

УДК 621.548

## **Роль физического моделирования в развитии роторной аэродинамики (обзор)\***

**В.Л. Окулов**

*Датский технический университет, Люнгби, Дания*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: vaok@dtu.dk

Целью обзора является оценка значения модельных экспериментальных исследований для создания и развития классической роторной аэродинамики, включая описание наиболее значимых последних результатов, инициированных интенсивным развитием ветровой энергетики.

**Ключевые слова:** аэродинамика ротора, вихревой след за ротором, ветроэлектростанция, взаимодействие ротора со следом, потери мощности.

### **Введение**

Современный этап развития аэродинамики ротора, безусловно, связан с развитием ветроэнергетики, с переходом от использования одиночных ветряных турбин к созданию сетевых ветроэлектростанций (ВЭС) и превращения их в промышленную отрасль — важнейшую составляющую мирового энергетического потенциала (Gupta, 2015).

В ВЭС, как правило, несколько промышленных ветрогенераторов объединяется в единую сеть — «ветряную ферму» (от англ. «wind farm»), которая включается в единые энергосистемы. В настоящее время основой развития промышленной ветроэнергетики, в том числе в России (Фортов, Попель, 2014; Гордеев и др., 2012), становятся крупные ВЭС, состоящие из большого числа ветроэнергетических установок. Иногда в них используется до 100 и более ветрогенераторов. Скорость развития ВЭС в Европе и Америке в настоящее время сопоставима со скоростью развития атомной энергетики во второй половине двадцатого века и даже, вероятно, уже превзошла её. Соответственно, у современных исследователей значительно возрос интерес к роторной аэродинамике. Сегодня, как и во время продуктивной авиационной эпохи Жуковского, Прандтля и их школ, наметился новый этап интенсивного научного развития роторной аэродинамики (Окулов и др., 2013). Он, прежде всего, связан с решением задачи по повышению эффективности использования расположенных друг за другом ветряков, объединенных в компактные группы ВЭС. Здесь требуется дополнительная оптимизация рабочих режимов

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 14-19-00487).

для турбин, попадающих в вихревой след за ротором предыдущей ветроустановки, где отклонение от расчетного оптимального режима работы объясняется существенным снижением скорости ветра внутри следа по сравнению с основным потоком. Этот дефицит скорости и дополнительное повышение уровня нестационарных пульсаций за счет взаимодействия с вихревыми структурами, сходящими с лопастей ротора, существенно ухудшают условия работы попадающих в след последующих ветряков в ферме (Vermeer et al., 2003). Средние потери мощности в крупных ВЭС составляют от 10 до 20 % из-за взаимодействия со следами от впереди расположенных ветротурбин. Поэтому развитие роторной аэродинамики сегодня направлено, прежде всего, на исследование динамики вихревых роторных следов и построение новых аэродинамических моделей взаимодействия с ними для поиска оптимальных компоновок ВЭС (Sørensen et al., 2013). Эти задачи ассоциируются с необходимостью изучения дальнего междуроторного взаимодействия. До сих пор в теории роторных машин рассматривались в основном задачи ближнего взаимодействия статора и ротора или двух роторов для двухступенчатых гребных винтов, когда вихревая система, порожденная лопатками первой ступени, сразу взаимодействует с лопастями следующей.

Новые потребности по описанию междуроторного взаимодействия на больших расстояниях в ВЭС предполагают рассмотрение и решение более сложных задач классической аэродинамики по изучению и описанию сложных закрученных движений в следах, взаимодействий с винтовыми вихрями и мультиплетами из них. Это дает новый импульс для изучения фундаментальных задач вихревой динамики и теории устойчивости вихревых структур (см, например, Okulov, Sørensen, 2007; Walther et al., 2007; Felli et al., 2011; Quaranta, Leweke, 2015; Okulov, 2016). Потребность промышленности в использовании ВЭС стимулировала развитие некоторых полуэмпирических и инженерных методов расчета их работы (Barthelmie et al., 2009; Larsen et al., 2013; Nygaard, 2014) даже в отсутствии точных представлений о течении в следе. Вследствие этого предлагаемые методы расчета были ограничены разным набором предположений и в целом не оправдали ожиданий по их применению как для развития теории взаимодействия ветрогенераторов, так и для верификации численного моделирования.

Экспериментальное исследование новых научных задач, поставленных индустриальной ветроэнергетикой, практически невозможно успешно проводить в условиях работы натуральных ветроустановок в ВЭС. Прежде всего, это связано с отсутствием достоверных методов измерений для исследования сложной вихревой системы следов на больших расстояниях за роторами ветрогенераторов в реальных атмосферных условиях. Натурные атмосферные измерения сейчас ограничены определением скорости ветра контактными датчиками на измерительных мачтах вблизи ВЭС или бесконтактными лазерными измерителями скоростей (лидары и т.п.), менее точными для применения на больших расстояниях. Первые позволяют оценить профили скорости в фиксированном положении в пространстве — вдоль мачты, вторые — измерить некоторые осредненные значения скорости в различных произвольных точках, но с большой погрешностью и не одновременно, т.е. в разные промежутки времени для последующего осреднения. В условиях неопределенных и недетерминированных атмосферных пульсаций полученная информация о разнесенных по времени и пространству средних значениях скорости становится малоинформативной для последующего анализа и обобщения. Поэтому сегодня приоритетная роль в экспериментальном изучении междуроторного взаимодействия в ВЭС по-прежнему принадлежит лабораторным модельным исследованиям.

Физическое (лабораторное) моделирование в развитии роторной аэродинамики всегда было эффективным инструментом исследования, начиная с периода ее становления в начале XX века. В то время русская аэродинамическая школа профессора Н.Е. Жуковского, стимулируемая прогрессом авиации, занимала ведущие мировые позиции в создании роторной аэродинамики (Kuik et al., 2015; Okulov, Sørensen, Wood, 2015). Сегодня

интерес исследователей сместился от авиации к задачам ветроэнергетики, индустриальное развитие которой пока объективно задерживается в России. Несмотря на явное отставание производства, у российских ученых в их научных исследованиях и разработках сохраняется возможность получать результаты мирового уровня в этой области знаний. Данной ситуации способствуют два фактора: первый — это, безусловно, огромный теоретический задел, созданный ранее русской школой, второй — проблемы с точностью натуральных измерений, вынуждающие развивать основы аэродинамического взаимодействия ветрогенераторов в ВЭС на доступной лабораторной базе. Передовой уровень исследований удается сохранить из-за отсутствия возможности проведения высокоточных натуральных измерений. Отсутствие достоверных натуральных данных было заменено использованием в модельных экспериментах высокоточного бесконтактного лабораторного измерительного оборудования как собственного производства, так и импортного исполнения. С его помощью удалось выявить новые важные закономерности и построить теоретические модели междуроторного аэродинамического взаимодействия для оптимизации работы ВЭС, которые внесли существенный вклад в развитие классических задач роторной аэродинамики.

Целью настоящего обзора является рассмотрение роли модельных исследований в развитии роторной аэродинамики и описание наиболее значимых результатов, полученных в последние несколько лет.

### 1. Роль моделирования в развитии роторной аэродинамики

Теоретические исследования по аэродинамике ротора (гребного винта, пропеллера, ветряной турбины и т.д.) всегда сопровождалось одновременным развитием экспериментального моделирования. Следует отметить, что первый опыт такого моделирования оказался не очень удачным. Он был связан с проверкой теории нагруженного диска — простейшей и самой старой математической модели винта. В этой абстрактной модели нагрузка заменяется равномерным распределением скачка давления на бесконечно тонком водопроницаемом диске, заменяющим ометаемую ротором область. Идея такой замены восходит к работе Рэнкина (Rankine, 1865). Строгое математическое доказательство действия нагруженного диска нашел Фруд-младший (Froude, 1889), показав, что такая теоретическая модель пропеллера/турбины должна ускорять/замедлять поток на одну треть до диска и еще на треть после него с существенным сужением/расширением следа за ротором для оптимального режима (средний фрагмент рис. 1а).

К сожалению, экспериментальное моделирование не сразу подтвердило эту простейшую модель идеального пропеллера или турбины, а привело сначала к неверному ее толкованию, говорившему о том, что за ротором жидкость не может ни ускоряться, ни замедляться, а течет в виде невозмущенной цилиндрической колонны. Неправильное толкование было основано на эксперименте Парсона, описанном в замечаниях к статье (Froude, 1911). На самом деле нерасширяющийся или очень слабо расширяющийся след может наблюдаться при частичных нагрузках на ротор (рис. 1б), а при нормальной или форсированной работе ротора расширение следа хорошо визуализируется (рис. 1с). Возможно, в эксперименте Парсона ротор работал на частичной нагрузке, или в его установке возникал эффект запирания (Segalini, Inghels, 2014), искажающий течение за ротором. Следствием неверного толкования этого эксперимента стало отставание в развитии теории ротора в Англии по сравнению с успехами русской и немецкой научных школ (Kuik et al., 2015).

В начале XX века в первых аэродинамических трубах или водных каналах использовали простейшие экспериментальные методы и приемы: визуализацию воздухом вихревой структуры за винтом в воде, определение неоднородностей поля течения за счет отклонения бумажных полосок или волосков в следе за ротором на воздухе. Именно

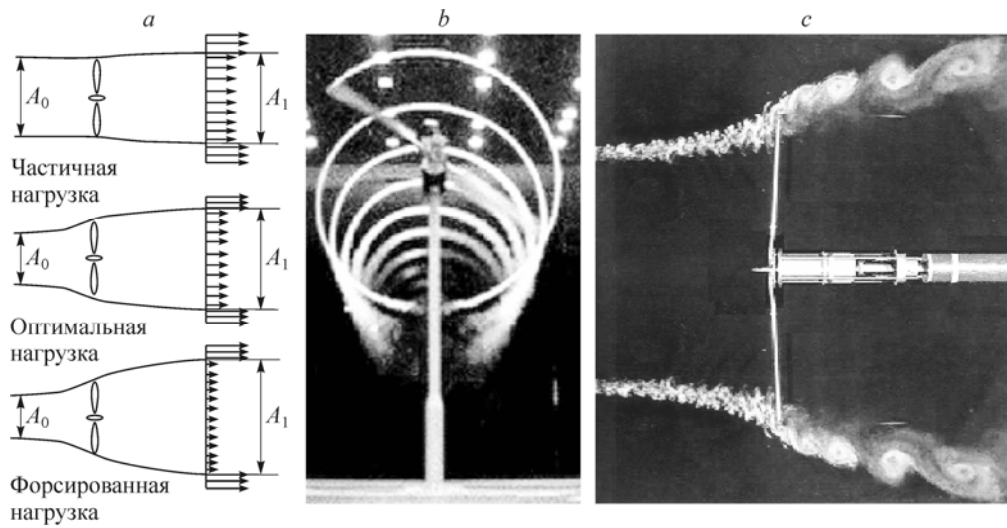


Рис. 1. Формы следа за ротором.

