на аэродинамику коротких цилиндров. Теоретический расчет обтекания коротких цилиндров со сферическими торцами пока не представляется возможным, даже для простейшего случая потенциального потока идеальной жидкости. Однако некоторое теоретическое представление о влиянии конечной длины поперечно обтекаемого цилиндра можно получать, рассматривая поперечное обтекание идеальной несжимаемой жидкостью эллипсоидов вращения, в зависимости от их удлинения a/b , где a и b – длины большой и малой полуосей эллипсоида. Поэтому сначала рассмотрим сначала расчет поперечного обтекания эллипсоида вращения несжимаемой идеальной жидкостью.

1.2.1 Профили поверхности в виде эллипсоида вращения

Для расчета поперечного обтекания эллипсоида вращения расположим фокусы эллипсоида вдоль оси x , набегающий однородный поток, направленный вдоль оси y , и используем эллиптическую систему координат (ξ, ψ) , связанную с (r, x) в меридиональной плоскости соотношениями [56]

$$\begin{cases} x = c \times ch \xi \times \cos \psi \\ r = c \times sh \xi \times \sin \psi \\ y = r \times \cos \varepsilon \end{cases}, \quad (1.1)$$

где c – фокусное расстояние эллипса.

На рисунке 1.7 представлены схема обтекания эллипсоида вращения и продольный разрез цилиндра со сферическими торцами.

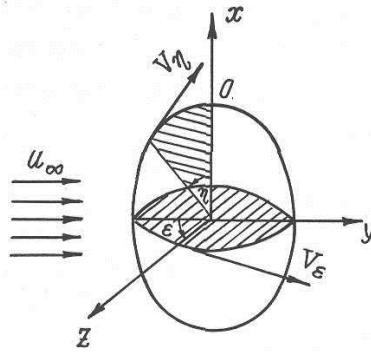


Рисунок 1.7 – Схема обтекания эллипсоида вращения и продольный разрез цилиндра со сферическими торцами

Положим $ch\xi = \beta$, $\cos\psi = \mu$. Тогда вместо (1.1) будем иметь

$$\begin{cases} x = c \times \beta \times \mu \\ r = c \times \sqrt{\beta^2 - 1} \times \sqrt{1 - \mu^2} \\ y = r \times \cos \varepsilon \end{cases} \quad (1.2)$$

Ввиду громоздкости математических преобразований, ссылаясь на подробности расчетов, запишем выражение для потенциала скорости поперечного обтекания эллипсоида вращения

$$\varphi = cV_\infty \sqrt{\beta^2 - 1} \times \sqrt{1 - \mu^2} \left\{ c_1 \left[\frac{1}{2} \ln \frac{\beta + 1}{\beta - 1} - \frac{\beta}{\beta^2 - 1} \right] + 1 \right\} \cos \varepsilon \quad (1.3)$$

Зная потенциал скорости (1.3), можно вычислить распределение скорости по поверхности эллипсоида в центральном меридиональном сечении ($x=0$):

$$V_\varepsilon = \frac{1}{H_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon} = -4V_\infty \sin \varepsilon \cdot \frac{e^3}{2e - 4e^2 - (1 - e^2) \ln \frac{1+e}{1-e}}, \quad (1.4)$$

в сечении ($z=0$):

$$V_\mu = \frac{1}{H_\mu} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} = \frac{4V_\infty \cos \varepsilon \cdot \cos \psi \cdot \sqrt{1 - e^2} \cdot e^3}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \psi} \cdot \left[2e - 4e^3 - (1 - e^2) \ln \frac{1+e}{1-e} \right]}, \quad (1.5)$$

где $H_\varepsilon = c \sqrt{\beta^2 - 1} \times \sqrt{1 - \mu^2}$ и $H_\mu = c \sqrt{\frac{\beta^2 - \mu^2}{1 - \mu^2}}$ – коэффициенты Ляме.

При $e \rightarrow 0$ формулы (1.4) и (1.5) совпадают между собой и дают распределение скорости по поверхности цилиндра с полусферами на торцах

$$V_\varepsilon = \frac{3}{2}V_\infty \sin \varepsilon \quad \text{и} \quad V_\mu = \frac{3}{2}V_\infty \cos \psi \quad (1.6)$$

Подчеркнем, что для передней критической точки $\varepsilon = 0$, $\psi = \frac{\pi}{2}$. В другом предельном случае, когда $e \rightarrow 1$, распределение скорости по (1.4) перейдет в распределение скорости по поверхности цилиндра бесконечной длины $V_\varepsilon = 2V_\infty \sin \varepsilon$.

При $\varepsilon = 0$ формула (1.5) описывает распределение скорости в меридиональном сечении по длинной оси эллипсоида. Расчеты показывают, что при $e \rightarrow 1$ максимальная скорость у закругленного торца эллипсоида вращения (практически бесконечно длинного цилиндра с закругленными торцами) также равна $2V_\infty$, как и в миделевом сечении бесконечно длинного цилиндра. Зная значение скорости из формул (1.4) и (1.5), можно рассчитать распределение давления по поверхности эллипсоида вращения с различной степенью удлинения a/b , которое приблизительно характеризует распределение давления по поверхности коротких цилиндров со сферическими торцами такой же длины $\frac{L+D}{D} = \frac{a}{b}$.

На рисунке 1.8 показано распределение давления в центральном сечении по поверхности цилиндров различной длины при $Re = 11,2 \times 10^4$.

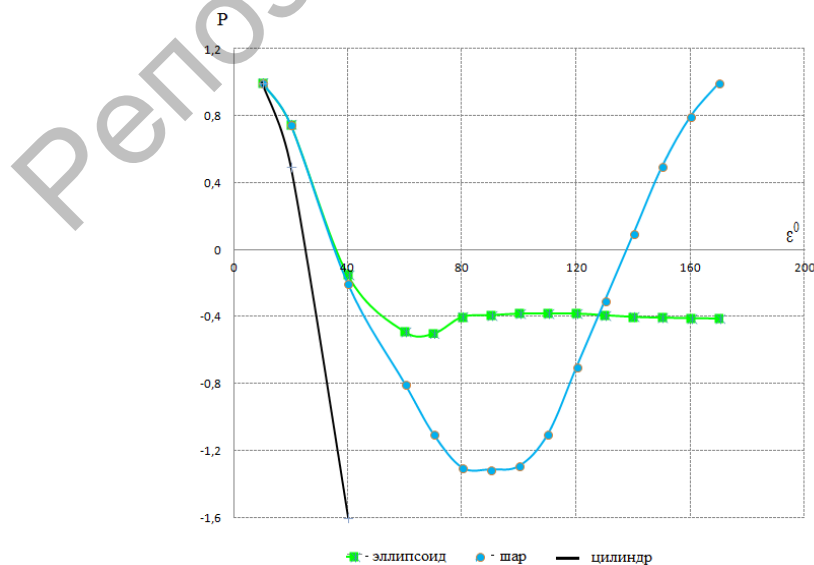


Рисунок 1.8 – Распределение давления в центральном сечении по поверхности цилиндров различной длины при $Re = 11,2 \times 10^4$

Как видно из рисунка 1.8, распределение давления по поверхности в поперечном центральном сечении, перпендикулярном к большой оси эллипсоида, меняется от распределения давления по поверхности шара до распределения, совпадающего с распределением давления до цилиндра бесконечной длины [57].

На рисунке 1.9 приведены расчетные зависимости распределения безразмерного коэффициента давления по поверхности эллипсоида вращения в центральном сечении, перпендикулярном его длинной оси.

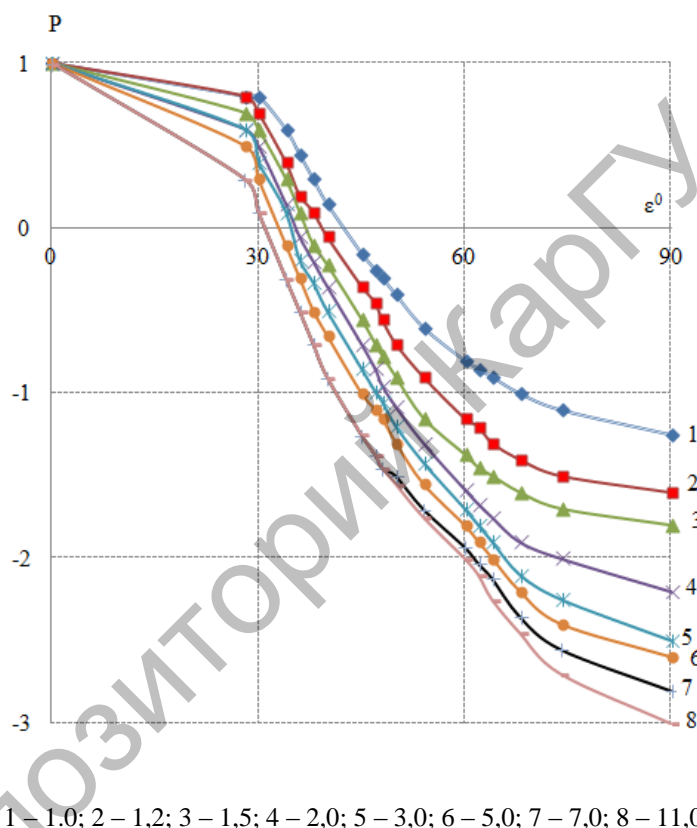


Рисунок 1.9 – Распределение безразмерного коэффициента давления по поверхности эллипсоида вращения в центральном сечении, перпендикулярном к его длинной оси по поверхности эллипсоида для различных значений отношения длин полуосей a/b

С целью выявления влияния ограниченности длины на аэродинамические характеристики цилиндрических тел со сферическими торцами опыты проводились с изменением геометрических параметров, начиная от сферы до цилиндра бесконечной длины. Опыты проводились при фиксированных значениях числа Рейнольдса в интервале $(4-30)10^4$. Данные получены для цилиндра с диаметром 50 мм.

В лобовой части цилиндра до точки отрыва пограничного слоя наблюдается постепенное расслаивание опытных данных для разных удлинений. С ростом длины короткого цилиндра значение безразмерного

давления при фиксированном угле уменьшается, проявляется постепенный переход от распределения давления, характерного пространственному движению – обтеканию шара, к распределению давления, характерного плоскому движению – обтеканию бесконечно длинного цилиндра.

Как видно, экспериментальные данные для коротких цилиндров со сферическими торцами и эллипсоидов вращения при одинаковых удлинениях удовлетворительно согласуются друг с другом [58].

На рисунке 1.10 показано распределение давления в центральном сечении в плоскости $x=0$, приведены точки для эллипсоида вращения и для коротких цилиндров со сферическими торцами.



Рисунок 1.10 – Распределение коэффициента давления по поверхности эллипсоида вращения ($a/b=6.0$) и цилиндра со сферическими торцами ($(l+d)/d=6.0$) в центральном сечении плоскостей $x=0$ и $z=0$

Из рисунка видно, что с удалением от центрального сечения значение максимального давления в точке $\varepsilon=0$ уменьшается благодаря появлению составляющей скорости, а в отрывной зоне значение разрежения одинаково во всей кормовой области течения. Аналогичные результаты получены и для других цилиндров.

На рисунке 1.11 (а, б) показано распределение давления вдоль поверхности коротких цилиндров и эллипсоида вращения. Были рассчитаны распределения скорости вдоль линии, проходящей через переднюю критическую точку.

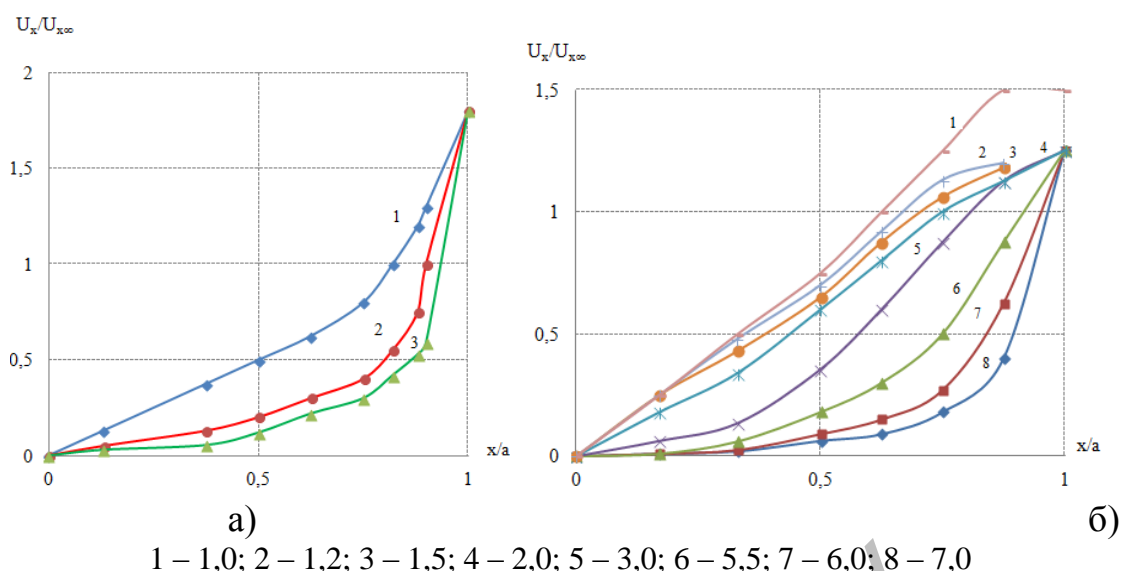


Рисунок 1.11 – Распределение скорости вдоль поверхности коротких цилиндров и эллипсоида вращения, проходящей: а) через переднюю критическую точку; б) в плоскость $z=0$; линия расчет, точки – эксперимент для цилиндров с различными удлинениями $\lambda=1-7$, $(l+d)/d$

Как видно, распределение скорости вдоль линии передней критической точки по поверхности цилиндра качественно аналогично распределению скорости по поверхности эллипсоида соответствующей длины. Представляет интерес сравнение расчетных и экспериментальных значений минимального давления на центральном сечении. При обтекании эллипсоида идеальной жидкостью быстро стремится к его значению для бесконечно длинного цилиндра с ростом относительной длины тела, тогда как экспериментальные значения минимального давления на поверхности тела изменяются значительно медленнее с ростом l/d .

Для того, чтобы изучить влияние относительной длины коротких цилиндров на аэродинамику течения в следе за телом были измерены профили средней скорости в различных сечениях в центральных плоскостях, совпадающих с осью цилиндра (плоскость $z=0$) и перпендикулярных оси цилиндра (плоскость $x=0$) [59]. Распределения профилей скорости во взаимно перпендикулярных плоскостях в следе за цилиндрами с удлинениями 1,2 и 3,0 приведены на рисунках 1.13 и 1.14. Здесь верхние половины рисунков соответствуют распределению скорости в плоскости $z=0$, а нижние – распределению скорости в плоскости $x=0$.

На рисунках 1.13, 1.14 приведена зависимость длины зоны циркуляционного течения за цилиндром от его относительной длины. Длина циркуляционной зоны за цилиндром определялась из распределения скорости вдоль оси следа.

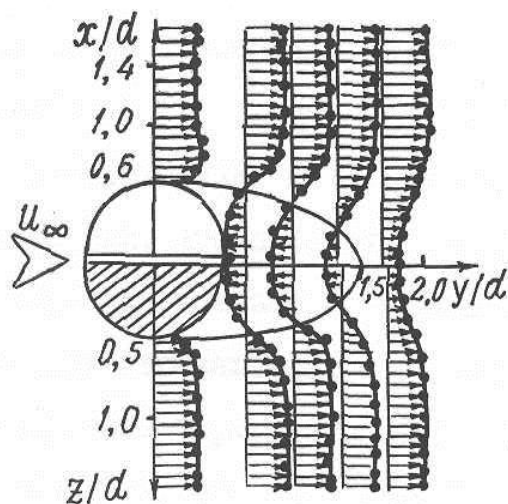


Рисунок 1.13 – Распределение профилей скорости во взаимно перпендикулярных плоскостях в следе за цилиндрами при $(l + d)/d = 1,2$

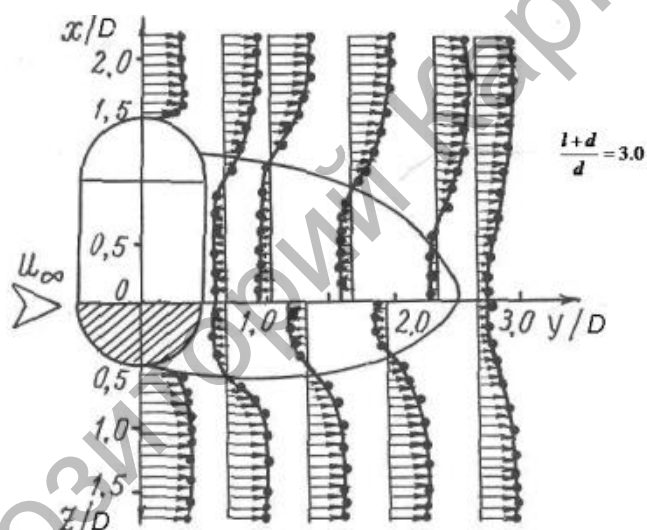


Рисунок 1.14 – Распределение профилей скорости во взаимно перпендикулярных плоскостях в следе за цилиндрами при $(l + d)/d = 3$

По данным измерений выяснено, что существует сложная зависимость размеров зоны циркуляционного течения в следе от относительной длины цилиндра со сферическими торцами. Установлено, что длина циркуляционной зоны возрастает от значения $\lambda = L/D = 1.34$, соответствующего длине циркуляционной зоны за шаром.

С ростом удлинения $\lambda > 5$ симметричность отрыва вихрей постепенно нарушается. Появляется некоторый «запоздалый» срыв то с одной, то с другой стороны цилиндра и, как следствие этого, тороидальность (или эллипсоидальность) формы вихрей еще сильнее искажается. С дальнейшим увеличением удлинения $\lambda > 12$ отрыв вихрей происходит попеременно то с одной, то с другой стороны удлиненного цилиндра. В этом случае вихри располагаются за цилиндром в «шахматном» порядке, повторяя характер

«вихревой дорожки» Кармана [60-62]. Полученные результаты визуальных исследований позволили сделать вывод о наличии регулярно срывающихся вихрей за короткими цилиндрами и о возможности количественного исследования этого явления.

Аналитический расчет продольного обтекания коротких цилиндров со сферическими торцами даже при обтекании идеальной жидкостью сложен. Поэтому для качественной оценки длины цилиндра на аэродинамику его обтекания рассмотрим обтекание вытянутого эллипсоида вращения идеальной жидкостью. Как указано выше, относительное распределение скорости по поверхности вытянутого эллипсоида при обтекании идеальной несжимаемой жидкостью определяется формулой (1.7)

$$\frac{V_{\eta}}{V_{\infty}} = \frac{e^2 \cdot \sin \eta}{e - \frac{1}{2}(1 - e^2) \ln \frac{1+e}{1-e} \sqrt{\frac{1-e^2}{e^2} + \sin^2 \eta}}. \quad (1.7)$$

Давление в области отрывного течения примерно постоянно и близко к давлению невозмущенного потока. Из распределения давления по поверхности эллипсоида и короткого цилиндра с соответствующим удлинением видно, что основное отличие обусловлено резким скачкообразным изменением кривизны поверхности коротких цилиндров при переходе к сферическим торцам, тогда как кривизна поверхности эллипсоида изменяется непрерывно. Можно предположить, что наличие резкого изменения кривизны поверхности и появление благодаря этому зоны положительного продольного градиента давления в области стыка передней полусферы и цилиндра приводят к ранней турбулизации пограничного слоя на боковой поверхности цилиндра. В сечении, соответствующем стыку головной полусферы и цилиндра, профиль скорости подходит ламинарному профилю.

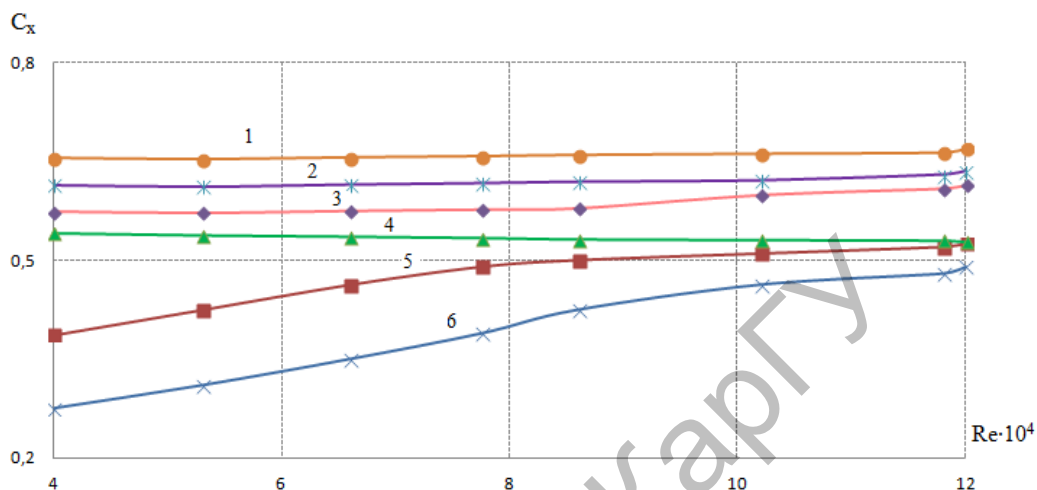
1.2.2 Анализ коэффициента лобового сопротивления цилиндров со сферическими торцами

Для анализа изменения определения лобового сопротивления использовались цилиндры со сферическими и плоскими торцами и для сравнения эллипсоид вращения с $a/b = 2$. Результаты расчетов и измерений коэффициента лобового сопротивления эллипсоидов и коротких цилиндров со сферическими торцами при поперечном обтекании приведены на рисунке 1.15.

Видно, что при поперечном обтекании коротких цилиндров со сферическими торцами коэффициент лобового сопротивления в диапазоне значений $Re = (30-200)10^4$ практически от числа Рейнольдса не зависит и

плавно растет по мере увеличения удлинения цилиндра от значения $C_x = 0.18$ для шара, до значения $C_x = 0.48 - 0.76$ для цилиндра бесконечной длины [63].

На рисунке 1.15 приведены результаты измерения коэффициента лобового сопротивления коротких цилиндров с плоскими торцами при поперечном обтекании.

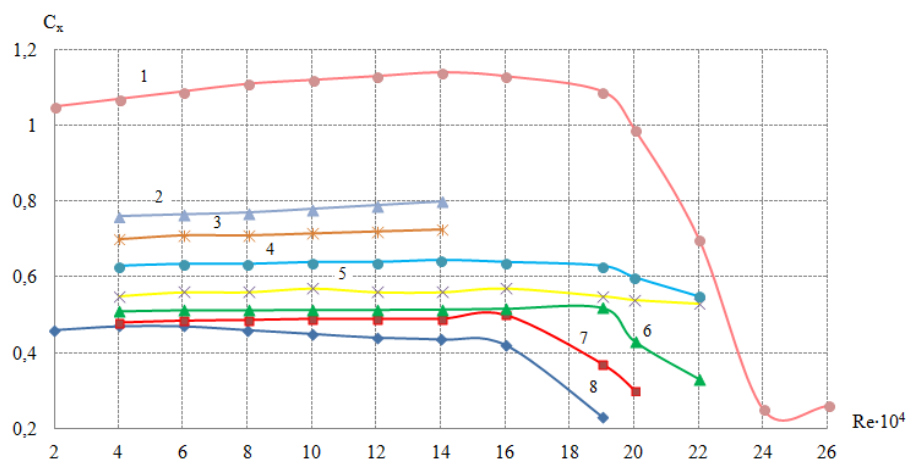


1 – 0,44; 2 – 0,74; 3 – 1,35; 4 – 2,24; 5 – 4,24; 6 – 6,23

Рисунок 1.15 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления коротких цилиндров с плоскими торцами от скорости при поперечном обтекании, l/d

В области значения критического числа $Re=(2-4)10^5$ наблюдается резкое уменьшение коэффициента лобового сопротивления. Значение сверхкризисного коэффициента сопротивления короткого цилиндра больше, чем у шара, но меньше, чем у цилиндра бесконечной длины. Коэффициент лобового сопротивления поперечно обтекаемого эллипсоида вращения немного меньше его значения для короткого цилиндра, при одинаковом значении удлинения тел [64].

На рисунке 1.16 приведена зависимость коэффициента лобового сопротивления эллипсоида и короткого цилиндра со сферическими торцами от числа Рейнольдса при поперечном обтекании.



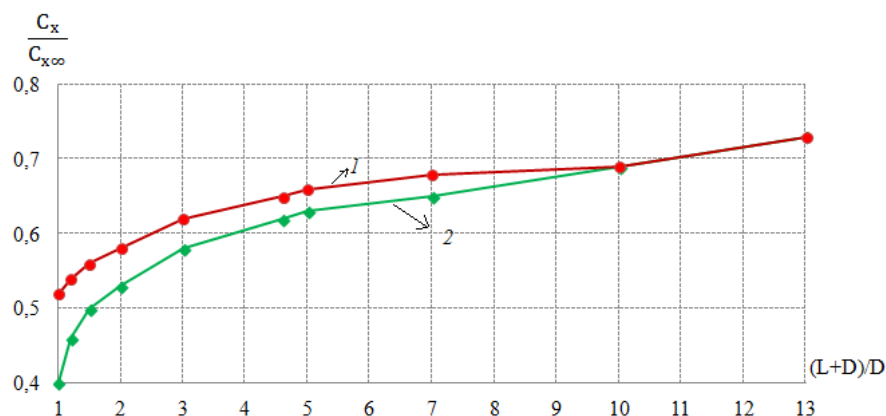
1 – 1,0; 2 – 1,2; 3 – 1,5; 4 – 2,0; 5 – 3,0; 6 – 5,5; 7 – 6,0; 8 – 7,0

Рисунок 1.16 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления эллипсоида и короткого цилиндра со сферическими торцами от числа Рейнольдса при поперечном обтекании, $(l+d)/d$

При продольном обтекании короткого цилиндра со сферическими торцами и эллипсоидов вращения коэффициенты лобового сопротивления плавно уменьшаются с ростом числа Re до некоторых минимальных значений. Сравнение зависимости $C_x=f(Re)$ для коротких цилиндров с аналогичной зависимостью для шара показывает, что переход к сверхкризисному режиму обтекания короткого цилиндра начинается намного раньше, чем у шара [64, с.274, 65].

При поперечном обтекании цилиндров с плоскими торцами при $\lambda \leq 0,5$ коэффициент лобового сопротивления меньше, чем у шара, но уже при $\lambda = 1$ коэффициент лобового сопротивления короткого цилиндра становится больше, чем у шара. Далее, с ростом относительной длины цилиндра коэффициент лобового сопротивления медленно растет, приближаясь к значению $C_x=1.2$ при $\lambda \rightarrow \infty$. Для выяснения влияния формы торцов поперечно обтекаемого цилиндра с плоскими и сферическими торцами на коэффициент лобового сопротивления результаты измерений $C_x/C_{x\infty}$, в зависимости от относительной длины, приведены на рисунке 1.17 заметно, что коэффициент лобового сопротивления цилиндра со сферическими торцами меньше, чем у цилиндра с плоскими торцами с тем же удлинением. С ростом λ эта разница уменьшается и уже при $\lambda > 6$ влияние формы торцов незаметно.

На рисунке 1.17 приведены результаты измерений $C_x/C_{x\infty}$ в зависимости от относительной длины.



1 – цилиндр с полусферическими торцами; 2 – цилиндр с плоскими торцами

Рисунок 1.17 – Зависимость относительного коэффициента лобового сопротивления от относительной длины цилиндра

Однако влияние относительной длины коротких цилиндров на коэффициент сопротивления весьма заметно даже при $\lambda > 20$, при котором $C_x/C_{x\infty} = 0,76$, где $C_{x\infty} = 1,2$ – коэффициент лобового сопротивления цилиндра бесконечной длины. Здесь же для сравнения приведены результаты измерений C_x для цилиндров с плоскими торцами из [65, с.36]. Видно, что результаты опытов хорошо согласуются с данными работы.

1.3 Приложения исследования аэродинамики вращающихся цилиндров в ветроэнергетике

1.3.1 Эффект Магнуса

Одним из первых ветродвигателей, использовавших эффект вращающихся цилиндров, был ветряной корабль. Ветряной корабль Флеттнера или «Ротор Флеттнера», обладает удивительными свойствами, которые никак нельзя объяснить простыми представлениями о ветряном давлении, достаточно сказать, что силовые действия на вращающийся цилиндр должны быть в 10 – 15 раз больше, чем на парус с такой же видимой поверхностью [66].

В настоящее время гидродинамика не только может вполне объяснить это на первый взгляд, загадочное явление, но она явилась планомерным путеводителем при открытии больших силовых действий вращающегося цилиндра [67].

Для определенного решения данного вопроса известный берлинский физик Магнус произвел в 1852 г. некоторые экспериментальные опыты. Опыт заключался в следующем: между двумя острями вращается латунный цилиндр; быстрое вращение цилиндру сообщалось как в волчке шнуром. Вращающийся цилиндр помещался в раме, которая, в свою очередь, легко могла поворачиваться. При помощи маленького центробежного насоса на эту систему пускалась сильная струя воздушного потока. Цилиндр отклонялся в направлении, перпендикулярном к воздушной струе и к оси цилиндра, при том в ту сторону, с которой направления вращения и струи были одинаковы. Направление отклонения было такое же, как и в артиллерийских опытах, величину отклоняющей силы Магнус не измерял, он полагал, однако, что порядок этой величины такой же, как и при отклонении сферических снарядов. С этих пор принято всю группу явлений называть «эффектом Магнуса». Следовательно, заслуга Магнуса, впервые выяснившего явление в лабораторной обстановке, оценена по достоинству [68].

На основании своих экспериментальных опытов Магнус предложил объяснение, которое, хотя и делает явление несколько понятным, свидетельствует о том, что гидродинамика находилась еще в примитивном состоянии. Для понимания этого явления значительно больше дает толкование в работе, опубликованной в 1877 г. Рэлеем в связи с вопросом о траектории срезанных теннисных мячей. Гидродинамика к этому времени получила значительное развитие в работах Гельмгольца, В. Томсона и других исключительно для случая «идеальной жидкости» без трения и сжимаемости. Расчеты Рэля относятся к потоку такой идеальной жидкости около бесконечного в осевом направлении круглого цилиндра. Рэлей рассматривает состояние потока, когда на обычный «поток потенциальный» налагается «циркуляционный поток»; он вычисляет силу, производимую на цилиндр из распределения давления около цилиндра. Рэлей в то время сам указывал слабый пункт своей теории, так как расчеты справедливы только для жидкости без трения. По теореме Томсона, однако, в отсутствие трения вихревое движение не может возникнуть, или если оно существовало, то не может измениться [69].

Исходя из интенсивности вихревого движения, наложение потоков приводит к различным формам. Одна из таких форм для случая умеренного вращения изображена на рисунке 1.18, другая, для более сильного вращения, – на рисунке 1.19.

На рисунке 1.18 показана схема вихревого движения для умеренного вращения.

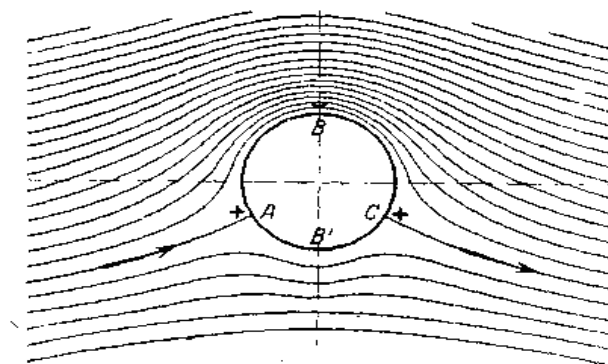


Рисунок 1.18 – Вихревое движение для умеренного вращения

На рисунке 1.19 показана схема вихревого движения для сильного вращения.

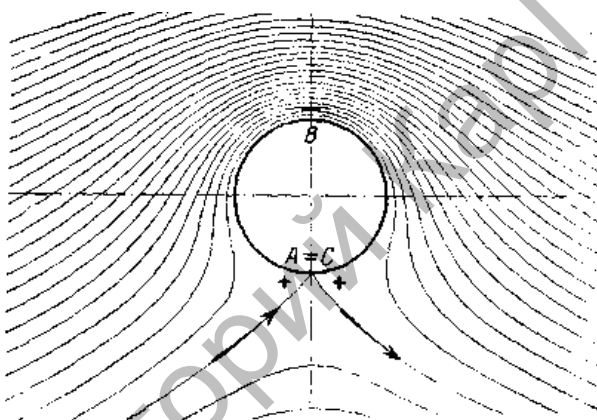


Рисунок 1.19 – Вихревое движение для сильного вращения

Для понимания того, что достигается такими потоками, рассматривают распределение давления в текущей идеальной жидкости. Прежде всего давление в одной и той же точке одинаково по всем направлениям, как и в случае покоящейся жидкости, но давление в двух различных точках разное. Данная разница может быть положительной и отрицательной, поэтому рассматриваются об увеличение и уменьшение давления. Если на пути от некоторой точки A к точке B одной и той же линии тока давление постоянно уменьшается, то каждая частица жидкости имеет за собой большее давление, чем впереди, поэтому она будет продвигаться, ускоряясь в сторону уменьшающегося давления. Если в точке A уже имелась некоторая скорость по направлению к B , то эта скорость будет постоянно возрастать на пути к B . Если, наоборот, частица жидкости в B обладает значительной скоростью по направлению к A , то эта скорость будет замедляться вследствие противоположной разницы давления. Следовательно и в этом случае скорость больше в точке B , где давление меньше, чем в A . Расчет для стационарного, т.е. не изменяющегося со временем потока в идеальной жидкости, приводит к такому соотношению: сумма

давления p и величины (ρ – плотность, масса единицы объема, v – скорость) вдоль линии тока постоянны. Это соотношение, установленное в 1738 г. Д. Берн у л л и часто называется «теоремой Бернулли», оно связано с законом сохранения энергии в механике точки [70].

Из распределения давлений во всех трех потоках нельзя обнаружить сопротивления в направлении движения. Это обстоятельство связано с заменой реальной жидкости идеальной: для преодоления сопротивления должна быть затрачена работа, эквивалентом которой может быть только кинетическая энергия жидкости. Если же поток одинаков, как впереди тела, так и за ним, то указанной кинетической энергии, а следовательно, и сопротивления здесь не может быть. Для короткого цилиндра это уже недопустимо. В идеальной жидкости при вращательном движении на концах цилиндра появляется кинетическая энергия, связанная с вихрем, она остается в потоке, и здесь возникает соответствующее сопротивление (так называемое наведенное сопротивление так же, как у подъемных крыльев), по этой причине эффект Магнуса полностью может наблюдаться только у длинных цилиндров, а с короткими цилиндрами и шарами эффект наблюдается в форме, сильно искаженной вихревым движением.

На основании распределения давлений Рэлея находит формулу, согласно которой эта сила пропорциональна произведению скорости V цилиндра относительно невозмущенной жидкости и скорости кругового потока U . Для отрезка мысленного «бесконечно длинного» цилиндра l , радиуса r эта сила

$$P = \rho VU \cdot 2\pi r l, \quad (1.8)$$

где ρ — плотность жидкости.

Следует отметить, что формула Релея является частным случаем формулы Жуковского

$$P = \rho T V l \quad (1.9)$$

которая применима для всех случаев, когда поток вызывает боковую силу, т.е. для подъемных крыльев, парусов и т.д. При этом T – «циркуляция», получающаяся следующим образом: каждый линейный элемент любой замкнутой кривой, окружающей предмет, вызывающий силу, умножается на компонент скорости в его направлении, и эти произведения складываются (интегрируются). Такая циркуляция обладает замечательными свойствами в случае потенциального потока. В обычных потоках она равна нулю для любой замкнутой кривой, а для круговых потенциальных потоков типа, изображенных на рисунках 1.18, 1.19, циркуляция для всякой замкнутой кривой обнимающей тела так же равна нулю, но для любой кривой, один раз охватывающей тело, она имеет

конечную величину, так что значение ее T является мерой для кругового потока.

Далее вкратце рассмотрим некоторые приведенные примеры расположения вращающихся цилиндрических элементов на парусном судне.

Отсутствие всяких перестановок при изменении направления ветра является важным преимуществом «ротора». На парусном судне всякое изменение направления или силы ветра связано с изменением положения парусов. У кораблей-роторов правильная установка получается сама собой; для изменения числа оборотов до нужной величины требуется минимальное усилие, для чего рулевому нужно только поворачивать ручку реостата электродвигателя. Только при изменении ветра с рулевого на кормовой необходимо переменить направление вращения роторов. Если заставить цилиндры вращаться в противоположные стороны, то можно корабль вращать на месте. При возрастании ветра отношение и вместе с тем c_a уменьшаются, т.е. сила ветра возрастает медленнее, чем на старых парусных кораблях, где приходится снимать паруса.

