



Принципы формирования аэродинамической компоновки диффузорной ветроэнергетической установки высокой эффективности

Попытки повышения мощности, снимаемой турбиной ветроэнергетической установки (ВЭУ), с помощью ускорения направляемого на турбину ветрового потока известны давно. В качестве ускорителей чаще других предлагаются кольцевые диффузоры, внутри которых размещаются осевые турбины. Такие установки здесь именуются диффузорными ветроэнергетическими установками (ДВЭУ). Широкие исследования их применимости были проведены в США в 1990-х годах. Результаты кратко изложены в [1], где показана возможность повышения эффективности ветротурбины в ускорителе до 80 % по сравнению с ветроколесом того же диаметра в свободном потоке. В то же время финансовые затраты оценены как равные или ненамного выше, чем для традиционных ВЭУ. Эта оценка, по-видимому, привела к прекращению разработки ДВЭУ в США того времени.

Однако изобретательская активность и поисковые разработки ДВЭУ во всём мире не прекращаются по сей день. Остаются привлекательными такие преимущества над традиционными ВЭУ, как повышение безопасности, уменьшения га-

баритов, особенно вращающихся частей, возможности снижения акустических излучений и др. Рядом предприятий на инициативной основе разработано несколько моделей и экспериментальных образцов. Примером может служить созданная в Республике Казахстан в 2004 году композиционная ДВЭУ малой мощности. Её испытания подтвердили ожидаемую эффективность [2].

Одним из этих инициативных предприятий является компания ООО «НПП «Ветроэнергетические системы» («ВЭС»), ведущая поиск технических решений на базе математического моделирования течений воздуха вокруг различных конфигураций ДВЭУ. В качестве математической модели используются полные уравнения Навье-Стокса и Рейнольдса, замкнутые с помощью дифференциальной $k-\omega$ -модели турбулентности в модификации Ментера [3]. По сравнению с другими компаниями используется более тщательный подход к разработке аэродинамической схемы ДВЭУ, учитывающий влияние работающей турбины на поток в диффузоре и внешнее течение и другие детали. В параметрических расчётах

УДС 621.311.24

Принципы формирования аэродинамической компоновки диффузорной ветроэнергетической установки высокой эффективности

Л. А. Маслов, д.т.н., ФГУП ЦАГИ; В. В. Митрофович, А. Ю. Онин, А. Е. Усачов, д.т.н.; С. В. Грибков, к.т.н., ООО НПП «ВЭС»

Изложена методология поиска путей повышения аэродинамической эффективности горизонтально-осевых ветротурбин с диффузорным ускорителем ветрового потока, именуемых диффузорными ветроэнергетическими установками (ДВЭУ). Используется математическое моделирование на базе решения осреднённых по Рейнольдсу полных уравнений Навье-Стокса (RANS-технологии) с учётом влияния работающей турбины. Проводятся многопараметрические расчёты различных вариантов геометрии элементов диффузора и значений коэффициента нагруженности ветротурбины. Их результаты позволяют выбрать геометрию и нагруженность турбины, обеспечивающие наибольшие значения коэффициента использования энергии ветра. Приведён пример реализации изложенного подхода на экспериментальной модели ДВЭУ мощностью 200 Вт, прошедшей испытания в аэродинамической трубе ЦАГИ. Результаты испытаний подтвердили её энергетическую эффективность, существенно превышающую установку традиционного типа с открытым ротором близких диаметров.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, диффузорный ускоритель потока, математическое моделирование, высокий коэффициент использования энергии ветра, испытания модели в аэродинамической трубе.

УДС 621.311.24

Principles of generation of aerodynamic design of diffuser augmented wind turbines for high efficiency

L. A. Maslov, Doctor of Engineering Sciences, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI); V. V. Mitrofovich, A. Yu. Onin, A. E. Usachov, Doctor of Engineering Science; S. V. Gribkov, PhD, Research-and-production enterprise "VES", Ltd.