*a* — схемы развития течений по струйной теории нагруженного диска для разных режимов работы турбины (Hansen, 2008), *b* — визуализации режима частичной нагрузки без расширения следа (Hand et al., 2001), *c* — визуализации режима оптимальной работы двухлопастного ротора с расширением трубки тока (Holten, 1981).

воздушная визуализация Фламма (Flamm, 1909) за винтом (рис. 2*a*) и фиксация неоднородности потока за пропеллером Д.П. Рябушинским легли в основу рассуждений Н.Е. Жуковского при создании им вихревой теории гребного винта (Жуковский, 1912). Удачная интерпретация этих модельных экспериментов позволила ему сформулировать вихревую теорию гребного винта (рис. 2*b*) на семь лет раньше, чем это было сделано немецкой аэродинамической школой Л. Прандтля (Betz, 1919).

Вихревая модель ротора сегодня является основным инструментом для исследования воздушных и водяных винтов, ветряков, компрессоров и турбин (Okulov, Sørensen, Wood, 2015). Более того, именно она позволила показать ошибочность эксперимента Парсонса и утвердить правильность теории Фруда. Винтообразная структура концевых вихрей генерирует дополнительное ускорение/замедление течения в следе за пропеллером/турбиной, что увеличивает замедление течения (рис. 2*c*), связанное с отбором кинетической энергии ветра в плоскости ротора. На оптимальных режимах работы турбин это замедление удваивается, что полностью подтверждает теорию Фруда.

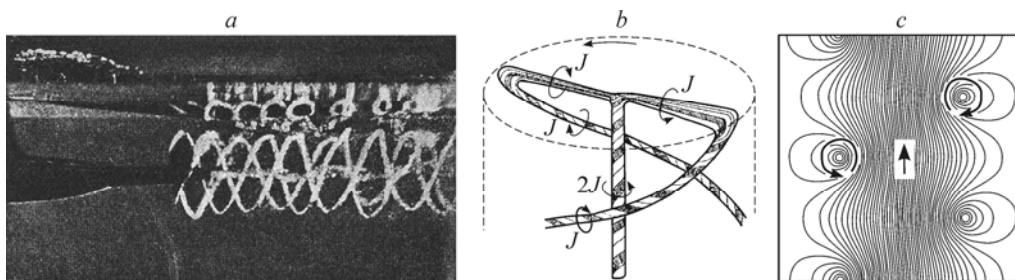


Рис. 2. Винтовые вихревые структуры.

*a* — визуализация вихревой структуры за корабельным винтом в воде (Flamm, 1909), *b* — схема вихревой модели ротора-пропеллера (Жуковский, 1912), *c* — структура течения, индуцированного винтовыми вихрями, в продольном сечении (Алексеевко и др., 2003).

Востребованность физического моделирования сегодня обусловлена сложной вихревой структурой закрученных течений за вращающимся лопаточным колесом, требующей применения специальных методов и приемов исследования с помощью высокоточного современного измерительного оборудования (Окулов и др., 2007). В ветроэнергетике возможность проведения более точных измерений дает физическому моделированию неоспоримое преимущество перед натурными измерениями. Как уже отмечалось ранее, непосредственное использование натуральных испытаний ограничивается отсутствием надежных средств диагностики атмосферных течений. На больших расстояниях в ВЭС удается полноценно изучать только средние характеристики течений впереди или в следе за ротором ветрогенератора (Larsen et al., 2007), но вместе с осреднением теряется важная информация о винтообразной когерентной вихревой структуре следа, которая хорошо фиксируется визуализацией в лабораторных условиях (рис. 1, 2). Недавно существование структуры следа с концевыми винтовыми вихрями за полномасштабным ветрогенератором было эффектно продемонстрировано в уникальном и пока единственном натурном эксперименте (Hong et al., 2014), выполненном в особых условиях. Таким образом, физическое моделирование все еще продолжает играть определяющую роль, так как для лабораторных масштабов существуют хорошо разработанные измерительные технологии, которые успешно применяются (Окулов и др., 2007).

Еще один аргумент в пользу необходимости проведения предварительных лабораторных исследований связан с возможностью максимально отделить в них посторонние эффекты и внешние воздействия, устранить неопределенность неповторяемых атмосферных состояний натурального эксперимента, что дает возможность проверить разные модели роторной аэродинамики и выявить закономерности распространения роторных следов. Лабораторное моделирование во многих случаях становится предпочтительнее прямого натурального эксперимента, так как позволяет с высокой степенью реализуемости многократно воспроизводить одинаковые входные условия на роторе для статистического набора необходимых для обработки данных. Поэтому целесообразно начинать исследования по междуроторному взаимодействию в ВЭС с модельных экспериментов. В натуральных условиях возникают непредсказуемые воздействия на ротор и след в основном за счет временной и пространственной неравномерностей ветряной нагрузки и крупномасштабной турбулентности атмосферного пограничного слоя. Кроме того, в настоящее время из-за роста размеров ветрогенераторов стали возникать и дополнительные эффекты при обтекании лопастей. Например, в самом верхнем их положении скорость ветра способна достигать 100 м/с, что для описания аэродинамических характеристик может потребовать учета сжимаемости, температурной стратификации, обледенения (Sunden, Wu, 2015) и пр. В той или иной степени все перечисленные возмущения являются важными, но второстепенными, дополнительными факторами, влияющими на работу ветрогенераторов и затрудняющими описание классического междуроторного взаимодействия, непосредственно связанного с воздействием роторов и вихревых следов, порожденных только вращающимися лопастями предыдущих турбин. В первой половине прошлого века после создания основ классической вихревой теории пропеллера в связи с увеличением скорости и высоты полета аналогичные факторы дополнительного воздействия на воздушные винты самолетов стали учитываться в виде соответствующих поправок. По аналогии с развитием авиации для ВЭС учет дополнительных воздействий должен стать очередным этапом после установления основных закономерностей развития следов и принципов их взаимодействия с роторами следующих турбин. Все дополнительные факторы целесообразно изучать после того, как базовые закономерности будут найдены. Их целесообразно рассматривать как возмущения первично установленных базовых моделей, чтобы правильно оценить степень влияния каждого фактора и выявить необходимость его учета или возможность пренебрежения им в натуральных условиях.

Еще один важный вопрос: в какой среде проводить моделирование. Для экспериментальной проверки базовых и разработки новых моделей ротора в начале XX века

в период становления аэродинамики вполне успешно применялись как воздушные, так и водные лабораторные эксперименты. При моделировании тихоходных винтов и турбин (включая ветрогенераторы) возможность применения двух разных сред оправдана пренебрежением сжимаемости за счет малых значений числа Маха. Даже при скоростях 100 м/с поправка на сжимаемость, пропорциональная квадрату числа Маха, не превосходит 9 %. Однако иногда необоснованно проявляется определенный скепсис при применении моделирования на воде для ветрогенераторов из-за значительного различия плотностей и вязкостей этих сред. Действительно, локально здесь могут возникать некоторые различия, связанные непосредственно с обтеканием тел и формированием пограничного слоя, но для широкого диапазона чисел Рейнольдса их влияние на формирование следа за затупленными телами практически отсутствует (Sumer, Fredøse, 2006). Недавно этот факт был подтвержден и в следах за вращающимися роторами, где в экспериментах были обнаружены колебания на близких числах Струхала как в аэродинамических трубах (Medici, Alfredsson, 2006), так и в водных каналах (Chamorro et al., 2013; Okulov et al., 2014). Результат в этом случае зависит от правильного масштабирования изучаемых явлений, что многократно подтверждалось сопоставлением аналогичных данных, полученных в разных средах. Например, в работах Н.Е. Жуковского (Жуковский, 1912; Жуковский, 1914; Жуковский, 1915; Жуковский, 1918) вихревая теория винта создавалась на основе визуализации Фламма за винтом в воде, а проверялась экспериментами Д.П. Рябушинского с воздушными пропеллерами. Для исследования роторного взаимодействия современных ветряных турбин лабораторное моделирование в водных каналах (Fraunie et al., 1986; Chamorro et al., 2013; Neary et al., 2013; Okulov et al., 2014; Bachant, Wosnik, 2015) часто применяют по двум причинам. Во-первых, для воды проще выдержать характерные числа Рейнольдса при мелкомасштабном моделировании ветротурбин в малых рабочих участках, ограниченных геометрическими размерами аэродинамических труб (Treugen, 2015) и водных каналов. Во-вторых, визуализация и диагностика распределенных характеристик в воде отработана значительно лучше и дает более точные результаты. Далее продемонстрируем несколько примеров такого моделирования и диагностики на воде, успешно реализованных с участием автора настоящего обзора. В описанных исследованиях идентичность получаемых результатов по возможности подтверждалась их сопоставлением в обеих средах.

## **2. Сравнение роторов ветротурбин, построенных с использованием разных методов оптимизации**

Возможность построения лопасти ротора через ее отдельные элементы, вырезанные цилиндрическими сечениями, была рассмотрена Джевецким в 1892 году (Окулов и др., 2013). Воспользовавшись предложенным способом, положив дополнительно для упрощения расчетов, что различные трубки тока в каждом сечении ведут себя независимо друг от друга, Глауэрт в 1935 году рассчитал параметры оптимального ротора ветряной турбины (Glauert, 1935). Он независимо оптимизировал уравнения импульсной теории в каждой отдельной цилиндрической трубке тока, проходящей через круговое сечение для любого фиксированного значения радиуса ротора, пренебрегая имеющимся взаимодействием между ними и изменениями давления в радиальном направлении. Метод импульсного расчета ротора в сечениях лопасти (англоязычный эквивалент — «blade element/momentum» или «BE/M») с различными типами поправок на концевые эффекты до сих пор является основным инструментом при проектировании роторов ветряных турбин (Kuik et al., 2015). Однако для моделирования лопастей существует другой — вихревой подход (Okulov, Sørensen, Wood, 2015). Он основан на комбинировании расчета лопасти в сечениях с вихревой моделью ротора, когда лопасть заменяется несущей линией с некоторым распределением завихренности (англоязычный эквивалент — «blade element/lifting lines» или «BE/LL»). Для определения оптимального распределения

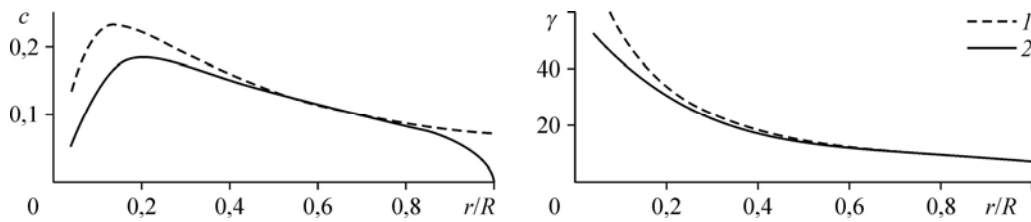


Рис. 3. Распределение хорды  $c$  и угла установки  $\gamma$  для трехлопастного ротора, построенного по BE/M-методу без коррекции на концевые эффекты (1) и для точного решения по BE/LL-методу с циркуляцией Гольдштейна (2).