Ослабить силу еще больше можно с уменьшением числа оборотов. Если во время сильной бури роторы совершенно останавливаются, то натиск ветра остается очень небольшим: $C_o = 0$ и $C_w = 0,3$. Сопротивление в этом случае меньше, чем у пустого такелажа эквивалентного старого парусника [71].

На рисунке 1.20 схематически изображен моторный парусник «Буку» в 600 тонн до и после перестройки (штрихами обозначены старые паруса).

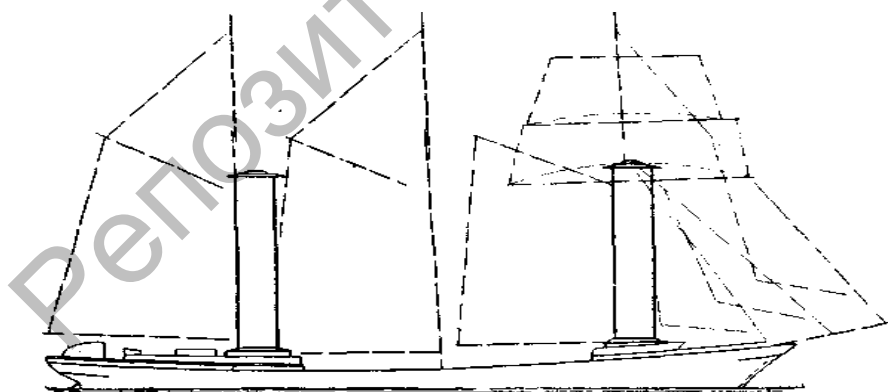


Рисунок 1.20 – Схема моторного парусника «Буку» до и после перестройки

Внутри роторов парусника «Буку» находится твердо связанная с парусом корабля колонна из стальной жести. Она поддерживает ось, на которой висит цилиндр. Внизу ротор имеет вторую опору. Движение передается парой зубчаток, помещенных над верхней осью, которая приводится в движение электродвигателем по Леонарду. Роторы изготовлены из листового железа толщиной 1 мм.

Исходя из материалов данного подраздела, можно сделать вывод о том, что к настоящему моменту известны значительные количества практических применений эффекта Магнуса как в качестве двигателей, так и движущих элементов.

В следующем подразделе приведен анализ существующих ветродвигателей с цилиндрическими лопастями, работающих на основе эффекта Магнуса.

1.3.2 Ветродвигатели на основе эффекта Магнуса

В работе [72] известного японского ученого Мураками Н. рассматривается изобретение в ветроэнергетике, которое может быть использовано в ветровых электрогенераторах на основе эффекта Магнуса. Ветровой электрогенератор содержит горизонтальный вал, предназначенный для передачи вращательного движения механизму, генерирующему электрическую энергию, вращающиеся цилиндры, расположенные радиально относительно горизонтального вала, и приводные электродвигатели, предназначенные для вращения соответствующих цилиндров вокруг своих осей. Причем в результате взаимодействия между вращательным движением каждого цилиндра и ветра возникает подъемная сила, обусловленная эффектом Магнуса, приводящая к вращению горизонтального вала, который, в свою очередь, приводит в движение механизм, генерирующий электрическую энергию. При этом для образования воздушных потоков на периферийных наружных поверхностях цилиндров установлено соответствующее средство создания воздушного потока, размещенное в заданном месте. Оно создает составляющую воздушного потока, по меньшей мере, параллельную оси цилиндра, направленную в одном направлении на периферийной наружной поверхности цилиндра от горизонтального вала или в направлении горизонтального вала. Изобретение позволяет обеспечить эффективное генерирование электроэнергии при скорости ветра в диапазоне от низких до относительно высоких скоростей.

На рисунке 1.21 показан ветровой электрогенератор на основе эффекта Магнуса.

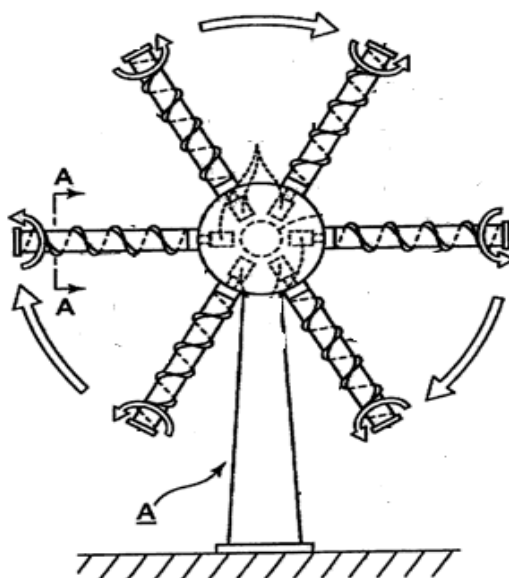


Рисунок 1.21 – Ветровой электрогенератор на основе эффекта Магнуса [72, с.3]

Настоящее изобретение [72, с.2] основывается на новом принципе, который заключается в том, что, в отличие от естественного ветра и движений воздуха в поверхностных слоях цилиндров, которые вращаются вместе с цилиндрами, подъемная сила, обусловленная эффектом Магнуса и возникающая в результате взаимодействия между вращением соответствующих цилиндров и силой ветра, увеличивается за счет создания воздушных потоков на периферийной наружной поверхности цилиндров, которые были обнаружены изобретателями. Создаются трехмерные воздушные потоки путем добавления составляющих воздушных потоков, параллельных осям цилиндров, к подъемной силе, обусловленной эффектом Магнуса, возникающей за счет природного ветра и движений воздуха в поверхностных слоях цилиндров, которые вращаются вместе с цилиндрами. Следовательно, увеличивается подъемная сила, обусловленная эффектом Магнуса, а именно сила, которая прикладывается к цилиндрам, увеличивается, что было доказано экспериментально. В этой связи все воздушные потоки, создаваемые средствами образования воздушного потока, необязательно должны быть параллельны цилиндрам – для достижения достаточного эффекта воздушные потоки должны иметь лишь составляющую вектора, параллельную цилиндрам. Изобретателям удалось добиться увеличения вращающего момента на горизонтальном валу, приводящем в движение механизм, генерирующий электрическую энергию, и таким образом значительно увеличить эффективность ветрового электрогенератора при скорости ветра в диапазоне от низкой до относительно высокой.

В работе [73] российского ученого Бычкова Н.М. рассматривается ветроустановка с вращающимися цилиндрами, использующими для работы эффект Магнуса, который характеризуется появлением подъемной силы (силы Магнуса) при вращении цилиндра в поперечном потоке (рисунок 1.22). Эта сила используется для вращения ветроколеса, аналогично подъемной силе лопасти, но имеет гораздо большую величину.

На рисунке 1.22 показана ветроустановка на основе эффекта Магнуса.

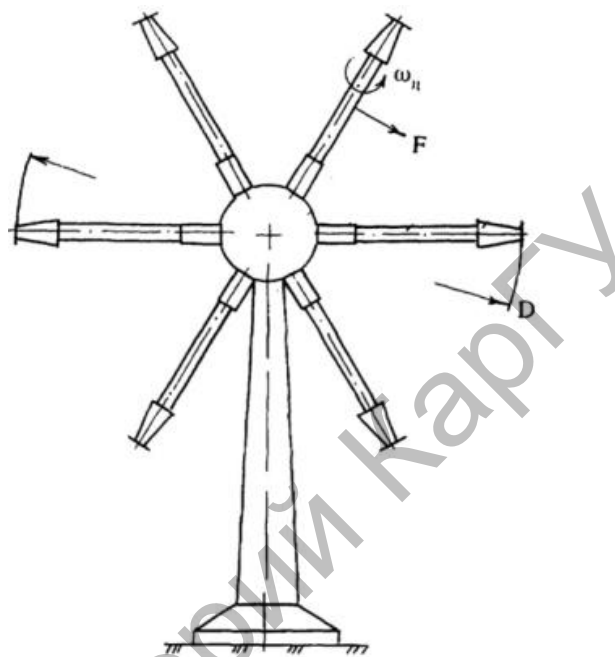


Рисунок 1.22 – Общий вид ветроустановки [73, с.2]

Изобретение (рисунок 1.22) относится к ветроэнергетике и касается ветроустановок с вращающимися цилиндрами, использующими для работы эффект Магнуса. Ветроустановка содержит ветроколесо с горизонтальной осью вращения и радиально установленными роторами Магнуса в виде цилиндров, а также привод цилиндров и электрогенератор [73, с.2]. Каждый из роторов выполнен с невращающейся корневой и вращающейся концевой частями и с шайбой на конце. Вращающаяся часть роторов выполнена из цилиндрической части с усеченным конусом на конце, основание которого обращено к цилиндру и имеет диаметр больше диаметра цилиндра. При этом поверхности цилиндра и конуса выполнены со спиральными ребрами-шнеками с навивкой в направлении вращения цилиндров от их корневого сечения до шайбы. Изобретение обеспечивает снижение индуктивного сопротивления до уровня, который позволяет заметно уменьшить скорость вращения цилиндров и затраты мощности на их вращение, чтобы обеспечить более высокую эффективность по отношению к традиционным лопастным ветроустановкам.

В работе российского ученого Климова В.С. рассматривается ветроустановка, предназначенная для преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения [74].

На рисунке 1.23 показана ветроустановка Климова В.С.

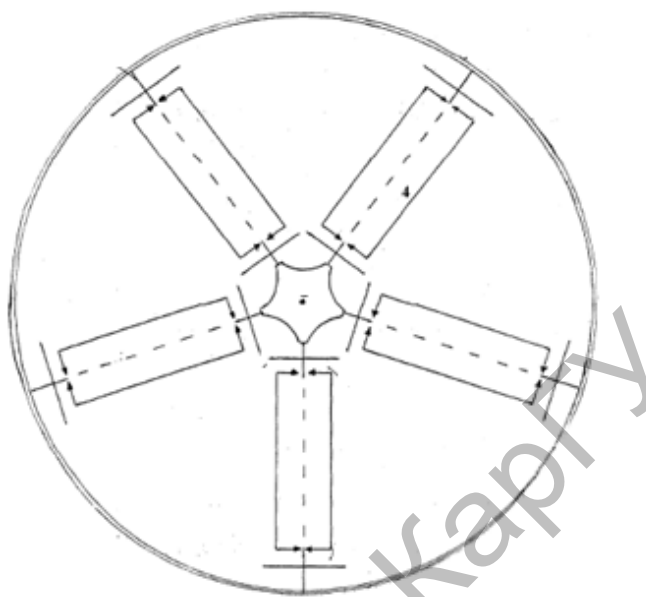


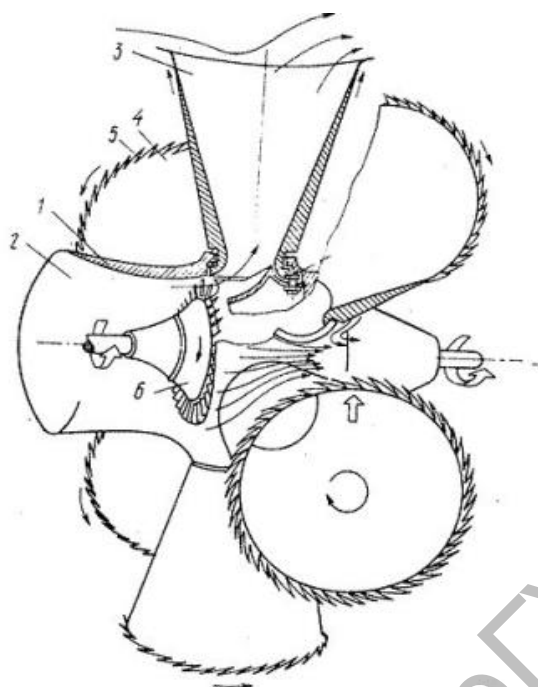
Рисунок 1.23 – Ветродвижитель многороторный с горизонтальной осью вращения [74, с.2]

Многороторный ветродвижитель (рисунок 1.23) представляет собой ветровое колесо с горизонтальной осью вращения, в ступице которого в радиальном направлении закреплены оси роторных ветродвижителей с силовыми элементами профиля – логарифмической спирали.

Принцип работы ветродвижителя [74, с.3] многороторного основан на одновременном использовании силы лобового давления ветрового потока, задающего вращение радиальным роторам, и поперечной аэродинамической силы, возникающей вследствие эффекта Магнуса при вращении радиальных роторов в обтекающем их ветром потоке. Суммарное действие этих сил создаёт вращательный момент горизонтальной оси.

Также же известен ветродвижитель ученого Викторюка В.А. [75]. Данное изобретение позволяет повысить мощность ветродвижителя с роторами, использующими эффект Магнуса [75, с.4]. Роторы выполнены в виде раструбов (4) и снабжены лопатками (5), использующими энергию ветра для вращения роторов. Ступица (1) выполнена полой, ее полость (2) сообщена с полостями (3) роторов и в ней установлена воздушная турбина (6), работа которой полезно используется.

На рисунке 1.24 представлен ветродвижитель Викторюка В.А.



1 – ступица, 2 – полости, 3 – роторы, 4 – раструбы, 5 – лопатки, 6 – воздушная турбина

Рисунок 1.24 – Ветродвижитель [75, с.1]

Изобретение относится к ветроэнергетике и касается ветродвижателей, использующих для своей работы эффект Магнуса [75, с.2].

Цель изобретения – повышение мощности.

Ветродвижитель содержит ступицу (1), установленные на ней радиальные конические роторы и преобразователь энергии. Ступица (1) выполнена полый, ее полость (2) и полости (3) роторов сообщены между собой и с атмосферой. Роторы выполнены в виде раструбов (4) и снабжены лопатками (5), закрепленными снаружи их торцов, преобразователь энергии выполнен в виде установленной в полости (2) ступицы (1). К воздушной турбине 6 подключен гидронасос, входящий в контур, содержащий гидроаккумуляторы, гидромоторы и гидрораспределители. Для вращения роторов может быть использована зубчатая передача. При работе ветродвижателя для вращения роторов используются лопатки (5). На вращающихся роторах при обтекании их ветром возникают поперечные силы Магнуса, создающие крутящий момент. В результате этого ветродвижитель вращается относительно горизонтальной оси, и воздух под действием центробежных сил протекает с большой скоростью через полость (2) ступицы (1) и раструбы (4). Воздушный поток приводит во вращение турбину 6, работа которой полезно используется. Для первоначальной раскрутки роторов и их вращения при слабом ветре используется передача, ведущее звено которой связано с гидромотором, использующим энергию гидроаккумуляторов.

Основным недостатком этих установок является сложность конструкции с использованием турбулизаторов и конечных концов, которые повышают турбулентность потока вокруг ветроколеса и понижают устойчивость установки при штормовом ветре.

Из приведенного обзора следует, что известные ветроэнергетические установки-ветродвигатели в настоящее время рассчитаны на работу при скорости ветра от 8 до 25 м/с, требуют ориентации на ветер при резком изменении его направления и малоприспособлены для использования в ветровых условиях Казахстана, так как отключаются при наиболее энергонесущих ветрах (более 20 м/с).

В отличие от существующих методов, научный подход автора монографии основан на активном захвате потока воздуха и использование в качестве лопастей ветродвигателя вращающихся цилиндров, обладающих меньшим аэродинамическим сопротивлением, при сохранении достаточно высокой силы тяги.

Выбрана конструкция рабочих лопастей ветродвигателя в виде системы вращающихся цилиндров переменного сечения с горизонтальной осью вращения. При этом профили поверхности цилиндров имеют форму коротких цилиндров со сферическими торцами – форму усеченного конуса при различных соотношениях торцевых диаметров. Частота вращения вала ветродвигателя 40-60 об/мин, частота вращения цилиндрических элементов 500-900 об/мин, минимальный порог рабочей скорости ветра – 3-5 м/с.

Целью данной работы является исследование аэродинамических характеристик системы вращающихся цилиндров переменного сечения.

На основании проведенного анализа имеющихся исследований была поставлена задача по экспериментальному исследованию аэродинамики системы вращающихся цилиндров в турбулентном потоке, являющихся взаимовлияющими элементами ветродвигателя с использованием эффекта Магнуса.

На основании вышеизложенного по разделу проведен анализ научных работ по исследованию аэродинамики цилиндрических элементов различных форм при обтекании поперечным и продольным потоком воздуха.

Как показывают литературные данные известные ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения ветродвигателя в настоящее время в основном рассчитаны на работу при скорости ветра от 8 до 25 м/с, требуют поворотов на ветер при резком изменении его направления и неэффективны для использования в ветровых условиях Казахстана, так как отключаются при наиболее энергонесущих (штормовых) ветрах (более 20 м/с).

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИССЛЕДУЕМЫХ ЦИЛИНДРОВ

В данном разделе рассмотрена методика проведения исследования закономерностей обтекания тел воздушным потоком, описан аэродинамический стенд и дан порядок проведения экспериментальных исследований по изучению аэродинамики при обтекании вращающегося цилиндра при различных скоростях и направлениях воздушного потока.

Аэродинамический эксперимент в настоящее время достиг большого совершенства. Применяемые методы для его осуществления очень разнообразны [77]. Основной задачей, в первую очередь, следует отметить принцип обратимости явлений обтекания. Данный принцип заключается в том, что силовое взаимодействие потока и тела одинаково независимо от того, движется ли тело в покоящейся среде или среда обтекает тело со скоростью, противоположной той, которую имело тело. Важно, чтобы скорость движения тела и скорость невозмущенного потока в случае обращения движения были равны друг другу. Большое значение для всей современной аэродинамики имеет принцип обратимости, который позволяет экспериментировать с неподвижными моделями летательных аппаратов и их частей в потоке движущегося газа. Основным условием является сохранение динамического подобия модели и природы [78].

Методы исследования могут быть разделены на две группы:

- 1) при которых среда неподвижна, а тело движется;
- 2) при которых тело неподвижно, а среда движется.

Каждая из этих групп включает в себя ряд экспериментальных путей получения относительного движения тела и среды.

К первой группе относятся следующие способы получения относительного движения тела и среды:

- прямолинейное движение тела (падение тела, летные испытания);
- криволинейное движение тела;

Ко второй группе относятся:

- использование естественного ветра;
- аэродинамические трубы.

Подробнее остановимся на второй группе методов аэродинамических исследований, основанной на обращении движения, т.е. испытываемое тело неподвижно, а среда движется.

В работе будут рассматриваться эксперименты, проводимые в аэродинамической трубе, представляющей собой каналы, в которых с помощью вентилятора создается искусственный воздушный поток.

Аэродинамическая труба – установка, создающая поток воздуха или газа для эксперимента, изучения явлений, сопровождающих обтекание тел.

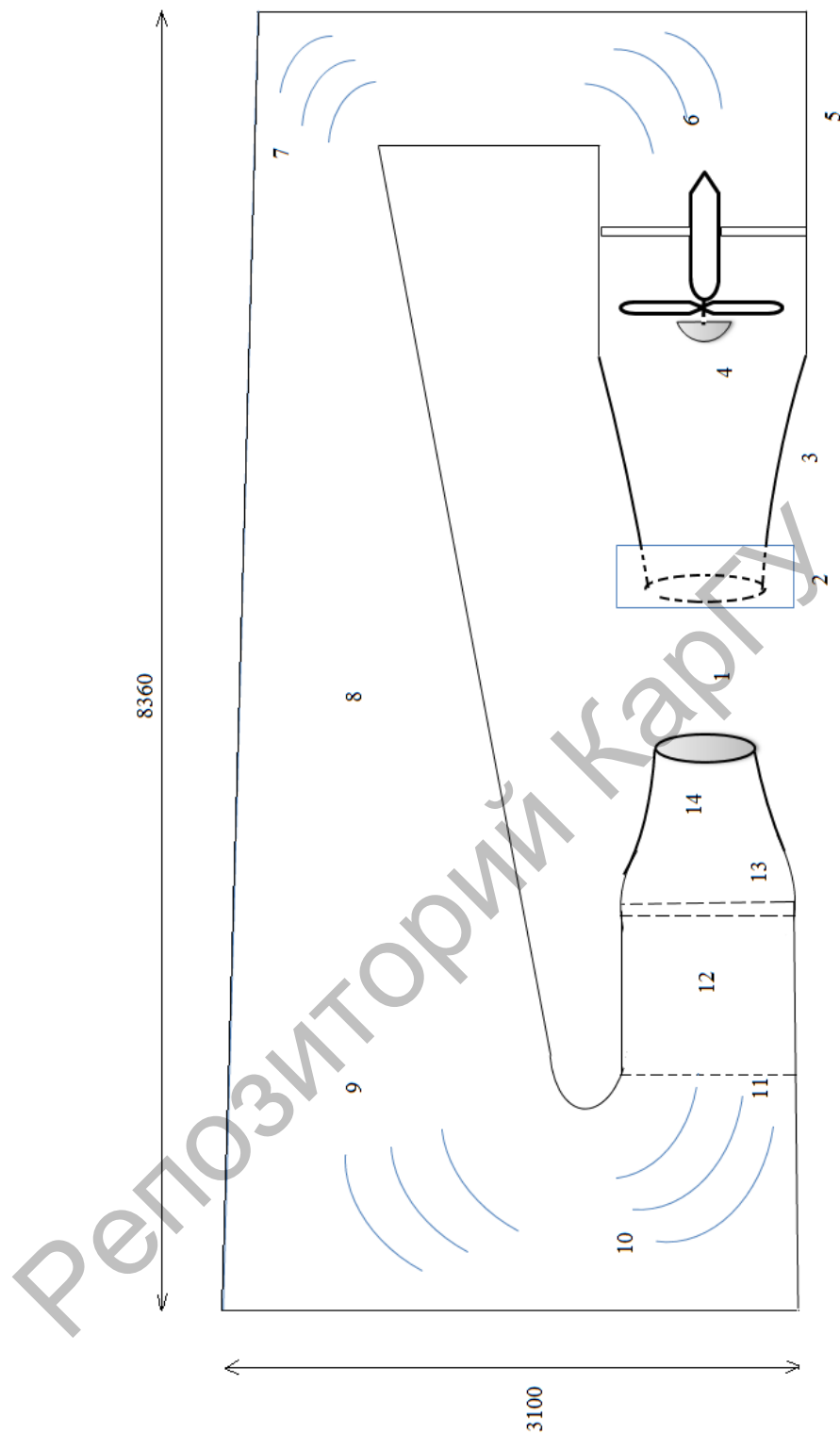
Опыты в аэродинамической трубе основываются на принципе обратимости движения, согласно которому перемещение тела относительно воздуха (или жидкости) можно заменить движением воздуха, набегающего на неподвижное тело. Для моделирования движения тела в покоящемся воздухе необходимо создать в аэродинамической трубе равномерный поток, имеющий в любых точках равные и параллельные скорости (равномерное поле скоростей), одинаковые плотность и температуру. Обычно в аэродинамической трубе исследуется обтекание модели проектируемого объекта или его частей и определяются действующие на неё силы [79]. При этом необходимо соблюдать условия, которые обеспечивают возможность переносить результаты, полученные для модели в лабораторных условиях, на полноразмерный натуральный объект. При соблюдении этих условий аэродинамические коэффициенты для исследуемой модели и натурального объекта равны между собой, что позволяет определить аэродинамический коэффициент в аэродинамической трубе и рассчитать силу, действующую на натуру.

Основной прототип аэродинамической трубы был создан в 1897 Циолковским К.Э., использовавшим для опытов поток воздуха на выходе из центробежного вентилятора. В 1902 г. Жуковский Н.Е. разработал и построил аэродинамическую трубу, в которой осевым вентилятором создавался воздушный поток со скоростью до 9 м/с [80]. Первые аэродинамические трубы разомкнутой схемы были созданы Стантоном Т. в Национальной физической лаборатории в Лондоне в 1903 году и Жуковским Н.Е. в Москве в 1906 г., а первые замкнутая аэродинамическая труба в 1907–1909 гг. в Гёттингене Л. Прандтлем и в 1910 г. Стантоном Т. Дальнейшее развитие аэродинамических труб шло преимущественно по пути увеличения их размеров и повышения скорости потока в рабочей части (где помещается модель), которая является одной из основных характеристик аэродинамической трубы.

По принципиальной схеме аэродинамическая труба представляет собой каналы, в которых с помощью вентилятора создается искусственный воздушный поток. В данной работе применялась аэродинамическая труба с замкнутым потоком воздуха.

Аэродинамическая труба Т-1-М включает в себя рабочую часть, диффузор, вентилятор, переходный канал, поворачивающиеся лопасти, выравнивающие сетки, форкамеру, коллектор (сопло).

На рисунке 2.1 показана принципиальная схема аэродинамической трубы Т – 1 – М.



1 – рабочая часть, 2 – кольцо, 3 – диффузор, 4 – вентилятор, 5 – переходной канал, 6,7,9,10 – поворачивающие лопатки, 8 – обратный канал, 11-13 – выравнивающие сетки, 12 – форкамера, 14 – коллектор (сопло)

Рисунок 2.1 - Схема аэродинамической трубы Т-1-М

На рисунке 2.2 представлено фото аэродинамической трубы Т – 1 – М

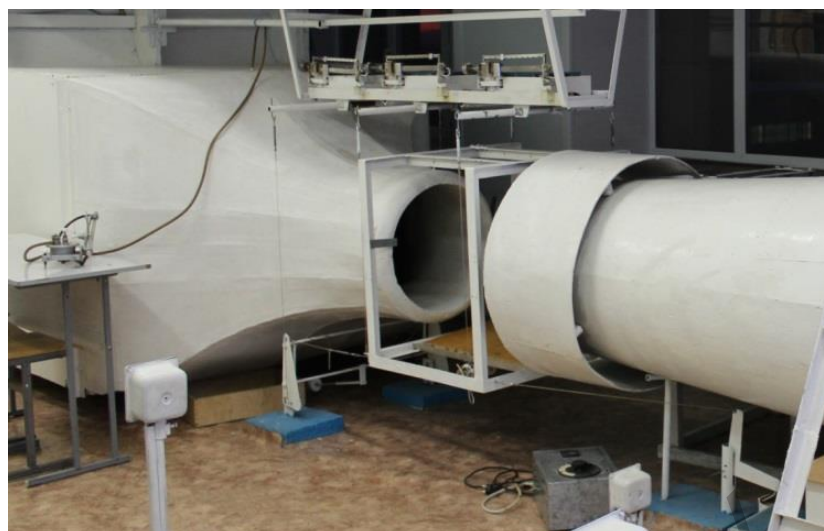


Рисунок 2.2 – Аэродинамическая труба Т – 1 – М

Основной частью аэродинамической трубы Т-1-М является ее рабочая часть. Рабочая часть трубы – место, где крепится на аэродинамических весах модель испытуемого тела. К потоку рабочей части предъявляются особенно серьезные требования. Размеры модели должны быть меньше соответствующих размеров рабочей части, для того чтобы границы потока не влияли на обтекание модели.

Наиболее точным и надежным является непосредственный метод измерения сил и моментов с помощью аэродинамических весов.

2.1 Трехкомпонентные аэродинамические весы, методика измерения действующих сил

Аэродинамические весы – установка или система для измерения составляющих аэродинамических сил и моментов, действующих на модель в аэродинамической трубе. Каждая составляющая воспринимается отдельным измерительным каналом – компонентом. Аэродинамические весы могут иметь от одного до шести компонентов. По принципу действия аэродинамические весы подразделяются на механические и электрические (тензометрические) [81].

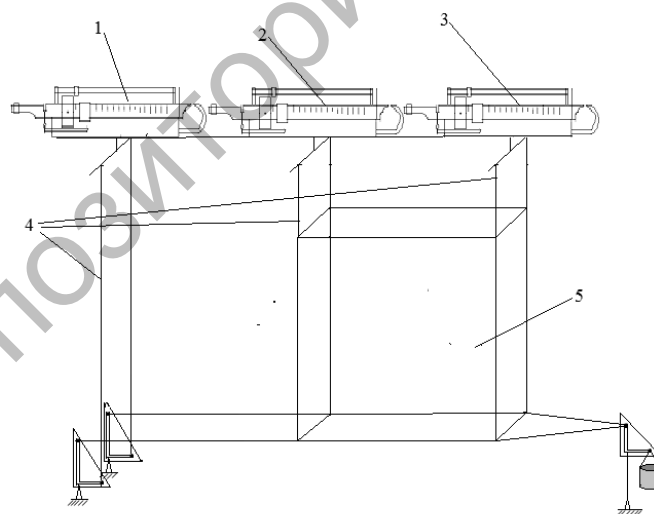
Механические аэродинамические весы состоят из жёсткой рамы (расположена за границами потока аэродинамической трубы) и связанных между собой рычажных систем, удерживающих её в положении равновесия; выходные звенья рычажных механизмов соединены с измерительными приборами. Модель устанавливается на раме с помощью стоек или растяжек, имеется также механизм дистанционного изменения углов установки модели [81, с.7].

Электрические аэродинамические весы состоят из упругого тела, чувствительных элементов и преобразователей деформации чувствительных элементов (обычно тензорезисторных) в электрический сигнал. Чувствительные элементы выполнены вместе с телом и ориентированы так, чтобы деформация элемента, вызванная соответствующей составляющей аэродинамической силы или момента, была максимальной [82].

Основные узлы, встречающиеся во всех конструкциях аэродинамических весов: 1) поддерживающее устройство, присоединяющее установленную в потоке модель к весам; 2) система разложения воспринимаемых моделью сил и моментов на их компоненты; 3) весовые элементы для отсчета измеряемых величин; 4) механизмы для изменения углов атаки и скольжения модели.

От конструкции подвески существенно зависит точность определения аэродинамических коэффициентов. Для большей точности производимых на весах измерений конструкция поддерживающих устройств должна отвечать двум условиям: 1) действующие на них аэродинамические силы (в первую очередь сила лобового сопротивления) должны быть малы по сравнению с силами, действующими на испытываемую модель; 2) они должны меньше искажать обтекание модели набегающим потоком.

На рисунке 2.3 показана схема трехкомпонентных аэродинамических весов.



1 – весы измеряющие силу лобового сопротивления; 2 и 3 – весы, измеряющие подъемную силу; 4 – подвески соединяющие весы с рабочей частью; 5 – рабочая часть для установления исследуемых макетов

Рисунок 2.3 - Схема трехкомпонентных аэродинамических весов

На рисунке 2.4 показан общий вид трехкомпонентных аэродинамических весов.



Рисунок 2.4 – Общий вид трехкомпонентных аэродинамических весов

Основным требованием к трехкомпонентным аэродинамическим весам является независимость измерений по разным каналам, т.е. чтобы каждый весовой элемент измерял только составляющую силы или момента и не реагировал бы на действие других составляющих.

Трехкомпонентные аэродинамические весы измеряют подъемную силу и силу лобового сопротивления при разных скоростях потока. Способ присоединения данных аэродинамических весов осуществляется с помощью нитевой подвески (нитей, проволоки), натягиваемых посредством вспомогательных грузов. Поток воздуха, набегающий на лобовую часть цилиндра, прикладывает силу. Эта сила отражается на весах.

Погрешность измерений аэродинамических сил и их моментов составляет (3-5)%.

2.2 Измерение угловой скорости вращения цилиндров

В устройствах тахометров используются физические явления, в которых скорость вращения связана определенной зависимостью с каким-либо динамическим эффектом. Чаще всего тахометры классифицируют по принципу действия чувствительного элемента, кроме того, существуют

классификации по виду указательной системы, по области применения, по дистанционности и т.д.

Наибольшее распространение благодаря своей простоте и точности получили тахометры механические – центробежные и часовые, магнитные, электрические – постоянного и переменного тока [83].

Принцип действия тахометра состоит в том, что угловая скорость измеряется по числу оборотов испытуемого вала за определенный промежуток времени. Таким образом, с помощью тахометра определяется не мгновенное значение угловой скорости, а ее среднее значение за известный промежуток времени.

Для измерения угловых скоростей вращающихся валов использовался контактно-бесконтактный цифровой фототахометр АТ-8 в пределах 0,1-10000 об/мин.

Принцип действия цифрового фототахометра АТ-8 основан на измерении скорости, возникающей в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля постоянного магнита, которому передается вращение от вала агрегата, с индукционными токами, наведенными этим полем в сплошном металлическом роторе, обеспечивает быстрые и точные показания частоты вращения.

На рисунке 2.5 показан цифровой фототахометр АТ-8.



Рисунок 2.5 - Цифровой фототахометр АТ-8 для измерения скорости вращения

Порядок измерения производится следующим образом: открыть крышку батарейного отсека и установить элемент питания 9В.

Бесконтактный способ измерения частоты вращения: закрепить клейкую светоотражающую метку на объект измерения. Ее следует наклеить на внешний край вращающейся детали.

Контактный способ измерения частоты вращения: установить насадку для измерения об/мин (из комплекта поставки) на ось тахометра, совместив прорезь в насадке со штифтом переходника оси прибора.

В таблице 2 приведены технические характеристики цифрового фототахометра АТ-8.

Условия измерения:

Необходимо отрезать квадрат светоотражающей клейкой ленты (пленки) размером примерно 12 мм и наклеить квадрат на вращающийся вал. Отражающая поверхность детали должна быть значительно меньше по сравнению с неотражающей.

Таблица 2 - Технические характеристики цифрового фототахометра АТ-8

Параметр	Значение
Экран	Пятиразрядной ЖК-экран
Точность	$\pm(1+0,05\%)$
Диапазон контактных измерений	2 до 20 000 об/мин
Диапазон бесконтактных измерений	2 до 99 999 об/мин
Диапазон оборотов	1 до 99 999
Разрешение: 0,1 об/мин	2 до 20 000 об/мин
Разрешение: 1 об/мин	свыше 10 000 об/мин
Быстродействие	0,5 сек. (свыше 120 об/мин)
Дистанция измерения	50 до 500 мм
Задающий генератор	Кварцевый кристалл
Ток потребления	Примерно 45мА
Батарея	9В
Рабочая температура	0 ⁰ С до 50 ⁰ С

2.3 Измерение скорости потока воздуха

Для измерения скорости воздуха применяется широкий класс приборов – анемометры. Они выполняются механическими, электрическими и цифровыми. В настоящее время имеются комбинированные цифровые приборы [83].

Анемометр, ветромёт – метеорологический прибор для измерения скорости ветра. Состоит из чашечной (или лопастной) вертушки, укрепленной на оси, которая соединена с измерительным механизмом. При возникновении воздушного потока ветер толкает чашечки, которые начинают крутиться вокруг оси.

Для измерения скорости потока воздуха во время экспериментальных исследований применялся анемометр GEOS № 11.

Анемометр GEOS № 11 (рисунок 2.6) замеряет число оборотов чашечек вокруг оси за заданное время, что равно определённому расстоянию, после чего рассчитывается средняя скорость ветра, расстояние делится на время (анемометр ручной). Чашечки соединены с электрическим индукционным тахометром, что позволяет прибору сразу показывать скорость ветра на данный момент, без дополнительных вычислений, и следить за изменениями скорости ветра в реальном времени [84].

На рисунке 2.6 показан анемометр GEOS № 11 для измерения скорости потока.



Рисунок 2.6 - Анемометр для измерения скорости потока

Анемометр GEOS № 11 может использоваться в качестве стационарной метеостанции для изучения ветровых условий при установке ветряков.

Емкость памяти: 24,480 записей.

Продолжительность работы записи прибора зависит от выбранного интервала. Например: 2,5 дня при интервале записи 10сек. 2,5 месяца при интервале записи 5 мин.

Скорость ветра: текущая, средняя, максимальная.

Температура: текущая, минимальная, максимальная, windchill (прохлада ветра), минимум windchill, максимум windchill.

Влажность: относительная текущая, минимум, максимум, точка росы, индекс жары (heat index).

Давление: абсолютное, относительное (QNH), давление у земли (QFE), тенденция давления.

Высота: максимальная высота, высота по плотности воздуха (density altitude), высота QFE, эшелон полета, отношение гориз/верт скорости (finesse), вариометр.

Компас (магнитный или истинный Север): аналоговый, цифровой
Запись значений: ручная и автоматическая с задаваемым интервалом.

Передача данных на компьютер: по интерфейсу RS 232 или USB при использовании дополнительного интерфейса SKYWATCH LOG.

Встроенный в анемометр датчик атмосферного давления дает возможность заранее узнать о грядущих изменениях погоды и показывает историю за предыдущие 48 ч. Точный электронный компас обозначит направление ветра.

Выключение подсветки анемометра происходит через 5 или 15 сек. (выбор в меню). Анемометр GEOS № 11 также имеет режим автовыключения через 1 мин или может работать в постоянном режиме. Анемометр GEOS № 11 влагозащищен и без последствий может переносить кратковременное погружение в воду на глубину до 1 м.