The methodology of search of ways of increase of aerodynamic efficiency of the horizontal axial wind turbines with the diffuser wind accelerator called by diffuser augmented wind turbines (DAWT) is discussed. Mathematical modeling on the basis of the solution of the full equations of Navier-Stokes average on Reynolds (RANS technology), taking into account influence of the working turbine is used. Multiple parameter calculations of various options of geometry of diffuser elements and values of coefficient of wind turbine loading are carried out. Their results allow to choose the geometry and loading of the turbine providing bigger values of power coefficient. The example of realization of the stated approach on the DAWT experimental model with a power of 200 W. The model was tested in a wind tunnel of Central Aerohydrodynamic Institute. Results of tests confirmed its power efficiency significantly exceeding of traditional wind turbines type with an open rotor of close diameters.

Keywords: wind turbine, wind accelerator, mathematical modeling, wind tunnel.

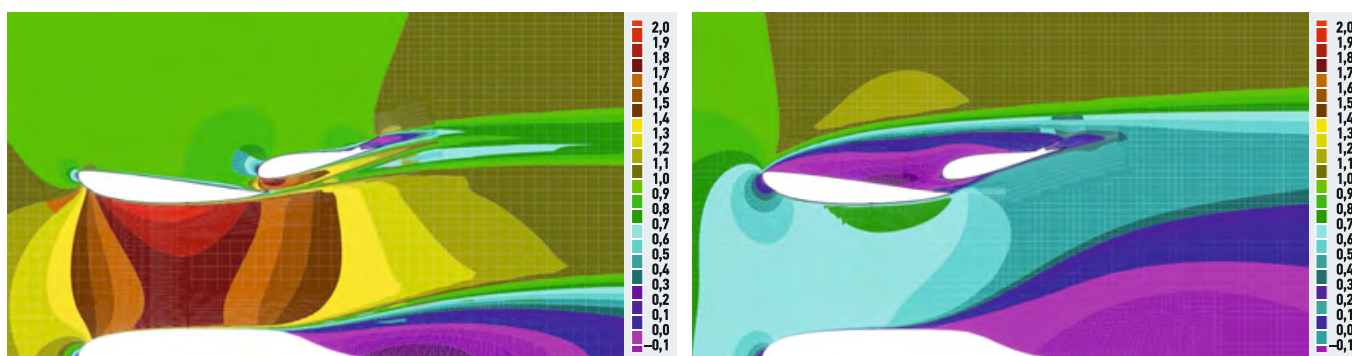


Рис. 16. Реальная физическая модель ДВ-1 (распределение горизонтальных скоростей в продольной плоскости при разных ψ)

кроме параметров геометрии диффузора и центрального тела турбины в широких пределах меняется коэффициент нагрузки турбины ψ , равный отношению перепада давления в плоскости установки турбины к скоростному напору невозмущённого ветра.

Поиск оптимальных параметров геометрии и значений ψ ведётся среди вариантов расчёта, демонстрирующих обтекание как стенок диффузора, так и поверхности центрального тела с минимальными зонами отрывных течений.

Профилировка лопаточной системы турбины (направляющий аппарат — рабочее колесо) ведётся для выбранного коэффициента нагрузки по специальной методике проектирования высоко нагруженных лопаточных систем. При этом соотношение чисел лопаток колеса и направляющего аппарата выбирается с точки зрения минимизации акустического излучения. В исследованиях на договорной основе при финансовой поддержке НПП «ВЭС» участвовали соответствующие подразделения ЦАГИ.

Методика расчёта параметров течения тестировалась на различных примерах. Применительно к ДВЭУ рассмотрена конфигурация реальной физической мо-

дели, обозначенной здесь как ДВ-1, разработанной старшим научным сотрудником ЦАГИ С.Г.Игнатьевым и испытанной в аэродинамической трубе. Непубликованные результаты испытаний и геометрия модели были предоставлены автором в процессе его участия в оценке обсуждаемой методики. Получено удовлетворительное соответствие расчётного и экспериментального распределений давления по внутренним поверхностям диффузора и центрального тела при работающей турбине и без неё.