циркуляции в BE/LL Гольдштейн (Goldstein, 1929) применил вариационный принцип Беца (Betz, 1919). В роторе с такой лопастью, или для краткости — в роторе Беца, распределение циркуляции вдоль несущей линии, заменяющей вращающуюся лопатку, должно быть таким, чтобы сходящая с нее свободная вихревая пелена имела строгую винтообразную форму и двигалась равномерно в осевом направлении. По аналогии с эллиптическим крылом такое поле свободных вихрей в следе за ротором должно отвечать его минимальному индуктивному сопротивлению и соответствовать оптимальному режиму работы (Okulov, Sørensen, Wood, 2015).

Для того чтобы проверить и сравнить эффективность роторов, спроектированных с использованием различных подходов (BE/M и BE/LL), было проведено экспериментальное сравнение пары одинаковых трехлопастных моделей, построенных по оригинальному BE/M-методу без коррекции на концевые эффекты и по точному решению BE/LL-метода с циркуляцией Гольдштейна (Окулов и др., 2015). Был разработан алгоритм определения формы лопасти для обоих роторов с одинаковым диаметром рабочего колеса  $2R = 0,376$  м для значения быстроходности  $\lambda = 5$  ( $\lambda = \Omega R/V$ , где  $R$  — радиус ротора,  $\Omega$  — угловая скорость его вращения,  $V$  — скорость набегающего потока). Изменение хорды  $c$  для профиля SD7003 (Selig et al., 1995) и окончательный угол установки в каждом сечении лопастей с коррекцией на одинаковый угол атаки  $\alpha = 4^\circ$  вдоль лопастей показаны на рис. 3. При проектировании обеих лопастей пренебрегалось влиянием втулки ротора. Для обоих роторов она была одинаковой, и это, следовательно, должно приводить к одинаковому ее влиянию. Отметим, однако, что вопрос о влиянии размера втулки на аэродинамические характеристики ветрогенераторов изучался специально. В рамках проведенных исследований было установлено, что для малых втулочных отношений, типичных для ветрогенераторов, влияние втулки на аэродинамические характеристики ротора пренебрежимо мало (Okulov, Sørensen, Shen, 2016), что соответствует выводам, сделанным ранее при исследовании оптимизации пропеллеров (Wald, 2006). Оба ротора в целях сравнения их производительности в зависимости от быстроходности экспериментально исследовались в водном канале. Вопрос о правомерности использования в этом случае водяного канала либо аэродинамической трубы был не актуален, так как в эксперименте только проверялись две разные философии оптимального проектирования лопастей для турбин, т.е. достаточно было сопоставить разные формы роторов, обеспечив равные условия тестирования. Обе модели помещались в канал при рабочей температуре  $20^\circ\text{C}$ , числе Рейнольдса порядка 240000 и значении скорости набегающего потока в месте расположения ротора  $U_\infty = 0,65$  м/с с ее колебаниями не более 3%. Измерение силовых характеристик моделей роторов проводилось тензометрическими датчиками, установленными в креплении ротора. Были проведены измерения крутящего момента и силы упора потока на ротор для быстроходностей  $\lambda = 3\div 9$ . На рис. 4 представлены соответствующие им зависимости коэффициентов мощности  $C_P$  и упора  $C_T$  для обоих ветроколес. Максимальная производительность  $C_{P_{\max}}$  обоих роторов достигается при расчетной быстроходности, равной 5, и сохраняет значение до  $\lambda = 6$  (рис. 4). Впервые было установлено,

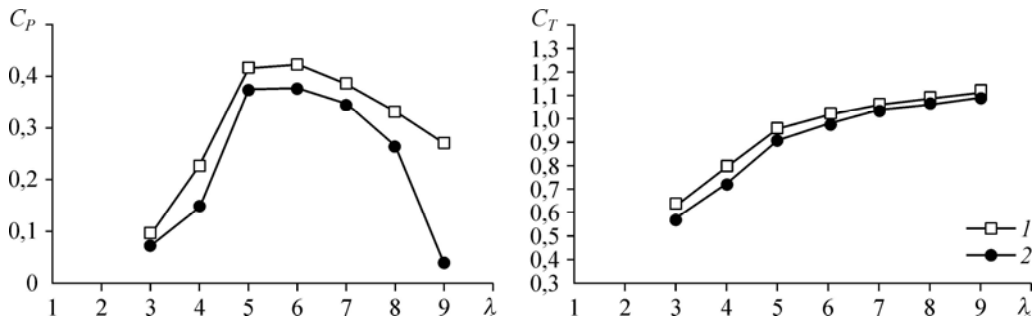


Рис. 4. Коэффициенты мощности  $C_p$  и упора  $C_T$  для роторов Беца (1) и Глауэрта (2) как функция быстроходности.

что трехлопастной ротор Беца, построенный точно по вихревому методу VE/LL, позволяет извлекать больше кинетической энергии из равномерного набегающего потока.

Наряду с экспериментом было проведено сравнение форм лопастей, получаемых расчетным способом в результате применения VE/LL-метода с другими подходами для проектирования, включающими рассмотрение постоянного распределения циркуляции вдоль лопасти — ротор НЕЖ (Жуковский, 1912; Жуковский, 1914), и предельные случаи с бесконечным числом лопастей. Более подробную информацию о различных моделях можно найти в обзорах (Kuik et al., 2015; Okulov, Sørensen, Wood, 2015), а также в книге (Sørensen, 2016).

В работах (Sørensen, 2016; Sørensen et al., 2016) сравнивались формы лопастей, построенные аналитически в соответствии с разными теориями. На рис. 5 приведены результаты сравнения разных геометрий лопастей, построенных различными способами для турбин разной быстроходности. Для более корректного сравнения к приближенным моделям с бесконечным числом лопастей была применена поправка на концевой эффект лопасти. Влияние разных способов коррекции формы конца лопасти, начиная с первой поправки, предложенной Прандтлем (Betz, 1919), было исследовано в работе (Wood et al., 2016).

На рисунке 5 показано, что лопасти, спроектированные по VE/М или различными приближениями по методу VE/LL, после дополнительной коррекции на концевую поправку Прандтля моделируют конец лопасти в очень хорошем согласии с ротором Беца, сконструированным по точному VE/LL решению для конечного числа лопастей и циркуляции Гольдштейна. Сравнение показывает, что геометрия лопастей зависит от используемого метода расчета, но эти различия в основном существуют в приосевой части лопасти и становятся значительными при малых значениях быстроходности турбин, ог-

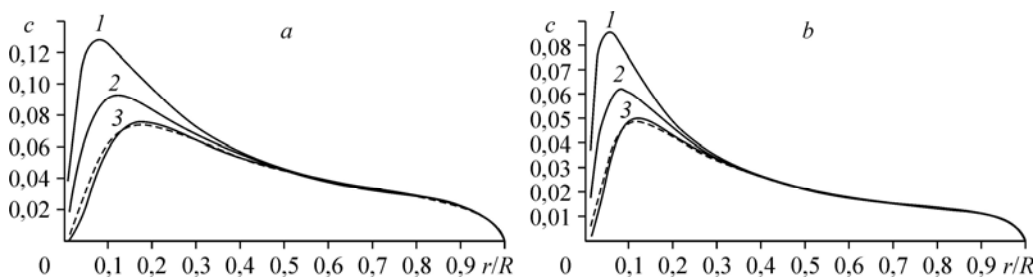


Рис. 5. Изменение хорды  $c$  вдоль лопасти  $r/R$  для быстроходностей  $\lambda = 6$  (a),  $9$  (b) при расчете формы лопастей разными способами моделирования.

Сплошные линии — аппроксимации по моделям с бесконечным числом лопастей с коррекцией на число лопастей по поправке Прандтля (Sørensen, 2016): 1 — VE/LL с постоянной циркуляцией НЕЖ, 2 — VE/М, 3 — VE/LL с циркуляцией Гольдштейна; штриховая линия — точный расчет по VE/LL для трехлопастного ротора Беца (Sørensen et al, 2015).



раниченных значений 5. Дальнейшее уточнение построения оптимальной лопасти было сделано путем учета нелинейного влияния концевых вихрей (Wood, Okulov, 2017). В результате было установлено незначительное влияние этой дополнительной нелинейной поправки на базовое решение VE/LL, которое, к тому же, возникало в очень узком диапазоне для еще меньших значений быстроходностей — от 0,8 до 1,5. Отметим, что обычно ветрогенераторы эксплуатируются при существенно более значительных быстроходностях, начиная с 5 и выше. Следовательно, подходы к построению лопастей, основанные на идеальных моделях с бесконечным числом лопастей в сочетании с использованием поправок на концевые эффекты (Wood et al., 2016), приводят к геометриям конца лопастей, которые практически идентичны между собой. Они все также очень близки к форме лопасти, определяемой точным решением VE/LL для ротора Беца с конечным числом лопастей (Okulov, Sørensen, 2008; Okulov, Sørensen, 2010b). Это важное заключение частично объясняет, почему предшествующая практика использования приближенных моделей при проектировании лопастей была столь результативной. Однако пока остается без ответа вопрос о роли различий в приосевых формах лопастей на производительность ветрогенераторов. Наиболее значительна эта разница для роторов Беца и НЕЖ (рис. 5, кривые 1 и 3), и для дальнейшего изучения здесь требуется проведение дополнительного экспериментального тестирования. Интерес к этому вопросу подогревается продолжающейся дискуссией о возможности извлечения большей кинетической энергии ветра ротором НЕЖ по сравнению с ротором Беца, основанная на аналитическом изучении разных предельных моделей с бесконечным числом лопастей для малых быстроходностей (Sørensen, Kuik, 2010). Последнее теоретическое исследование (Kuik, 2016) еще раз установило превосходство ротора НЕЖ, но снова в нереализуемом идеальном предельном случае с бесконечным числом лопастей. Ответ может быть получен только после проведения экспериментального сравнения роторов Беца и НЕЖ с конечным числом лопастей.