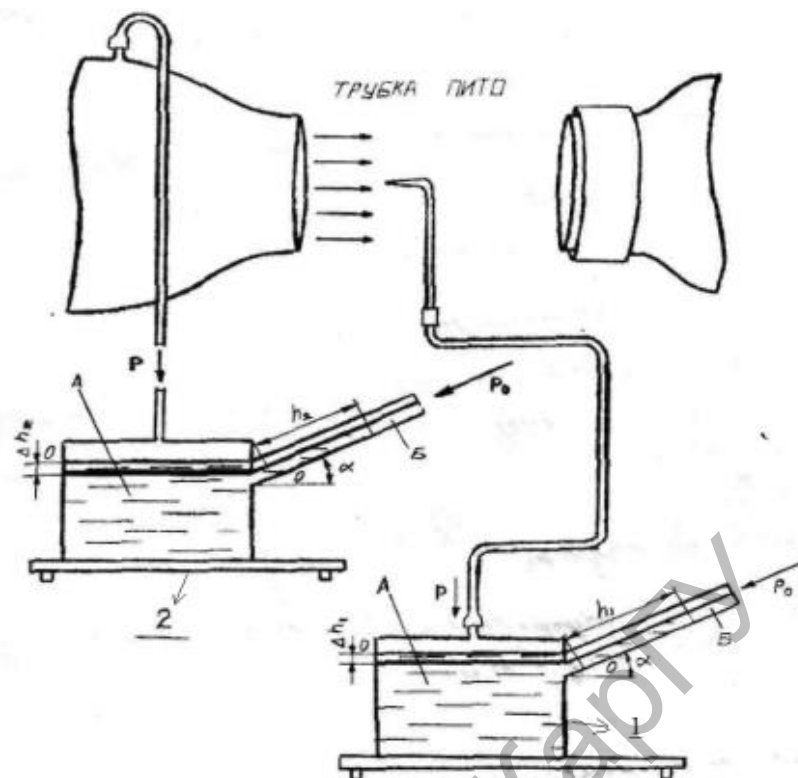
В практике аэродинамического эксперимента чаще всего приходится измерять избыточное давление в потоке или перепад давления, а также давление на поверхности испытуемого тела. Для этого применяется приборы, называемые микроманометрами (рисунок 2.7) [84].

На рисунке 2.7 показан общий вид микроманометра.



Рисунок 2.7 - Общий вид микроманометра

Для точности измерения скорости потока воздуха была проведена тарировка микроманометра 2 (рисунок 2.9), обладающего большей точностью. Тарируемый контрольный микроманометр 2 был соединен с верхней частью сопла аэродинамической трубы. Эталонный микроманометр 1 расположен по центру сопла аэродинамической трубы, который соединен с трубкой Пито, расположенной по центру сопла аэродинамической трубы (рисунок 2.8).



- 1 – Эталонный микроманометр
2 – Контрольный микроманометр

Рисунок 2.8 - Схема тарировки микроманометра

Микроманометр состоит из сосуда А и сообщающейся с ним стеклянной трубки Б диаметром 3–5 мм (рисунок 2.9), на котором нанесена шкала с миллиметровыми делениями. Если разность давления невелика, то в качестве жидкости, заполняющей микроманометры, применяется спирт. В зависимости от желаемой точности отчета показаний микроманометра трубку Б можно устанавливать под разными углами, комбинирующими к горизонту. При этом, чем меньше угол d , тем точнее можно снять показания микроманометра. При большем наклоне трубки начинается сказываться влияние капиллярности жидкости, налитой в микроманометре, что приводит к комбинирующим ошибкам эксперимента. Сосуды А и Б смонтированы на подставке, которую перед опытом при помощи установочных винтов и уровней приводят в горизонтальное положение. В сосуде А располагается цилиндр, который с помощью винта может перемещаться вертикально, что позволяет добавить совмещения мениска жидкости в наклонной трубке с нулевым отсчетом шкалы.

На графике рисунка 2.9 показана тарировка контрольного микроманометра 2 тарировочным микроманометром 1.

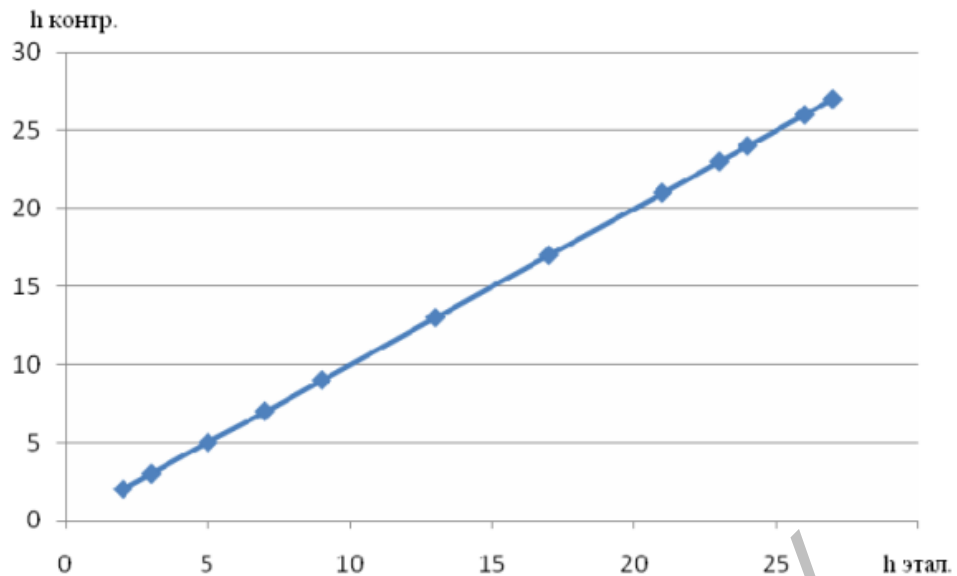


Рисунок 2.9 – График показания тарировки микроманометра

Выведем расчетную формулу для вычисления скорости воздушного потока. Исходя из уравнения Бернулли для сечений 1 и 2:

$$P_{ст} + \rho \frac{u^2}{2} = P_{полн} \quad (2.1)$$

откуда

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \sqrt{P_{полн} - P_{ст}}} \quad , \quad P_{полн} = \rho_{спирт} g H \quad (2.2)$$

Подставив (2.1) в (2.2), получаем расчетную формулу для определения скорости потока

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \sqrt{\rho_{спирт} g H - P_{ст}}} \quad (2.3)$$

Практика показывает, что значение статического давления в воздушном потоке, как правило, не превышает 1% от значения динамического потока. Следовательно, им можно пренебречь.

При нормальных условиях ($P_{атм} = 760$ мм.рт.ст. и температура $t = 20^{\circ}\text{C}$) плотность воздуха равна $\rho_{воздух} \approx 1,21 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, тогда

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.8}{1.21} \cdot \sqrt{kh}} \cong 4.04 \sqrt{kh} \quad (2.4)$$

Отсюда итоговая расчетная формула для определения скорости потока

$$U = 4.04\sqrt{kh}, \text{ м/с} \quad (2.5)$$

где k – коэффициент микроманометра, h – показания микроманометра.

2.4 Использование элементов теории подобия для анализа результатов измерений аэродинамических характеристик

Аэродинамический расчет любого аппарата связан с определением аэродинамических сил и моментов, действующих на него. Только в некоторых частных случаях данная задача может быть решена теоретическим путем, но теоретическая схема явлений в аэродинамике не всегда точно описывает их. Поэтому экспериментальный путь оказывается в большинстве случаев более надежным, но при условии соблюдения условий гидродинамического подобия [85].

Закон аэродинамического подобия является основой всей экспериментальной аэродинамики. В аэродинамических лабораториях обычно исследуются небольшие модели летательного аппарата или модели его частей. По результатам исследований этих моделей судят о летных свойствах летательного аппарата или об аэродинамических характеристиках его частей.

Практика показывает, что результаты экспериментальных исследований модели не всегда совпадают с данными, которые имеет натура. Это происходит в связи тем, что обтекание модели потоком в условиях, создаваемых в аэродинамической лаборатории, и тела в натуральных условиях не подобны. Для того чтобы по полученным аэродинамическим характеристикам модели судить об аэродинамических характеристиках природы, надо знать законы перехода от модели к натуре.

Теория аэродинамического подобия рассматривает два отдельных вопроса [86]:

1. Как перейти от аэродинамических характеристик модели к аэродинамическим характеристикам природы, если при исследовании модели подобие явлений было обеспечено.

2. Какие условия необходимо соблюдать при исследовании модели для того, чтобы обеспечить аэродинамическое подобие явлений.

В механике различают три вида подобия: геометрическое, кинематическое и динамическое. Два тела считаются геометрически подобными, если сходственные отрезки тел пропорциональны и углы между сходственными отрезками равны между собой.

В аэродинамике к этим условиям добавляется требование равенства углов, характеризующих положение тела в потоке, т.е. равенство углов атаки и скольжения.

Потоки считаются кинематически подобными, если скорости в сходственных точках пропорциональны и углы ориентировки векторов скоростей в сходственных точках одинаковы. Следовательно, кинематическое подобие предполагает наличие геометрического подобия поля векторов скоростей.

Явления обтекания тел потоком считаются динамически подобными в том случае, если силы, действующие на сходственные элементы, пропорциональны и углы ориентировки соответствующих векторов сил равны между собой. Это означает, что динамическое подобие предполагает наличие геометрического подобия поля векторов сил.

Для соблюдения механического подобия двух явлений требуется одновременное выполнение геометрического, кинематического и динамического подобия. Первые два условия являются необходимыми, но недостаточными. Достаточность условий подобия явлений обеспечивает динамическое подобие.

В жидкости действуют различные силы: давления, трения, тяжести, инерции, упругости и т.д. Соответственно, существует несколько критериев подобия, каждое из которых связывает две различные силы различной природы [87]. При соблюдении каждого из критериев по отдельности имеет место частичное подобие. Если выполняются все критерии подобия, то имеет место полное подобие.

Точка, в которой линия тока разветвляется, называется критической, или точкой полного торможения потока. Скорость в критической точке $V = 0$.

Запишем уравнение Бернулли для точки в невозмущенном потоке и критической точки

$$p_{\infty} + \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} = p_0 = const, \quad (2.6)$$

где p_0 – давление в критической точке (полное давление), равное сумме статического давления p_{∞} и скоростного напора на бесконечности.

В инженерной практике для вычисления коэффициента подъемной силы часто используется формула

$$C_y = \frac{\Delta F_y}{\rho \cdot \frac{u^2}{2} \cdot S}, \quad \text{или} \quad C_y = \frac{2F_y}{\rho u^2 \cdot S}. \quad (2.7)$$

Для расчета коэффициента лобового сопротивления C_x в ходе выполнения работы использовалась следующая формула:

$$C_x = \frac{\Delta F_x}{\rho \cdot \frac{u^2}{2} \cdot S}, \text{ или } C_x = \frac{2F_x}{\rho u^2 \cdot S}. \quad (2.8)$$

Здесь ΔF_x – сила лобового сопротивления, [Н]; ΔF_y – подъемная сила, [Н];

ρ – плотность воздуха, [кг/м³]; u – скорость потока воздуха, [м/с]; S – площадь миделевого сечения, [м²].

Для получения универсальных безразмерных зависимостей в экспериментах в качестве безразмерной скорости используется Re - число Рейнольдса, характеризующее отношение сил инерции к силам вязкости:

$$Re = \frac{u \cdot d_u}{\nu}, \quad (2.9)$$

где d_u – диаметр цилиндра, [м]; ν – кинематическая вязкость воздуха, [м²/с].

В условиях эксперимента значения плотности и вязкости воздуха равны соответственно: $\rho = 1.21$ кг/м³, $\nu = 1.49 \times 10^{-5}$ м²/с.

В проведенных экспериментах при прямом обтекании, когда поток перпендикулярно направлен по отношению к поверхности цилиндра, угол скоса потока равен 0, площадь миделевого сечения, равная максимальной обтекаемой площади поперечного сечения, вычислялась как произведение [88]:

$$S = L_u \times d_u, \quad (2.10)$$

где длина цилиндра $L_u = 0.36$ м; $d_u = 0.18$ м; $S = 0.0648$ м².

При обтекании под ненулевым углом скоса потока α площадь миделевого сечения рассчитывается как:

$$S_\alpha = S \times \sin \alpha. \quad (2.11)$$

В случае обтекания ветротурбины площадь миделевого сечения определяется как сумма поперечных сечений всех трех лопастей.

Для каждой лопасти в виде цилиндра переменного сечения площадь поперечного миделевого сечения определяется как площадь трапеции:

$$S = \frac{1}{2}(d_{y1} + d_{y2}) \times L_y \quad (2.12)$$

где d_{y1}, d_{y2} - диаметры цилиндра у основания и на конце лопасти; L_y - длина лопасти.

Тогда для ветротурбины с тремя лопастями в виде цилиндров с переменным сечением получаем

$$S = \frac{3}{2}(d_{y1} + d_{y2}) \times L_y \quad (2.13)$$

С использованием формул можно получить универсальные зависимости коэффициентов аэродинамических сил от числа Рейнольдса, что выполнено по результатам проведенных экспериментов.

2.5 Лабораторные образцы вращающихся цилиндров

Современный уровень развития техники и высоких технологий позволяет использовать вращающийся цилиндр как особый элемент для получения дополнительной подъемной силы, направленной поперек потока. При вращательном движении цилиндра в потоке воздуха в верхней части скорость потока и скорость поверхности совпадают, они складываются, и появляются ускорение потока и повышение скорости [89].

В нижней части цилиндра скорости потока и вращающейся поверхности направлены противоположно. Они вычитаются, происходит торможение и уменьшение скорости. Появление такой разницы скоростей приводит к появлению поперечной разницы давлений и возникновению поперечной подъемной силы, названной эффектом Магнуса. Данное явление нами использовано для создания ветродвигателя [90].

Основной частью экспериментальной установки является цилиндр с разными диаметрами и поверхностями.

Лабораторный макет цилиндра крепится на двух металлических стойках с диаметром 1 см и по двум дополнительным креплением на обеих стойках с диаметром 0,5 см стойки установлены на платформе с шириной 25 см, длиной 50 см. Возле стойки закреплен мощный двигатель, который приводит в действие сам цилиндр с помощью ремня. Для легкого вращения цилиндра на основные стойки были установлены подшипники с внутренним диаметром 0,6 см. Вся экспериментальная установка устанавливается на второй платформе с шириной 60 см и длиной 60 см, на которой была отградуирована шкала градусов с ценой деления 5° .

На рисунке 2.10 представлен внешний вид макета полусферического цилиндра с торцами диаметром 11 см.



Рисунок 2.10 - Фотоснимок внешнего вида макета полусферического цилиндра с торцами диаметром 11 см

На рисунках 2.11 – 2.15 показаны лабораторные образцы коротких цилиндров с разными геометрическими параметрами.

На рисунке 2.11 показан цилиндр с плоскими торцами с шероховатой рабочей поверхностью. Рабочая поверхность изготовлена из наждачной бумаги различной зернистости.



Рисунок 2.11 – Образец цилиндра диаметром 11,5 см с шероховатой поверхностью

На рисунке 2.12 показан образец цилиндра с плоскими торцами, гладкой поверхностью, с увеличенным диаметром 18 см.



Рисунок 2.12 – Образец экспериментального цилиндра диаметром 18 см с гладкой поверхностью

На рисунке 2.13 показан образец короткого цилиндра с полусферическими торцами.



Рисунок 2.13 – Образец экспериментального полусферического цилиндра с торцами

На рисунке 2.14 показан образец цилиндра с пористой поверхностью. Использование пористости вращающейся поверхности приводит к увеличению коэффициента подъемной силы при постоянном значении коэффициента лобового сопротивления, что обусловлено увеличением эффективности захвата частиц набегающего потока за счет эффекта пористости.



Рисунок 2.14 – Экспериментальный образец цилиндра с пористой поверхностью



Рисунок 2.15 - Экспериментальная установка усеченного конуса с шероховатой поверхностью

На рисунке 2.16 показан общий вид рабочей части аэродинамической трубы с установленными для исследования спаренными цилиндрами.



Рисунок 2.16 – Общий вид рабочей части аэродинамической трубы с установленными для исследования спаренными цилиндрами

На рисунке 2.17 показан общий вид рабочей части аэродинамической трубы с установленной для исследования системой вращающихся цилиндров, расположенных под углом друг к другу.



Рисунок 2.17 – Общий вид рабочей части аэродинамической трубы с установленной для исследования системой вращающихся цилиндров, расположенных под углом друг к другу

Таким образом, изготовлены лабораторные образцы коротких цилиндров с разными геометрическими параметрами, на которых в последующем будут проводиться лабораторные исследования.

2.6 Описание лабораторных моделей двух – и трехлопастных ветродвигателей

Для исследования процесса преобразования ветровой энергии воздушного потока в электрическую энергию в лабораторных условиях нами созданы специальные экспериментальные стенды ветродвигателя из систем вращающихся цилиндров, на которых можно определить и оценить использование энергии ветрового потока. Экспериментальные стенды относятся к ветроэнергетическим установкам с использованием эффекта Магнуса.

Стенд состоит из системы цилиндров и кронштейнов крепления, на которых установлены подшипники для фиксации осей вращения цилиндров. Цилиндры крепятся на горизонтальном валу, который поддерживается двумя металлическими стойками с каждого конца вала. Стойки установлены на платформе. На главной оси (вал) крепятся гладкие цилиндры, двигатель, коллекторно-щеточная система, и в конце вала – шкив.

Аэродинамические параметры потока изменились в следующих пределах:

- первый диапазон – малые скорости ветра – 2-5 м/с;
- второй диапазон – средние скорости ветра – 5-10 м/с;
- третий диапазон – высокие скорости ветра – свыше 10 м/с.

При этом скорость вращения изменилась от 500 до 1900 оборотов в минуту. Направления вращения могли быть сонаправленными и противоположно направленными.

Для того чтобы привести в действие вращения цилиндров, к двигателю через щеточно-коллекторный механизм подается электроток (напряжение). Коллектор установлен на валу и изолирован от него с помощью изоляционного материала. После коллектора ток направляется к генератору, который приводит во вращение цилиндрические лопасти.

Силу лобового сопротивления и подъемную силу измеряли динамическими весами, установленными в рабочей части аэродинамической трубы. Экспериментальный макет обтекался поперечным воздушным потоком, создаваемым в рабочей части аэродинамической трубы. Цилиндры приводились во вращение с помощью электромотора.

Погрешность измерения силы лобового сопротивления составляет 5–6 %.

На рисунке 2.18 показан экспериментальный макет двухлопастного ветродвигателя.

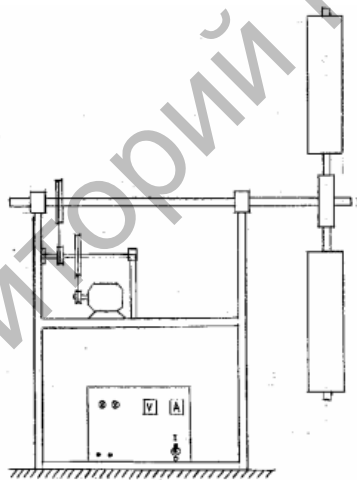


Рисунок 2.18 – Экспериментальный макет двухлопастного ветродвигателя

На рисунках 2.19 и 2.20 показаны макетный образец и основная ось вращения генератора (вид сбоку).

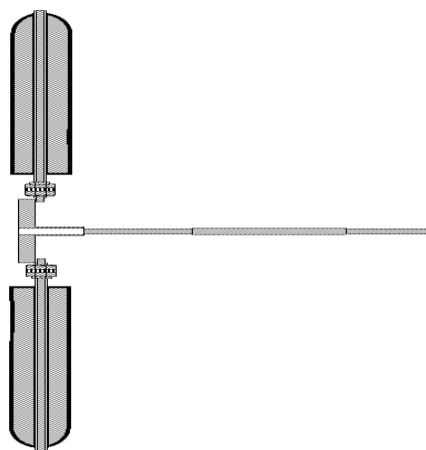


Рисунок 2.19 – Основная ось и вращающиеся цилиндры заданного сечения макетного образца ветродвигателя (вид сбоку)

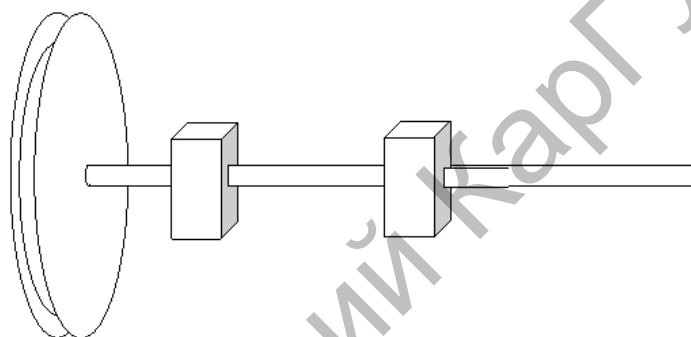
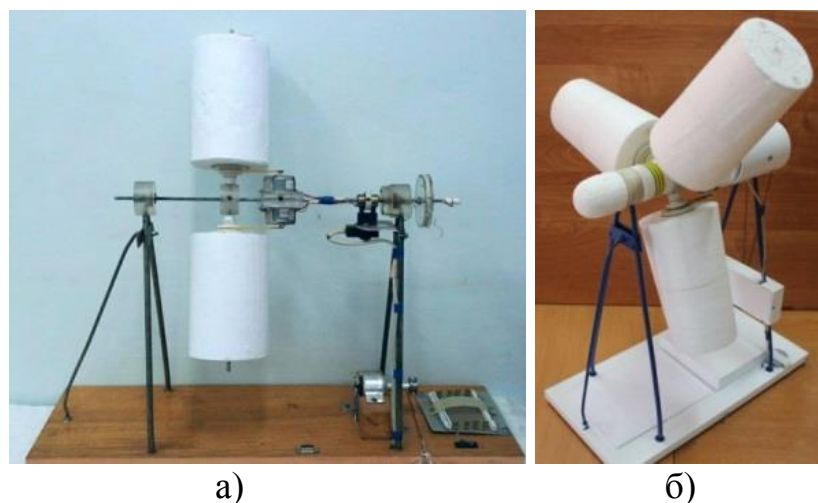


Рисунок 2.20 – Основная ось и шкив для вращения генератора макетного образца ветродвигателя (вид сбоку)

Изменяя напряжение можно было изменить обороты вращающихся элементов. Также для выработки электроэнергии установлен микро генератор, а к нему подключена проверочная лампочка с напряжением 3,5 В и с мощностью 5 Вт.

Геометрические размеры модели двухлопастного ветродвигателя цилиндрических элементов были следующими: $d = 5\text{ см}$ $\lambda_1 = \lambda_2 = 20\text{ см}$, для трехлопастного ветродвигателя: $D = 12\text{ см}$, $d = 10\text{ см}$, $l = 20\text{ см}$.

На рисунке 2.21 показан фотоснимок модели двух – и трехлопастного ветродвигателя.



а) двухлопастной ветродвигатель; б) трехлопастной ветродвигатель

Рисунок 2.21 – Лабораторная модель ветродвигателя

На рисунках 2.22 и 2.23 показаны модели ветродвигателей с вращающимися элементами, расположенными в рабочей части аэродинамической трубы.



Рисунок 2.22 – Модель ветродвигателя с двумя вращающимися элементами располагаемая в рабочей части аэродинамической трубы

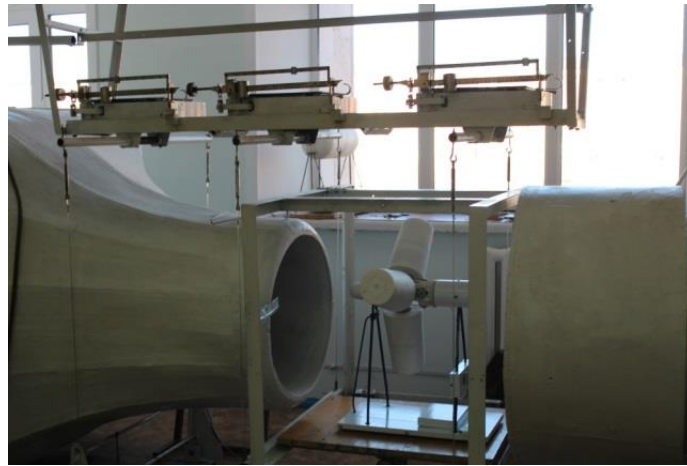


Рисунок 2.23 – Модель ветродвигателя с тремя вращающимися элементами, располагаемая в рабочей части аэродинамической трубы

Регулируемый диапазон изменения скорости вращения цилиндров был порядка 300–1500 оборотов в минуту. Измерение оборотов вращающихся цилиндров проводилось цифровым тахометром марки ТЦ-3М с фотоэнергетическим датчиком ДФ -1.

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИКИ КОРОТКИХ ЦИЛИНДРОВ

Цилиндрическое тело классически является неотъемлемым элементом практически всех аэро-гидродинамических аппаратов и теплообменных устройств. Особый интерес представляют особенности аэродинамики при поперечном обтекании и одновременном вращении вокруг цилиндра своей оси. В работе [91] приведено описание использования вращения поперечно обтекаемого цилиндра как способа устранения разности между скоростью внешнего потока и скоростью стенки с целью предотвращения образования и отрыва пограничного слоя.

На верхней стороне цилиндра, где течение жидкости и вращение стенки направлены в одну и ту же сторону, отрыв пограничного слоя полностью отсутствует. На нижней стороне, где течение жидкости и вращение стенки направлены в противоположные стороны, отрыва почти не возникает [92]. Линии тока подтверждают появление большой поперечной силы, направленной вверх, что связано с явлением, известным под названием эффекта Магнуса. Для тел иной формы осуществить движение обтекаемой стенки технически очень трудно, в связи с чем этот способ управления пограничным слоем почти не нашел практического применения. Современный уровень развития техники и высоких технологий позволяет использовать вращающийся цилиндр в качестве специального элемента аэродинамических аппаратов для создания большой подъемной силы, направленной поперек направления обтекаемого потока [93, 94].

3.1 Влияние угла скоса потока на аэродинамическое сопротивление и подъемную силу вращающихся цилиндров

Исследовано влияние угла скоса потока на аэродинамические характеристики вращающихся цилиндров с гладкой и шероховатой поверхностью. Скорость потока изменялась в пределах 5÷15 м/с.

На рисунке 3.1 показана схема расположения цилиндра, установленного на оси рабочей части аэродинамической трубы с углами скоса $\alpha = 0^{\circ}; 45^{\circ}; 90^{\circ}$.

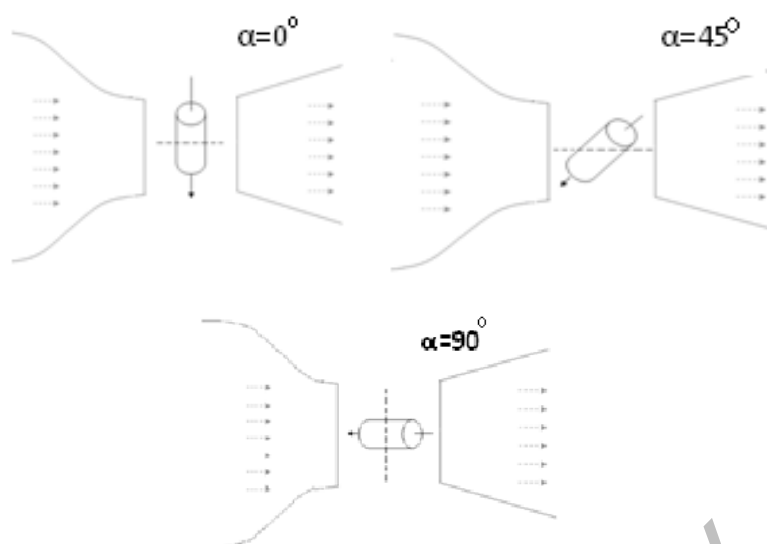


Рисунок 3.1 - Схема расположения цилиндра, установленного на оси рабочей части аэродинамической трубы

Эксперименты проводились с цилиндрами разных диаметров. Результаты измерения аэродинамических характеристик исследованных тел представлены на графиках в виде зависимостей (рисунки 3.2-3.7) [95]:

- зависимости силы лобового сопротивления от угла скоса потока для гладкого цилиндра диаметрами 11 см и 18 см;
- зависимости подъемной силы от угла скоса потока для гладкого цилиндра диаметрами 11 см и 18 см;
- зависимости силы лобового сопротивления от угла скоса потока для шероховатого цилиндра диаметром 11 см;
- зависимости подъемной силы от угла скоса потока для шероховатого цилиндра диаметром 11 см.

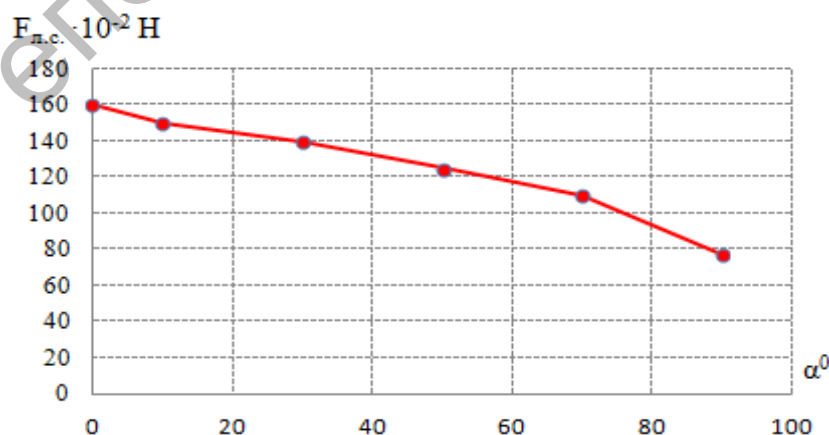


Рисунок 3.2 - График зависимости силы лобового сопротивления от угла скоса потока для гладкого цилиндра диаметром 11 см

На приведенных ниже графиках показано, что лобовое сопротивление вращающегося цилиндра диаметром 11 см шероховатой поверхностью и

диаметром 18 см с гладкой поверхностью с изменением угла скоса потока уменьшается (рисунки 3.3 и 3.4).

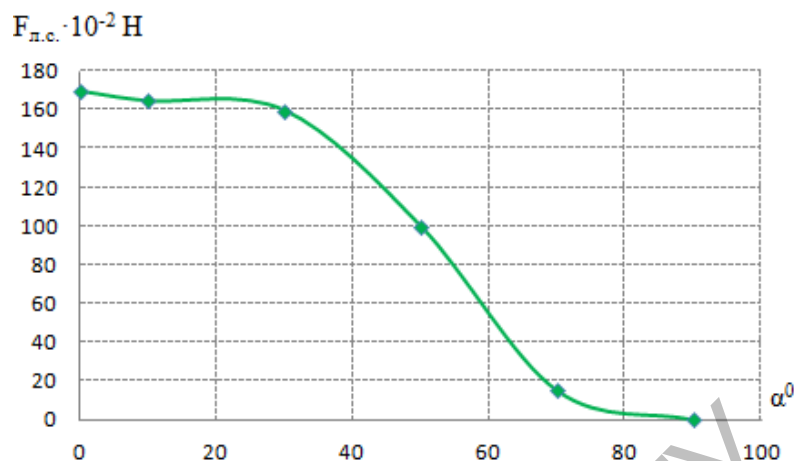


Рисунок 3.3 - График зависимости силы лобового сопротивления от угла скоса потока для шероховатого цилиндра диаметром 11 см

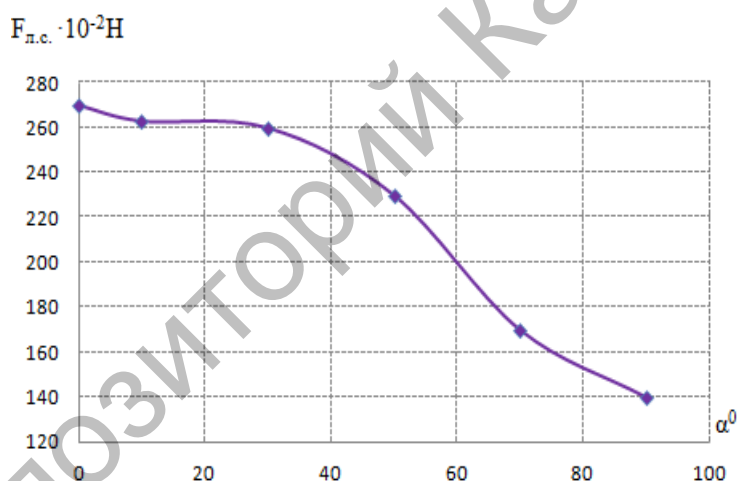
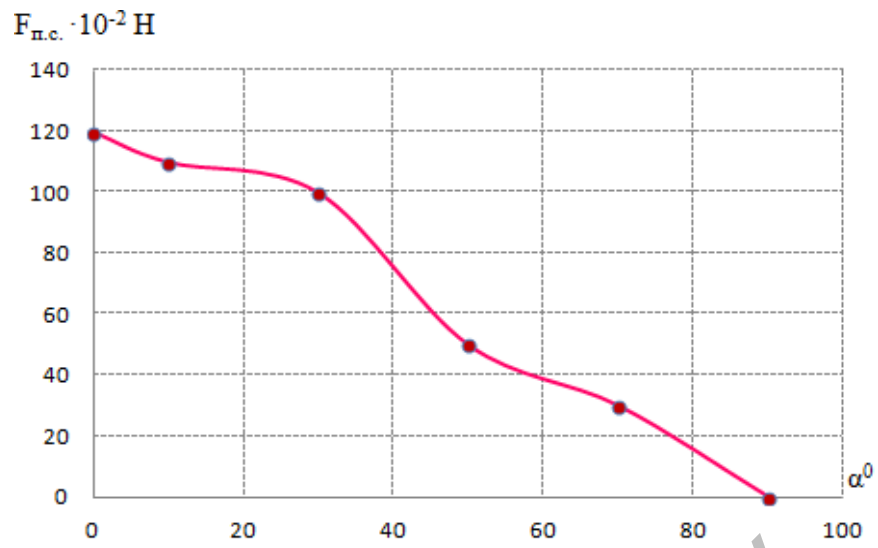
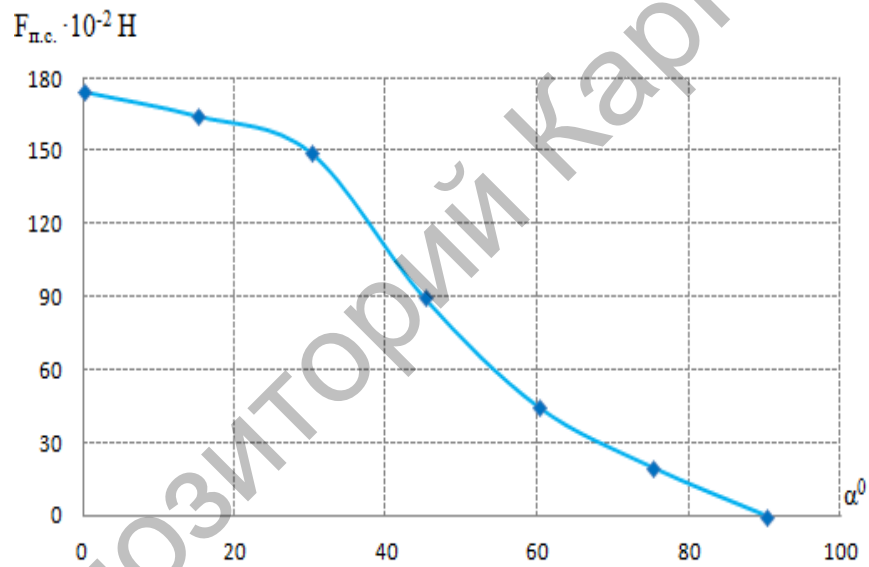


Рисунок 3.4 - График зависимости лобового сопротивления от угла скоса потока вращающегося цилиндра диаметром 18 см с гладкой поверхностью

На приведенных ниже графиках показано, что подъемная сила вращающегося цилиндра диаметром 11 см с гладкой поверхностью, диаметром 11 см с шероховатой поверхностью и диаметром 18 см с гладкой поверхностью с изменением угла скоса потока уменьшается, что необходимо для данного эксперимента (рисунок 3.5 и 3.6).



а) гладкая поверхность



б) шероховатая поверхность

Рисунок 3.5 - График зависимости подъемной силы от угла скоса потока для цилиндра диаметром 11 см

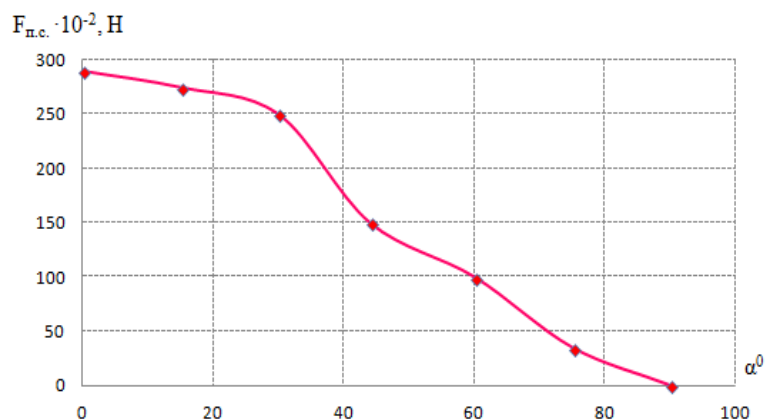


Рисунок 3.6 - График зависимости подъемной силы от угла скоса потока для цилиндра диаметром 18 см гладкой поверхностью

На рисунке 3.7 показан график зависимости коэффициента подъемной силы от угла скоса при различных значениях скорости ветра.