Результаты расчётов модели ДВ-1 не только подтвердили количественные значения параметров течения внутри диф-

фузора, но и позволили дать качественное объяснение источников возможных неудач при проектировании ДВЭУ. Дело в том, что модель ДВ-1 проектировалась в 1980-х годах на основе характерной для изобретателей того времени раздельной оптимизации ускорителя и турбины.

По расчётным и экспериментальным данным ускоритель из двух кольцевых крыльев, сечения которых продольной плоскостью вместе с центральным телом показаны на рис. 1а, без турбины в районе её установки увеличивал скорость потока в плоскости предполагаемой установки турбины, по сравнению с невозмущённым, практически вдвое. Трёхлопастная турбина также была одной из лучших моделей с коэффициентом использования энергии ветра в свободном потоке ξ , близким к 0,5. Однако, испытания ДВ-1, проведённые в аэродинамической трубе С.Г.Игнатьевым, не показали какого-либо возрастания ξ .

С помощью обсуждаемой методологии этот не ожидавшийся разработчиком результат можно объяснить с помощью цветных диаграмм распределения горизонтальных составляющих расчётной скорости, отнесённой к скорости невозмущённого потока. Они построены на рис. 16 при двух значениях нагруженности турбины.

Нулевой нагруженности соответствует левая картинка рис. 16, близкой к проектной ($\psi = 0,8$) — правая. При $\psi = 0$ имеют место лишь ожидаемый отрыв потока в хвостовой части центрального тела и значительное увеличение скорости потока в поперечном сечении предполагаемой установки турбины. Однако при рабочей нагрузке возникает новая срывная зона на внешней поверхности диффузора с его носовой части, распространяющаяся на всю внешнюю поверхность и лишаящая его ускорительных функций, ожидавшихся за счёт эффекта разрезного крыла. При этом проведённая в эксперименте визуализация пристенного течения на внутренней поверхности диффузора этого явления не обнаруживала.

В [1] показана возможность повышения эффективности ветротурбины в ускорителе до 80 % по сравнению с ветроколесом того же диаметра в свободном потоке. В то же время финансовые затраты оценены как равные или ненамного выше, чем для традиционных ВЭУ. Эта оценка привела к прекращению разработки ДВЭУ в США

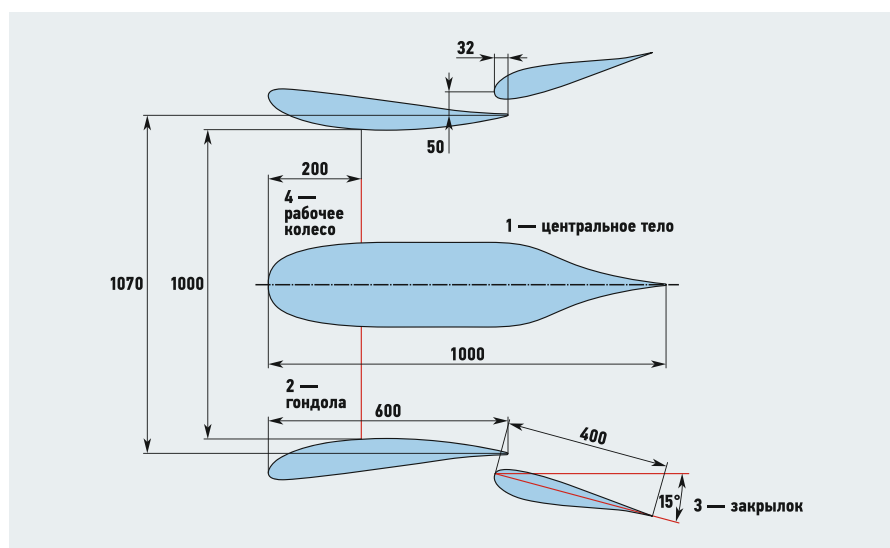


Рис. 1а. Реальная физическая модель ДВ-1 (сечение продольной плоскостью)