### 3. Исследование следа за диском в водном канале и аэродинамической трубе

Прежде чем перейти к моделированию и изучению развития роторных следов, исследуем свойства автомодельности в следах за плохообтекаемыми телами, в данном случае за диском, в разных средах: в водной и воздушной средах. Для описания следа за диском в воде такое тестирование было проведено в работе (Наумов, Литвинов и др., 2015). С помощью измерений, выполненных методом цифровой трассерной визуализации (PIV) и лазерным доплеровским анемометром (ЛДА), изучены закономерности затухания осесимметричного турбулентного следа за неподвижным диском в водном канале и проведено сравнение с экспериментами, выполненными ранее с помощью гребенки термоанемометров за неподвижным диском в аэродинамической трубе (Johansson, George, 2006). В турбулентном осесимметричном следе за диском было проверено свойство автомодельности (самоподобия профилей скорости), которое должно проявляться и стабильно воспроизводиться в широком диапазоне чисел Рейнольдса, включающем, в том числе, и режимы работы реальных ветрогенераторов. Представлялось интересным сопоставить в каждом поперечном сечении следа за диском на удалении  $x$  для разных сред форму безразмерных профилей дефицита скорости  $(U_\infty - U(r))/U_0$ , где  $U_\infty$  — скорость свободного набегающего потока,  $U_0 = \max(U_\infty - U(r))$  — дефицит скорости на оси следа,  $U$  — профиль продольной компоненты скорости. Для описания профиля использовалась JG-аппроксимация  $(1 + ar^2 + br^4)e^{(-cr^2 - dr^4)}$  с фиксированными параметрами  $a = 0,049$ ,  $b = 0,128$ ,  $c = 0,345$  и  $d = 0,134$ , предложенная в работе (Johansson, George, 2006) (на рис. 6b

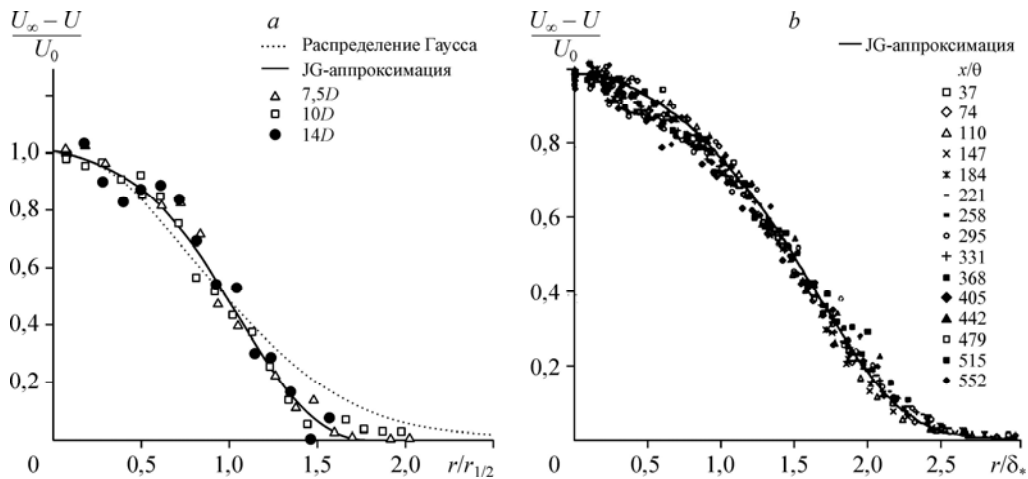


Рис. 6. Проверка автомодельности профилей скорости в следе за диском.

*a* — водный канал с нормировкой ширины профиля в точке с половинным значением дефицита (Наумов и др., 2015),  
*b* — аэродинамическая труба с нормировкой на ширину профиля (Johansson, George, 2006).

удаление профилей от диска  $x/\theta = 552$  соответствует  $150D$ ). JG-аппроксимация незначительно отличается от привычного гауссова распределения, но лучше моделирует след при обоих тестированиях (рис. 6) — как за диском в водном канале, так и за диском в аэродинамической трубе — при значениях чисел Рейнольдса  $Re = 2 \cdot 10^5$  и  $Re = 2,6 \cdot 10^4$  соответственно, попадающих в диапазон существования автомодельного следа.

Другой важный вопрос связан с выяснением влияния фазового состояния среды на затухание дефицита скорости в следе вдоль оси диска вниз по течению. Это затухание за диском в водном канале полностью совпало со степенной зависимостью  $0,32(x/D - 3,2)^{-2/3}$ , установленной ранее в экспериментах на воздухе в аэродинамической трубе (Johansson, George, 2006) (рис. 7). На рисунке видно, что в точках дальнего следа ( $x/D \geq 5$ ) происходит монотонное затухание торможения со степенью  $-2/3$  с выходом на асимптотическую горизонтальную линию при  $x/D \geq 25$ , определяющую уровень фоновых пульсаций в набегающем потоке, ниже которой выделить существование следа становится невозможным. Отметим, что скорость затухания следа за диском в гидроканале совпадала с его затуханием за диском в аэродинамической трубе несмотря на отмеченные выше различия в числах Рейнольдса. Действительно, для широкого диапазона относительно больших чисел Рейнольдса степень  $-2/3$  для затухания турбулентного осесимметричного следа сохраняется за любым затупленным осесимметричным телом (George, 1989; Новиков, 2009). Для незначительных, дозвуковых скоростей обтекания она не зависит от среды (вода или воздух). Кроме того, недавно было обнаружено, что данная степень затухания

у следов сохраняется и при их неосесимметричном обтекании (Jiang et al., 2016).

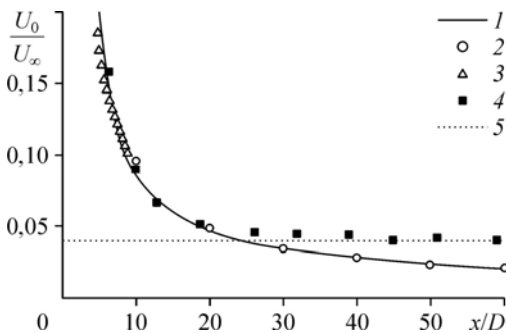


Рис. 7. Сравнение затухания дефицита скорости за круглым диском в гидроканале и аэродинамической трубе.

*1* — степенная зависимость с показателем  $-2/3$ ,  
*2* — измерения в воздухе (Johansson, George, 2006),  
 измерения в воде: *3* — метод PIV, *4* — метод ЛДА;  
*5* — уровень внешних возмущений в гидроканале (Наумов и др., 2015).

Представленные в работе (Наумов и др., 2015) данные подтвердили универсальность свойств автомодельности и затухания дальнего турбулентного следа при относительно высоких числах Рейнольдса и возможность их исследования как в водных каналах, так и в аэродинамических трубах.

#### 4. Сопоставление следов за ротором и диском

Предсказание режима работы ветрогенератора, попадающего в след от предыдущей турбины, имеет принципиальное значение для расчета потерь и оптимизации ветроэлектростанций. Для решения этой задачи необходимо создать адекватную модель развития следа за ротором. Сегодня наиболее популярными являются кинематические модели, основанные на автомодельности профилей дефицита скорости при сохранении массы и импульса в следе, использующие в качестве входных данных предположение о линейном расширении следа и экспериментальное значение коэффициента упора потока на ометаемую поверхность ротора ветрогенератора. Следует отметить, что предположение о линейном расширении следа и законы сохранения однозначно определяют затухание следа по гиперболическому закону с показателем степени  $-1$ , что отличается от рассмотренного выше случая его затухания за затупленными телами с показателем  $-2/3$ . Хотя целенаправленного экспериментального изучения развития следа за ветрогенераторами для достаточно больших расстояний не проводилось, на практике априори применяется в основном модель Енсена (Jensen, 1983) с показателем затухания следа  $-1$  или ее модификации, уточняющие только форму профилей дефицита скорости в следе, например, в работе (Bastankhan, Porte-Agel, 2014) было предложено использовать гауссово распределение. На следующем шаге исследований была устроена более тщательная проверка закона замедления дальнего следа за ротором.

Общее представление о структуре течения за ротором, работающим в режиме турбины, известно давно. Отбирая энергию набегающего потока, ротор турбины тормозит его, образуя характерный провал скорости в следе — дефицит, характерный для следов за плохо обтекаемыми телами. Следует указать и на принципиальное различие между следами за затупленными телами (в нашем рассмотрении — дисками) и роторами. В первом случае замедление потока связано только с сопротивлением тела и носит пассивный характер. В противоположность этому торможение потока за ротором является результатом его активного воздействия и связано с отбором кинетической энергии у потока. В плоскости ротора поток тормозится за счет отбора полезной энергии. На оптимальном режиме замедление на нем составляет около  $1/3$  начальной скорости, но на этом оно не заканчивается, и далее происходит уже в следе. Скорость дополнительно уменьшается еще на одну треть и в сумме замедление достигает  $2/3$  невозмущенной скорости.

В ближнем следе, когда действие самой турбины на поток уже закончилось, дополнительное торможение определяется воздействием системы винтообразных вихрей (рис. 8а), сходящих с концов лопастей. Они генерируют еще одно течение вдоль оси (рис. 2с), что дополнительно замедляет поток. Такие течения отсутствуют в следе за диском (рис. 8б). За ротором подобное дополнительное замедление скорости регистрируется во всех измерениях профилей скорости ближнего следа (Наумов и др., 2012; Naumov et al., 2014). Его рост полностью прекращается на расстоянии 2–4 диаметров ротора, когда вихревая система полностью разрушается и ее действие заканчивается.

Дополнительное замедление осредненных профилей скорости в ближнем следе также многократно регистрировалось в различных натуральных экспериментах (Vermeer, Sørensen, Crespo, 2003). Тем не менее, существовал определенный скепсис к возможности использования данных модельных исследований о влиянии винтообразных концевых вихрей на формирование ближнего следа за реальными ветряками, т.к. их существование

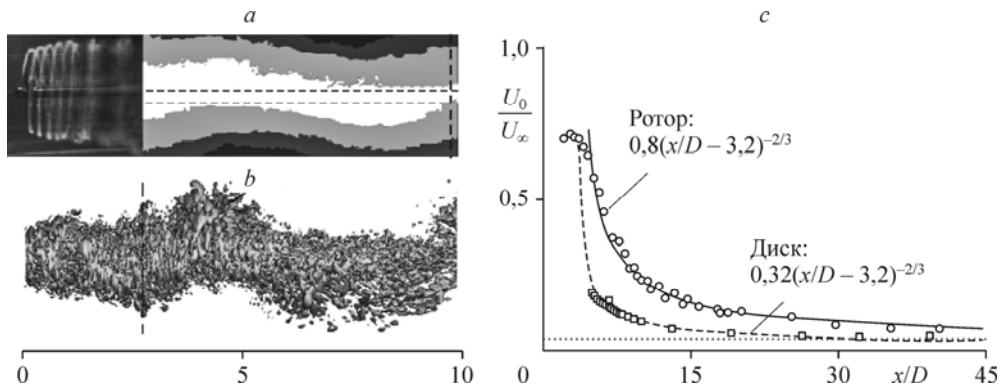


Рис. 8. Сопоставление структуры следа.

След за активным ротором (Okulov et al., 2014) (a), за пассивным диском (Yang et al., 2014) (b); сравнение затухания дефицита скорости в обоих следах (Litvinov et al., 2016) (c).

не удавалось зафиксировать в натуральных условиях никакими доступными методами измерений в атмосфере (Larsen et al., 2007). Авторами (Hong et al., 2014) был проведен уникальный натуральный эксперимент, где с помощью оригинального решения — использования снежинок для трассеров в крупномасштабных PIV-измерениях — в ближнем следе за 2,5 МВ ветряной турбиной было однозначно установлено существование концентрированных концевых вихрей, предсказанных в многочисленных модельных водных и воздушных экспериментах.