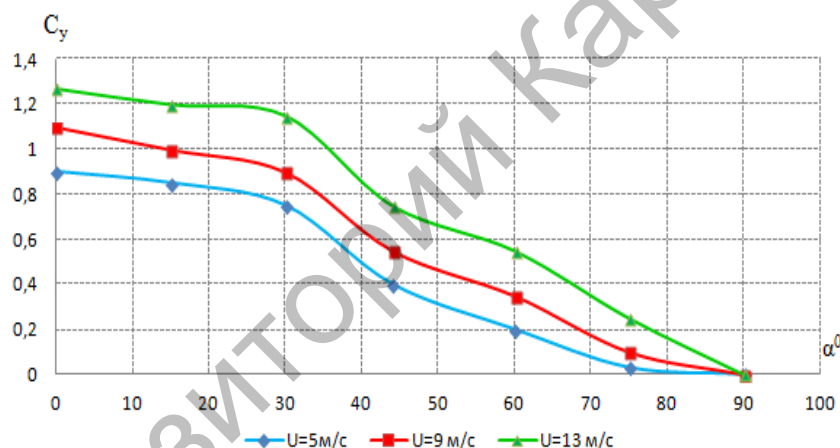


Рисунок 3.7 - Зависимость коэффициента подъемной силы от угла скоса при различных значениях скорости ветра

Из приведенных графиков видно, что уменьшение коэффициента подъемной силы наблюдается при углах скоса потока свыше 30° , поэтому в пределах углов скоса $-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ элемент ветродвигателя в виде вращающегося цилиндра работает эффективно. При углах скоса потока $-45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ силовой элемент ветродвигателя работает нормально, обеспечивается технически минимальный эффект работы, а при углах свыше 45° эффективность работы резко уменьшается.

Таким образом, установлено, что сила лобового сопротивления увеличивается с ростом скорости воздушного потока, однако с увеличением угла скоса потока, значения силы лобового сопротивления уменьшаются. Этот факт объясняется тем, что с увеличением отклонения направления потока от перпендикулярного к плоскости ветроколеса площадь миделевого сечения уменьшается. В диапазоне изменения углов

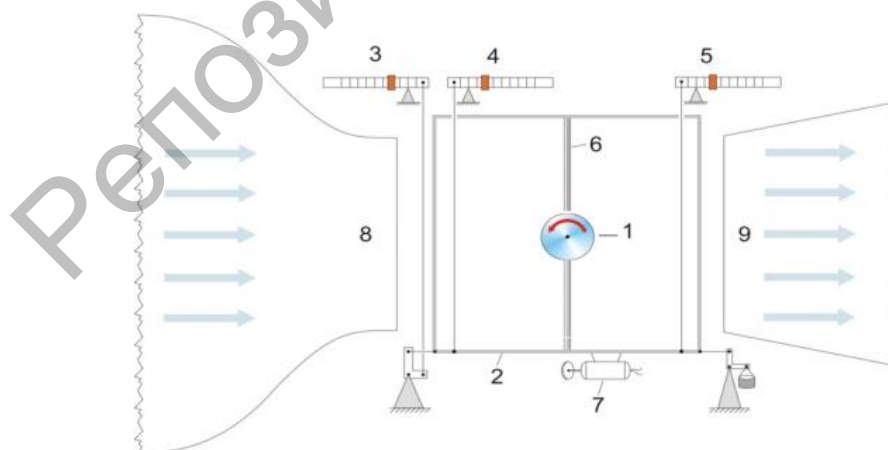
скоса $-30^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ значения силы лобового сопротивления и подъемной силы практически не изменяется. С увеличением угла скоса потока при его значениях свыше $\alpha \geq \pm 30^{\circ}$ наблюдается резкое уменьшение обеих аэродинамических параметров.

3.2 Анализ экспериментальных данных одиночного вращающегося цилиндра с гладкой и шероховатой поверхностью

Исследованы аэродинамические параметры одиночного вращающегося цилиндра с гладкой и шероховатой поверхностью в различных режимах обтекания потоком ветра. Получены зависимости подъемной силы вращающегося цилиндра с гладкой и шероховатой поверхностью от частоты вращения при скорости воздушного потока 5 и 10 м/с, диаметр цилиндра 50 мм [96].

Цилиндр приводился во вращение с помощью ременной передачи, питаемой от автотрансформатора электродвигателя с переменными оборотами. Воздушный поток в рабочей части аэродинамической трубы достаточно равномерный по всему сечению. Скорость набегающего потока менялась в пределах 3÷10 м/с, диаметры цилиндров $d - 50 \div 150$ мм, длина цилиндров $l - 300$ мм, диапазон изменения частоты вращения цилиндров составил $n - 100 \div 1500$ об/мин.

На рисунке 3.8 представлено схематичное расположение элементов экспериментальной установки.



1 – исследуемый цилиндр; 2 – рама для крепления макета с аэродинамическими весами; 3 – весы, измеряющие силу лобового сопротивления; 4,5 – весы, измеряющие подъемную силу; 6 – стойка для крепления цилиндров; 7 – двигатель для вращения цилиндров; 8,9 – диффузор и конфузор аэродинамической трубы

Рисунок 3.8 – Схема расположения цилиндра в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М

На рисунках 3.9–3.12 приведены результаты экспериментального исследования подъемной силы от частоты и направления вращения цилиндра гладкой и шероховатой поверхностью в потоке воздуха. Скорость воздушного потока 8 и 10 м/с, диаметр цилиндра 50 мм.

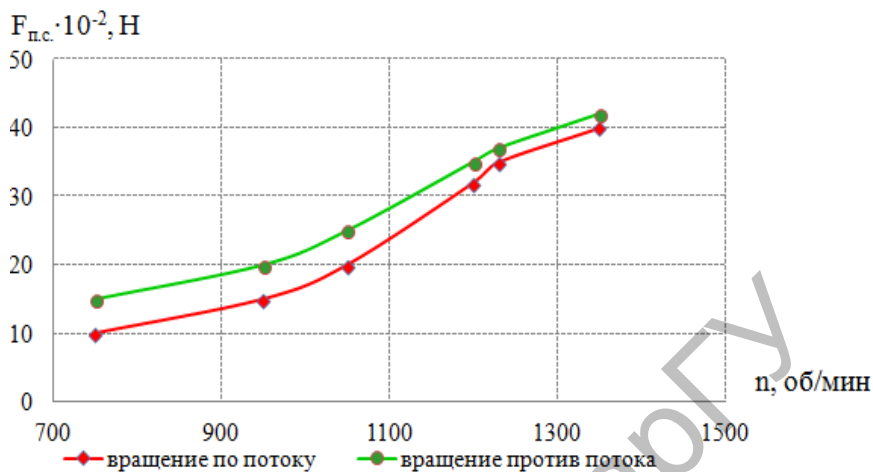


Рисунок 3.9 – Зависимость подъемной силы от частоты вращения цилиндра с гладкой поверхностью в потоке при скорости воздушного потока $U=8$ м/с, диаметр $D = 50$ мм

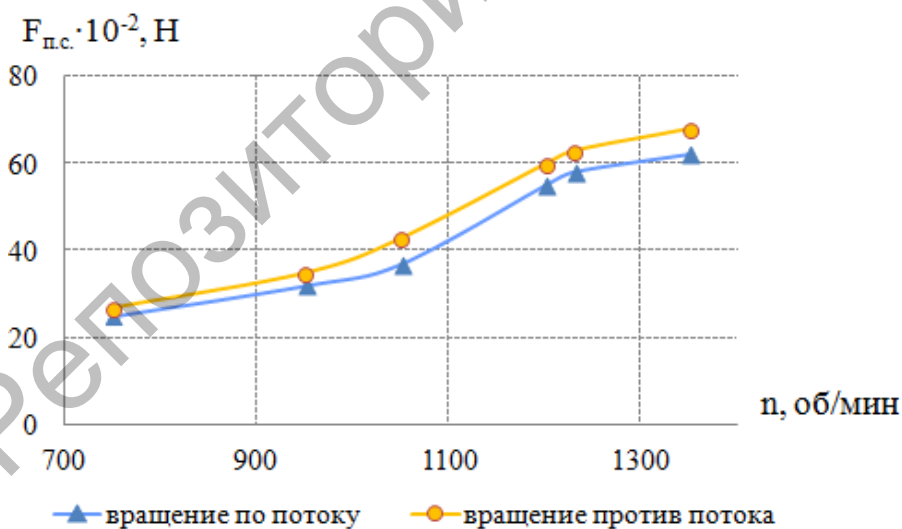


Рисунок 3.10 – Зависимость подъемной силы от частоты вращения цилиндра с шероховатой поверхностью в потоке при скорости воздушного потока $U= 8$ м/с, диаметр $D = 50$ мм

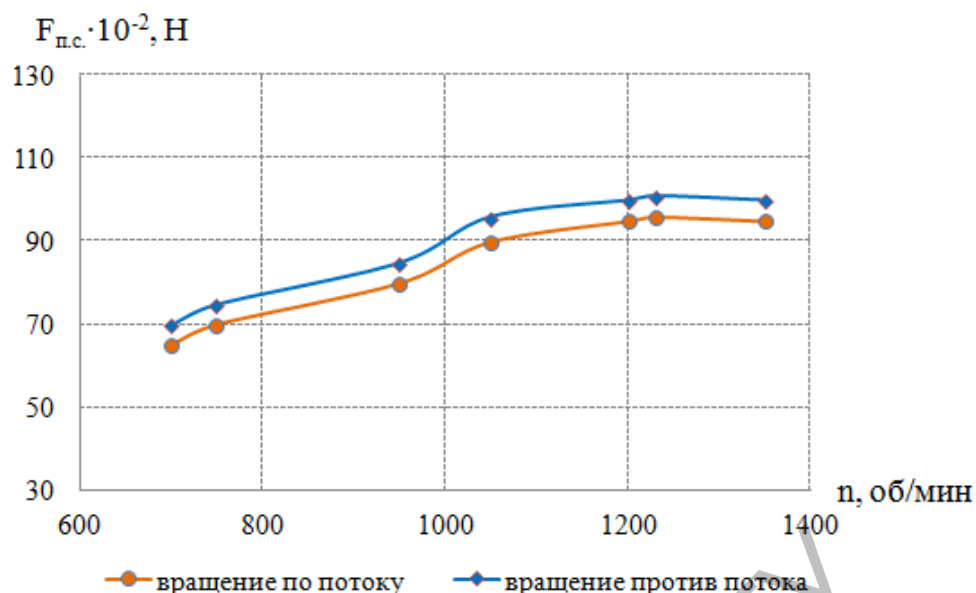


Рисунок 3.11 - Зависимость подъемной силы от частоты вращения цилиндра с гладкой поверхностью в потоке при скорости воздушного потока $U = 12$ м/с, диаметр $D = 50$ мм

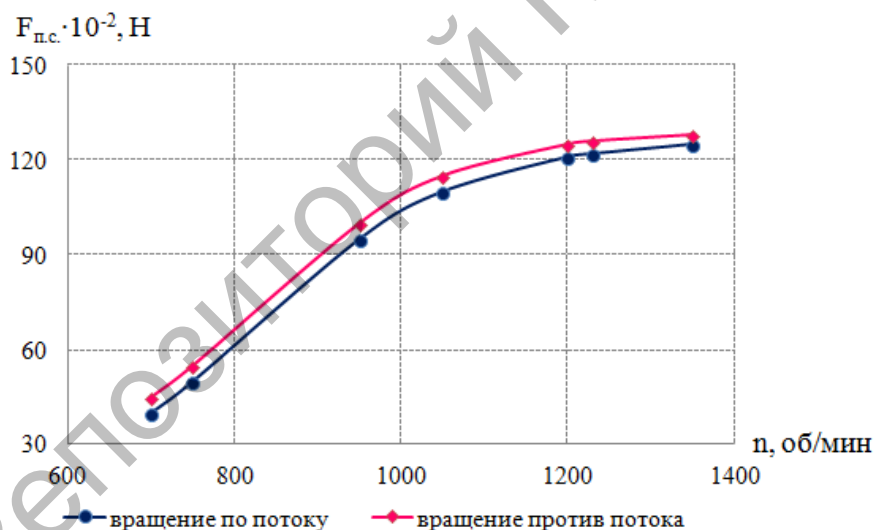


Рисунок 3.12 - Зависимость подъемной силы от частоты вращения цилиндра с шероховатой поверхностью в потоке при скорости воздушного потока $U = 12$ м/с, диаметр $D = 50$ мм

Данные, полученные при вращении цилиндра по потоку и против потока, качественно повторяют друг друга, имеются только некоторые отличия в числовых данных.

Наличие зернистой шероховатости приводит к увеличению подъемной силы на 30 %. С ростом диаметра цилиндра подъемная сила увеличивается, например, при скорости потока 10 м/с. Рост диаметра от 50 до 150 мм

приводит к увеличению подъемной силы более чем в 1,5 раза (рисунок 3.13).

Но величина подъемной силы возрастает только до определенного значения скорости вращения цилиндра, при дальнейшем возрастании частоты вращения увеличения не наблюдается.

На рисунке 3.13 (а, б) показан сводный график зависимости максимальной и подъемной силы от скорости набегающего потока для цилиндров с гладкими и шероховатыми поверхностями. Расчет коэффициента сопротивления подъемной силы рассчитывался по формуле (2.8).

Увеличение числа Рейнольдса приводит к уменьшению коэффициента подъемной силы, при этом наблюдается чёткое расслоение линий зависимости по диаметрам исследованных цилиндров.

Таким образом, проведенные испытания подъемной силы при поперечном обтекании вращающегося цилиндра при скоростях набегающего потока от 5 до 10 м/с и угловых скоростях вращения цилиндра от 300 до 1300 об/мин показывают удовлетворительное согласие с расчетными данными.

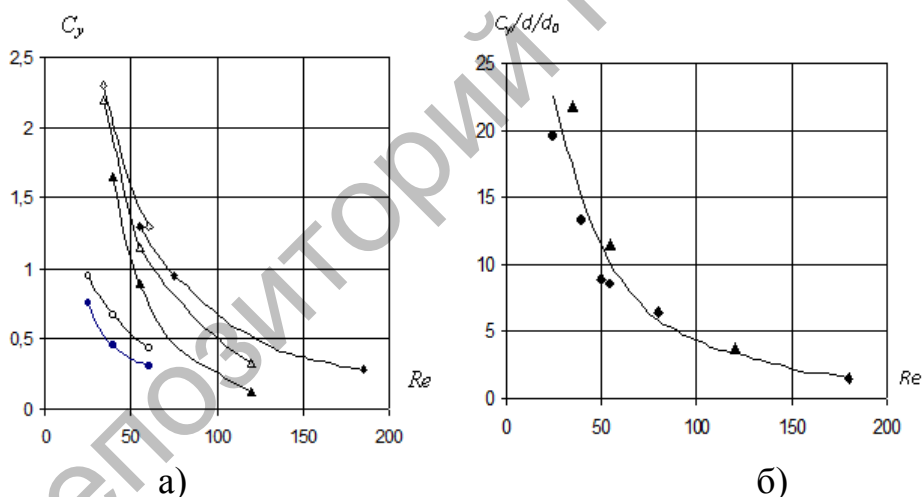


Рисунок 3.13 – Зависимость коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса: ●, ▲, ◆ – цилиндр с гладкой поверхностью; ○, △, ◇ – цилиндр с шероховатой поверхностью: D = ●, ○ - 50 мм; ▲, △ - 100 мм; ◆, ◇ - 150 мм

3.3 Анализ экспериментальных исследований аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра в форме усеченного конуса

Экспериментальные исследования проводились с вращающимся цилиндром в форме усеченного конуса с гладкой и шероховатой поверхностью. Скорость воздушного потока от 5 до 15 м/с, диаметр цилиндра D = 150 мм, d=35÷68 мм, длина цилиндра 330 мм.

На рисунках 3.14 и 3.15 представлены зависимости подъемной силы от скорости воздушного потока для гладкого конуса и шероховатого конуса с вращением. Параметр конусности менялась в пределах $0,25 \div 0,35$.

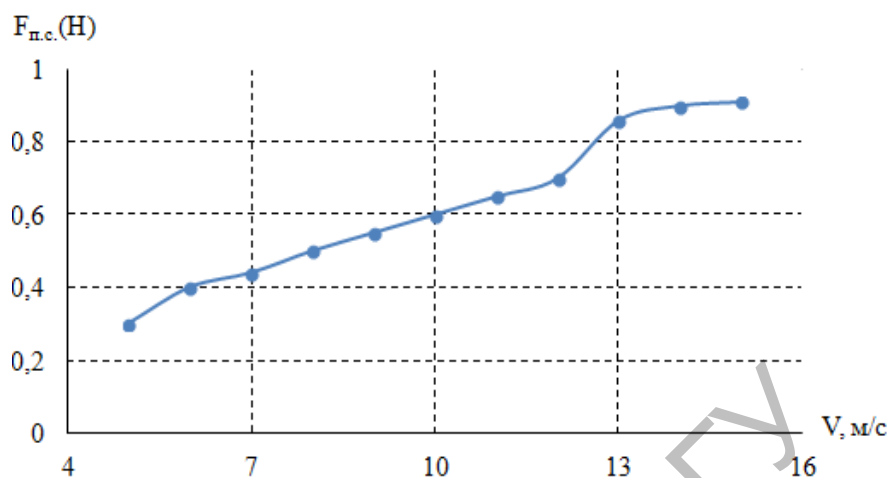


Рисунок 3.14 – Зависимость подъемной силы от скорости потока для гладкого конуса с вращением

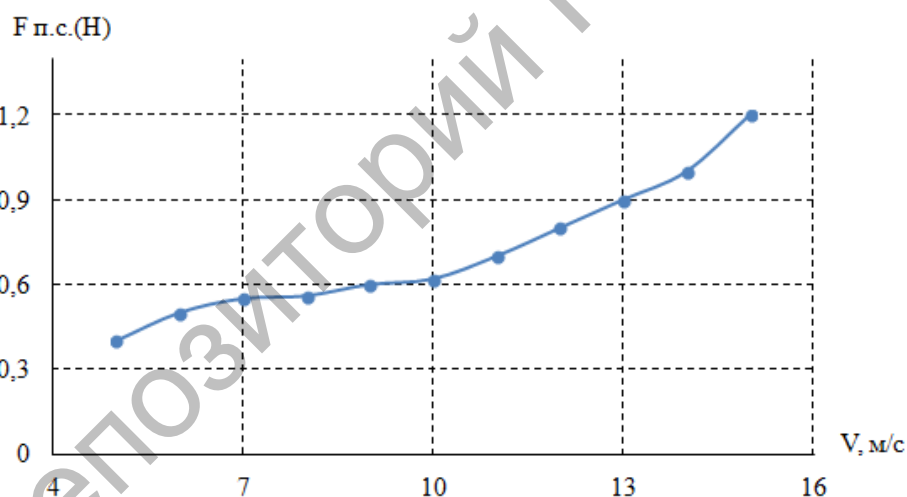


Рисунок 3.15 – Зависимость подъемной силы от скорости потока для шероховатого конуса с вращением

Видно, что качественно характер зависимостей повторяет данные, полученные для ранее описанного цилиндра. С ростом количества оборотов конуса подъемная сила возрастает. Этот рост тем выше, чем больше скорость набегающего потока. Шероховатость обтекаемой поверхности усиливает эффект увеличения максимума подъемной силы [97].

На рисунках 3.16 и 3.17 представлены зависимости коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса вращающегося цилиндра в форме усеченного конуса с гладкой и шероховатой поверхностью.

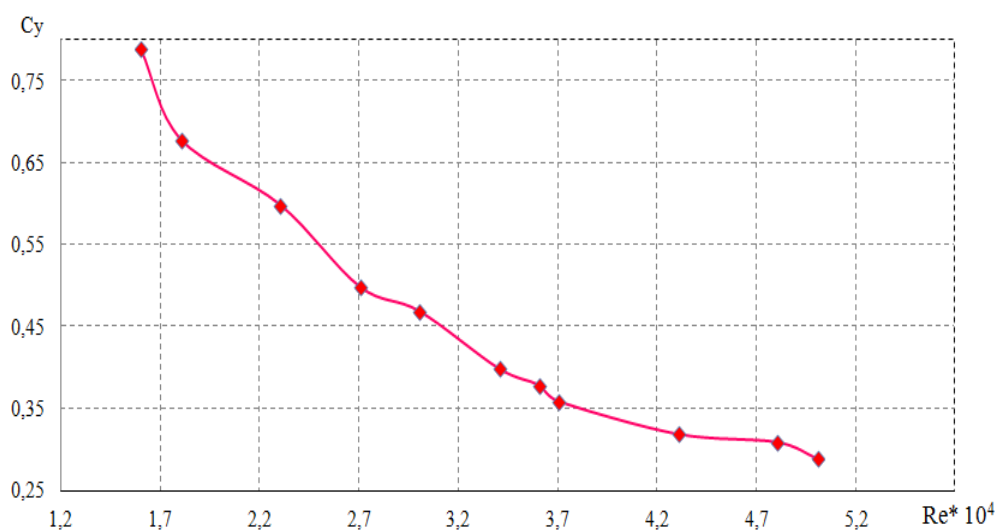


Рисунок 3.16 – Зависимость коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса для гладкого конуса с вращением

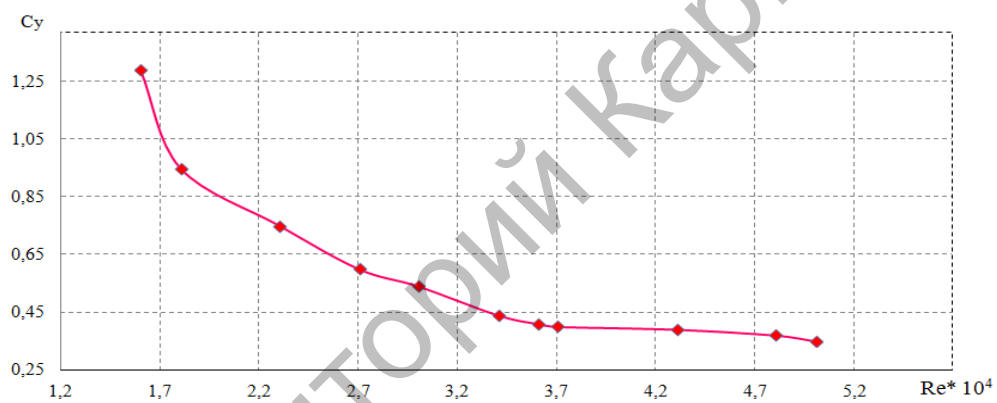


Рисунок 3.17 – Зависимость коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса для шероховатого конуса с вращением

Полученные данные с физической точки зрения качественно не отличаются друг от друга. Наблюдаются отличия в числовых значениях максимального значения коэффициента подъемной силы.

Также получены результаты зависимостей силы лобового сопротивления от скорости воздушного потока, коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса для конуса с вращением и с учетом параметров конусности (рисунки 3.18, 3.19).

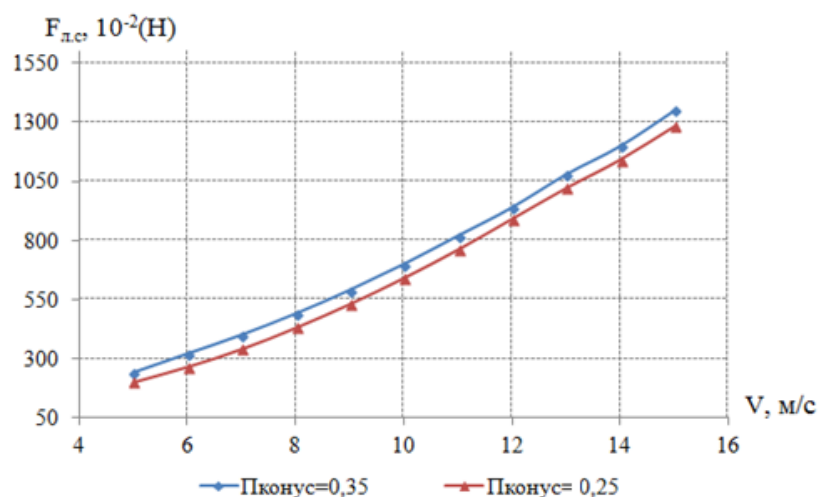


Рисунок 3.18 – Зависимость силы лобового сопротивления от скорости потока конуса с вращением

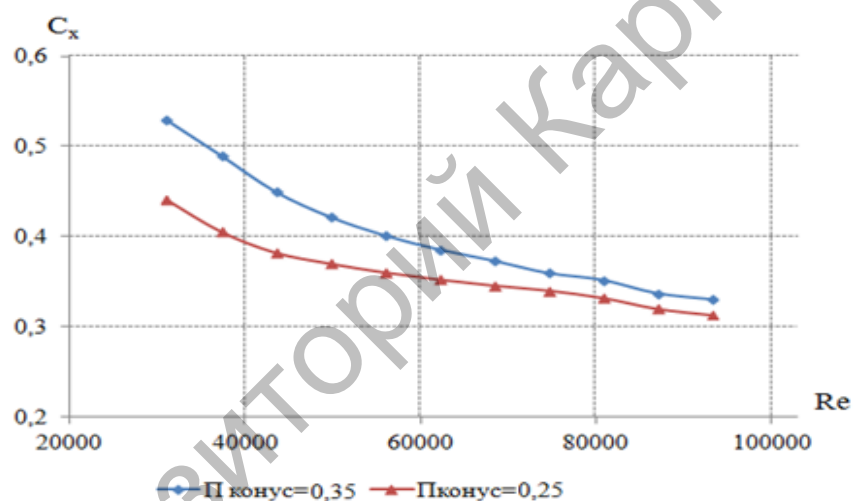


Рисунок 3.19 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса для конуса с вращением

Наличие шероховатости поверхности вращающихся цилиндров приводит к увеличению подъемной силы на 25–30%. Этот положительный эффект связан с дополнительной турбулизацией потока как за счет шероховатой поверхности вращающегося цилиндра, так и за счет возникающей силы Магнуса.

Это явление используется далее в данной работе при разработке макета многолопастной ветротурбины с силовыми элементами в виде вращающихся цилиндров переменного сечения.

Подводя итоги изучения зависимости подъемной силы от скорости вращения конуса, приходим к выводу о том, что с ростом скорости потока, скорость вращения конуса и шероховатости поверхности конуса возрастает подъемная сила. Установлено, что переменность сечения вращающегося цилиндра в потоке воздуха в диапазоне изменения

параметра конусности $0,25 \div 0,35$ обеспечивает уменьшение коэффициента лобового сопротивления при сохранении значений коэффициента подъемной силы, что достигается за счет оптимальной геометрической формы.

3.4 Анализ экспериментальных данных спаренных вращающихся цилиндров

Для изучения системы вращающихся цилиндров нами проведены экспериментальные исследования аэродинамических параметров из двух вращающихся цилиндров, расположенных параллельно друг другу [98].

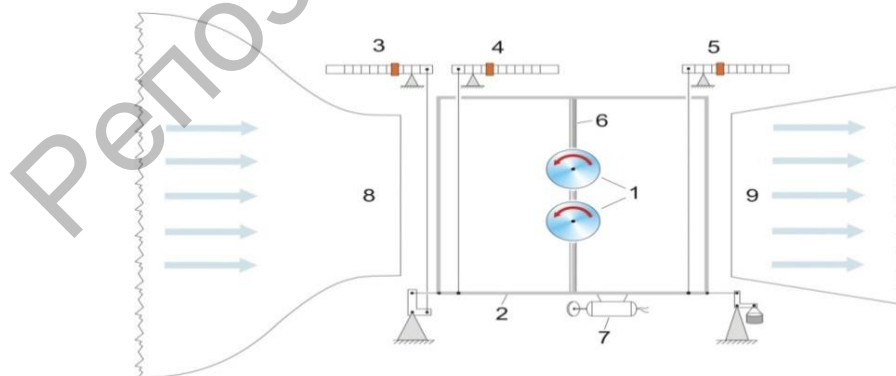
На рисунке 3.20 показана схема рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М, в которой поток воздуха, набегая на лобовую часть цилиндра, прикладывает силу, и эта сила отражается на весах.

Испытания проводились с двумя вращающимися цилиндрами диаметром 100 мм, скорость воздушного потока от 5 до 10 м/с. При этом скорость набегающего потока и частота вращения цилиндров оставались неизменными.

Лабораторные исследования проводились при разных расстояниях между цилиндрами.

При исследовании аэродинамических характеристик двух вращающихся цилиндров были рассмотрены два случая:

- оба цилиндры вращаются в одну сторону против потока воздуха;
- цилиндры вращаются противоположно друг другу.



1 – исследуемые цилиндры; 2 – рама для крепления макета с аэродинамическими весами; 3 – весы, измеряющие силу лобового сопротивления; 4,5 – весы, измеряющие подъемную силу; 6 – стойка для крепления цилиндров; 7 – двигатель для вращения цилиндров; 8,9 – диффузор и конфузор аэродинамической трубы

Рисунок 3.20 – Схема расположения параллельно друг другу двух вращающихся цилиндров в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М

Во время эксперимента были получены экспериментальные данные и построены графики зависимости коэффициентов аэродинамических характеристик от расстояния между цилиндрами L .

На рисунке 3.21 представлен график зависимости коэффициента лобового сопротивления от расстояния между цилиндрами, вращающимися в одном направлении.

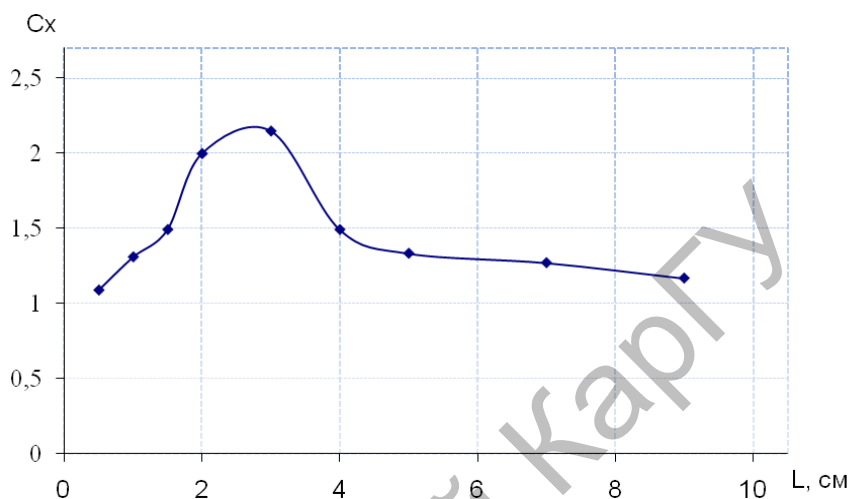


Рисунок 3.21 – График зависимости коэффициента лобового сопротивления от расстояния между цилиндрами, вращающимися в одном направлении

С увеличением расстояния между цилиндрами до 3 см, коэффициент силы лобового сопротивления увеличивается, но с дальнейшим увеличением расстояния между ними с 3 до 4 см значения коэффициента лобового сопротивления и взаимовлияние цилиндров друг на друга постепенно уменьшаются по оси ординат с 2,3 до 1,4, а с дальнейшим увеличением расстояния между ними взаимовлияние цилиндров друг на друга практически исчезает.

Из графика рисунка 3.22 видно, что с увеличением скорости вращения цилиндров значение коэффициента подъемной силы увеличивается.

С увеличением расстояния между цилиндрами до 3 см, коэффициент подъемной силы растет, при дальнейшем увеличении расстояния с 3 до 4 см значения коэффициента подъемной силы и взаимовлияние цилиндров друг на друга постепенно уменьшаются по оси ординат с 1,3 до 1, а с увеличением расстояния между ними взаимовлияние цилиндров исчезает.

На рисунке 3.22 представлен график зависимости коэффициента подъемной силы от расстояния между цилиндрами, вращающихся в одном направлении.

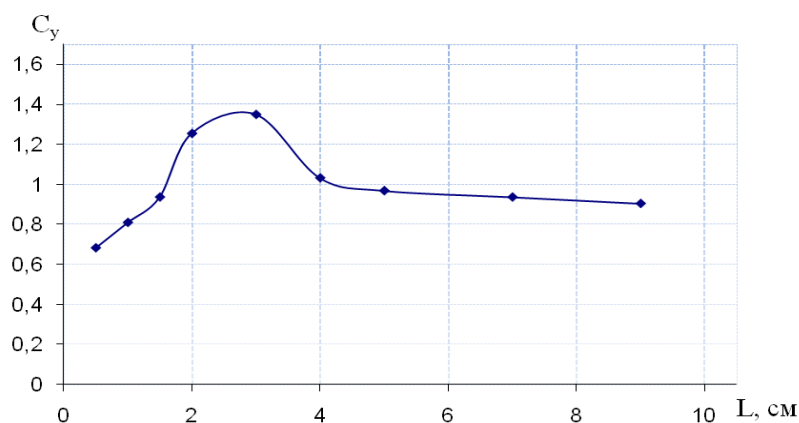


Рисунок 3.22 - График зависимости коэффициента подъемной силы от расстояния между цилиндрами, вращающимися в одном направлении

Далее представлены уникальные графики зависимостей коэффициента лобового сопротивления и коэффициента подъемной силы цилиндров от расстояния между цилиндрами, вращающимися в противоположных направлениях (рисунки 3.23, 3.24). В этом случае возникающие в следе за вращающимися цилиндрами вихри будут приближаться друг к другу, затем сливаться, как бы создавая область, похожую на хорошо обтекаемое тело.

На рисунке 3.23 показан график зависимости коэффициента лобового сопротивления от расстояния между цилиндрами, вращающимися в противоположном направлении.

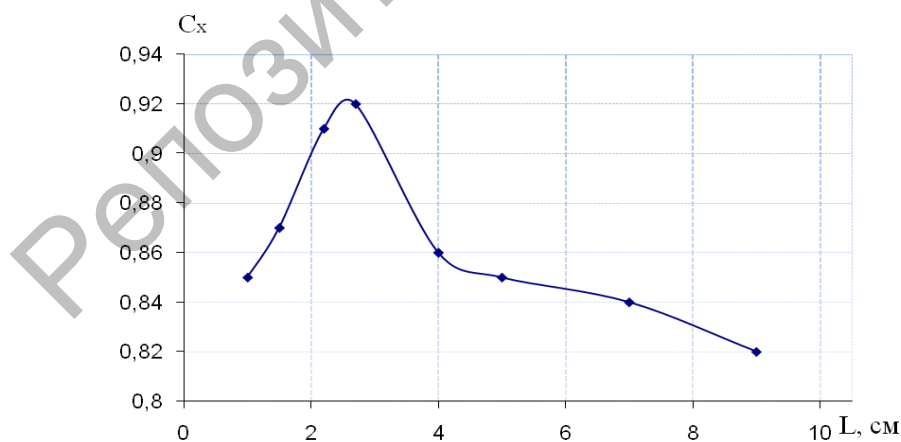


Рисунок 3.23 – График зависимости коэффициента лобового сопротивления от расстояния между цилиндрами, вращающимися в противоположных направлениях

На рисунке 3.24 показан график зависимости коэффициента подъемной силы от расстояния между цилиндрами, вращающимися в противоположном направлении.

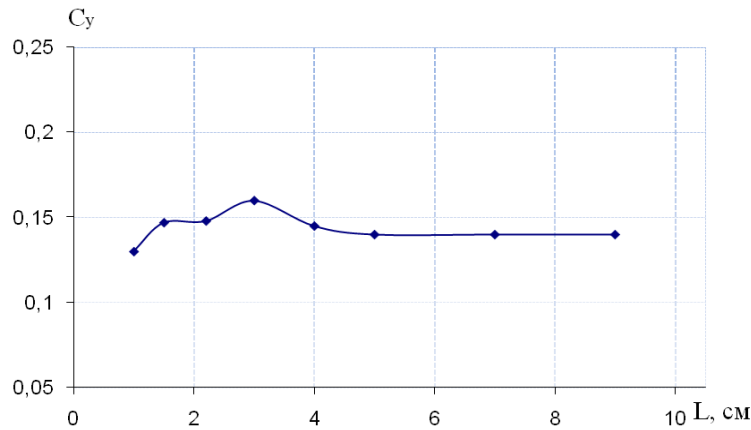


Рисунок 3.24 – График зависимости коэффициента подъемной силы от расстояния между цилиндрами, вращающихся в противоположных направлениях

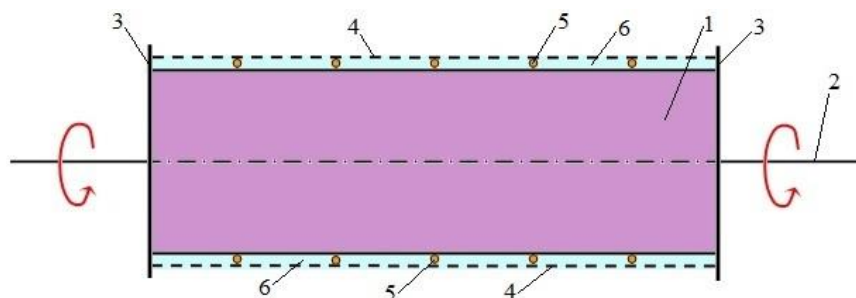
Из полученных графиков мы видим, что, в отличие от цилиндров, вращающихся в одном направлении, противоположно вращающиеся цилиндры практически не создают подъемную силу, так как с увеличением расстояния между цилиндрами значение коэффициента подъемной силы практически ни возрастает, ни уменьшается, т.е. начиная с 4 см взаимовлияние цилиндров друг на друга практически исчезает.

Таким образом, в отличие от существующих методов данный подход основан на активном захвате потока воздуха вращающимися цилиндрическими элементами. Постоянность сечения обеспечивает вращающимся элементам оптимальное аэродинамическое сопротивление и достаточно высокую силу тяги. Расстояние, начиная с которого, взаимовлияние цилиндров друг на друга практически исчезает, составляет 4 см. или 0,4 диаметра исследуемых цилиндров. Это расстояние, как правило, устанавливается для любой исследуемой системы цилиндров экспериментальным путем.

3.5 Анализ влияния пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра

Было приведено исследование влияния пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра. Испытания проводились в диапазоне скоростей воздушного потока 5...13 м/с ($Re=40000...105000$) при постоянном числе оборотов цилиндра вокруг собственной оси [99].

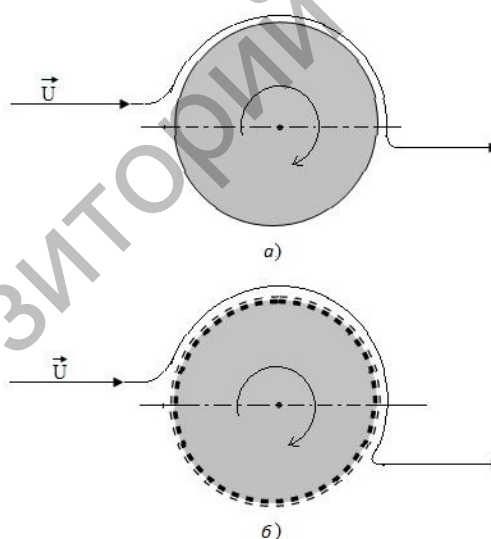
На рисунке 3.25 показана схема продольного сечения вращающегося пористого цилиндра.



1 – вращающийся цилиндр; 2 – ось вращающегося цилиндра; 3 – ограничивающие диски; 4 – пористая поверхность; 5 – опора-держатель пористой поверхности в вращающемся цилиндре; 6 – воздушный слой под пористой поверхностью

Рисунок 3.25 - Схема продольного сечения вращающегося пористого цилиндра

На рисунке 3.26 схематически показана картина обтекания вращающегося гладкого цилиндра и цилиндра с пористой поверхностью.



а) обтекания цилиндра гладкой поверхностью;
б) обтекания цилиндра с пористой поверхностью

Рисунок 3.26 - Схема обтекания вращающегося цилиндра с воздушным потоком

Цилиндры при вращении увлекают за собой частицы воздуха, находящиеся вблизи их поверхности. Эти частицы будут двигаться по поверхности цилиндра по направлению вращения цилиндра, создавая вращательный воздушный поток.

При обтекании вращающегося цилиндра воздушным потоком частицы воздуха набегающего потока, обтекая цилиндр от действия потока вокруг поверхности вращающегося цилиндра, изменяют свою траекторию движения по направлению вращения цилиндра. Увлечение частиц набегающего потока вращательным потоком и сгиб линии набегающего потока зависят от типа поверхности и скорости вращения. Цилиндр с пористой поверхностью при вращении более увлекает набегающий поток, чем цилиндр с гладкой поверхностью.

Экспериментальные исследования для сравнения проводились на трех видах цилиндра длиной 330 мм и с диаметрами 120 мм, 121,5 мм, 122 мм: 1- гладкий цилиндр; 2-цилиндр с поверхностью пористости №1, размер ячеек пористости было до 1 мм; 3-цилиндр с поверхностью пористости №2, размер ячеек пористости 2 мм. Параметр пористости цилиндров с пористой поверхностью менялся в диапазоне $0,2 \leq P_p \leq 0,3$.

Экспериментальный макет обтекался поперечным воздушным потоком, создаваемым в рабочей части аэродинамической трубы. Цилиндр приводился во вращение с помощью электромотора.

Поток воздуха, набега на лобовую часть цилиндра, прикладывает силу, которая отражается на весах.

Зависимости коэффициента лобового сопротивления C_x и подъемной силы от числа Re приведены в рисунках 3.27 и 3.28.

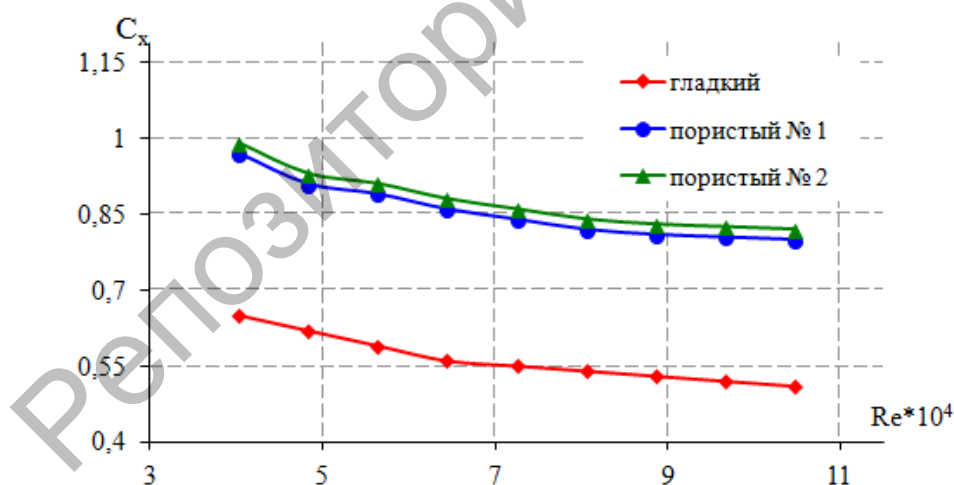


Рисунок 3.27 - Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса

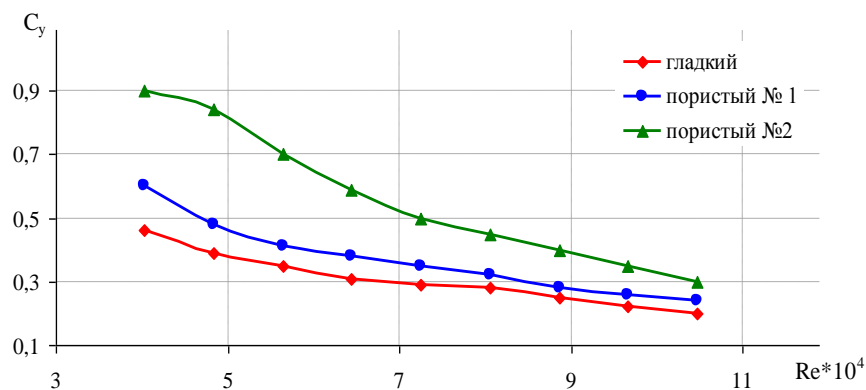


Рисунок 3.28 - Зависимость коэффициента подъемной силы от числа Рейнольдса

Из рисунков 3.27 и 3.28 видно, что коэффициент лобового сопротивления и коэффициент подъемной силы вращающегося цилиндра уменьшается с увеличением скорости потока (чисел Re).

В ходе эксперимента, помимо исследований зависимостей коэффициентов аэродинамических характеристик, исследована зависимость коэффициента лобового сопротивления и коэффициента подъемной силы от частоты вращения цилиндра вокруг собственной оси при постоянной скорости набегающего потока.

На рисунке 3.29 приведен график зависимости коэффициента лобового сопротивления от частоты вращения при постоянной скорости воздушного потока, набегающего на цилиндр.

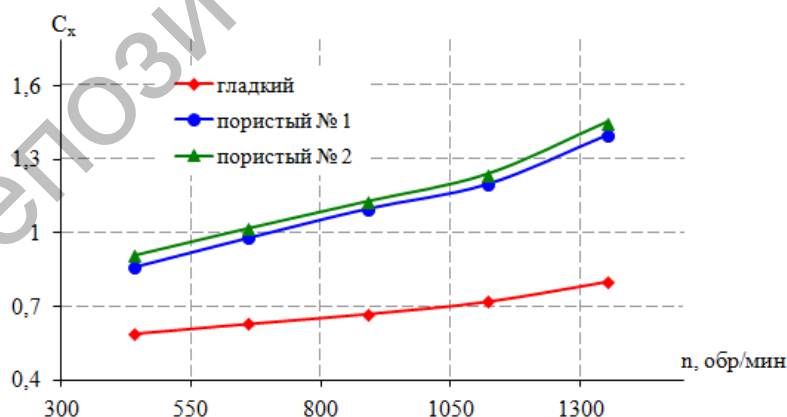


Рисунок 3.29 - Зависимость коэффициента лобового сопротивления вращающегося цилиндра от частоты вращения

Из рисунка 3.29 видно, что при увеличении частоты вращения цилиндра повышается коэффициент лобового сопротивления. Это связано с тем, что когда поток с определенной скоростью обтекает вращающийся цилиндр, за ним образуются вихревые потоки. Эти вихревые потоки будут взаимодействовать с частицами воздуха на поверхности цилиндра с задней

стороны и препятствовать набегающему потоку. С увеличением частоты вращения силы препятствия цилиндра потоку растет. Следовательно, увеличивается лобовое сопротивление вращающегося цилиндра.

На рисунке 3.30 приведена зависимость коэффициента подъемной силы от частоты вращения цилиндра, при постоянной скорости поперечно обтекающего потока.

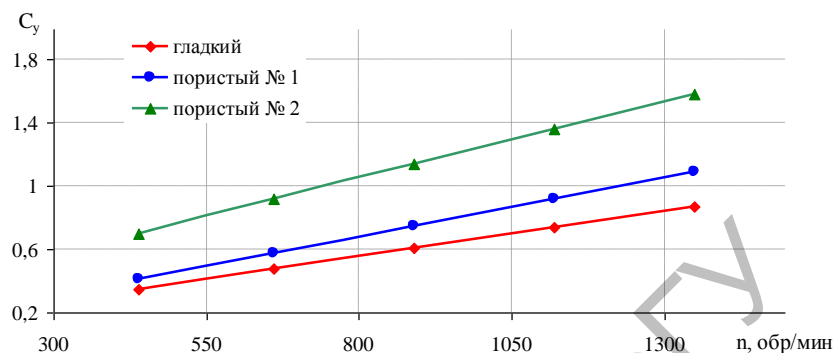


Рисунок 3.30 - Зависимость коэффициента подъемной силы вращающегося цилиндра от частоты вращения

Из рисунков 3.29 и 3.30 видно, что коэффициент подъемной силы вращающегося цилиндра повышается с увеличением частоты вращения цилиндра при постоянной скорости воздушного потока. Это обусловлено тем, что когда цилиндр начинает вращаться, он образует вихревое движение вокруг себя. При своем вращении цилиндр увлекает прилегающие слои воздуха, в результате окружающий воздух получает, кроме поступательного движения, еще и вращения вокруг цилиндра. В тех местах, где скорость поступательного и вращательного движения складывается, результирующая скорость превосходит скорость потока, набегающего на цилиндр. А с противоположной стороны цилиндра скорости вычитаются, и результирующая скорость меньше, чем скорость потока вдали от цилиндра. В результате появляется разность давлений в поверхности цилиндра. Эти разности имеют влияние на коэффициенты аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра. С увеличением частоты вращений цилиндра увеличивается разность давлений на поверхности цилиндра. Следовательно, увеличиваются коэффициенты аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра [100].

Из приведенных выше графиков видно, что с увеличением пористости поверхности цилиндра численно увеличиваются коэффициенты аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра. Причина заключается в следующем: при обтекании вращающегося цилиндра с пористой поверхностью воздушным потоком на его поверхности образуется пограничный слой, который с увеличением параметра пористости будет расширяться.

На основании экспериментальных исследований влияния пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра установлено, что:

- при увеличении частоты вращения цилиндра вокруг собственной оси увеличиваются численные значения исследуемых аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра;

- аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра зависят от параметра пористости поверхности цилиндра. При малых изменениях параметра пористости порядка $0,2 \leq \Pi_n \leq 0,3$ приводит к увеличению коэффициента подъемной силы при постоянном значении коэффициента лобового сопротивления, что обусловлено увеличением эффективности захвата частиц набегающего потока за счет эффекта пористости.

Таким образом, установлены универсальные зависимости влияния пористости и шероховатости на аэродинамические параметры вращающихся цилиндров при различных режимах обтекания.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦИЛИНДРОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

4.1 Анализ экспериментального исследования аэродинамических характеристик элементов вращающегося цилиндра с полусферическими торцами

Следующие серии опытов проводились с цилиндрами переменного сечения полусферическими торцевыми элементами. Результаты измерения аэродинамических характеристик исследованных тел представлены в виде зависимостей [101]:

- силы лобового сопротивления и коэффициента лобового сопротивления от числа оборотов вращения исследуемого тела;
- коэффициента лобового сопротивления от скорости набегающего потока;
- зависимости подъемной силы от числа оборотов изучаемого тела и от скорости набегающего потока.

По полученным результатам построены графики зависимостей силы лобового сопротивления от числа оборотов в минуту и от скорости воздушного потока. Диаметр полусферического цилиндра 10 см, скорость воздушного потока от 5 до 15 м/с.

На рисунке 4.1 показан график зависимости силы лобового сопротивления от числа оборотов в минуту.

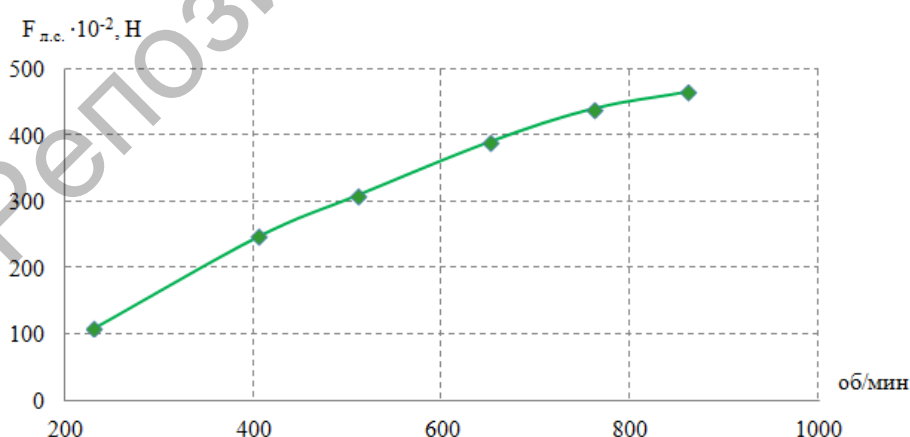


Рисунок 4.1– Зависимость лобового сопротивления от числа оборотов в минуту при $U = \text{const}$

На рисунке 4.2 показан график зависимости силы лобового сопротивления от скорости воздушного потока при $n = \text{const}$.

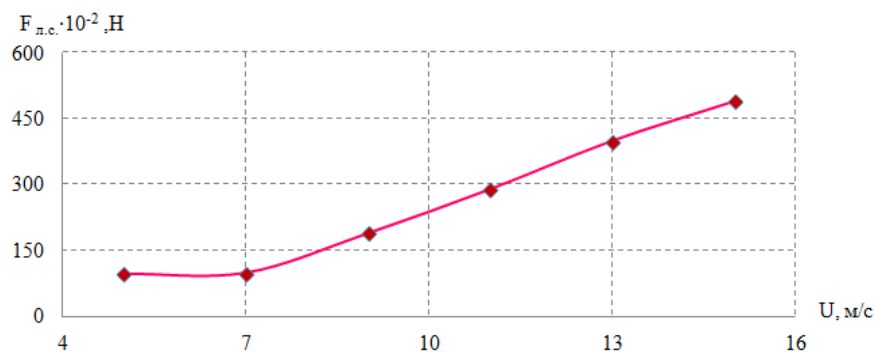


Рисунок 4.2 – Зависимость лобового сопротивления от скорости потока при $n = \text{const}$

Также получены результаты измерения аэродинамических характеристик коэффициента лобового сопротивления от числа оборотов и от числа Рейнольдса.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены графики зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа оборотов в минуту и от числа Рейнольдса.

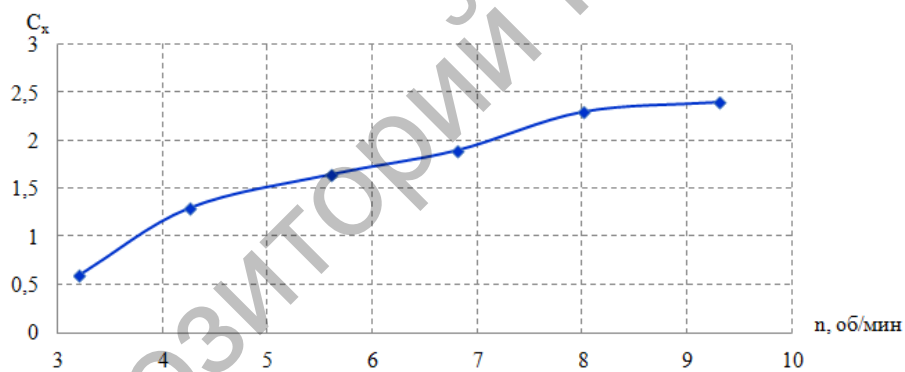


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа оборотов в минуту при $U = \text{const}$

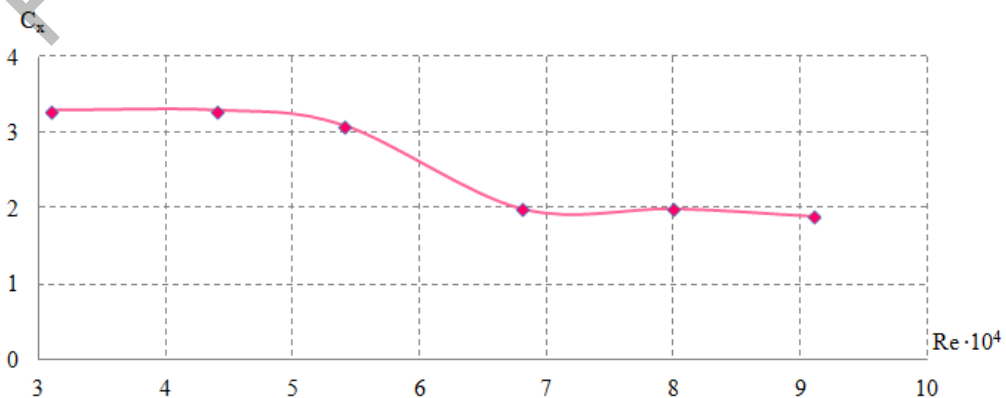


Рисунок 4.4 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса при $n = \text{const}$

Получены результаты зависимости подъемной силы от числа оборотов и от скорости воздушного потока.

На рисунке 4.5 показан график зависимости подъемной силы от числа оборотов в минуту при $U=\text{const}$.

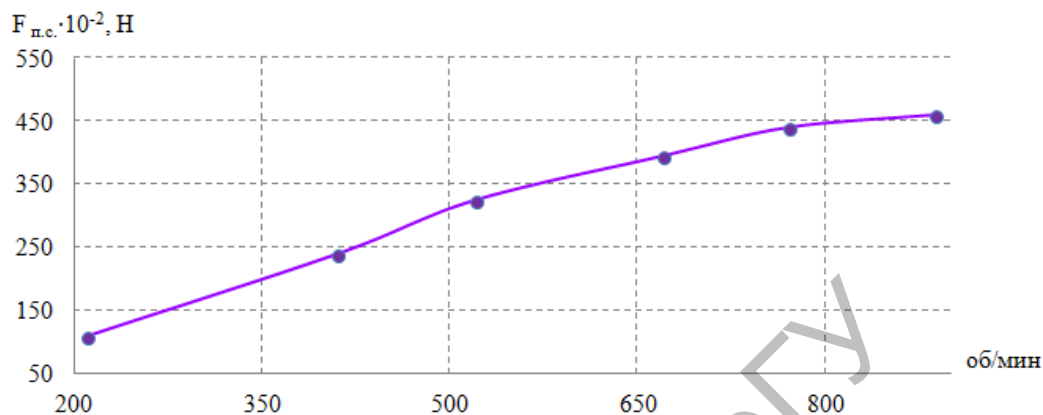


Рисунок 4.5 – Зависимость подъемной силы от числа оборотов в минуту при $U=\text{const}$

На рисунке 4.6 представлен график зависимости подъемной силы от скорости потока при $n=\text{const}$.

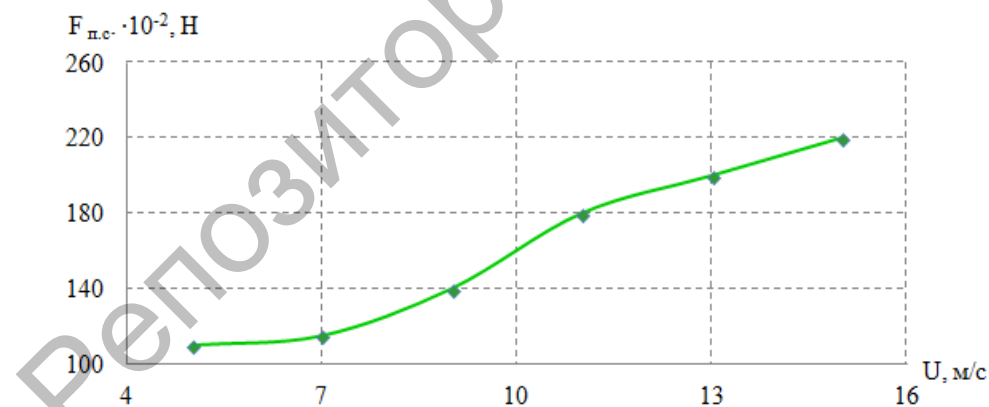


Рисунок 4.6 – Зависимость подъемной силы от скорости потока при $n=\text{const}$

Из полученных графиков видно, что исследуемые тела обладают более низким лобовым сопротивлением порядка 15-17%, при прочих равных условиях.

Полученные результаты были сравнены с подъемной силой крыловых профилей симметричной формы длины хорды, которых имели размеры, совпадающие с диаметрами исследуемых цилиндров. Длина (т.е. размах) крыла совпадает с длиной вращающихся цилиндров. Сравнивая полученные данные для крылового профиля и вращающегося цилиндра с

полусферическими торцами, можно сделать вывод о том, что в случае с подвижным цилиндром подъемная сила, создаваемая эффектом Магнуса, значительно выше, чем у крыла такого же размера. Сравнение сил лобового сопротивления крыла и вращающегося цилиндра показало, что последний по своим характеристикам значительно уступает первому, т.е. сила лобового сопротивления значительно выше крыловых профилей.

4.2 Анализ экспериментальных данных для системы двух цилиндров, установленных под углом друг к другу

Лабораторные исследования проводились между двумя вращающимися цилиндрами, расположенными под углом друг к другу. Изменяя угол между двумя вращающимися цилиндрами, мы получили зависимости их аэродинамических характеристик [102, 103].

На рисунке 4.7 показана схема расположения двух вращающихся цилиндров под углом друг к другу.

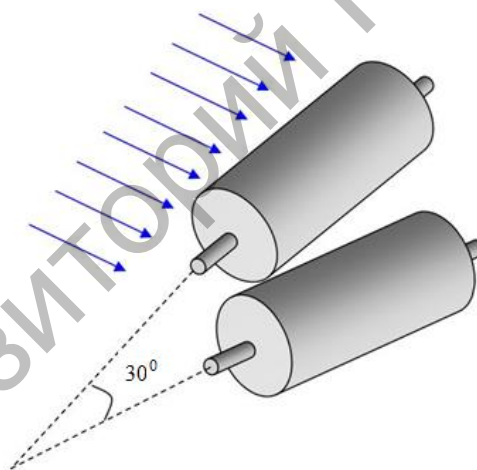


Рисунок 4.7 – Схема расположения системы вращающихся цилиндров, расположенных под углом друг к другу

На рисунке 4.8 представлена зависимость силы лобового сопротивления двух цилиндров, помещенных в поток ветра со скоростями 9 и 13 м/с, от угла между ними при постоянном числе вращений.

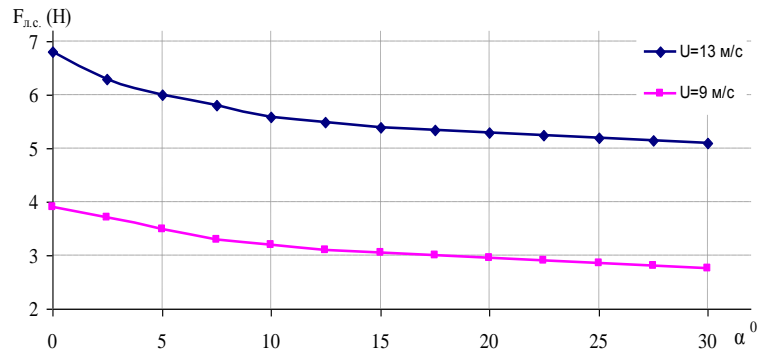


Рисунок 4.8 - Зависимость силы лобового сопротивления двух вращающихся цилиндров от угла между ними при постоянном числе вращений

Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением угла $> 30^\circ$ между цилиндрами уменьшается сила лобового сопротивления. Это связано с тем, что увеличение угла между двумя вращающимися цилиндрами приводит к ослаблению и, далее, к исчезновению их влияния друг на друга. После исчезновения взаимного влияния между цилиндрами они начинают действовать на поток как отдельные цилиндры. При этом изменение силы лобового сопротивления очень мало.

На следующем графике рисунка 4.9 показана зависимость подъемной силы двух вращающихся цилиндров от угла между ними при постоянном числе вращений. Видно, что при увеличении угла между цилиндрами уменьшается значение подъемной силы.

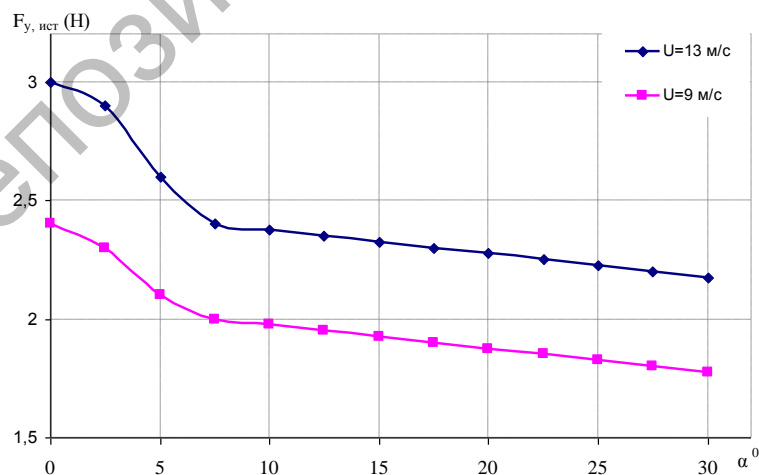


Рисунок 4.9 - Зависимость подъемной силы двух вращающихся цилиндров от угла между ними при постоянной числе вращений

Причиной уменьшения подъемной силы при увеличении угла между цилиндрами является уменьшение взаимодействия между сопутствующими потоками, возникающими при вращательных движениях

цилиндров. В результате это приводит к исчезновению взаимного влияния верхней и нижней областей давления, возникающих в середине цилиндров. Поэтому при постоянном числе вращений увеличение угла между цилиндрами, помещенными в воздушный поток с определенной скоростью, приводит к уменьшению их подъемной силы.

Далее рассмотрим зависимости коэффициента лобового сопротивления, найденного с помощью уравнения силы лобового сопротивления от угла между цилиндрами. Эта зависимость показана на рисунке 4.10. Из зависимости видно, что увеличение угла между цилиндрами приводит к уменьшению значений коэффициента лобового сопротивления двух цилиндров, вращающихся с постоянной частотой в одном и противоположном направлениях к воздушному потоку.

На рисунке 4.10 показан график зависимости коэффициента лобового сопротивления двух вращающихся цилиндров от угла между ними при постоянном числе вращений.

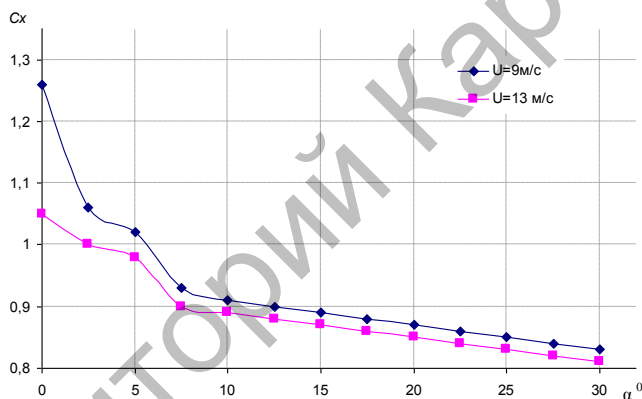


Рисунок 4.10 - Зависимость коэффициента лобового сопротивления двух вращающихся цилиндров от угла между ними при постоянном числе вращений

Из приведенных выше зависимостей мы увидели, что при увеличении угла между цилиндрами уменьшается сила лобового сопротивления, так как коэффициент лобового сопротивления двух цилиндров зависит от силы лобового сопротивления. Согласно этому выражению сила лобового сопротивления прямо пропорциональна его коэффициенту, поэтому увеличение угла между цилиндрами приводит к уменьшению коэффициента лобового сопротивления исследуемых тел.

При ослаблении взаимодействия между сопутствующими потоками цилиндров, воздушный поток, огибающий их, начинает легко проходить между цилиндрами. Энергия потока, затраченная на подъем цилиндров не используется на полезную работу. Поэтому уменьшается подъемная сила цилиндров.

4.3 Анализ результатов экспериментальных исследований аэродинамических характеристик двухлопастного ветродвигателя

Проводились экспериментальные исследования аэродинамических характеристик ветродвигателя с двумя вращающимися элементами расположенными линейно друг к другу [104].

Исследование гладких цилиндров проводилось при диаметре 5 и 10 см, длина каждого цилиндра равнялась 20 см.

Ниже приведена схема вращения цилиндров ветродвигателя в противоположных направлениях (рисунок 4.11).

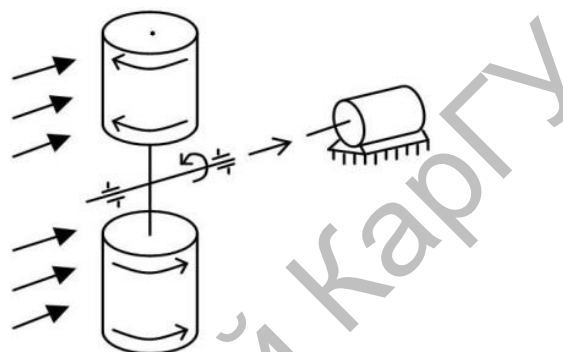


Рисунок 4.11 - Схема вращения цилиндров ветродвигателя

На рисунке 4.12 и 4.13 представлены графики зависимостей силы лобового сопротивления от скорости с потока диаметрами цилиндра 5 см и 10 см.

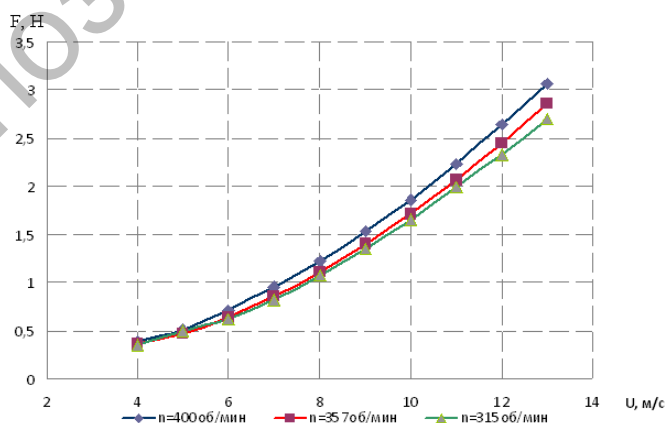


Рисунок 4.12 - График зависимости силы лобового сопротивления от скорости потока двухлопастного ветродвигателя с вращающимися гладкими цилиндрами. Диаметр цилиндров 5 см, длина каждого цилиндра 20 см

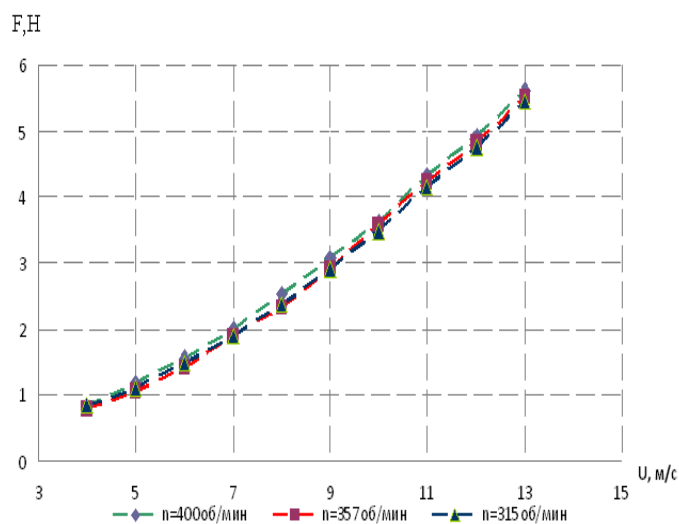


Рисунок 4.13 - График зависимости силы лобового сопротивления от скорости потока двухлопастного ветродвигателя с вращающимися гладкими цилиндрами. Диаметр цилиндров 10 см, длина каждого цилиндра 20 см

Из рисунка 4.12 и 4.13 видно, что сила лобового сопротивления увеличивается с увеличением скорости ветра при диаметрах цилиндров 5 и 10 см, при числе вращения 400 об/мин, 357 об/мин и 315 об/мин. Сравнивая графики зависимости можно увидеть, что при большем диаметре, равном 10 см, лобовое сопротивление больше. Это связано с тем, что при увеличении диаметра цилиндра увеличивается миделовое сечение, которое противодействует движению потока. Также с ростом количества оборотов лобовое сопротивление увеличивается. Это объясняется тем, что при увеличении скорости ветра увеличивается напорное давление потока, действующее на переднюю часть вращающегося цилиндра. Таким образом, при увеличении скорости потока будет увеличиваться лобовое сопротивление двухлопастного ветродвигателя [105].

На рисунке 4.14, 4.15 представлены графики зависимости коэффициента лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя от числа Рейнольдса с диаметрами цилиндра 5 и 10 см.

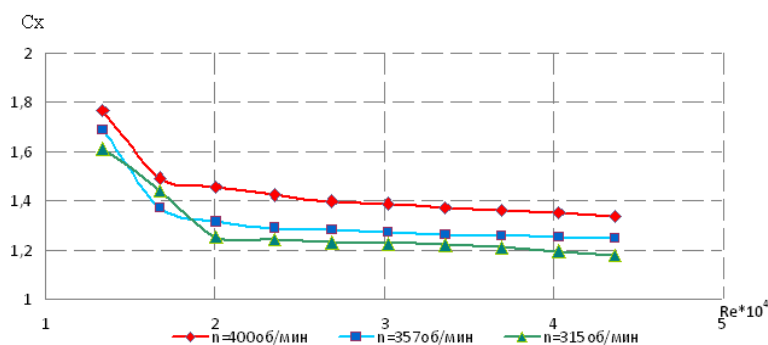


Рисунок 4.14 - График зависимости коэффициентов лобового сопротивления от числа Рейнольдса. Диаметр цилиндров 5 см, длина каждого цилиндра 20 см

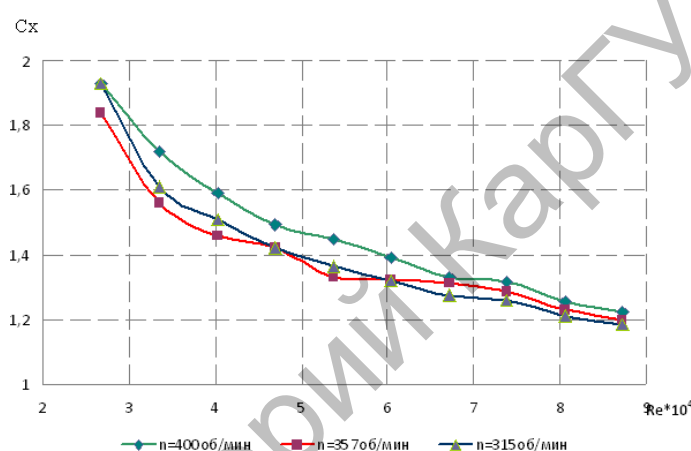


Рисунок 4.15 - График зависимости коэффициентов лобового сопротивления от числа Рейнольдса. Диаметр цилиндров 10 см, длина каждого цилиндра 20 см

Из рисунков 4.14 и 4.15 видно, что при увеличении числа Рейнольдса уменьшается коэффициент лобового сопротивления.