Прекращение воздействия концевых вихрей в следе связано с их разрушением, т.к. полная вихревая система в сочетании с центральным осевым вихрем (рис. 2b) абсолютно неустойчива (Okulov, Sørensen, 2010a; Felli, Camussi, Di Felice et al., 2011). За ротором на расстояниях, начиная с 2–3 его диаметров, винтовые вихри разрушаются (рис. 8a) и их действие на поток прекращается. Формирование дальнего следа начинается после разрушения ближнего следа и достижения максимального торможения на расстоянии от 2 до 5 диаметров от ротора. За ближним следом (выделенная зона на рис. 8a и 8b) дальний след и для ротора, и для диска одинаково формируется сначала в крупномасштабную винтообразную спираль. Сопоставление динамических характеристик следов в этой области выявило в них развитие низкочастотных колебаний при постоянстве числа Струхали — явления, хорошо известного при обтекании затупленных тел (в рассматриваемом случае — диска) и воспроизводимого в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса. Кроме того, впервые для ротора в работе (Okulov et al., 2014) была установлена слабая зависимость частот этих колебаний и от параметра быстроходности роторов на оптимальных и форсированных нагрузках. Это объясняется тем, что при быстром вращении ометаемая ротором поверхность действует схоже с непроницаемым диском при формировании формы и динамики низкочастотных колебаний дальнего следа. Отметим, что наличие низкочастотных колебаний на частотах Струхали было установлено в следах за роторами для обеих сред: в экспериментах на воздухе в аэродинамической трубе эта частота была зафиксирована в работе (Medici, Alfredsson, 2006), а полномасштабное исследование в водном канале было проведено авторами (Okulov et al., 2014), в результате чего еще раз было получено подтверждение корректности моделирования динамического развития следа в обеих средах.

В экспериментах (Okulov, Naumov et al., 2015) было установлено, что похожесть дальнего следа за активным ротором на следы за пассивными неподвижными затупленными телами — диском или сферой, наблюдается также при их дальнейшем развитии. Целью работы (Наумов, Миккелсен, Окулов, 2016) являлось создание экспериментальной модели следа за ротором ветрогенератора для получения максимальной оценки дальности его распространения. На рис. 8c сплошной линией показана кривая, аппроксимирующая

изменение средней осевой скорости в дальнем следе за ротором в зависимости от удаления от него. Формирование дальнего следа начинается после разрушения ближнего следа и достижения максимального торможения за ротором на расстоянии от 2 до 5 его диаметров. Дополнительно на рис. 8с показано сравнение приведенных данных с данными для развития следа за диском. Их сопоставление показало, что затухание дальнего следа в обоих случаях происходит по одинаковому степенному закону с разницей только в интенсивности дефицита скорости в следах, которая отражается в коэффициентах при одинаковой степенной зависимости затухания (рис. 8с). В следах за ротором этот коэффициент относительной интенсивности затухания имеет существенно большее значение (0,8) по сравнению со значением за диском (0,32). Различия в интенсивностях дефицита скорости вполне объяснимы. Так, в отличие от пассивного замедления потока диском, ротор активно воздействует на набегающий поток, трансформируя его энергию в отбираемый крутящий момент, и, вдобавок, дополнительное замедление генерируется винтообразными концевыми вихрями.

Отметим, что автомодельное поведение дальнего следа было независимо установлено также в разных сечениях за ротором ветрогенератора в водном канале (Okulov, Naumov et al., 2014) и аэродинамических трубах (Dufresne, Wosnik 2013; Bastankhan, Porte-Agel, 2014). Авторы последних двух работ показали автомодельность следа за ротором, но из-за недостаточной длины измерительной секции, малых значений быстроходности ротора и недостаточной точности воздушных измерений в этих работах значения коэффициентов в законах затухания было трудно установить точно. Данные тестирования автомодельности следа за ротором в водном канале (Okulov, Naumov et al., 2015), представленные на рис. 9, показали хорошее соответствие формы профилей в следе и JG-аппроксимации, предложенной для описания следа за диском авторами (Johansson, George, 2006) и ранее использованной для анализа данных на рис. 6. Кроме того, авторы (Okulov, Naumov et al., 2015) впервые обнаружили и описали наличие одинаковой автомодельности для разных быстроходностей ротора (рис. 9b). Различие возникло только для медленного вращения ротора  $\lambda = 2$  (с конструктивным оптимумом при  $\lambda = 5$ ), когда аппроксимирующая функция была ближе к гауссовому распределению, а не JG-аппроксимации.

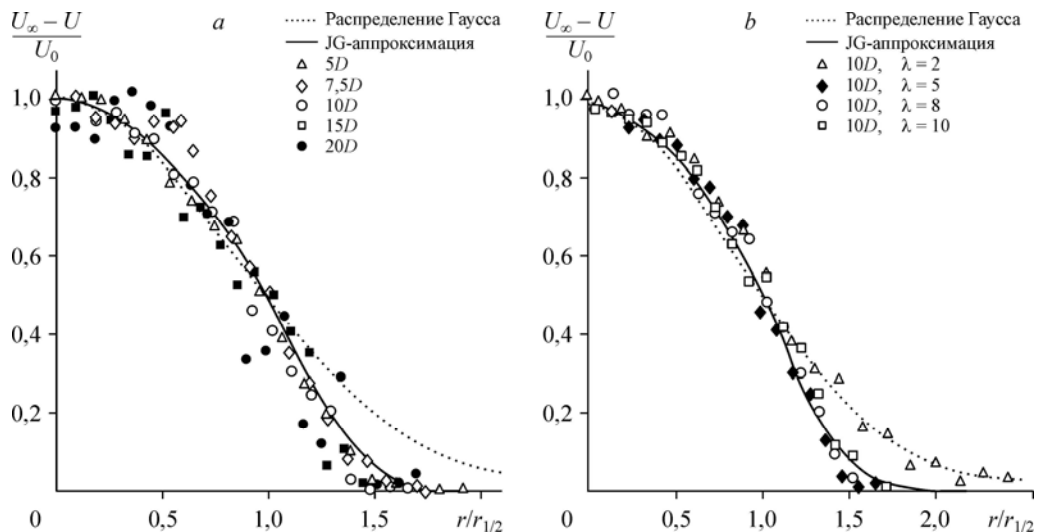


Рис. 9. Проверка автомодельности профилей скорости в следе за трехлопастным ротором в зависимости от удаления за ротором (а) и от его быстроходности  $\lambda$  (Окулов и др., 2015) (b).

Таким образом, поведение дальнего следа за ротором во многом аналогично его поведению за диском, начиная с возникновения низкочастотных колебаний на частоте Струхаля, слабо зависящих от изменения числа Рейнольдса, и заканчивая автомодельностью следа при одинаковой степени его затухания с показателем  $-2/3$ , но при разных коэффициентах интенсивности. При сохранении массы и импульса в следе такое затухание определяет степенной характер его расширения с показателем степени  $1/3$ , то есть реальное поведение следа отличается от применяемых кинематических моделей с линейным расширением (Jensen, 1983; Bastankhan, Porte-Agel, 2014; Bastankhan, Porte-Agel, 2016). Следовательно, применение кинематических моделей с линейным расширением следа не совсем корректно и, вероятно, может быть успешным только на коротких его отрезках, где работает линейная аппроксимация для реально расширяющегося по другому закону следа. Еще одну возможность для упрощенного моделирования можно, видимо, получить из установленной схожести поведения дальнего следа за диском и ротором. Например, при расчете ветряных ферм было бы удобно для упрощения заменять роторы более простыми дисковыми моделями, применяя формальную коррекцию коэффициента интенсивности следа с 0,32 на 0,8 или корректируя коэффициент упора, как в модели Енсена (Jensen, 1983), но, конечно, в рамках обнаруженной степенной зависимости  $-2/3$ . Правомочность этих возможностей будет рассмотрена в следующем пункте.

### 5. Аэродинамическое взаимодействие роторов и дисков

Перед началом описания результатов модельных исследований обратимся к данным эксплуатации реальной ВЭС «London Agrau» (Nygaard, 2014), где представлены результаты выработки электроэнергии в четырех разных цепочках ветрогенераторов, расположенных в следах друг за другом при фронтальных направлениях ветра. В одном случае были выбраны две цепочки F20-F01 и J20-J06 с направлением ветра  $312,2^\circ$  и шагом между турбинами, составляющим  $5,4D$  диаметров ротора, а во втором — C19-M19 и A13-L13 с направлением ветра  $222,3^\circ$  и шагом, равным  $8,3D$ . Изменения отбираемой энергии ветра турбинами вдоль цепочек относительно производительности первой турбины в цепочке представлены на рис. 10а и 10б соответственно. В работе трех цепочек из четырех наблюдается эффект стабилизации отбираемой у ветра энергии или вырабатываемой турбинами мощности. В четвертой цепочке (A13-L13) мощность не стабилизируется, а продолжает падать от турбины к турбине, что согласуется с классическим представлением об уменьшении скорости каждой турбины, по крайней мере, на треть,

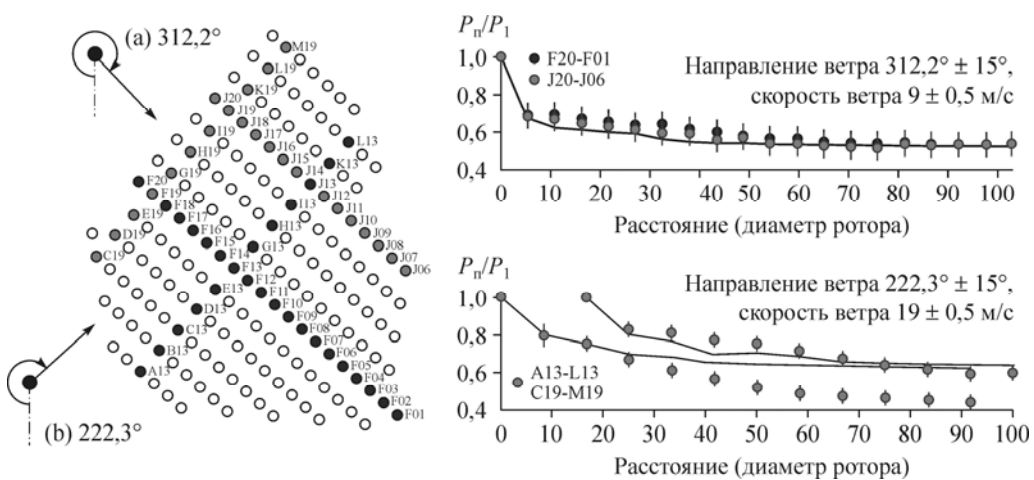


Рис. 10. Эффект стабилизации отбираемой у ветра энергии в выбранных цепочках ветрогенераторов в ветроэлектростанции «London Agrau» (Nygaard, 2014).

что, естественно, уменьшает мощность попадающей в след следующей турбины, и так далее по всей цепочке.