Такой характер поведения кривых объясняет физическую картину обтекания вращающихся цилиндров потоком воздуха. Как известно, за цилиндрами при обтекании потоком воздуха, появляется вихревая зона обратных течений – основная причина образования лобового сопротивления цилиндров. Вращающиеся движения цилиндров приводят к образованию за цилиндрами достаточно объемной вихревой зоны обратных течений, размеры которой зависят от скорости набегающего потока.

Таким образом, при малых скоростях потока, соответствующих малым числам Рейнольдса ($2 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4$), увеличение скорости потока приводит к интенсивному перемешиванию и уменьшению объема вихревой зоны обратных течений. Мы наблюдаем относительно резкое уменьшение коэффициента лобового сопротивления вращающихся цилиндров.

При достаточно больших скоростях потока, соответствующих числам Рейнольдса $8 \cdot 10^4$ и выше за цилиндрами образуется достаточно сильная интенсивно турбулизованная вихревая зона обратных течений, на размер которых увеличение скорости потока практически не влияет, и, как следствие этого, коэффициент лобового сопротивления цилиндров остается практически постоянным.

4.4 Анализ результатов экспериментальных исследований аэродинамических характеристик трехлопастного ветродвигателя

В соответствии с поставленными задачами изготовлен и исследован макет многолопастной ветротурбины с силовыми элементами в виде системы вращающихся цилиндров переменного сечения. Полученные экспериментальные результаты подтвердили возможность использования вращающихся цилиндров в конструкции ветродвигателя [106, 107].

На рисунке 4.16 показана схема ветродвигателя с тремя вращающимися элементами.

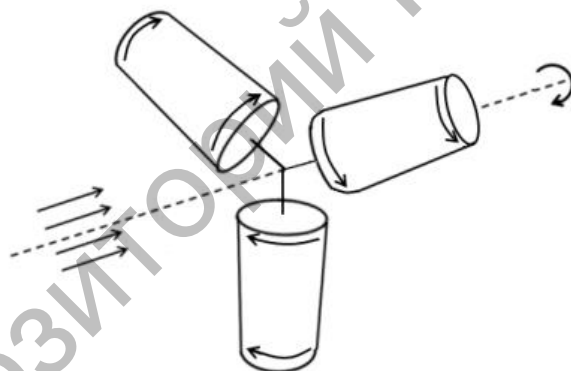


Рисунок 4.16 – Схема ветродвигателя с тремя вращающимися элементами

Исследования лобового сопротивления трехлопастного ветродвигателя проводились при диаметрах $10 \div 12$ см, длина каждого цилиндра 20 см.

Модель начинает работать при скорости 3 м/с и эффективно функционирует при скорости ветра 5-15 м/с. Для уменьшения сил трения и заедания осей на осях качения установлены подшипники.

На рисунке 4.17 представлен график зависимости силы тяги трехлопастного ветродвигателя от скорости воздушного потока.

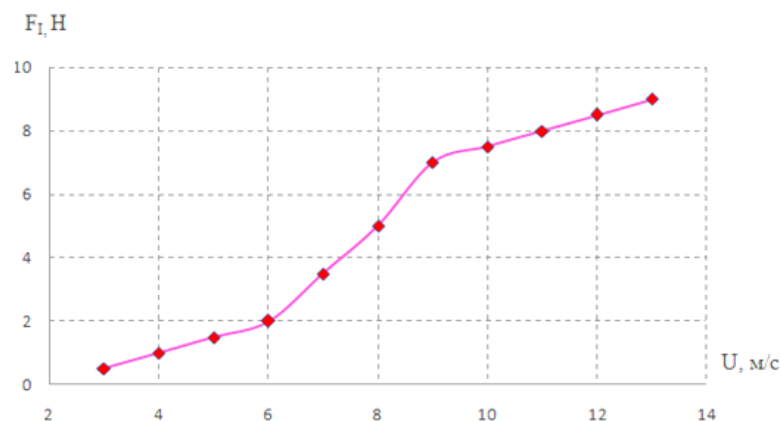


Рисунок 4.17 – Зависимость силы тяги макета ветродвигателя с лопастями в форме усеченного конуса от скорости обтекающего потока

Экспериментальные результаты по определению количества оборотов лопастей и вращающегося цилиндра в минуту представлены на рисунке 4.18.

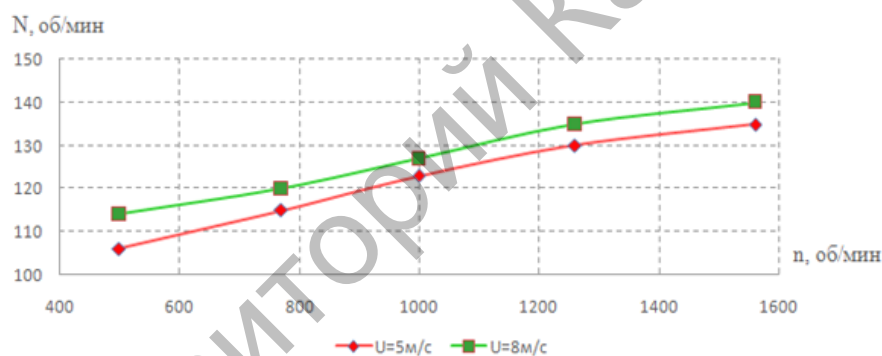


Рисунок 4.18 - Зависимость количества оборотов лопастей ветродвигателя от угловой скорости вращающихся цилиндров

Приведенные зависимости на рисунках получены во время изменения скоростей потока от 3 до 11 м/с. Как видно из рисунков 4.17 и 4.18 с увеличением скорости потока ветра и ростом скорости вращения цилиндров количество оборотов лопастей ветродвигателя возрастает и достигает своего максимального значения. С помощью полученных результатов по скорости вращающегося цилиндров можно регулировать количество оборотов лопастей ветродвигателя. Это дает возможность модели устойчиво работать при малых скоростях потока и развить момент силы, способный крутить маломощный ветрогенератор который дает электрический ток [108].

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании ветродвигателей для малых скоростей на основе эффекта Магнуса.

5 МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ ОБТЕКАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

5.1 Постановка задачи. Граничные условия

Программа ANSYS FLUENT обладает большим диапазоном возможностей моделирования течений жидкостей и газов для промышленных задач с учетом турбулентности, теплообмена, химических реакций. Например, программу FLUENT можно использовать для решения задачи обтекания крыла, горение в печах, внешнего обтекания нефтедобывающих платформ, течения в кровеносной системе, конвективного охлаждения сборки полупроводника, вентиляция в помещениях, моделирования промышленных стоков. Специальные модели горения, аэроакустики, вращающихся/неподвижных расчетных областей, многофазных течений всерьез расширяют сферы использования основного продукта. ANSYS FLUENT – это нетрудный, отказоустойчивый инструмент, позволяющий даже неквалифицированным специалистам в области моделирования добиваться высокой производительности труда. Интеграция модуля ANSYS FLUENT в рабочую среду ANSYS Workbench, а также возможность применения модуля ANSYS CFD-Post для обработки результатов формируют единое решение для исполнения технического анализа в сфере моделирования течений жидкостей и газов [109].

Реализация указанного метода осуществлялась с помощью пакета программ ANSYS-Fluent 13. Для построения конечно-разностной сетки использовалась программа Gambit 2.3.16.

Решение системы уравнений проводилось конечно-разностным методом по схеме Патанкара [110] с использованием процедуры SIMPLE для согласования поля давления и поля скоростей жидкости и противопоточной схемы второго порядка точности для определения конвективных потоков.

Для численного решения задачи используются метод конечных объемов и нестационарное уравнение Навье-Стокса. Частные производные аппроксимируются со вторым порядком точности, производные по времени - по неявной схеме Эйлера второго порядка. Модель относится к семейству 2-х параметрических моделей турбулентности, содержит уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности и ее диссипации [111].

Уравнение сохранения массы

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (5.1)$$

где ρ – плотность; \vec{V} – вектор скорости газа.

Уравнение сохранения импульса:

$$\nabla \cdot (\rho \overline{V V}) + \nabla p = \nabla \cdot \tau_{eff}, \quad (5.2)$$

$$\tau_{eff} = \tau + \tau_{turb}, \quad (5.3)$$

где τ_{eff} – эффективный тензор напряжений; τ_{turb} – турбулентный тензор напряжений; τ – тензор вязких напряжений.

$$\tau = \mu \left[(\nabla \overline{V} + \nabla \overline{V}^T) - \left(\frac{2}{3} \nabla \cdot \overline{V} \right) U \right], \quad (5.4)$$

где U – единичный тензор; μ – динамическая вязкость газа.

Модель турбулентности

Гипотеза Буссинеска гласит, что тензор турбулентных напряжений связан с градиентами скоростей зависимостью

$$\tau_{turb} = \mu_{turb} (\nabla \overline{V} + \nabla \overline{V}^T) - \frac{2}{3} (\rho \kappa + \mu_{turb} \nabla \overline{V}) U. \quad (5.5)$$

Для нахождения турбулентной вязкости μ_{turb} используется k - ε модель Лаундера-Сполдинга

$$\mu_{turb} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5.6)$$

где k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии.

Краевые условия. Граничные условия на стенке.

Условие прилипания и не протекания

$$\mathbf{n} \cdot \overline{V} = 0, \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad \varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} \cdot k_p^{3/2}}{\kappa \cdot y_p}, \quad (5.8)$$

где $k = 0,4187$ – постоянная Кармана; индекс P – относится к центру пристенной ячейки разностной сетки.

Граничные условия на входе.

$$U = U_{in}; V = 0. \quad (5.9)$$

Турбулентные параметры потока определяются через задание интенсивности турбулентных пульсаций I и гидравлического диаметра D_{hyd}

$$k = \frac{3}{2} (I \cdot V_{inlet})^2; \quad \varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \cdot \frac{k^{3/2}}{l}; \quad l = 0.07 \cdot D_{hyd}. \quad I = 3\% \quad (5.10)$$

Граничные условия на выходной границе

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0. \quad (5.11)$$

Для k - ε -модели использовался стандартный рекомендуемый набор эмпирических констант (2.0), который обычно принимается по умолчанию в вычислительных пакетах:

$$C_{\mu} = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_{\varepsilon} = 1.3 \quad (5.12)$$

Размеры расчетной области брались в соответствии с габаритами аэродинамической трубы.

Построение расчетной модели в программе GAMBIT.

Процесс исследования моделирования обтекания вращающегося цилиндра воздушным потоком с помощью программного комплекса Fluent включает следующие этапы решения, которые показаны на блок-схеме (рисунок 5.1).

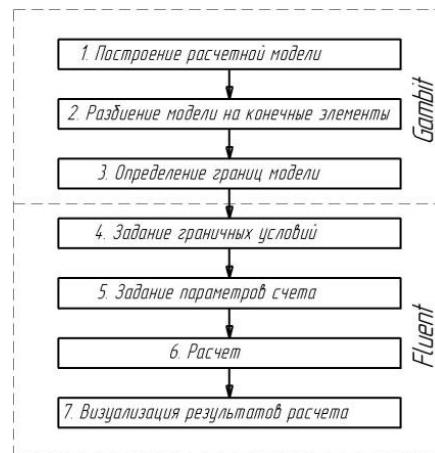


Рисунок 5.1 - Этапы решения поставленной задачи в программном комплексе FLUENT

Первые три этапа решения задачи выполняются в программе GAMBIT, являющейся составной частью программного комплекса. Остальные этапы реализуются непосредственно в программе FLUENT.

Этап построения расчетной модели является одним из важнейших шагов к получению успешного решения поставленной задачи. Правильно созданная расчетная модель, грамотно разбитая на конечные элементы, существенно повышает качество решения поставленной задачи, снижает вероятность появления не физических картин потока и способствует достижению результатов, близких к экспериментально полученным. Кроме того, качественная расчетная модель и сетка существенно облегчают процесс получения решения, повышая сходимость и устойчивость вычислительных процессов [114].

Программа GAMBIT позволяет решать следующие задачи:

1. Создавать геометрию расчетной области:
 - создавать геометрию внутренними средствами программы;
 - импортировать геометрию расчетной области из CAD программ;
 - делить или объединять элементы геометрии для последующего построения структурной сетки.
2. Разбивать расчетную область на конечные элементы:
 - строить конечно-элементные сетки на базе треугольных и четырехугольных элементов;
 - управлять процессом разбиения.
3. Проверять качество расчетной сетки.
4. Определять границы расчетной области, на которых в дальнейшем будут установлены граничные условия.
5. Экспортировать конечно-элементные сетки в FLUENT или в другие расчетные программы.

На рисунке 5.2. показано рабочее окно программы GAMBIT.

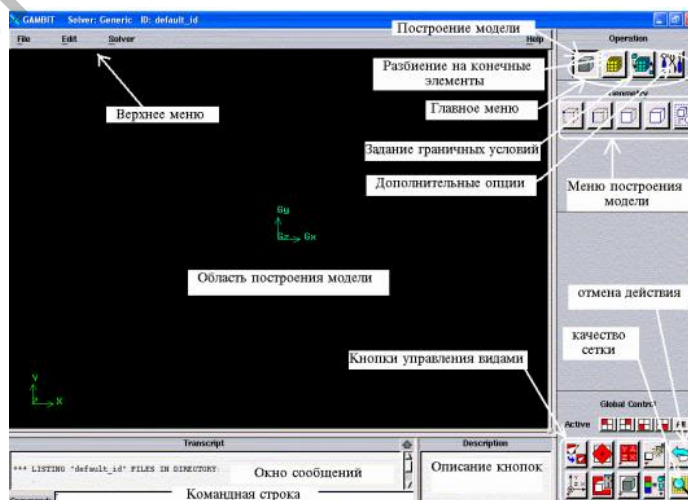


Рисунок 5.2 - Рабочее окно программы GAMBIT

Первым этапом моделирования обтекания цилиндра является построение расчетной сетки в программе GAMBIT. В данном случае рассматривается обтекание лопасти потоком воздуха [115, 116].

Использовалась равномерная сетка со сгущением к поверхности цилиндра, при этом цилиндр был смещен к левой границе расчетной области, для того чтобы не возникало в области возвратного течения и было хорошее разрешение для образующихся вихревых зон:

1. коэффициент сгущения конечно-разностной сетки в радиальном направлении (отношение размеров двух соседних ячеек) равен 0.85;

2. размер первой ячейки в радиальном направлении относительно радиуса цилиндра равен 0.01;

3. количество ячеек во всей области интегрирования равно 200000.

Известно, что при обтекании цилиндра, как, впрочем, и любого другого тела, потенциальным (безвихревым) потоком, равнодействующая всех сил, действующих на обтекаемое тело, равна нулю.

При обтекании вращающегося цилиндра реальной жидкостью наличие сил трения и положительных градиентов давления правее точек максимального стеснения потока (концы вертикального диаметра цилиндра) приводят к отрыву пограничного слоя от поверхности цилиндра, образованию вихрей, которые порождают понижение давления в тыльной области, распределение давлений становится несимметричным, что и ведет к возникновению силы лобового сопротивления и подъемной силы, обусловленной эффектом Магнуса.

Картина обтекания (положение точки отрыва пограничного слоя, распределение давлений, интенсивность образования вихрей за цилиндром) существенно зависят от скорости (числа Рейнольдса) потока. При этом при очень малых числах Рейнольдса ($Re < 1$) обтекание достаточно близко к идеальному и, наоборот, чем больше число Рейнольдса, тем интенсивнее вихреобразование за телом, чем ближе точка отрыва пограничного слоя к сечению максимального стеснения потока [116, с.120].

Для моделирования обтекания одиночного вращающегося цилиндра был произведен расчет в программном пакете ANSYS FLUENT.

В нашей работе мы хотели показать возможность использования стандартного пакета программ по гидрогазодинамике ANSYS FLUENT для расчета аэродинамических характеристик на примере исследования коэффициента лобового сопротивления.

В программе ANSYS FLUENT было проведено моделирование вращающегося цилиндра при обтекании воздухом. В начале процесса были произведены следующие действия:

- проверка качества конечно-элементной сетки;
- выбор типа решателя и постановка задачи (к-ε модель);
- задания свойств рабочего тела (задания материала для цилиндра);
- выбор физических моделей, используемых в расчете;

- выбор модели турбулентности;
- задание граничных условий.

5.2 Результаты моделирования обтекания вращающегося цилиндра в программе ANSYS FLUENT

5.2.1 Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных исследованных образцов вращающихся цилиндров

Следующим этапом решения поставленной задачи является обработка результатов расчета. Грамотное использование постпроцессора позволяет оценить адекватность сделанных расчетов, увидеть структуру потока и собрать исчерпывающие сведения о нем. Умение правильно и полно представить полученные результаты позволяет существенно облегчить анализ картины течения и поиск путей ее улучшения.

Для моделирования были построены 2D осесимметричная геометрическая сеточная модель обтекания цилиндра в пакете GAMBIT (рисунок 5.3).

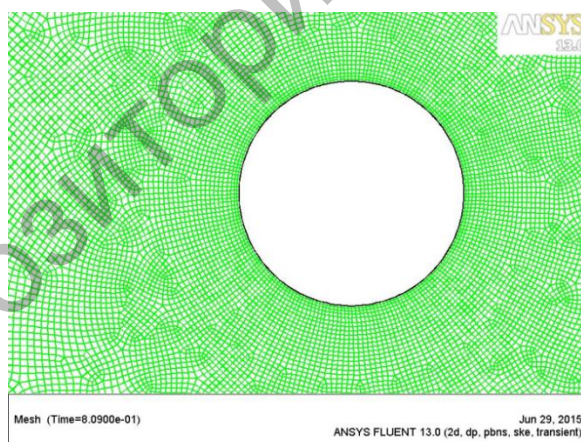


Рисунок 5.3 - Сеточная модель обтекания цилиндра в GAMBITe

После построения сеточной модели она экспортируется для дальнейшего моделирования в ANSYS FLUENT. В ходе моделирования было получено графическое изображение области распределения давления вращающегося цилиндра (рисунок 5.4) [117].

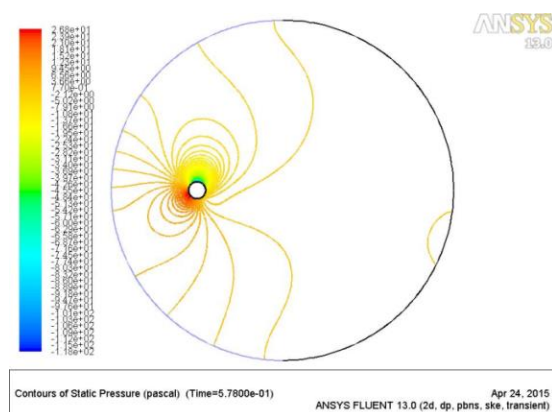


Рисунок 5.4 – Область распределения давления вращающегося цилиндра

Как видно из рисунка 5.4, картина линий тока, полученных путем компьютерного моделирования для случая $Re=3,3 \cdot 10^4$, $U=5$ м/с. Анализ результатов численного решения задачи показывает, что вращение цилиндра приводит к захвату части прилегающей жидкости в сопутствующее вращательное движение, которое, в свою очередь, существенно меняет профили скорости течения жидкости в пограничном слое.

На рисунке 5.5 показана картина обтекания вращающегося цилиндра потоком воздуха.

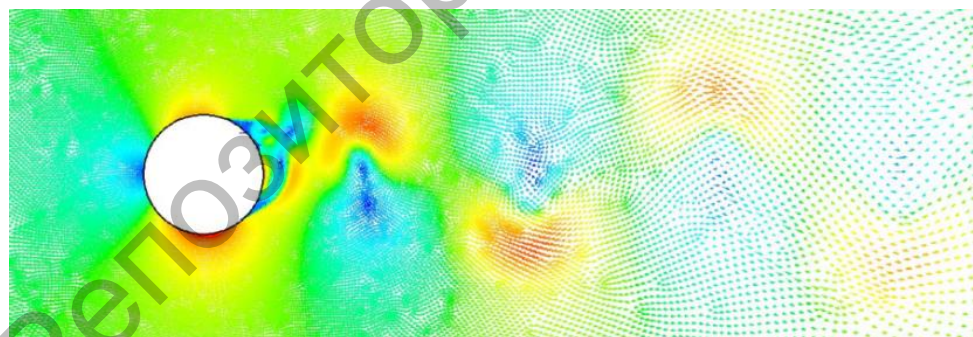


Рисунок 5.5 – Картина обтекания вращающегося цилиндра потоком воздуха

На рисунках 5.6–5.9 приведены зависимости силы лобового сопротивления и подъемной силы вращающегося цилиндра от скорости потока, полученные экспериментальным путем и с помощью моделирования данного процесса в программе FLUENT [118, 119, 120, 121].

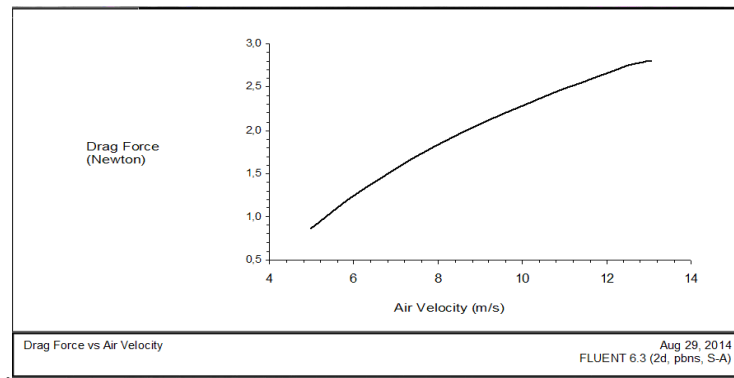


Рисунок 5.6 - Зависимость подъемной силы вращающегося цилиндра от скорости потока

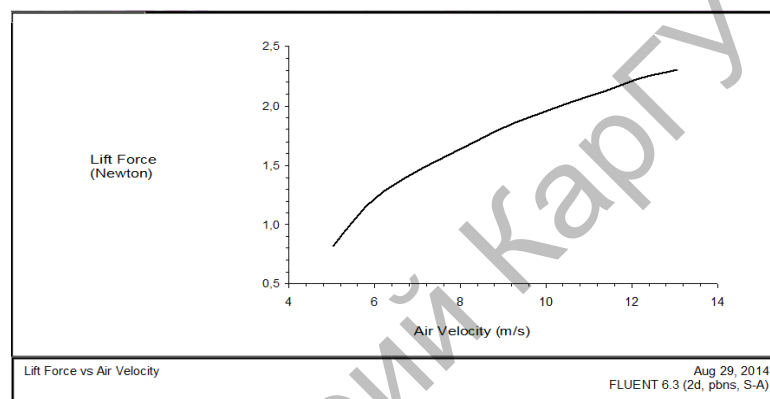


Рисунок 5.7 - Зависимость силы лобового сопротивления вращающегося цилиндра от скорости потока

На рисунках 5.8 и 5.9 показаны сравнения результатов теоретических и экспериментальных данных.

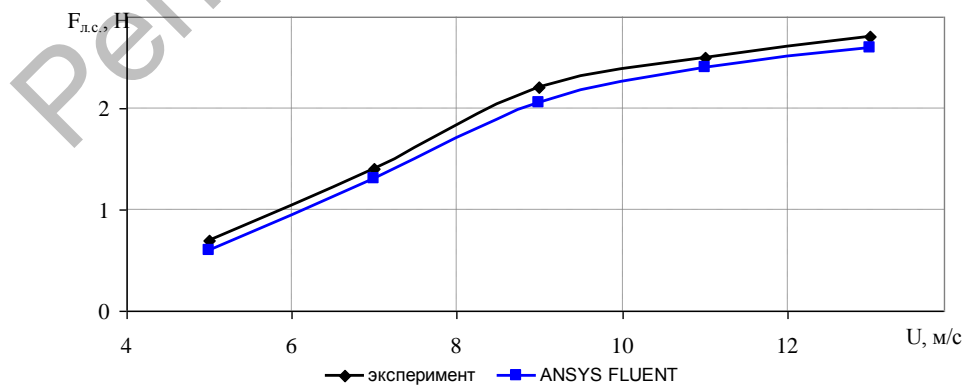


Рисунок 5.8 – Зависимость силы лобового сопротивления вращающегося цилиндра от скорости потока

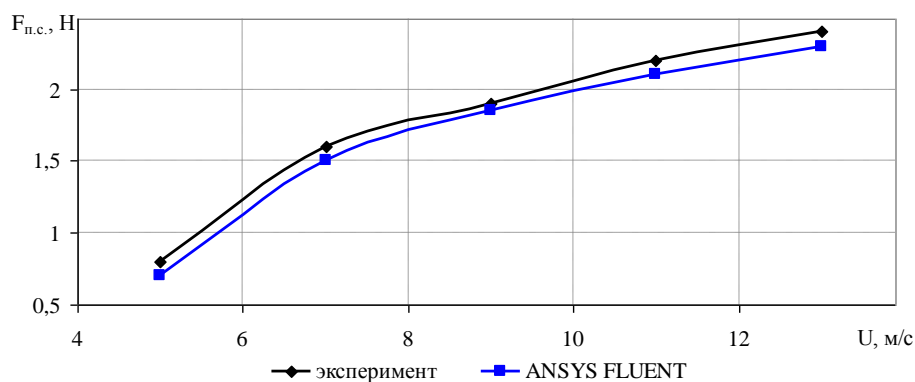


Рисунок 5.9 – Зависимость подъемной силы вращающегося цилиндра от скорости потока

Таким образом, характер этих зависимостей показывает, что при увеличении скорости потока повышаются сила лобового сопротивления и подъемная сила. Это связано с тем, что при обтекании цилиндра потоком воздуха на его поверхности появляется несимметричное распределение давления и поток завихряется. Как видно из рисунков экспериментальные и теоретические значения исследуемых параметров довольно близки.

Получены результаты математического моделирования на основе численного решения уравнений Навье-Стокса с применением программного пакета ANSYS FLUENT, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

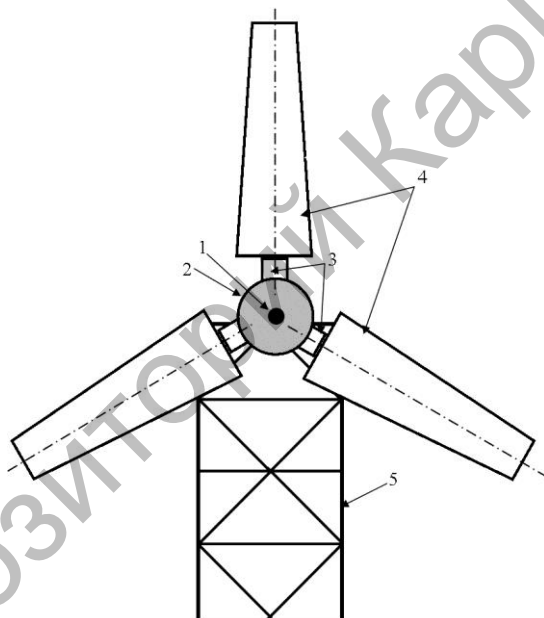
Получены степенные зависимости подъемной силы и силы лобового сопротивления: $F_y = 0.2628 \cdot V^{1.2142}$; $F_x = 0.0931 \cdot V^{1.4963}$.

Получены результаты математического моделирования на основе численного решения уравнений Навье-Стокса с применением программного пакета ANSYS FLUENT, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

6 РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МНОГОЛОПАСТНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

6.1 Описание конструкции макетного образца трехлопастного ветродвигателя с силовыми элементами в виде усеченного конуса

На рисунке 6.1 изображен экспериментальный макет трехлопастного ветродвигателя с вращающимися лопастями в виде усеченного конуса и его основные элементы, сконструированного в лаборатории «Нетрадиционные источники энергии».



1 – горизонтальный вал, 2 – круговой диск, радиально установленный к горизонтальному валу; 3 – корневой цилиндрический осевой вал лопасти; 4 – вращающиеся лопасти в виде усеченного конуса; 5 – мачта ветродвигателя

Рисунок 6.1 - Ветродвигатель на основе эффекта Магнуса с вращающимися лопастями в виде усеченного конуса

Ветроустановка трехлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса (рисунок 6.1) состоит из горизонтального вала (1), кругового диска горизонтального вала для крепления лопастей ветродвигателя (2), вращающейся корневой (3) и цилиндрической (4) части лопасти ветродвигателя усеченной конусообразной формы, при этом цилиндр имеет шероховатую поверхность и мачты (5).

Общий диаметр ветроколеса 4 м. Горизонтальный вал изготовлен из стального прута диаметром 30 мм, который крепится на верхнюю площадку мачты. Круговой диск изготовлен из стального листа толщиной 10 мм. Диаметр кругового диска 400 мм. Высота вращающегося цилиндра 1,75 м. На круговой диск для вращения цилиндров через редукторы крепятся электродвигатели. Вращающиеся цилиндрические части лопастей ветродвигателя выполнены из трех цилиндров с малым и большим диаметром. Соотношение диаметров цилиндров 1:2.

Данное конструктивное решение обеспечивает снижение индуктивного сопротивления цилиндров и улучшение их обтекания, приближая его к безотрывному, что позволяет уменьшить скорость вращения цилиндров и снизить соответствующие затраты мощности при сохранении числа оборотов и мощности ветроколеса.

6.2 Учет влияния гироскопических сил на рабочую часть ветродвигателя

Вращающийся цилиндр ветродвигателя представляет собой достаточно массивное симметричное тело, вращающееся вокруг оси симметрии с большой скоростью, т.е. является источником гироскопических сил [122-124].

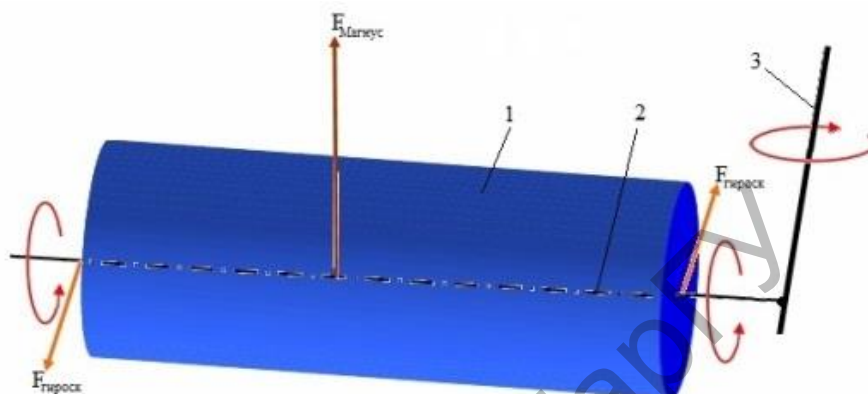
Когда цилиндр не вращается вокруг основной оси ветродвигателя, вращаясь при этом вокруг собственной оси, момент импульса гироскопа совпадает по направлению с его осью вращения, являющейся одной из главных осей инерции данного гироскопа. В этом случае какого-либо действия гироскопических сил не наблюдается.

Для возникновения гироскопического эффекта необходимо подействовать на вращающийся цилиндр моментом внешних сил, который возникает при влиянии потока воздуха на систему вращающихся цилиндров, что, вследствие эффекта Магнуса, приводит к вращению данной системы вокруг основной оси ветродвигателя и возникновению приращения момента импульса гироскопа, являющегося причиной появления гироскопических сил.

Принудительный поворот оси гироскопа приводит вследствие гироскопического эффекта к появлению гироскопических сил, действующих на опоры оси вращения цилиндров, что ведет к возникновению дополнительного, подчас значительного, давления оси на подшипники (рисунок 6.2).

Рабочая часть ветроустановки состоит из свободно вращаемых ветром цилиндрических роторов, которые могут вращаться: вокруг собственной оси; оси рабочего вала; поворачиваться вокруг оси перпендикулярной как собственной оси цилиндрических роторов, так и вокруг оси, рабочего вала.

Таким образом, ротор представляет систему с тремя пересекающимися осями вращения. Это дает возможность использовать различные сочетания аэродинамических сил и сил гироскопических, действующих на рабочую систему. На рабочую часть действуют: 1) силы Магнуса (при полной компенсации гироскопических сил); 2) гироскопические силы прецессии (при минимизации сил Магнуса); 3) сочетание сил Магнуса и гироскопических сил.



1 – цилиндр, 2 – ось цилиндра, 3 – основная ось ветродвигателя

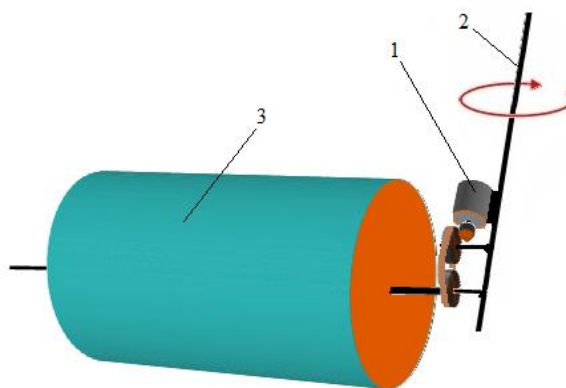
Рисунок 6.2 – Схема вращающегося цилиндра ветродвигателя на основе эффекта Магнуса, появление гироскопических сил

Величина гироскопических сил, действующих на опоры осей вращения цилиндров, зависит от массы вращающегося цилиндра, от угловой скорости его вращения и от момента внешних сил, зависящего от скорости воздушного потока.

Таким образом, с учетом сказанного выше, с целью уменьшения влияния гироскопических сил при создании опытного образца ветроустановки нами предлагается:

- 1) уменьшить массу вращающихся цилиндров, а также угловую скорость вращения цилиндров вокруг собственной оси;
- 2) уменьшить влияние приводного электродвигателя на величину гироскопических сил при достаточно высокой угловой скорости его вращения.

На рисунке 6.3 показана предлагаемая схема вращающейся части ветроустановки, позволяющая уменьшить влияние гироскопических сил.



1 – приводной электродвигатель цилиндрического ротора, 2 – основная ось ветродвигателя, 3 – цилиндрический ротор

Рисунок 6.3 – Схема расположения приводного электродвигателя ротора, уменьшающего влияние гироскопических сил

В соответствии с пунктом 1) необходимо: а) применить для изготовления цилиндров (3) легкие полимерные или композитные материалы, что позволит снизить их массу; б) вращение цилиндров осуществлять в диапазоне малых оборотов порядка $500 \div 900$ об/мин. Согласно пункта 2) необходимо обеспечить параллельность осей приводного электродвигателя (1) и основного вала ветрогенератора (2), что также приведет к уменьшению влияния гироскопических сил. Все названные условия в предлагаемой автором конструкции, показанной на рисунке 6.3, выполнены и реализованы на опытной установке для полевых испытаний.

6.3 Опытные полевые испытания трехлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса

Опытные полевые испытания образца ветроустановки проводились с использованием специально изготовленного подвижного стенда (рисунки 6.4 и 6.5).

На рисунке 6.4 показан фотоснимок опытного образца ветроустановки.



Рисунок 6.4 – Фотоснимок ветроколеса опытного образца

На рисунке 6.5 показан фотоснимок низкооборотного генератора ветроустановки.



Рисунок 6.5 - Фотоснимок низкооборотного генератора ветроустановки

Ниже представлены графики зависимости силы тяги и напряжения, вырабатываемого ветрогенератором, в зависимости от скорости естественного ветра [125-127].

На рисунке 6.6 показана зависимость силы тяги от скорости ветра при 400 об/мин. Как видно из рисунка, максимальное значение силы тяги 250 Н было получено при скорости ветра 10 м/с.

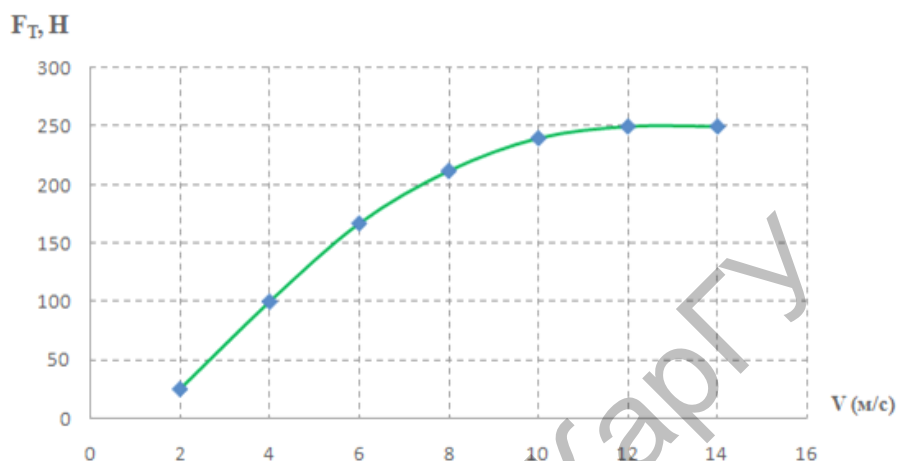


Рисунок 6.6 - Зависимость силы тяги от скорости ветра при 400 об/мин

На рисунке 6.7 представлена зависимость силы тяги от скорости ветра при 300 об/мин. Как видно из рисунка, максимальное значение силы тяги 230 Н было получено при скорости ветра 8 м/с.