Точного объяснения эффекта стабилизации при работе цепочки турбин в следах друг за другом пока не найдено, хотя этот эффект хорошо известен и используется при эксплуатации ветроэлектростанций. На графиках рис. 10 линиями представлены результаты расчетов по модели Енсена при ее локальном применении с последовательным переходом от турбины к турбине, каждый раз для расчетной турбины использовался измеренный для нее коэффициент упора. Отметим, что такая пошаговая эмпирическая коррекция хорошо описывает эффект стабилизации отбираемой у ветра энергии цепочкой турбин, что ожидаемо из-за существования корреляции между вырабатываемой мощностью и силой упора ветра на ометаемую ротором поверхность, использованную в качестве эмпирического параметра модели. То есть модель Енсена и ее разновидности (Jensen, 1983; Bastankhan, Porte-Agel, 2014; Bastankhan, Porte-Agel, 2016) в силу их эмпиричности не могут прояснить причину эффекта стабилизации, который, очевидно, связан с восстановлением профиля скорости перед следующими турбинами в цепочке. Кроме того, эти модели не всегда точно описывают реальную работу цепочки турбин (например, для режима на рис. 10*b*). Здесь могут играть роль значительная удаленность турбин в цепочке, обеспечивающая большее уменьшение дефицита скорости; атмосферная турбулентность, отвечающая за более интенсивное перемешивание; неравномерность профиля скорости набегающего потока или, скорее всего, одновременное воздействие всех факторов, влияющих на восстановление профиля скорости в следе. Конечно, для правильного описания явления полезно иметь оценку степени влияния каждого фактора на изучаемый эффект, но, как упоминалось ранее, на сегодняшний день это невозможно проделать в натуральных условиях из-за недостаточной точности измерительных методик и невозможности управлять натурными условиями при эксплуатации ВЭС для исключения отдельных факторов. Таким образом, снова возвращаемся к необходимости проведения модельных исследований, которые можно начать с изучения взаимодействия двух турбин в условиях практического отсутствия внешних турбулентных пульсаций и неравномерности профиля набегающего потока. Такое идеализированное моделирование условий работы позволит получить данные о базовом взаимодействии роторов, чтобы потом при добавлении по отдельности других возмущений оценить влияние каждого из них на производительность системы.

В исследовании (Окулов и др., 2017) использовались две идентичные модели горизонтальных ветрогенераторов (рис. 11*a*). В разделах 2 и 4 одиночная модель такого ротора была использована для изучения его силовых характеристик и следа за ним в водном канале.

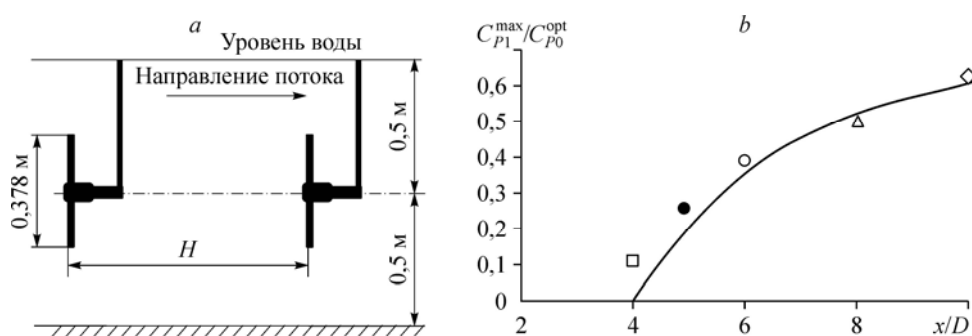


Рис. 11. Взаимодействие двух турбин.

*a* — схема установки,

*b* — отношение максимальной мощности двух роторов в зависимости от расстояния между ними  $H = x/D$ :

светлые символы — эксперименты в водном канале (Окулов и др., 2017),

темный символ — эксперименты в аэродинамической трубе (Bartl et al., 2012);

сплошная линия — квадрат относительной скорости на оси следа за одиночным ротором.

В ходе экспериментов варьировались частоты вращения роторов  $n$  и расстояние между ними  $H$ . В зависимости от фиксированных значений этих параметров по измеренным величинам вычислялись коэффициенты мощности и упора для обоих роторов. Следует отметить, что определение быстроходности второго ротора оказалось не такой простой задачей как определение быстроходности первого ротора из-за того, что скорость набегающего потока на второй ротор неизвестна заранее, чтобы использовать ее согласно определению. Возникали также проблемы и из-за неравномерного профиля набегающей скорости в соответствии JG-аппроксимацией следа за первым ротором. Тем не менее авторам удалось установить простое соотношение для оценки максимальной эффективности второго ротора. Оказалось, что изменение производимой мощности второго ротора, отнесенное к мощности первого, в зависимости от расстояния между ними можно оценить с помощью закона затухания следа за одиночным ротором как квадрат изменения скорости на его оси:  $(U_0/U_\infty)^2 = (1 - 0,8(x/D - 3,2)^{-2/3})^2$  (рис. 11b). На рисунке представлены не только данные экспериментов в водном канале, но и результаты экспериментов в аэродинамической трубе, что еще раз подтверждает идентичность моделирования в разных средах. Последние данные представлены единственной точкой, т.к. размеры рабочего участка аэродинамической трубы не позволяли сделать расстояние между роторами больше  $5D$ . В дополнение к изучению роторов, расположенных на одной оси, в работе (Okulov et al., 2017) исследовались случаи, когда оси были сдвинуты на половину и на полный диаметр. Здесь ничего неожиданного обнаружено не было — худшим оказался случай с расположением роторов вдоль одной оси, когда второй из них полностью попадает в след от первого.

Особый интерес представляет изучение развития дальнего следа за вторым ротором и, соответственно, сравнение его поведения со следом, образующимся за двумя дисками в аналогичных конфигурациях.

Сравнение развития следов при обтекании пассивных систем с двумя неподвижными дисками и за двумя активно работающими роторами (рис. 12a) выявило принципиальное различие между ними (Наумов, Литвинов и др. 2016; Okulov, Mikkelsen et al., 2016; Okulov, Litvinov et al., 2017a; Okulov, Litvinov et al., 2017b). В частности, введение второго диска в след за первым вызывает увеличение скорости торможения в общем следе, что естественно для пассивных систем и связано с возникновением дополнительного сопротивления от второго диска, увеличивающего начальное торможение и суммарную интенсивность следа. В отличие от этого, торможение в следе за двумя активно работающими роторами не растет, а уменьшается. Типичным подходом к объяснению

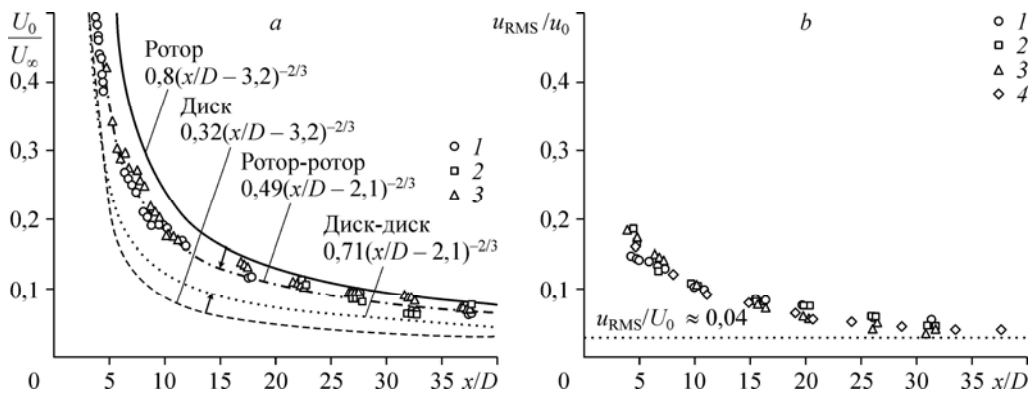


Рис. 12. Сравнение дальнего следа за одиночными или двойными системами из роторов и дисков.

$a$  — затухание дефицита скорости:  $H = 4D$  (1),  $6D$  (2),  $8D$  (3),

$b$  — развитие турбулентных пульсаций (Okulov, Mikkelsen et al., 2016):

$L_x = 4D$  (R-R) (1),  $6D$  (R-R) (2),  $8D$  (R-R) (3),  $D$ ,  $D-D$  ( $L_x = 4D-8D$ ) (4).



разных особенностей в развитии следов является ссылка на различие в турбулентных характеристиках. Однако в рассмотренных экспериментах для всех следов — за одиночными и двойными, пассивными и активными системами — распределение интенсивности пульсаций было практически одним и тем же (рис. 12*b*). Следовательно, можно предположить, что турбулентные характеристики не могут быть основной причиной установленного феномена.

Зафиксированная разница в поведении следов за пассивными и активными системами представляет собой важнейший результат, так как обнаруженное уменьшение интенсивности следа за двумя роторами может стать ключом к разгадке эффекта стабилизации вырабатываемой мощности цепочкой ветрогенераторов. Для осмысления неожиданного факта — уменьшения интенсивности следа за двумя работающими роторами в противоположность ее росту для двух дисков — напомним различие при образовании следа за активными и пассивными системами. Как указывалось ранее, сильное влияние на формирование следа за ротором играет винтообразная вихревая система концевых винтовых вихрей (рис. 2 и рис. 8*a*), обеспечивающая дополнительное удвоение дефицита скорости в следе. Разумно предположить, что вихревая система в следе от первого ротора разрушает систему второго, нивелируя ее вклад и уменьшая интенсивность суммарного следа. Безусловно, это предположение должно стать предметом всестороннего изучения в дальнейших исследованиях.

Действительно, влияние крупномасштабных пульсаций в разных следах на производительность попадающих в них турбин еще недостаточно изучено. Это факт подтверждают также исследования влияния следа от препятствия (диска) на работу ветротурбины (Naumov et al., 2016; Naumov et al., 2017). Показано, что при разных положениях препятствия относительно оси ротора дефицит скорости в сечении перед ним колеблется от 0 до 20 %, причем уровень турбулентности, приходящий от препятствия всегда был высоким: от 8 до 15 % по сравнению с 4 % фонового значения в свободном потоке. Было установлено, что на мощность ветрогенератора влияет только его попадание в зону тени от следа за препятствием, а повышение уровня пульсаций практически не оказывает влияния на уровень мощности, что также требует более тщательного изучения.