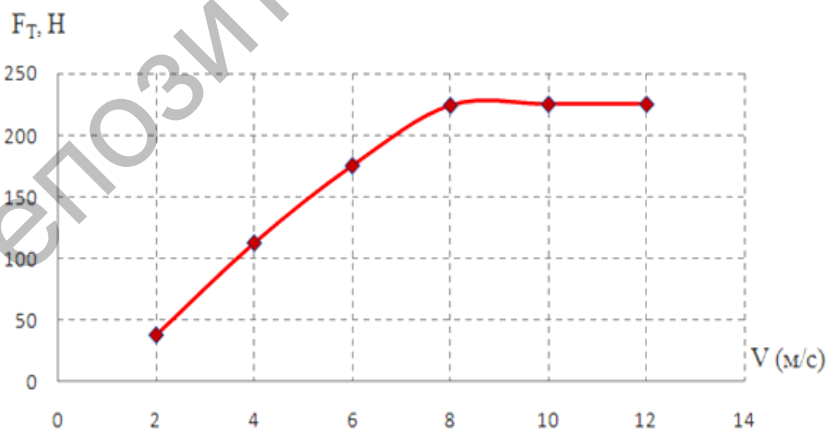


Рисунок 6.7 - Зависимость силы тяги от скорости ветра при 300 об/мин

Кривая в интервале от 1 до 6 м/с быстро растет. Максимум графика находится между 5 и 6 м/с.

На рисунке 6.8 представлена зависимость напряжения генератора без нагрузки от скорости воздушного потока.

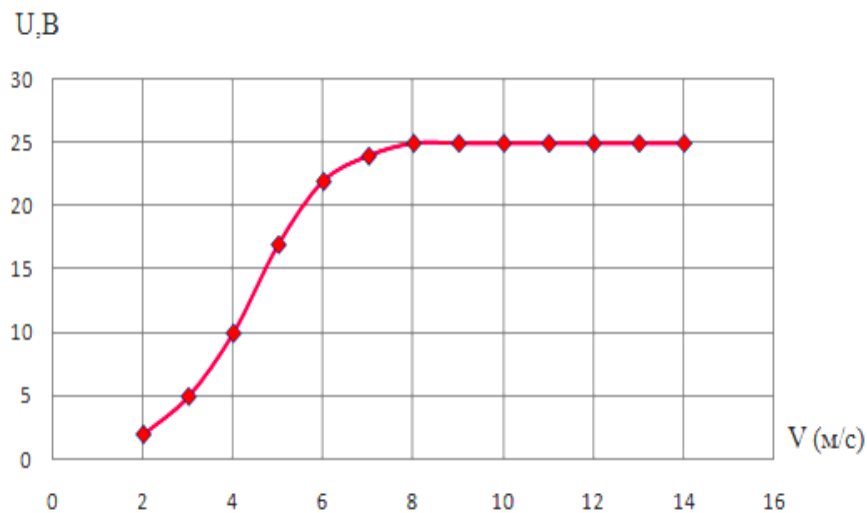


Рисунок 6.8 - Зависимость напряжения генератора без нагрузки от скорости воздушного потока

На рисунке 6.9 представлена зависимость напряжения генератора с нагрузкой от скорости воздушного потока.

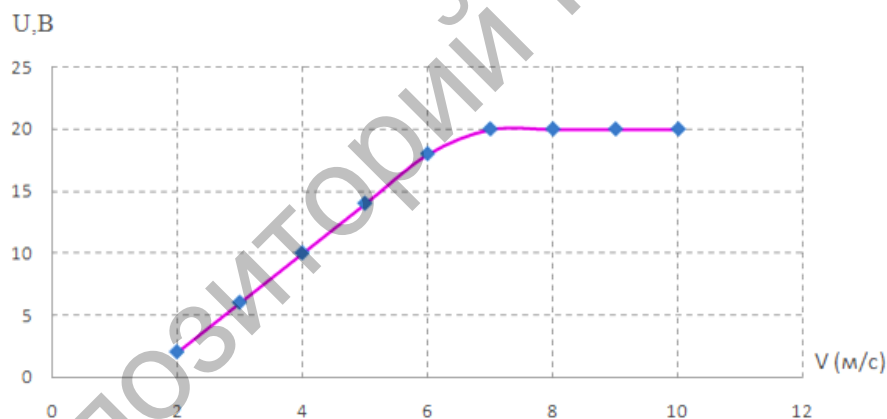


Рисунок 6.9 - Зависимость напряжения генератора с нагрузкой от скорости ветра

Таким образом, проведены испытания ветродвигателя в диапазоне скоростей искусственного ветра 2÷14 м/с и для данного диапазона определены напряжения и силы тяги при различных нагрузках.

Разработан макет многолопастного ветродвигателя с силовыми элементами в виде вращающихся цилиндров переменного сечения.

Исследованы аэродинамические параметры многолопастной ветроэнергетической установки при различных климатических условиях.

В отличие от существующих методов, научный подход исследования, основан на активном захвате потока воздуха вращающимися цилиндрическими элементами с шероховатой поверхностью и использовании возникающей дополнительной силы Магнуса.

Переменность сечения обеспечивает вращающимся элементам оптимальное аэродинамическое сопротивление и достаточно высокую силу тяги в достаточно широком диапазоне скоростей.

Проведены эксперименты по изучению влияния скорости и направления воздушного потока на значение силы лобового сопротивления макета многолопастного ветродвигателя с силовыми элементами в виде вращающихся цилиндров переменного сечения. Показано, что сила лобового сопротивления увеличивается с ростом скорости воздушного потока, однако, с увеличением угла скоса потока, значения силы лобового сопротивления уменьшаются. Этот факт объясняется тем, что с увеличением отклонения направления потока от перпендикулярного к плоскости ветроколеса площадь миделевого сечения уменьшается.

Значение подъемной силы возрастает в зависимости от скорости вращения цилиндра. Это возрастание происходит только до определенного максимального значения. Дальнейший рост частоты вращения не ведет к увеличению подъемной силы. Степень шероховатости цилиндра не приводит к существенному изменению характера зависимостей, а влияет только на численные значения коэффициента сопротивления, как в случае с подъемной силой.

Проведенные эксперименты показали, что цилиндры переменного сечения обладают меньшим аэродинамическим сопротивлением и достаточно высокими значениями подъемной силы.

С увеличением скоса потока сила тяги ветротурбины уменьшается, что соответствует физической картине обтекания. Однако, с увеличением скорости воздушного потока, значение силы тяги макета многолопастной ветротурбины увеличивается, что также объясняется увеличением силы давления на ветроколесо.

Сила тяги соответствует положительному эффекту, т.е. полезно получаемой работе ветротурбины. Как показали результаты проведенных экспериментов, в отличие от существующих конструкций ветроустановок, в данной разработке осуществляется более активный захват потока воздуха, обусловленный вращающимися цилиндрическими элементами с шероховатой поверхностью, т.е. используется возникающая дополнительная сила Магнуса. Переменность сечения обеспечивает вращающимся элементам оптимальное аэродинамическое сопротивление и достаточно высокую силу тяги в достаточно широком диапазоне скоростей.

Испытуемая модель вращающегося цилиндра заданного сечения может быть использована при малых скоростях (начиная с 2,5 м/с) естественного ветра в различных климатических условиях (дождь, снег).

7 ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

7.1 Анализ климатических условий в Карагандинской области

Климатологические аспекты ветроэнергетики составляют, по существу, целый раздел прикладной метеорологии и климатологии, охватывающий широкий круг задач. Они относятся прежде всего к режиму ветра, который должен исследоваться, с одной стороны, в качестве источника энергии, а с другой – в качестве вредного фактора, определяющего ветровые нагрузки. Необходимые для ветроэнергетики параметры ветрового режима должны включать сравнительно точные статистические характеристики, зависящие не только от общей повторяемости различных скоростей ветра, но и от непрерывной их реализации во времени и пространстве. Наряду с такого рода параметрами ветра для ветроэнергетики существенны также характеристики турбулентных пульсаций (порывов) ветра [128].

На использование энергии ветра оказывает влияние ряд других метеорологических элементов, к числу которых, прежде всего, относятся характеристики гололедно-изморозевых отложений – они оказывают не только дополнительные нагрузки на конструкции, но и механически препятствуют работе ветродвигателя [128, с. 97].

Изучение данных о метеорологическом режиме в нижнем слое атмосферы, одно из условий выбора наиболее рациональных инженерных решений при проектировании, строительстве и эксплуатации энергетических объектов. В зависимости от назначения объекта и степени надежности используются различные климатические характеристики [129].

Казахстан занимает огромную площадь и поэтому граничит с регионами, которые сильно отличаются по своим климатическим условиям: с Западно-Сибирской низменностью на севере страны и с Центральной Азией – на юге. Под воздействием холодных и теплых воздушных масс сформировался резко континентальный климат Казахстана, который характеризуется жарким летом, холодными зимами, большими сезонными и суточными перепадами температур, а также неравномерным распределением осадков. Зима в Казахстане начинается в ноябре и заканчивается в апреле, зимний воздух сухой и холодный. В основном стоит ясная морозная погода, иногда морозы до -50°C . зимой при этом могут быть оттепели. В Казахстане весна начинается в середине апреля и заканчивается в мае, погода весной очень неустойчива, ясная погода может смениться резким похолоданием с разницей температур более 10° . Особенности климата Казахстана необходимо учитывать при выборе технических характеристик и исполнения ветроэлектрических установок. Подобные климатические условия, как показывает опыт

строительства в Казахстане отдельных системных ветроэнергетических установок, накладывают определенные ограничения на условия эксплуатации их в наших климатических условиях (низкие температуры, большая скорость ветра, оледенение поверхностей). Для эффективного использования энергии ветрового потока необходимо иметь исчерпывающую информацию о нем. Общие метеорологические характеристики, даваемые метеостанциями, для этого недостаточны. Необходимы характеристики, учитывающие природную структуру ветра, пределы достоверности и репрезентативности исходных данных и т.д.

Основой всех ветроэнергетических расчетов является ветроэнергетический кадастр, который представляет собой совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра, позволяющих выявить его энергетическую ценность и определить возможные режимы работы ветроустановок.

К числу основных кадастровых характеристик ветра относятся:

- годовой и суточный ход;
- среднегодовая скорость;
- повторяемость скоростей ветра по градациям;
- распределение ветровых периодов и периодов затишья по длительности;
- максимальная скорость;
- удельная мощность и удельная энергия ветрового потока;
- ветроэнергетические ресурсы района.

Данные о средних скоростях ветра за длительные периоды времени служат исходной информацией об общем уровне интенсивности ветра. Средняя многолетняя скорость ветра является одним из критериев оценки эффективности ветровой энергии. По ее величине в первом приближении можно судить о перспективности применения ветроустановок в том или ином районе [130].

На большей территории Казахстана среднегодовая скорость ветра находится в пределах 3-4 м/с (низкая категория). Скорость ветра в пределах 4-6 м/с наблюдается в основном на севере республики и в отдельных горных и предгорных областях (приближается к обычной). На побережье Каспийского моря скорость ветра достигает 6-7 м/с (хорошая). Это необходимо учитывать при рассмотрении возможности использования ветроэнергетических установок малой и средней мощности, у которых высота башни не превышает 12-18 м.

На рисунке 7.1 показана карта распределения среднегодовых скоростей ветра на высоте 10 м по областям РК.

В низких слоях от земной поверхности и до 500 м, наблюдается резкое повышение скорости ветра по мере удаления от земной поверхности (рисунок 7.1). Сравнение хода скоростей в зимнее и летнее время показывает, что изменение скорости ветра с высотой летом значительно меньше, чем зимой. Это можно объяснить меньшими значениями

вертикального температурного градиента в зимнее время по сравнению с летним. Как следует из рисунка 7.1 наибольшим ветропотенциалом обладает Северный регион Казахстана.

Климат Карагандинской области резко континентальный, сухой. Высокая степень континентальности проявляется в больших годовых и суточных амплитудах температуры и в неустойчивости климатических показателей во времени (из года в год).

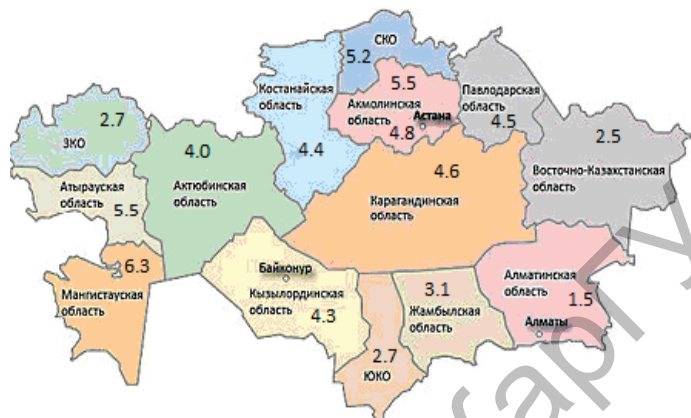


Рисунок 7.1 - Карта распределения среднегодовых скоростей ветра на высоте 10 м по областям РК

Средняя годовая температура воздуха колеблется на территории области в пределах 1,4–7,3°C, причем наиболее высокие ее значения характерны для самых южных районов – пустынь. Лето на территории области очень жаркое, а на юге знойное и продолжительное. Температура воздуха летом иногда повышается до 40-48°C; Зима, наоборот, холодная, морозы иногда доходят до 40-45°C и даже 50°C.

В среднем продолжительность теплого периода (со средней суточной температурой воздуха выше 0°) колеблется на территории области от 200 (на северо-востоке) до 240 дней (на юге).

Годовое количество осадков по области меняется от 130 мм и менее до 310 мм и более. Наименшее количество осадков выпадает в районе Прибалхашья. Осадки теплого периода на северо-востоке области исчисляются в среднем 200-270 мм, а в пустынной зоне – всего лишь 65-80 мм.

Энергетические запасы ветра в области достаточно велики и вполне могут быть использованы для целого ряда нужд народного хозяйства. На большей территории средняя годовая скорость ветра составляет 2,0-4,4 м/сек. Преобладающее направление ветра в равнинных районах южной половины области – восточное и северо-восточное, в северо-восточной части территории – юго-западное и южное.

Согласно источнику [131] данные о температуре воздуха в Караганде приведены в таблице 3 и 4 за 2014 год. Абсолютный минимум

наблюдалось в декабре и составило $-42,9^{\circ}\text{C}$, а абсолютный максимум в августе $40,2^{\circ}\text{C}$.

В таблице 3 представлены данные по температуре воздуха в городе Караганде за первое полугодие 2014 года.

Таблица 3 – Температура воздуха в городе Караганде за первое полугодие в 2014 год, $^{\circ}\text{C}$ [131, с.2]

Месяц	Абсолют. минимум, $^{\circ}\text{C}$	Средний минимум, $^{\circ}\text{C}$	Средняя, $^{\circ}\text{C}$	Средний максимум, $^{\circ}\text{C}$	Абсолют. максимум, $^{\circ}\text{C}$
Январь	-41.7	-17.1	-12.9	-8.7	6.2
Февраль	-41.0	-17.2	-12.7	-7.7	6.0
Март	-34.7	-10.4	-6.2	-1.4	22.3
Апрель	-24.0	0.1	5.6	12.0	30.6
Май	-9.5	6.9	13.3	20.1	35.6
Июнь	-2.3	12.3	18.9	25.6	39.1

В таблице 4 представлены данные о температуре воздуха в городе Караганде за второе полугодие 2014 года.

Таблица 4 – Температура воздуха в городе Караганде за второе полугодие 2014 года, $^{\circ}\text{C}$ [131, с.3]

Месяц	Абсолют. минимум, $^{\circ}\text{C}$	Средний минимум, $^{\circ}\text{C}$	Средняя, $^{\circ}\text{C}$	Средний максимум, $^{\circ}\text{C}$	Абсолют. максимум, $^{\circ}\text{C}$
Июль	1.7	14.3	20.4	26.8	39.6
Август	-0.8	12.3	18.6	25.4	40.2
Сентябрь	-7.4	6.1	12.2	19.2	37.4
Октябрь	-19.3	-0.3	4.4	10.5	27.6
Ноябрь	-38.0	-8.6	-4.8	-0.2	18.9
Декабрь	-42.9	-15.1	-11.0	-6.8	11.5

На рисунке 7.2 даны сведения о количестве осадков за год в Караганде. Как видно из рисунка, максимальное количество осадков было зафиксировано в июле месяце – 41 мм.

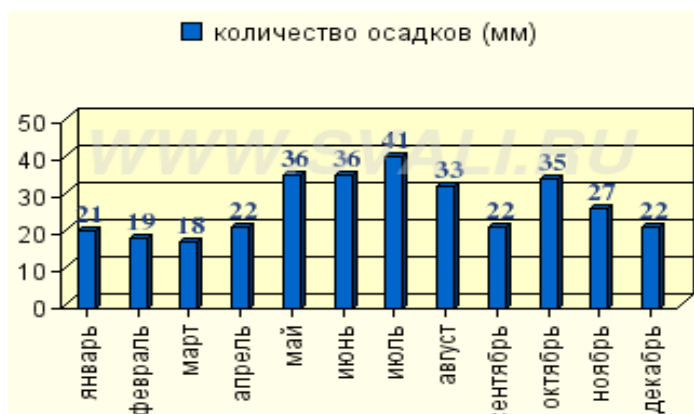


Рисунок 7.2 - Сведения о количестве осадков за год в городе Караганде

В таблице 5 представлены данные о повторяемости различных направлений ветра для города Караганды за 2014 год.

Таблица 5 – Данные о повторяемости различных направлений ветра за 2014 год, %

Направление	Месяцы												
	Январь %	Февраль %	март %	Апрель %	Май %	Июнь %	Июль %	Август %	Сентябрь %	Октябрь %	Ноябрь %	Декабрь %	За год %
Север	4	5	6	10	10	17	20	19	12	7	7	4	10
Северо-восток	9	11	14	15	12	17	18	17	14	11	9	5	13
Восток	12	14	17	16	14	14	13	13	12	10	10	10	13
Юго-восток	16	16	14	11	10	9	8	9	10	12	13	17	12
Штиль	14	12	9	10	11	13	14	13	17	14	12	13	13

В таблице 6 приведены сведения о влажности воздуха, для города Караганды.

Таблица 6 – Сведения о влажности воздуха за 2014 год, в %

январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль
79%	78%	78%	61%	54%	50%	55%
август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	годовой	
52%	53%	66%	77%	78%	65%	

Эти критерии устанавливались из условия, что экономически оправданная скорость ветра должна превышать 4-5 м/с.

На рисунке 7.3 показана роза ветров города Караганды.

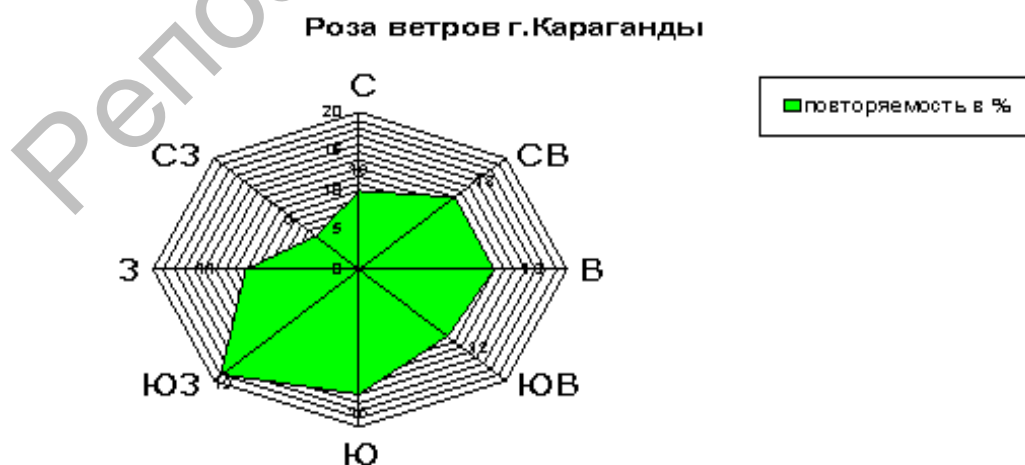


Рисунок 7.3 - Роза ветров г. Караганды

Как видно из рисунка 7.3, преобладающим направлением ветра в Караганде является юго-западное, а далее идет преобладание южного

ветра, западного и восточного направлений ветров. Средняя годовая скорость ветра в городе Караганде 3,8 м/с, максимальная – 15 м/с. Сильные ветры наиболее вероятны при часто встречающихся направлениях ветра, а слабые характерны для направлений с малой повторяемостью.

7.2 Испытания опытного образца трехлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса при разных климатических условиях

Анализ климатических условий города показал ясно, что климат г.Караганды является резко-континентальным, вследствие удаленности территории от Атлантического океана, являющегося главным поставщиком влаги. Среднегодовая температура воздуха – +3,6 °С. Средняя температура самого теплого месяца — июля колеблется от +18 °С до +22 °С. Максимальная температура воздуха в июле достигает 40–43 °С. Температура (30 °С и выше) отмечается в среднем за июль на протяжении от 7–8 до 10–15 дней. Средняя температура самого холодного месяца (января) –18°С.

Были проведены опытные экспериментальные испытания ветроустановки трехлопастного ветродвигателя для четырех сезонов года (январь, апрель, июнь, сентябрь). Исследования проводились с 1 по 27 число месяца 2014 года. В результате испытаний были получены зависимости значений силы тяги от дней месяца для каждого сезона [132].

На рисунке 7.4 показана зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в январе. Испытания проводились с 3 по 27 января. Максимальное значение силы тяги было получено 20 января при температуре воздуха -1°С, скорости ветра – 8 м/с.

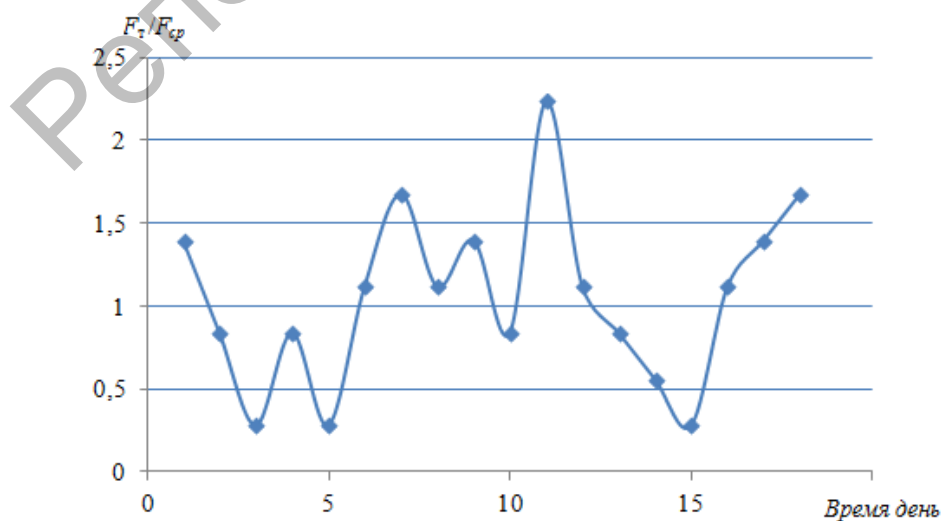


Рисунок 7.4 - Зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в январе

На рисунке 7.5 показана зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в апреле. Максимальное значение силы тяги было отмечено 16 апреля при температуре воздуха $+10^{\circ}\text{C}$, скорости ветра – 8 м/с.

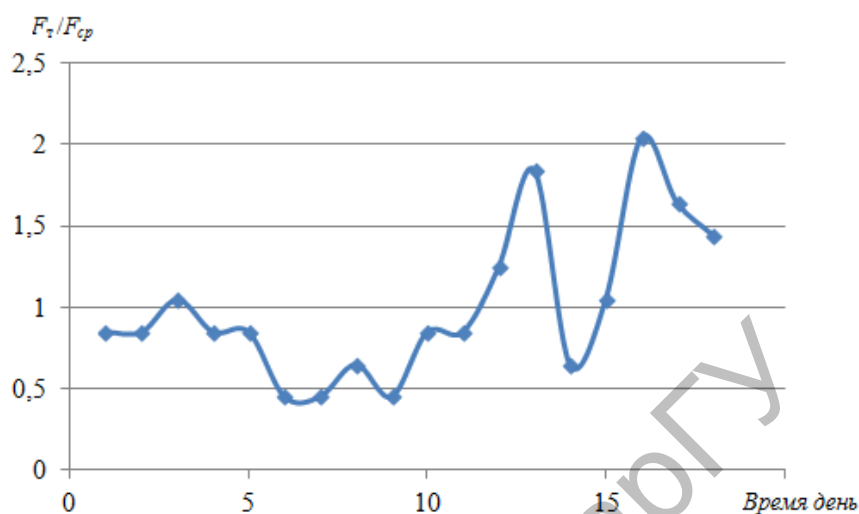


Рисунок 7.5- Зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в апреле

На рисунке 7.6 показана зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в июне. Максимальное значение силы тяги было зафиксировано при температуре воздуха $+32^{\circ}\text{C}$ и $+26^{\circ}\text{C}$, скорости ветра – 8 м/с 3 июня и 10 м/с 6 июня.

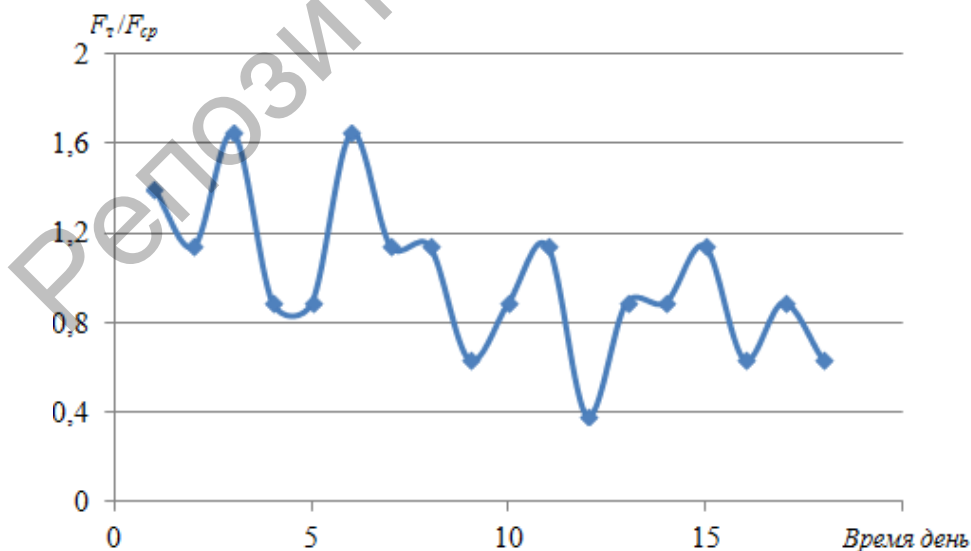


Рисунок 7.6- Зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в июне

На рисунке 7.7 показана зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в сентябре. Максимальное значение силы тяги 120 Н было

получено 10 сентября при температуре воздуха $+15^{\circ}\text{C}$, скорости ветра – 8 м/с.

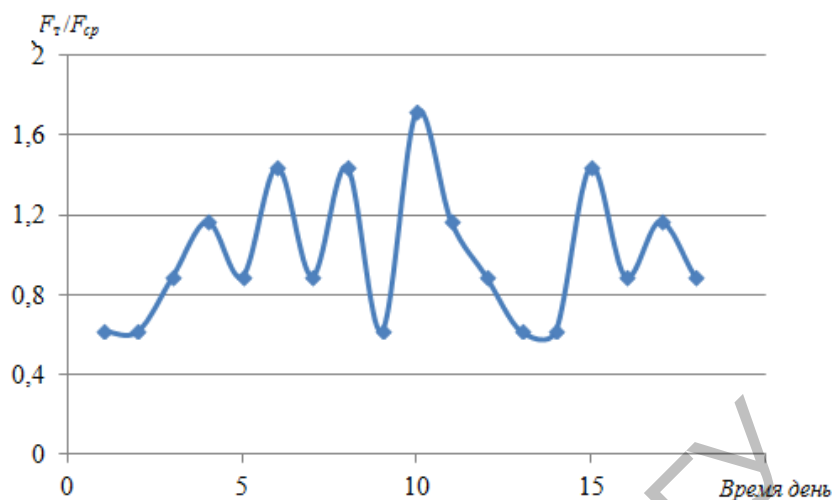


Рисунок 7.7 - Зависимость безразмерного значения силы тяги от дней в сентябре

Представленные результаты (рисунок 7.4-7.7) позволяют сделать вывод, что:

- максимальное значение силы тяги было получено 20 января при температуре воздуха -1°C , скорости ветра – 8 м/с;

- максимальное значение силы тяги было получено 16 апреля при температуре воздуха $+12^{\circ}\text{C}$, скорость воздушного потока равна 8 м/с. Испытания проводились со 2 по 27 апреля;

- максимальное значение силы тяги было получено при температуре воздуха $+32^{\circ}\text{C}$ и $+26^{\circ}\text{C}$, скорость ветра равна 8 м/с 3 июня и 10 м/с 6 июня. Испытания проводились с 3 по 27 июня.

- максимальное значение силы тяги было получено 10 сентября при температуре воздуха $+15^{\circ}\text{C}$, скорость ветра равна 8 м/с. Испытания проводились с 10 по 27 сентября.

Таким образом, как показали графические данные работы ветродвигателя на аэродинамические характеристики, прежде всего влияют изменения скорости воздушного потока, а затем на температуру воздуха, т.к при минусовых градусах температуры смазочные материалы подшипников ветроустановки сгущаются и происходит замедленное вращение ветроколеса, которое обусловлено увеличением трения между деталями.

При плюсовых градусах температуры вязкость смазочных материалов подшипников вращающихся деталей ветродвигателя уменьшается. Следовательно, понижается трение между деталями ветродвигателя.

На рисунке 7.8 показан график зависимости силы тяги от температуры окружающей среды, где проводились экспериментальные исследования работы ветродвигателя при скорости ветра 5 м/с.

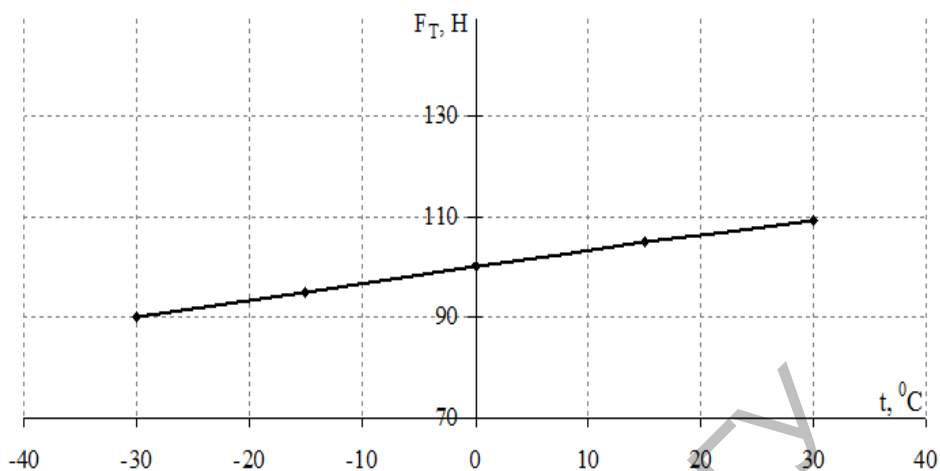


Рисунок 7.8 - График зависимости силы тяги от температуры при скорости ветра 5 м/с

На рисунке 7.9 показан график зависимости силы тяги от температуры окружающей среды при скорости ветра 9 м/с, полученный в результате экспериментальных исследований работы ветродвигателя.

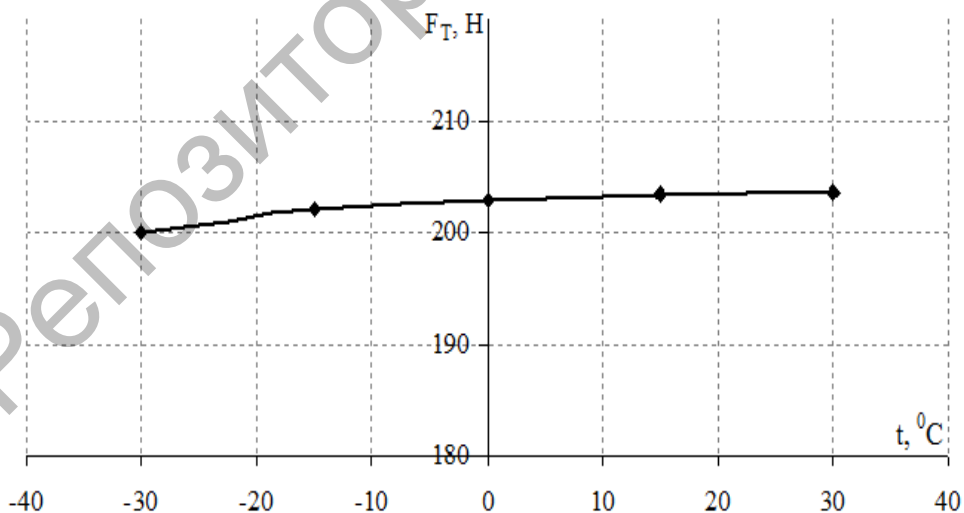


Рисунок 7.9 - График зависимости силы тяги от температуры при скорости ветра 9 м/с

На рисунке 7.10 показан график зависимости силы тяги от температуры окружающей среды при скорости ветра 13 м/с, полученный в результате экспериментальных исследований работы ветродвигателя.

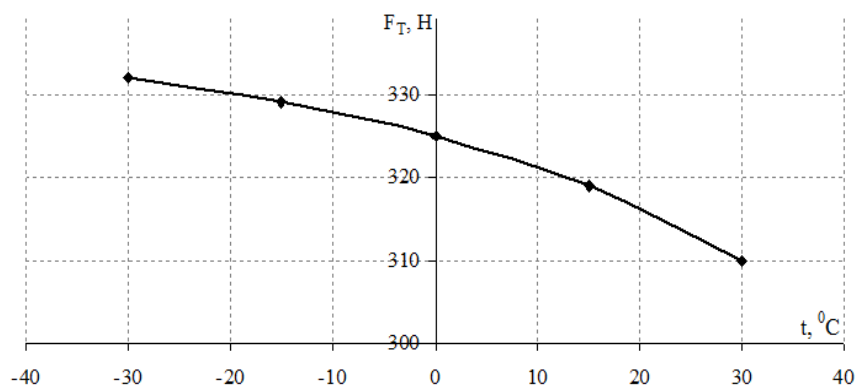


Рисунок 7.10 - График зависимости силы тяги от температуры при скорости ветра 13 м/с

Вид кривых на рисунках 7.8-7.10 можно связать с влиянием на работу ветродвигателя основных параметров, таких как скорость ветра, трение между деталями ветроколеса и плотность воздуха.

Полученные результаты имеют прикладной характер и могут быть использованы при разработке многолопастной ветротурбины с вращающимися цилиндрами переменного сечения для натурных испытаний [133-147]. Результаты экспериментальных исследований показывают, что применение вращающихся цилиндров переменного сечения позволяет использовать возникающую при обтекании дополнительную движущую силу за счет эффекта Магнуса и преобразовывать энергию воздушного потока начиная со скорости 3 м/с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Республики Казахстан. Закон РК. О поддержке использования возобновляемых источников энергии: принят 4 июля 2009 года, № 165–IVЗРК.
- 2 Указ Президента Республики Казахстан. Стратегия территориального развития Республики Казахстан до 2015 года: утв. 28 августа 2006 года, № 167.
- 3 Мукажанов В.Н. Проблемы и состояние использования возобновляемой энергетики в Казахстане // Вестник АИЭС. – 2008. – №1. – С. 41–47.
- 4 Буктуков Н.С. Перспективы развития ветроэнергетики Казахстана // Материалы Казахстанско–Российской научно–практической конференции «Проблемы ресурсоэнергообеспечения и использования альтернативных экологически чистых способов получения энергии». – Усть–Каменогорск, 2008. – С. 29–40.
- 5 Болотов А.В., Соколов С.Е., Болотов С.А. Развитие ветроэнергетики Республики Казахстан, энергетические системы электроснабжения автономных объектов // Вестник АИЭС. – 2009. – №3. – С. 11–18.
- 6 Жумабеков К.С., Барбашинова Н.С., Буркитбаев Б.О. Анализ тенденций развития технических решений в ветроэнергетике // Вестник с.-х. науки Казахстана. – 1990. – №5. – С. 98–100.
- 7 Байшагиров Х.Ж., Нуримбетов А.У. О проекте по разработке и созданию опытной партии композиционной ветроэнергетической установки с диффузором (ВЭУД) // Матер. IV междунар. научно–практической конф. «Научно–технические и социально–экономические аспекты использования возобновляемой энергетики». – Алматы, 2008. – С. 108–112.
- 8 Петров В.А., Калиниченко О.Г., Петрова Е.В. Инновационные решения при создании ветроэлектрической установки нового типа // Материалы междунар. научно–практической конф. «Роль университетов в создании инновационной экономики». – Усть–Каменогорск, 2008. – Т.2. – С. 245–249.
- 9 Ветровая карта Казахстана: http://www.windenergy.kz/files/1259909339_file.pdf.
- 10 Бекбаев А.Б., Петров В.А., Петрова Е.В. Через инновации к казахстанскому содержанию // Матер. междунар. науч. конф., посв. 75–летию КазНУ им. Аль–Фараби «Университеты XXI века: инновации и новые технологии». – Алматы, 2009. – С. 194–197.
- 11 Абдрахманов Р.С., Якимов Ф.В. Эффективность использования источников энергии ветра с ограниченными скоростями ветра // Известия РАН. – 2010. – № 5. – С. 54–57.
- 12 Бежан А.В. Проблема оледенения ветроэнергетических установок // Энергетика: экономика, техника, экология. – 2008. – №5. – С. 25–29.

13 Садыков Г. К. Использование энергии ветра. – Алматы: Кайнар, 1965. – 242 с.

14 Ершина А.К., Ершин Ш.А. Использование возобновляемых источников энергии одна из современных экологических проблем // Матер. Казахстанско–Российской научно–практической конф. "Математическое моделирование научно–технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности". – Алматы, 1997. – 54 с.

15 Ершина А.К. Некоторые вопросы экологии Казахстана // Материалы респуб. научно–практич. конф. "Педагогические аспекты экологического образования и воспитания молодого поколения в свете стратегии "Казахстан – 2030". – Алматы, 1999. – С. 179–181.

16 Бекметьев Р.М., Заглиев И.Г. Ветроэнергетические ресурсы различных районов Казахстана // В сб. науч. тр.: Ветроэнергетические станции. – М., 1988. – С. 63–70.

17 Петров В.А., Бекбаев А.Б., Петрова Е.В. Инновационный способ использования энергии ветра // Матер. Казахстанско–Российской научно–практической конф. «Проблемы ресурсосбережения и использования, альтер–нативных экологически чистых способов получения энергии». – Усть–Каменогорск, 2008. – С. 170–173.

18 Бакенов К.А. Эффективный электромеханический преобразователь для ветроэлектростанции // Вестник Павлодарского государственного универси–тета. – 2009. – № 3. – С. 17–24.

19 Ершина А.К., Ершин Ш.А., Тулепбергенов А.К. Опытные испытания модели ветроэнергетического устройства «Бидарье» // Матер. междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы современной физики». – Алматы, 2012. – С. 70–74.

20 А.с. 21023. Ветродвижитель / А.Б. Басимов, Т.М. Мунсызбай, А.Б. Бекбаев, Н.Р. Турапова, А.К. Атыбеков; опубл. 16.03.2009, Бюл. №3. – 3 с.

21 А.с. 21023. Ветродвижитель «Алга» / Н.А. Баубеков, А.А. Баубеков; опубл. 15.06.2001, Бюл. №3. – 4 с.

22 А.с. 11119. Ветродвижитель / А.П. Втулкин; опубл. 15.07.2004, Бюл. №3. – 4 с.

23 А.с. 24624. Цилиндрический конфузорный ветродвижитель / А. Искендеров; опубл. 15.09.2011, Бюл. № 3. – 3 с.

24 А.с. 15999. Ветродвижитель / А.К. Нугербеков; опубл. 15.07.2005, Бюл. №3. – 4 с.

25 А.с. 8441. Ветродвижитель / А. Акылбеков; опубл. 15.10.2004, Бюл. №3. – 3 с.

26 А.с. 1630. Ветроколесо Курилова / В.В. Курилов; опубл. 15.12.1994, Бюл. №3. – 4 с.

27 Жилкашинова А.М., Жилкашинов Р. Разработка эффективного парусного ветрогенератора мощностью 5,5 кВт // Региональный вестник Востока. – 2011. – №2(50).

- 28 А.с. 3230. Ветродвиатель системы Савонуса / М.М. Майлибаев; опубл. 15.03.1996, Бюл. №3. – 3 с.
- 29 А.с. 27817. Ветроэлектростанция Буктукова 6 (варианты) / Н.С. Буктуков, Б.Ж. Буктуков, Г.Ж. Молдыбаева, А.К. Жакып; опубл. 18.12.2013, Бюл. №12. – 4 с.
- 30 Байшагиров Х.Ж., Каримбаев Т.Д., и др., Разработка и создание композиционной ветроэлектрогенераторной установки с диффузором: отчет о НИР. – Алматы. – 2004. – 91 с.
- 31 А.с. 802. Ветровая энергетическая установка / Х.Ж. Байшагиров; опубл. 16.04.2012, Бюл. № 4. – 4 с.
- 32 Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жапбасбаев У.К. Основы теории ветротурбины Дарье. – Алматы, 2001. – 104 с.
- 33 Ершина А.К., Ершин Ш.А. Об аэродинамике ветротурбин Дарье с прямыми лопастями // Известия МН–АН РК. Серия «Физико–математическая». – 1998. – №1(200). – С. 86–91.
- 34 Ершина А.К., Тулепбергенов А.К. Расчет характеристик вертикально–осевой ветротурбины «Дарье» // Вестник КазГУ. Серия «Математика, механика, информатика». – 2001. – №2. – С. 66–71.
- 35 Ершина А.К. Аэродинамика вертикально–осевой ветротурбины VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. – Пермь, 2001. – С. 10–12.
- 36 А.с. 19114. Ветродвиатель Бидарье / Ш.А. Ершин, Ч.Ш. Ершин, А.К. Ершина; опубл. 15.02.2008, Бюл. № 3. – 3 с.
- 37 Ершина А.К., Манатбаев Р.К. Исследование тепловой защиты вращающихся частей ветротурбины Дарье // Промышленная теплотехника. – Киев, 2007. – №7. – С. 139–144.
- 38 Ершина А.К., Манатбаев Р.К. Способ тепловой защиты работающей ветроэнергетической установки карусельного типа и конструктивные варианты для его осуществления // Вестник КазНУ. Серия «Физика». – Алматы, 2009. – №4(31). – С. 103–107.
- 39 Ершина А.К., Манатбаев Р.К. Определение гидравлического сопротивления симметричного крылового профиля NASA –0021 // Вестник КазНУ. Серия «Математика, механика, информатика». – Алматы, 2006. – №4 (51). – С. 56–58.
- 40 Ершина А.К., Манатбаев Р.К. О гидравлике внутренних полостей ветротурбины Дарье // В сб. межд. научно–практ. конф.: «Современные проблемы математики, механики и информационных технологий». – Талдыкорган, 2007. – Т.2. – С. 49–56.
- 41 Ершина А.К., Ершин Ш.А. Манатбаев Р.К. Исследование тепловой защиты вращающихся частей ветротурбины Дарье // Проблемы промышленной теплотехники: тезисы V международной конференции. – Киев, 2007. – С. 276–277.

42 Yershina A.K., Yershin Sh. A., Manatbaev R.K. Research of thermal protection of rotating parts wind turbine Darie // Abstracts V-th international conference Problems of industrial heat Engineering. – Kyiv, 2007. – P. 248–249.

43 Болотов А.В., Уткин Л.А. Паспортизация энергетических характеристик виндоторных модулей // Проблемы развития энергетики и телекоммуникации в свете стратегии индустриально-инновационного развития Казахстана: сб. тез. науч.техн. конф. – Алматы, 2005. – С.45–49.

44 Болотов А.В., Низовкин В.Н. К вопросу создания виндоторных электростанций типа БОНИ и БОНИ-ШХВ // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: сборник трудов 1-й межд. науч.-тех. конф. – Алматы, 1998. – С. 150–152.

45 Болотов А.В., Новокшенов В.С., Бакенов К.А. Математическая модель вентильного генератора // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 3-ей Международной научно-технической конференции. – Алматы, 2002. – С. 121–123.

46 А.с. 8086. Вентильный генератор / В.С.Новокшенов, А.В.Болотов, Е.Ф. Ганага, К.А. Бакенов; опубл. 15.10.99. Бюл. № 10. – 5 с.

47 Болотов А. В., Новокшенов В. С., Бакенов К. А. Разработка электромеханического преобразователя на базе асинхронного двигателя // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: сб. науч. трудов второй междунар. науч.-технич. конф. – Алматы, 2000. – С. 150–153.

48 Новокшенов В.С., Болотов С.А., Бакенов К.А. Бесконтактные генераторы для ВЭС малой мощности // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 5-ой междунар. научно-технич. конф. – Алматы, 2006. – С. 142–144.

49 Болотов А.В., Уткин Л.А., Бакенов К.А., Болотов С.А. Электроснабжение удаленных объектов с использованием автономных источников энергии // Труды 3-ей междунар. науч.-технич. конф. «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях». – Алматы, 2002. – С. 28–31.

50 Болотов А. В., Новокшенов В. С., Бакенов К. А. Вентильный генератор для ВЭС // Сборник трудов первой междунар. науч.-технич. конфер. «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях». – Алматы, 1998. – С.152–153.

51 А.с. 20572. Ветроэнергетический агрегат Болтова / Н.С. Болотов, А.В. Болотов, С.А. Болотов; опубл. 15.11.11. Бюл. № 11. – 4 с.

52 Исатаев С.И., Жангунов О. Влияние относительной длины коротких цилиндров со сферическими торцами на интенсивность теплообмена: тез. конф. молодых ученых. – Алма-Ата, 1985. – С. 221–222.

53 Исатаев С.И., Жангунов О. Поперечное обтекание короткого цилиндра со сферическими торцами потоком воздуха. Исследование процесса переноса. – Алматы, 1985. – С. 17–21.

- 54 Жукаускас А.А. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости // Теплоэнергетика. – 1955. – № 4. – С. 38–40.
- 55 Бычков Н.М. Ветродвижитель с эффектом Магнуса: 1 Результаты модельных исследований // Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – Т. 11, № 4. – С. 583–596.
- 56 Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А. Особенности аэродинамики вращающегося цилиндра в потоке // Промышленная теплотехника. – Киев, 2003. – Т.25, №4. – С. 279–281.
- 57 Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А., Миньков Л.Л. Исследование подъемной силы вращающегося цилиндра при поперечном обтекании турбулентным потоком газа. Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. – Алматы: Изд. КазНУ, 2003. – С. 78–82.
- 58 Kusainov K., Sakipova S.E. Aerodynamics of the cylinder in a cross flow. // Eurasian Physical Technical Journal. – 2004. – Vol.4, № 1. – P. 71–75.
- 59 Kusainov K., Sakipova S.E., Nikitina L.A. Aerodynamics of the transversally streamlined rotated barrel // Methods of aerophysical research: 12th international conference ICMAR–2004. – Novosibirsk, 2004. – Vol.4. – P. 195–198.
- 60 Еронин М.В., Кратиров Д.В., Молочников В.М., Дунай О.В. Вихри Кармана при турбулизации пограничного слоя на плохобтекаемом теле // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену: в 8 т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – Т. 2. – С. 118–122.
- 61 Молочников В.М., Михеев Н.И., Кратиров Д.В., Давлетшин И.А. Вихревая дорожка Кармана в условиях пульсирующего потока // Матер. VI межд. школы–семинара «Модели и методы аэродинамики. Евпатория». – М.: МЦНМО, 2006. – С. 71–72.
- 62 Молочников В.М., Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Фасхутдинов Р.Э. Динамика переноса турбулентных пульсаций гидродинамических и тепловых параметров в следе за поперечным цилиндром вблизи стенки // Изв. РАН Энергетика. – 2007. – №6. – С. 80–86.
- 63 Козлов А.П., Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Молочников В.М. Структура течения вблизи поперечно обтекаемого кругового цилиндра в ограниченном турбулентном потоке с неравномерным профилем скорости // Теплофизика и аэромеханика. – 1998. – Т.5, № 2. – С. 161–166.
- 64 Кусаиынов К., Смакова Н.С. Өзгермелі бағытты ауа ағынындағы жартылай сфералармен шектелген цилиндрдің аэродинамикасы // Бейсызықты жүйелердегі хаос және құрылымдар. Теория және тәжірибе: 7–ші халықаралық конференцияның материалдары. – Қарағанды, 2010. – Б. 271–276.

65 Smakova N.S., Dusembaeva A.N. The research of aerodynamics of circulating cones in survey// Eurasian Physical Technical Journal. – 2010. – Vol.7, №2(14). – P. 35–38.

66 Толеуов Г., Исатаев С.И. Изучение развития вихревой структуры турбулентных струй и пограничного слоя однородного потока // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование: матер. 7-ой междунар. науч. конф. – Алматы: Изд-во КазНУ, 2011. – С. 1–4.

67 Бычков Н.М. Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 2. Характеристики вращающегося цилиндра // Теплофизика и аэромеханика. – 2005.– Т.12, №1. – С. 59–175.

68 Бычков Н.М. Ветродвижитель с эффектом Магнуса. 3. Расчетные характеристики ветроколеса // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т.15, №2. – С. 583–596.

69 Прандтль Л. Эффект Магнуса и ветряной корабль // Успехи физических наук. – 1925. – Т.5, №1. – С. 1–27.

70 Жангунов О. Аэродинамика и теплообмен цилиндрических тел конечной длины: дис. ... канд. тех. наук. – Алматы, 1987. – 148 с.

71 Хозяинов Б.П. Вычисление угловой скорости вращения ветротурбины с вертикальной осью // Энергетик. – 2011. – № 5. – С. 28–30.

72 А.с. RU № 2330988. Ветровой электрогенератор на основе эффекта Магнуса / Н. Мураками, И. Дзун; опубл. 27.03.2012. Бюл. № 25. – 3 с.

73 А.с. 2118699. Ветроустановка и способ ее работы / Н.М. Бычков; опубл. 18.06.1996. Бюл. № 45. – 4 с.

74 А.с. 15695. Ветродвижитель многороторный и способ его работы / О.В. Климов; опубл. 31.10.2011. Бюл. №3. – 3 с.

75 А.с. 1612106. Ветродвижитель / В.А. Викторук; опубл. 07.12.1990. Бюл. №45. – 3 с.

76 Бекбаев А.Б., Петрова Е.В., Петров В.А., Акпанбетов Д.Б. Экспериментальное обоснование работы ветроэлектрической установки нового типа // Вестник КазНТУ им. К. Сатпаева. – 2010. – №3. – С. 63–67.

77 Гарбузов В.М., Ермаков А.Л., Кубланов М.С., Ципенко В.Г. Аэромеханика: учебник для студентов вузов. – М.: Транспорт, 2000. – 45 с.

78 Мартынов А.К. Прикладная аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1972. – 120 с.

79 Хозяинов Б.П., Березин М.А. Методика проведения испытаний моделей ветроэнергетической установки в аэродинамической трубе 3–АТ–17.5/3 фирмы УНИКОН // Вестник КузГТУ. – 2000. – № 4. – С. 38–42.

80 Верховский В.П. Газодинамическое проектирование профилированных сопел аэродинамических труб: дис. ... док. тех. наук: 01.02.05 / Центр. аэродинамический институт им. Н.Е. Жуковского. – М., 2005. – 250 с. – Инв. № 004410413.

- 81 Гарипова Л.И., Батраков А.С., Кусюмов А.Н., Михайлов А. С., Баракос Дж. Определение аэродинамических характеристик модели несущего винта на режиме осевого обтекания // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2014. – № 3. – С. 7–13.
- 82 Gagliardi A., Barakos G. Analysis and design of a flapped–equipped low–twist rotor for hover // Journal of Aircraft. – 2009. – Vol.46, № 1. – P. 74–84.
- 83 Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. – 282 с.
- 84 Шваб А.В., Зятиков П.Н., Садретдинов Ш.Р., Чепель А.Г. Исследование закрученного турбулентного течения в рабочей зоне воздушно–центробежного классификатора // ПМТФ. – Новосибирск: Изд–во СО РАН, 2010. – Т.51, № 2. – С. 253–259.
- 85 Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента: учебное пособие для вузов. – Новосибирск: Изд–во НГТУ, 2011. – С. 497–536.
- 86 Tao Y., Fan X., and Zhao Y. Flow visualization for the evolution of the slipstream in steady shock reflection // Journal of Visualization. – 2015. – Vol.18, №1. – P. 21–24.
- 87 Madsen H.O., Krenk S., Lind N.C. Methods of Structural Safety // Prentice–Hall: Englewood Cliffs. – New Jersey, 1986. – Vol.3, №12. – P. 125–130.
- 88 Kurose R., Komori S. Drag and lift forces on a rotating sphere in a linear shear flow // Journal Fluid Mechanics. – 1999. – Vol.13, №2. – P. 183–384.
- 89 Грязнова И.Ю., Мартьянов А.И. Экспериментальные исследования закономерностей обтекания цилиндра и крыла воздушным потоком на аэростенде ТМЖ–1М: учебно–методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 60 с.
- 90 Kusaıynov K., Schragger E. R., Tanasheva N.K., Turgunov M., Dyusembaeva A. The research of drag of two–bladed wind turbine in the operating mode // Eurasian Physical Technical Journal. – 2014. – Vol.11, № 1(21). – P. 57–61.
- 91 Юшина Л.Е. Влияние формы необогреваемого торца на теплообмен поперечно обтекаемого цилиндра // Теплообмен и теплофизические свойства вещества: сб. научных трудов. – Киев: Наука думка, 1984. – С. 17–23.
- 92 Бычков Н.М., Коваленко В.М. Аэродинамические характеристики кругового цилиндра в поперечном потоке // Изв. СО АН СССР. Серия «Технические науки». – 1980. – №8, вып. 2. – С. 114–124.
- 93 Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Дюсембаева А.Н., Тансыкбаева Н.К. Экспериментальное исследование аэродинамики системы вращающихся цилиндров в турбулентном потоке // Хаос и структуры в

нелинейных системах. Теория и эксперимент: матер. 8-й международной научной конференции, посвященной 40-летию КарГУ им. академика Е.А. Букетова. – Караганда, 2012. – С. 368–372.

94 Kussaiynov K., Sakipova S.E., Tansykbaeva N.K. Experimental research of aerodynamics of the system of the revolved cylinders in a turbulent stream // *Turbulence, Heat and Mass Transfer: 7th International Symposium (September 24–27)*. – Palermo, 2012. – P. 125–128.

95 Кусаиынов К., Дюсембаева А.Н., Тургунов М.М., Тансыкбаева Н.К. Аэродинамика системы вращающихся цилиндров // *Актуальные проблемы современной физики: матер. междунар. конф., посв. 80-летию профессора Исатаева С.И.* – Алматы, 2012. – С. 18–22.

96 Sakipova S.E., Kussaiynova A., Dyusembaeva A., Tansykbaeva N. Aerodynamics Of The Revolved Cylinders In A Cross Turbulent Stream // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2012. – Vol.9, №1(17). – P. 39–44.

97 Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Омаров Н. Анализ эффективности ветродвигателей с цилиндрическими элементами переменного сечения // *Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика»*. – 2010. – №1 (57). – С. 41–46.

98 Тансыкбаева Н.К., Тургунов М.М., Кусаиынова А. Экспериментальное исследование аэродинамики системы из двух вращающихся цилиндров // *Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика»*. – 2011. – № 4 (64). – С. 49–52.

99 Ахмадиев Б.А., Тургунов М.М., Дюсембаева А.Н., Тансыкбаева Н.К. Влияние пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – Киев, 2013. – № 1(12). – С. 420–425.

100 Kusaiynov K., Tanasheva N.K., Turgunov M.M., Kalikova A., Dysembaeva A. The effect of porosity on the aerodynamic characteristics of a rotating cylinder // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2013. – Vol.10, №.2 (20). – P. 26–32.

101 Шрагер Э.Р., Танашева Н., Тургунов М., Дюсембаева А. Экспериментальное исследование силы лобового сопротивления макета ветродвигателя в рабочем режиме // *Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика»*. – 2014. – № 3(75). – С. 47–52.

102 Кусаиынов К., Тансыкбаева Н.К., Кусаиынова А., Тургунов М.М., Дюсембаева А.Н. Исследования аэродинамики вращающихся двух цилиндров расположенных под углом друг другу // *Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: матер. 8-й междунар. научной конф., посв. 40-летию КарГУ им. академика Е.А. Букетова*. – Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. – С. 372–375.

103 Танашева Н.К., Тургунов М.М., Кусаиынова А.К., Кусаиынов Е.К. Анализ экспериментальных данных одиночного вращающегося цилиндра с шероховатой поверхностью // *Хаос и структуры в нелинейных*

системах. Теория и эксперимент: матер. 9-й междунар. науч. конф. – Караганда: Изд-во КарГУ, 2015. – С. 302–305.

104 Кусаиынов К., Танашева Н.К., Тургунов М., Дюсембаева А. Исследование лобового сопротивления двухлопастного ветродвигателя в рабочем режиме // Вестник Томского государственного университета. Серия «Математика и механика». – 2014. – № 4(30). – С. 82–88.

105 Сакипова С.Е., Камбарова Ж.Т. Танашева Н.К. и др. Конструкция ветротурбины с динамически изменяемой формой поверхности лопастей для малых скоростей // Наука и инновации – важные факторы развития «зеленой экономики» Казахстана: матер. респуб. научно–практич. конф. – Караганда, 2014. – С. 136–140.

106 Кусаиынов К., Смакова Н.С., Омаров Н. Исследование аэродинамики вращающегося тела с округленными торцами // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2010. – №2(58). – С. 52–56.

107 Кусаиынов К., Камбарова Ж.Т., Танашева Н.К. и др. Расчет силы лобового сопротивления и подъемной силы опытных образцов лопастей ветродвигателя с динамически изменяемой формой // Наука, образование и производство – ведущие факторы Стратегии «Казахстан– 2050»: труды междунар. научно – практ. конф. – Караганда, 2014. – С. 277–280.

108 Кусаиынов К., Танашева Н.К., Алибекова А.Р., Кусаиынова А., Тургунов М. Исследование аэродинамической силы тяги треугольных лопастей ветротурбины // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2014. – № 2(74). – С. 47–51.

109 Математическое моделирование: Методы, описания и исследования сложных систем / под ред. А.А. Самарского. – М.: Наука, 1989. – 271 с.

110 Олейников А.М., Матвеев Ю.В., Канов Л.Н. Моделирование режима ветроэлектрической установки малой мощности // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 16–20.

111 Редчиц Д.А., Приходько А.А. Численное решение задачи динамики и аэродинамики ротора ветроагрегатов // Космическая наука и технология. – 2005. – Т.11, №1. – С. 27–35.

112 Baek S., Sung H.J. Numerical simulation of the flow behind a rotary oscillating circular cylinder // Phys. Fluids. – 1998. – Vol.10, №4. – P. 869 – 893.

113 Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. – С–Пб.: Балтийский гос. ун–т, 2001. – 34 с.

114 Piziali R.A. An experimental investigation of 2D and 3D oscillating wind aerodynamics for a range of attack including stall // NASA TM 4632 – 1993. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950012704.pdf>

115 Батурин О.В. Построение расчетных моделей в препроцессоре Гамбит универсального программного комплекса Флуент: учебное

пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. университета, 2009. – 172 с.

116 Батулин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Флуент: учебное пособие. – Самара: Изд. Самар. гос. аэрокосм. университета, 2009. – 151 с.

117 Камбарова Ж.Т., Танашева Н.К., Тургунов М.М., Алибекова А.Р., Кусаиынова А.К. Математическое моделирование обтекания парусной лопасти потоком ветра с использованием программ Ансус Флуент // Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане: материалы VII междунар. науч. конф. – Алматы, 2014. – С. 21–24.

118 Kussaiynov K., Stoev M., Tanasheva N.K. The research of aerodynamic characteristics of a rotating cylinder with variable cross section // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference – MNS2015. Mathematics and Natural Science. – Blagoevgrad. – 2015. – Vol.2. – P. 66–70.

119 Кусаиынов К., Танашева Н.К., Тургунов М.М., Кусаиынова А.К., Саденова К.К. Моделирование картины обтекания вращающегося цилиндра в потоке воздуха // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2015. – № 1(77). – С. 74–77.

120 Карагаева М., Танашева Н.К., Степанова Ю.О., Тургунов М.М., Кусаиынова А.К. Численные моделирование обтекания вращающегося цилиндра в турбулентном потоке // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: мат. 9-й междунар. науч. конф. – Караганда: Изд-во КарГУ, 2015. – С. 270–275.

121 Kussaiynov K., Tanasheva N.K., Turgunov M.M., Shaimerdenova K.M., Alibekova A.R. The Effect of Porosity on the Aerodynamic Characteristics of a Rotating Cylinder // Modern Applied Science. – 2015. – Vol.9, No 2. – P.218–227.
<http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56604246200>.

122 Кусаиынов К., Танашева Н.К. и др. Исследование аэродинамической силы тяги треугольных лопастей ветротурбины // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика» – 2014. – № 2 (74). – С. 47–51.

123 Кусаиынов К., Танашева Н.К. и др. Аэродинамические параметры лопасти ветротурбины с динамически изменяемой формой рабочей поверхности // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2014. – № 3(75). – С. 52–57.

124 Кусаиынов К., Камбарова Ж.Т., Танашева Н.К., Алибекова А.Р. Исследование обтекание парусной лопасти ветротурбины воздухом // Энергоэффективность–2014: матер. междунар. научно–технической конф. – Минск, 2014. – С. 73–79.

125 Кусаиынов К., Шрагер Э.Р., Танашева Н.К., Тургунов М. М. Экспериментальное исследование силы тяги двухлопастного

ветродвигателя // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2014. – № 4(76). – С. 75–79.

126 Kusaiynov K., Kambarova Jh.T., Tanasheva N.K., Shaimerdenova K.M., Alibekova A.R. Flow Past the Sail Blade of a Wind Turbine // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Springer GmbH & Co, Auslieferungs. – Gesellschaft, 2015. – Vol. 88, №2. – P. 497–503.

127 Kusaiynov K., Tanasheva N.K., Turgunov M.M., Alibekova A.R. Analysis of aerodynamic characteristics of rotating porous cylinders // Technical Physics. Pleiades Publishing. – 2015. – V.60, № 5. – P. 656–659.

128 Садоков В.П., Дмитриева Л.Р., Кузнецова Н. Н., Акимов И.В. Анализ временной и пространственной структуры среднего квадратического отклонения количества осадков в Республике Казахстан и прилегающих районах // Труды Гидрометцентра России. – 2001. – № 336. – С. 94–106.

129 Боголюбова Е.В., Игнатенко О.С. Пространственно–временная статистическая структура поля месячных сумм осадков на территории Казахстана летом // Гидрометеорология и экология. – 2003. – №4. – С. 43–50.

130 Болотов А.В., Соколов С.Е., Болотов С.А. Развитие ветроэнергетики республики Казахстан, энергетические системы электроснабжения автономных объектов // Вестник АИЭС. – 2009. – № 3(6). – С. 11–18.

131 Казгидромет: http://www.kazhydromet.kz/ru/inforeg_6

132 Алибекова А.Р., Кусаиынов К.К., Камбарова Ж.Т., Танашева Н.К., Карагаева М.Б. Экспериментальные испытания опытной ветроэнергетической установки при различных климатических условиях // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – 2015. – № 2(78). – С. 44–48.

133 Kusaiynov K., Tanasheva N.K., L. L. Min'kov, B. R. Nusupbekov, Yu. O. Stepanova, A. V. Rozhkova. Numerical simulation of a flow past a triangular sail-type blade of a wind generator using the ANSYS FLUENT software package // Technical Physics. – 2016. – Vol. 61. – № 2. – P. 299-301. (IF – 0.524, SCOPUS)

134 Кусаиынов К.К., Танашева Н.К., Дюсембина А.Г., Тургунов М.М., Шуюшбаева Н.Н. Ашық кеңістікте жел ағынын тудыратын кондырғының аэродинамикалық параметрлерін зерттеу // Вестник Карагандинского университета. – Серия физика. – 2016. - № 1 (81). – С. 57-61. http://vestnik.ksu.kz/files_vestnik/Physics/Physics_1_81_2016.pdf

135 Kussayinov K., Tanasheva N.K., Shuyushbayeva N.N., Ryzhykh Yu.N., Stepanova Yu.O., Bagdatova S.B. Simulation of airflow pattern of two rotating cylinders // Вестник Карагандинского университета. – Серия физика. – 2016. - № 2 (82). – С. 50 http://vestnik.ksu.kz/files_vestnik/Physics/Physics_1_81_2016.pdf

- 136 Tanasheva N.K., Sakipova S.E., Kivrin V.I., Kussaiynova A.K. Study of aerodynamic characteristics of the model of a wind turbine with rotating cylinders // Eurasian Physical Technical Journal.– Vol 13.– № 2(26).– Karaganda, 2016. – P. 111-116. http://phtj.ksu.kz/files_phtj/2017.01/16.pdf
- 137 Tanasheva N.K., Shrager E.R., Dyusembaeva A.N., Kussaiynova A.K., Ospanova D.A., Bakhtybekova A.R. Simulation of flow of the blade wind turbine // Вестник Карагандинского университета. – Серия физика. – 2016. - № 2 (82). – С.50-56. http://vestnik.ksu.kz/files_vestnik/Physics/Physics_4_84_2016.pdf
- 138 Танашева Н.К., А.Н. Дюсембаева, С.Б. Багдатова, В.И. Киврин. Исследование аэродинамических характеристик систем вращающихся цилиндров на основе эффекта Магнуса // Республиканская научно-практическая конференция «ЭКСПО-2017: технологии будущего» (21-22 октября 2016). – Караганда, 2016. – С. 41-46.
- 139 Нусупбеков Б.Р., Танашева Н.К., А.Н. Дюсембаева, С.Б. Багдатова, В.И. Киврин. Исследование электрофизических характеристик ветрового генератора // Республиканская научно-практическая конференция «ЭКСПО-2017: технологии будущего» (21-22 октября 2016). – Караганда, 2016. – С. 100-104.
- 140 Танашева Н.К., Бахтыбекова А.Р., Дюсембаева А.Н., Нургалиева Ж.Г., Багдатова С.Б., Кусаиынова А.К. Экспериментальные исследования аэродинамической характеристики ветротурбины при различных климатических условиях // Республиканская научно-практическая конференция «ЭКСПО-2017: технологии будущего» (21-22 октября 2016). – Караганда, 2016. – С. 125-129
- 141 Kusaiynov K., Nussupbekov B.R., Shuyushbayeva N.N., Tanasheva N.K., Shaimerdenova K.M., Khassenov A.K. On electric-pulse well drilling and breaking of solids // Technical Physics. – 2017. – Vol. 62. – № 6. – P. 867-870 (IF-0.632)
- 142 Tanasheva N.K., Kunakbaev T. O., Dyusembaeva A. N., N. N. Shuyushbayeva, S. K. Damekova. Effect of a rough surface on the aerodynamic characteristics of a two-bladed wind-powered engine with cylindrical blades // Technical Physics. – 2017. – Vol. 62. – № 11. – P. 1631-1633. (Th R. IF – 0.632, SCOPUS) <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063784217110299>
- 143 Kussaiynov K.K., Tanasheva N.K., Dyussembina A.G., Turgunov M.M., Shuyushbayeva N.N. The study of aerodynamic parameters of the production setup of the wind flow in open space // BULLETIN OF THE UNIVERSITY OF KARAGANDA-PHYSICS. - Karaganda, 2016.- Vol. 2. - № 81.-P. 57-61.
- 144 Tanasheva N.K., Shrager E.R., Sakipova S.E., Dyusembaeva A.N., Nurgalieva Zh.G., Karsybekov R. Research of aerodynamic characteristics of the wind generator on the basis of Magnus's effect // Bulletin of the Karaganda University. – Physics Series. – 2017. –№3(87). –P. 60-64.
- 145 Танашева Н.К., Базарбек М. Исследование системы вращающихся цилиндров поперечного сечения // Эволюция современной

науки: Сборник статей международной научно-практической конференции.– Уфа, 2017. – С. 56-58. <http://os-russia.com/SBORNIKI/KON-152-2.pdf>

146 Танашева Н.К., Дюсембаева А.Н., Нургалиева Ж.Г. Математическое моделирование аэродинамических характеристик двухлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса // V Международная научно – практическая конференция: «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения» (17 марта 2017). – Астана, 2017. – С. 414-419.

147 Танашева Н.К., Кунакбаев Т.О., Дюсембаева А.Н., Н.Н. Шуюшбаева, С.К. Дамекова. Влияние шероховатой поверхности на аэродинамические характеристики двухлопастного ветродвигателя с цилиндрическими лопастями // Журнал технической физики. – Санкт-Петербург, 2017. – Том. 87.– №11. – С.1628-1631. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/45120>

148 Танашева Н.К., Ботпаев Н., Танашев Е.Т., Дюсембаева А.Н. Ветроэнергетическая установка с пористой поверхностью на основе эффекта Магнуса / Заявка на Евразийский патент. № 4769 от 13.02.2017.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 АЭРОДИНАМИКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОПЕРЕЧНЫМ И ПРОДОЛЬНЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА И ПРИЛОЖЕНИЯ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ.....	5
1.1 Актуальность исследуемой темы.....	8
1.2 Аэродинамика коротких цилиндров в поперечном и продольном потоке воздуха.....	14
1.2.1 Профили поверхности в виде эллипсоида вращения.....	15
1.2.2 Анализ коэффициента лобового сопротивления цилиндров со сферическими торцами.....	22
1.3 Приложения исследования аэродинамики вращающихся цилиндров в ветроэнергетике.....	25
1.3.1 Эффект Магнуса.....	25
1.3.2 Ветродвигатели на основе эффекта Магнуса.....	30
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИССЛЕДУЕМЫХ ЦИЛИНДРОВ.....	36
2.1 Трехкомпонентные аэродинамические весы, методика измерения действующих сил.....	39
2.2 Измерение угловой скорости вращения цилиндров.....	41
2.3 Измерение скорости потока воздуха.....	43
2.4 Использование элементов теории подобия для анализа результатов измерений аэродинамических характеристик.....	48
2.5 Лабораторные образцы вращающихся цилиндров.....	51
2.6 Описание лабораторных моделей двух- и трехлопастного ветродвигателей.....	55
3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИКИ КОРОТКИХ ЦИЛИНДРОВ.....	60
3.1 Влияние угла скоса потока на аэродинамическое сопротивление и подъемную силу вращающихся цилиндров.....	60
3.2 Анализ экспериментальных данных одиночного вращающегося цилиндра с гладкой и шероховатой поверхностью.....	65
3.3 Анализ экспериментальных исследований аэродинамических характеристик вращающегося цилиндра в форме усеченного конуса.	68
3.4 Анализ экспериментальных данных спаренных вращающихся цилиндров.....	72
3.5 Анализ влияния пористости на аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра.....	75
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СИСТЕМЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦИЛИНДРОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ.....	81

4.1 Анализ экспериментального исследования аэродинамических характеристик элементов вращающегося цилиндра с полусферическими торцами.....	81
4.2 Анализ экспериментальных данных для системы двух цилиндров, установленных под углом друг к другу.....	84
4.3 Анализ результатов экспериментальных исследований аэродинамических характеристик двухлопастного ветродвигателя...	87
4.4 Анализ результатов экспериментальных исследований аэродинамических характеристик трехлопастного ветродвигателя...	90
5 МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ ОБТЕКАНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА.....	92
5.1 Постановка задачи. Граничные условия.....	92
5.2 Результаты моделирования обтекания вращающегося цилиндра в программе ANSYS FLUENT.....	97
5.2.1 Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных исследованных образцов вращающихся цилиндров.....	97
6 РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА МНОГОЛОПАСТНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	101
6.1 Описание конструкции макетного образца трехлопастного ветродвигателя с силовыми элементами в виде усеченного конуса....	101
6.2 Учет влияния гироскопических сил на рабочую часть ветродвигателя.....	102
6.3 Опытные полевые испытания трехлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса.....	104
7 ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	109
7.1 Анализ климатических условий в Карагандинской области.....	109
7.2 Испытания опытного образца трехлопастного ветродвигателя на основе эффекта Магнуса при разных климатических условиях.....	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	119

Танашева Назгуль Кадыралиевна

**АЭРОДИНАМИКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦИЛИДРОВ В
ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Монография

Рекомендовано к опубликованию Ученым советом
КарГУ им. Е.А. Букетова

Рекомендовано к опубликованию Ученым советом
РГКП «Институт прикладной математики» КН МОН РК

Подписано в печать 25.05.2018г. Тираж 500 экз.
Издательство «Полиграфист», 100028, Караганда, ул. Язева, 2,
тел 8(7212)77 08 08