### Заключение

В настоящем обзоре о ретроспективе развития научных основ роторной аэродинамики (Kuik et al., 2015; Okulov, Sørensen, Wood, 2015; Fukumoto et al., 2015) установлена определяющая роль физического моделирования в исследованиях работы ветрогенераторов. Определено место и дана оценка этих исследований для современного решения ветроэнергетических задач. Возвращение к физическому моделированию на современном этапе развития роторной аэродинамики, так же как и ранее, связано с невозможностью проведения полноценных натурных исследований из-за сложного характера междуроторного взаимодействия в ВЭС, отсутствия достаточной точности и абсолютной неповторяемости натурных условий, что существенно затрудняет установление общих закономерностей и концепций при натурном эксперименте. При этом для проведения физического моделирования были проанализированы, адаптированы и получили дальнейшее развитие различные точные методики для измерений кинематических характеристик движений жидкости с помощью оптико-лазерных методов в следах за моделями ветротурбин с доминированием винтовых вихревых структур, с последующим их распадом и формированием дальнего следа. С помощью модельных исследований удалось ответить на вопросы по проектированию роторов ветрогенераторов и установить закономерности развития следов и междуроторного взаимодействия. Эффективность разных форм роторов турбин, построенных на основе различных классических методов оптимизации были также сопоставлены пока только в модельных исследованиях. В результате большая производительность выявлена у ротора, спроектированного в соответствии

с концепцией Беца (Okulov, 2014) и распределением циркуляции Гольдштейна вдоль лопасти (Окулов и др., 2015). Следует отметить, что различные приближенные методы проектирования формы лопастей с применением разных поправок на влияние концов лопастей (Wood et al., 2016) дают хорошее приближение к форме оптимальной лопасти. При незначительном влиянии роторных втулок малых размеров (Okulov, Sørensen, Shen, 2016) эти формы различались только при приближении к оси ротора (Sørensen et al., 2016), что свидетельствует о высокой эффективности существующих ветрогенераторов, роторы которых были спроектированы различными приближенными методами оптимизации.

Приоритетным фактом, обнаруженным при изучении развития дальнего следа за ротором, стало определение единообразной аналитической модели для описания его автотомельности и затухания по степенной зависимости с показателем степени  $-2/3$  (Наумов и др., 2016). Установленная модель оказалась пригодной для произвольных режимов работы ротора при моделировании дальнего следа, формируемого в результате распада винтообразной вихревой структуры ближнего следа (Naumov et al., 2014). Здесь для разных параметров работы модели ветрогенератора независимо от структуры ближнего следа и форм его распада всегда формировался дальний след с одинаковой структурой за исключением режимов очень малой быстроходности, не реализуемых на практике (Okulov, Naumov et al., 2015). Такая же структура дальнего следа вырабатывалась в случае, когда ближний след состоял из внутреннего и внешнего колец винтовых вихрей, сходящих одновременно с привтулочных и концевых кромок лопастей. Возможность существования данных режимов неоднократно визуализировалась в экспериментах и доказана теоретически, как существование равновесных состояний для внутренних и внешних винтовых вихрей (Okulov, 2016).

Важным этапом в представленных в настоящем обзоре исследованиях стало определение влияния следа от вышестоящей турбины на производительность следующего ветрогенератора. Для расстояний между турбинами более четырех калибров (по диаметру ротора) была найдена простая зависимость для определения потерь второго ветрогенератора в зависимости от его удаления (Окулов и др., 2017). Определенный интерес представляет сопоставление поведения следов за отдельным ротором и системой из двух роторов, расположенных друг за другом. Зафиксированное неожиданное уменьшение интенсивности следа за двумя роторами может стать ключом к разгадке эффекта стабилизации вырабатываемой мощности в цепочке ветрогенераторов (Okulov, Naumov et al., 2016). Дополнительно эти эксперименты показали, что система из двух дисков не может удовлетворительно заменить систему из двух роторов, например, для упрощения расчетов, так как в первом случае интенсивность суммарного следа возрастает, а во втором падает по сравнению со следом за одиночным диском или ротором соответственно.

При исследовании влияния следа от крупномасштабного препятствия установлено, что на мощность ветрогенератора влияет только его попадание в зону тени от следа за препятствием, а повышение уровня пульсаций из-за наличия неоднородности практически не влияло на работу ветротурбины (Naumov et al., 2016). Безусловно, в дальнейшем изучение влияний разных возмущающих факторов следует распространить на стратифицированные течения (Voropaeva et al., 2016), моделирующие естественную неравномерность атмосферного пограничного слоя.

Полученные результаты, несомненно, представляют интерес для дальнейшего развития аэродинамики ветроустановок и ВЭС как для оптимизации работы действующих ВЭС, так и для их проектирования и расчета новых. Выводы, сформулированные выше при описании исследованных явлений, будут полезны для повышения энергоэффективности, экономичности, надежности и безопасности рабочих колес осевых турбин в ветроэнергетике. Кроме того, проведенные исследования дают импульс для выполнения новых работ, связанных с дальнейшим совершенствованием работы ВЭС. В новых исследованиях необходимо завершить изучение вопроса о выборе оптимальной формы для

лопасти ветротурбины. Следует получить ответ на вопрос, как влияет различие в профильной форме лопасти на производительность турбины, чтобы правильно оценить теоретические решения, предсказывающие большую эффективность для лопасти с постоянным распределением циркуляции по сравнению с циркуляцией Гольдштейна.

Значимым является вопрос о влиянии турбулентных пульсаций набегающего потока на эффективность работы ветротурбин. Необходимо исследовать модельные установки при повышенных уровнях турбулентности набегающего потока и сопоставить их с имеющимися данными для практически бестурбулентного режима. Также следует продолжить изучение влияния различных препятствий на работу ветрогенераторов.

Последний важнейший момент новых исследований связан с попыткой осмысления и корректного моделирования эффекта стабилизации вырабатываемой мощности в цепочке ветрогенераторов, расположенных в следах друг за другом. Здесь следует уделить внимание изучению влияния возмущений в следах предыдущих турбин на развитие ближнего следа последующих турбин и попробовать использовать дополнительную генерацию различных возмущений, чтобы выявить динамику разрушения ближнего следа.

Поставленные выше вопросы для новых исследований, несомненно, дадут импульс нового развития аэродинамики ветроустановок и ВЭС.

Автор благодарит И.В. Наумова и И.В. Литвинова за полезные замечания при подготовке рукописи.

### Список литературы

- Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. 2003. Новосибирск: Наука, Институт теплофизики СО РАН. 503 с.
- Гордеев И.Г., Ермоленко Г.В., Никомарова А.В., Рыженков М.А., Цхомария В.Н. 2012. Пилотные проекты сетевых ветроэлектростанций в Ейском районе Краснодарского края: состояние и перспективы // Теплоэнергетика. № 11. С. 41-49
- Жуковский Н.Е. 1912. Вихревая теория гребного винта I // Тр. Отделения Физических наук Общества Любителей Естествознания. Т. 16, вып. 14.
- Жуковский Н.Е. 1914. Вихревая теория гребного винта II // Тр. Отделения Физических наук Общества Любителей Естествознания. Т. 17, вып. 1.
- Жуковский Н.Е. 1915. Вихревая теория гребного винта III // Тр. Отделения Физических наук Общества Любителей Естествознания. Т. 18, вып. 2.
- Жуковский Н.Е. 1918. Вихревая теория гребного винта IV // Тр. авиационного расчетно-испытательного бюро. № 3-4. 129 с.
- Наумов И.В., Литвинов И.В., Миккельсен Р., Окулов В.Л. 2015. Исследование затухания следа за диском в гидроканале при больших числах Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. Т. 22, № 6. С. 683-692
- Наумов И.В., Литвинов И.В., Миккельсен Р.Ф., Окулов В.Л. 2016. Экспериментальное исследование развития следа за парой плоских дисков // Теплофизика и аэромеханика. Т. 23, № 5. С. 686-692.
- Наумов И.В., Миккельсен Р.Ф., Окулов В.Л. 2016. Оценка дальности распространения следа и уровня его пульсаций за роторами ветрогенераторов // Теплоэнергетика. № 3. С. 54-60.
- Наумов И.В., Рахманов В.В., Окулов В.Л., Велте К.М., Майер К.Е., Миккельсен Р.Ф. 2012. Диагностика течения за моделью ротора трехлопастной турбины // Теплофизика и аэромеханика. Т. 19, № 3. С. 268-278.
- Новиков Б.Г. 2009. О влиянии малого суммарного импульса на развитие следа за самодвижущимися телами // Теплофизика и аэромеханика. Т. 16, № 4. С. 597-624
- Окулов В.Л., Миккельсен Р., Литвинов И. В., Наумов И. В. 2015. Эффективность работы роторов ветрогенераторов, оптимизированных по методу Глауэрта и Беца // Журнал технической физики. Т. 85, № 11. С. 60-64.
- Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н. 2007. Особенности оптической диагностики пульсирующих течений // Журнал технической физики. Т. 77, № 5. С. 47-57.
- Окулов В.Л., Наумов И.В., Цой М.А., Миккельсен Р.Ф. 2017. Потери эффективности при соосном расположении пары ветрогенераторов // Теплофизика и аэромеханика. Т. 24, № 4. С. 561-567.
- Окулов В.Л., Соренсен Ж.Н., ван Куйк Г.А.М. 2013. Развитие теорий оптимального ротора. Москва-Ижевск: РХД. 120 с.
- Фортов В.Е., Попель О.С. 2014. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. № 6. С. 4-13.
- Vachant P., Wosnik M. 2015. Characterising the near-wake of a cross-flow turbine // J. of Turbulence. Vol. 16, No. 4. P. 392-410.

- Barthelmie R.J., Hansen K., Frandsen S.T., Rathmann O., Schepers J.G., Schlez W., Phillips J., Rados K., Zervos A., Politis E.S., Chaviaropoulos P.K.** 2009. Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore // *Wind Energy*. Vol. 12, No. 5. P. 431–444.
- Bartl J., Pierella F., Sætran L.** 2012. Wake measurements behind an array of two model wind turbines // *Energy Procedia*. Vol. 24. P. 305–312.
- Bastankhan M., Porté-Agel F.** 2014. A new analytical model for wind turbine wakes // *Renewable Energy*. Vol. 70. P. 116–123.
- Bastankhan M., Porté-Agel F.** 2016. Experimental and theoretical study of wind turbine wakes in yawed conditions // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 806. P. 506–541.
- Betz A.** 1919. Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust: mit einem Zusatz von L. Prandtl // *Göttinger Nachrichten*, Göttingen. S. 196, bis 217.
- Chamorro L.P., Hill C., Morton S., Ellis C., Arndt R.E.A., Sotiropoulos F.** 2013. On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial-flow turbine // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 716. P. 658–670.
- Dufresne N.P., Wosnik M.** 2013. Velocity deficit and swirl in the turbulent wake of a wind turbine // *J. Marine Technology Society*. Vol. 47. No. 4. P. 193–205.
- Felli M., Camussi R., Di Felice F.** 2011. Mechanisms of evolution of the propeller wake in the transition and far fields // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 682. P. 5–53.
- Flamm O.A.H.** 1909. Die Schiffschraube und ihre Wirkung auf das Wasser. Berlin. 23 p.
- Fraunie P., Beguier C., Paraschivoiu I., Brochier G.** 1986. Water channel experiments of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades // *J. of Propulsion and Power*. Vol. 2, No. 5. P. 445–449.
- Froude R.E.** 1889. On the part played in propulsion by differences of fluid pressure // *Transactions of the Institute of Naval Architects*. Vol. 30. P. 390–405
- Froude R.E.** 1911. The acceleration in front of a propeller // *Transactions of the Institute of Naval Architects*. Vol. 53. P. 139–182.
- Fukumoto Y., Okulov V., Wood D.H.** 2015. The contribution of Kawada to the analytical solution for the velocity induced by a helical vortex filament // *ASME. Appl. Mech. Rev.* Vol. 67, No. 6. P. 060801.
- George W.K.** 1989. The self-preservation of turbulent flows and its relation to initial conditions and coherent structures // *Advances in Turbulence*. / ed. W.K. George and R. Anndt. N.Y.: Hemisphere Publ. Corp. P. 39–73.
- Glauert H.** 1935. Airplane propellers: Division L // *Aerodynamic Theory IV* / ed. W.F. Durand. Springer: Berlin. P. 169–360.
- Goldstein S.** 1929. On the vortex theory of screw propellers // *Proc. Roy. Soc. London, A*. Vol. 123. P. 440–465.
- Gupta A.K.** 2015. Efficient wind energy conversion: evolution to modern design // *J. Energy Resour. Technol.* Vol. 137, No. 5. P. 051201-1–051201-10.
- Jensen N.** 1983. A note on wind turbine interaction // Technical report Ris-M-2411. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory. 61 p.
- Jiang F., Andersson H.I., Gallardo J.P., Okulov V.L.** 2016. On the peculiar structure of a helical wake vortex behind an inclined prolate spheroid // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 801. P. 1–12
- Johansson P.B., George W.K.** 2006. The far downstream evolution of the high-Reynolds number axisymmetric wake behind a disk. Part 1. Single-point statistics // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 555. P. 363–385.
- Hansen M.O.L.** 2008. *Aerodynamics of Wind Turbines* / ed. Earthscan. 181 c.
- Hand M., Simms D., Fingersh L., Jager D., Cotrell J., Schreck S., Larwood S.** 2001. Unsteady aerodynamics experiment phase vi: Wind tunnel test configurations and available data campaigns // Technical report NREL/TP. No. 500-29955.
- van Holten Th.** 1981. Concentrator systems for wind energy, with emphasis on tip-vanes // *Wind Engng.* Vol. 5, No. 1. P. 29–45.
- Hong J., Toloui M., Chamorro L.P., Guala M.** 2014. Natural snowfall reveals large-scale flow structures in the wake of a 2,5-MW wind turbine // *Nature Communications*. Vol. 5, No. 4216. P. 1–9.
- van Kuik G.A.M.** 2016. Momentum theory of Joukowski actuator discs with swirl // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, Vol. 753, No. 2. P. 022021.
- van Kuik G.A.M., Sørensen J.N., Okulov V.L.** 2015. Rotor theories by professor Joukowski: Momentum theories // *Progress in Aerospace Sciences*. Vol. 73. P. 1–18.
- Larsen G.C., Madsen H.Aa., Bingöl F., Mann J., Ott S. et al.** 2007. Dynamic wake meandering modeling // Risø National Laboratory. 84 p.
- Larsen T. J., Madsen H.Aa., Larsen G.C., Hansen K.S.** 2013. Validation of the dynamic wake meander model for loads and power production in the Egmond aan Zee wind farm // *Wind Energy*. Vol. 16, No. 4. P. 605–624.
- Litvinov I.V., Naumov I.V., Okulov V.L., Mikkelsen R.F.** 2015. Comparison of far wake behind solid disk and three blades rotor // *J. of Flow Visualization and Image Processing*. Vol. 22, No. 4. P. 175–183.
- Medici D., Alfredsson P.H.** 2006. Measurements on a wind turbine wake: 3D effects and bluff body vortex shedding // *Wind Energy*. Vol. 9. P. 219–236.
- Naumov I.V., Kabardin I.K., Mikkelsen R.F., Okulov V.L., Sørensen J.N.** 2016. Performance and wake conditions of a rotor located in the wake of an obstacle // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 753, No. 3. P. 032051.

- Naumov I.V., Kabardin I.K., Mikkelsen R.F., Okulov V.L., Sørensen J.N.** 2017. An influence of the different incoming wake-like flows on the rotor vibrations // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 854. P. 012034.
- Naumov I.V., Mikkelsen R.F., Okulov V.L., Sørensen J.N.** 2014. PIV and LDA measurements of the wake behind a wind turbine model // *J. of Physics: Conference Series*. Vol. 524. P. 012168.
- Near V.S., Gunawan B., Hill C., Chamorro L.P.** 2013. Near and far field flow disturbances induced by model hydrokinetic turbine: ADV and ADP comparison // *Renewable energy*. Vol. 60. P. 1–6.
- Nygaard N.G.** 2014. Wakes in very large wind farms and the effect of neighbouring wind farms // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 524, No. 1. P. 012162.
- Okulov V.L.** 2014. Limit cases for rotor theories with Betz optimization // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 524, No. 1. P. 012129.
- Okulov V.L.** 2016. An acentric rotation of two helical vortices of the same circulations // *Regular and Chaotic Dynamics*. Vol. 21, No. 3. P. 267–273.
- Okulov V.L., Litvinov I.V., Mikkelsen R.F., Naumov I.V., Sørensen J.N.** 2017a. Wake developments behind different configurations of passive disks and active rotors // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 854. P. 012035.
- Okulov V.L., Litvinov I.V., Naumov I.V., Mikkelsen R.** 2017b. Self-similarity of far wake behind tandem of two disks // *J. of Engng Thermophysics*. Vol. 26, No. 2. P. 154–159.
- Okulov V.L., Mikkelsen R.F., Naumov I.V., Litvinov I.V., Gesheva E., Sørensen J.N.** 2016. Comparison of the far wake behind dual rotor and dual disk configurations // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 753, No. 3. P. 032060.
- Okulov V.L., Mikkelsen R.F., Sørensen J.N., Naumov I.V., Tsoy M.A.** 2017. Power properties of two interacting wind turbine rotors // *ASME. J. Energy Resour. Technol.* Vol. 139, No. 5. P. 051210-1–051210-6.
- Okulov V.L., Naumov I.V., Mikkelsen R.F., Kabardin I.K., Sørensen J.N.** 2014. A regular Strouhal number for large-scale instability in the far wake of a rotor // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 747. P. 369–380.
- Okulov V.L., Naumov I.V., Mikkelsen R.F., Sørensen J.N.** 2015. Wake effect on a uniform flow behind wind-turbine model // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 625, No. 1. P. 012011.
- Okulov V.L., Sørensen J.N.** 2007. Stability of helical tip vortices in a rotor far wake // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 576. P. 1–25.
- Okulov V.L., Sørensen J.N.** 2008. Refined betz limit for rotors with a finite number of blades // *Wind Energy*. Vol. 11, No. 4. P. 415–426.
- Okulov V.L., Sørensen J.N.** 2010a. Applications of 2D helical vortex dynamics // *Theor. Comput. Fluid Dyn.* Vol. 24. P. 395–401.
- Okulov V.L., Sørensen J.N.** 2010b. Maximum efficiency of wind turbine rotors using Joukowski and Betz approaches // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 649. P. 497–508.
- Okulov V.L., Sørensen J.N., Shen W.Z.** 2016. Extension of Goldstein's circulation function for optimal rotors with hub // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 753, No. 2. P. 022018.
- Okulov V.L., Sørensen J.N., Wood D.H.** 2015. The rotor theories by professor Joukowski: Vortex theories // *Progress in Aerospace Sci.* Vol. 73. P. 19–46.
- Quaranta H.U., Leweke T.** 2015. Long-wave instability of a helical vortex // *J. Fluid Mech.* Vol. 780. P. 687–716.
- Rankine W.J.M.** 1865. On the mechanical principles of the action of propellers // *Transactions of the Institute of Naval Architects*. Vol. 6. P. 13–39.
- Segalini, A., Inghels, P.** 2014. Confinement effects in wind-turbine and propeller measurements // *J. of Fluid Mechanics*. Vol. 756. P. 110–129.
- Selig M.S., Guglielmo J.J., Broeren A.P., Giguere P.** 1995. Summary of low-speed airfoil data // *SolarTech Publication*. Vol. 1. 292 p.
- Sørensen J.N.** 2016. *General momentum theory for horizontal axis wind turbines*. Springer. 193 c.
- Sørensen J.N., Kuik G.A.M. van.** 2010. General momentum theory for wind turbines at low tip speed ratios // *Wind Energy*. Vol. 14. P. 821–839.
- Sørensen J.N., Mikkelsen R.F., Troldborg N., Okulov V., Shen W.Z.** 2013. The aerodynamics of wind turbines // *Mechanics Down Under — Proceedings of the 22nd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, ICTAM 2008*. P. 231–247.
- Sørensen J.N., Okulov V.L., Mikkelsen R.F., Naumov I.V., Litvinov I.V.** 2016. Comparison of classical methods for blade design and the influence of tip correction on rotor performance // *J. of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 753, No. 2. P. 022020.
- Sumer B. M., Fredøse J.** 2006. *Hydrodynamics around cylindrical structures* // *World Scientific: Advanced Series on Ocean Engineering*. Vol. 26. 530 c.
- Sundén B., Wu Z.** 2015. On icing and icing mitigation of wind turbine blades in cold climate // *J. Energy Resour. Technol.* Vol. 137, No. 5. P. 051203-1–051203-10.
- van Treuren K.W.** 2015. Small-scale wind turbine testing in wind tunnels under low Reynolds number conditions // *J. Energy Resour. Technol.* Vol. 137, No. 5. P. 051208-1–051208-11.
- Vermeer L., Sørensen J.N., Crespo A.** 2003. *Wind turbine wake aerodynamics* // *Progress in Aerospace Sci.* Vol. 39. P. 467–510.

- Voropaeva O.F., Druzhinin O.A., Chernykh G.G.** 2016. Numerical simulation of momentumless turbulent wake dynamics in linearly stratified medium // J. Eng. Therm. Vol. 25, No. 1. С. 85–99.
- Wald Q.R.** 2006. The aerodynamics of propellers // Progress in Aerospace Sci. Vol. 42, No. 2. P. 85–128.
- Walther J.H., Guenot M., Machefaux E., Rasmussen J.T et al.** 2007. A numerical study of the stability of helical vortices using vortex methods // J. of Physics: Conference Series. IOP Publishing. Vol. 75, No. 1. P. 012034.
- Wood D.H., Okulov V.L.** 2017. Nonlinear blade element-momentum analysis of Betz-Goldstein rotors // Renewable Energy. Vol. 107. P. 542–549.
- Wood D.H., Okulov V.L., Bhattacharjee D.** 2016. Direct calculation of wind turbine tip loss // Renewable Energy. Vol. 95. P. 269–276.
- Yang J., Liu M., Wu G., Zhong W., Zhang X.** 2014. Numerical study on coherent structure behind a circular disk // J. Fluids Struct. Vol. 51. P. 172–188.

*Статья поступила в редакцию 5 июля 2017 г.,  
после доработки — 7 сентября 2017 г.*