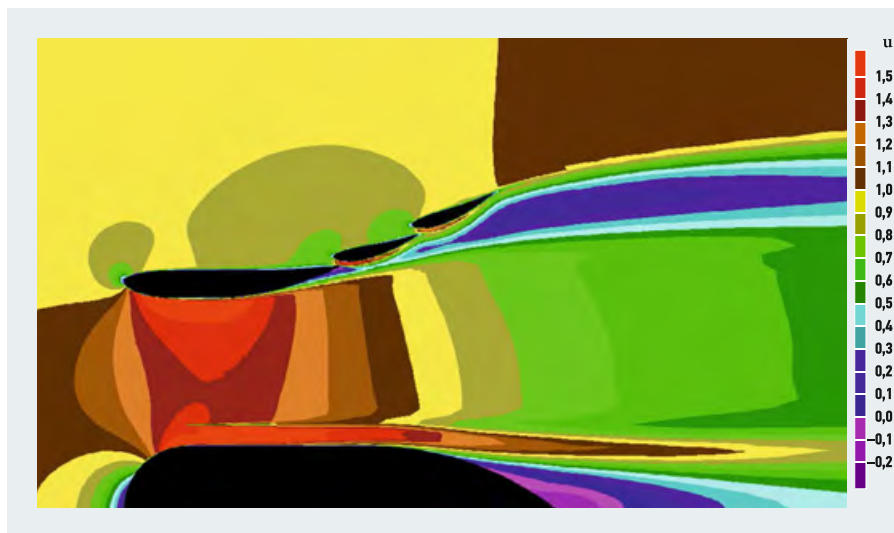


Рис. 2. Диаграмма скоростей потока в продольной плоскости (при $\psi = 0,8$)

Разработанный и тестированный таким образом математический комплекс программ позволил ООО «НПП «ВЭС» вести поиск оптимальных сочетаний геометрических и энергетических параметров ДВЭУ. На его основе найдена компоновка с диффузором из трёх кольцевых крыльев. На рис. 2 показан пример её расчёта в виде цветной диаграммы распределения скоростей потока в продольной плоскости. Чёрным закрашены профили кольцевых крыльев и контур центрального тела. Распределение скоростей соответствует близкому к оптимальному коэффициенту нагруженности турбины. Приняты меры по сокращению отрывной зоны в хвостовой части центрального тела. Для этого организован кольцевой проток между турбиной и центральным телом, видный на рис. 2.



Проток при близких к рабочим коэффициентам нагруженности турбины уменьшает диаметр указанной зоны отрыва, что должно приводить к росту перепада давления на турбине. Окончательно выбранная расчётная компоновка этой схемы реализована в действующей модели ДВЭУ мощностью 200 Вт, показанной на фотографии (рис. 3а), сделанной в процессе испытаний в аэродинамической трубе ЦАГИ. На рис. 3б представлены результаты этих испытаний в виде безразмерных характеристик: коэффициента вращающего момента на валу турбины $\bar{M}$ и коэффициента использования энергии ветра ξ в зависимости от коэффициента быстроходности Z , равного отношению скорости конца лопасти турбины (ωR) к скорости невозмущённого потока V_∞ . Приведённое здесь значение коэффициента ξ с максимальным значением 1,3 отнесено к площади диска турбины и скоростному напору невозмущённого потока.

Окончательно выбранная расчётная компоновка этой схемы реализована в действующей модели ДВЭУ мощностью 200 Вт, показанной на фотографии, сделанной в процессе испытаний в аэродинамической трубе ЦАГИ

Следует заметить, что значение $\xi = 1,3$ заметно превышает его величину для ротора такого же диаметра в открытом потоке, как и у большинства предлагаемых вариантов ДВЭУ. При аналогичном сравнении ДВЭУ между собой представляется логичным использовать площадь, определяемую не диаметром турбины, а максимальным диаметром диффузора. В рассмотренной компоновке соотношение указанных диаметров составляет 1,5. Исполнители данной работы попытались с учётом этого соотношения сопоставить полученную эффективность с другими вариантами ДВЭУ на основе публикуемых данных, имеющих не только рекламный характер, но и основанных на реальных измерениях. Таких же значений или выше пока не найдено. ●

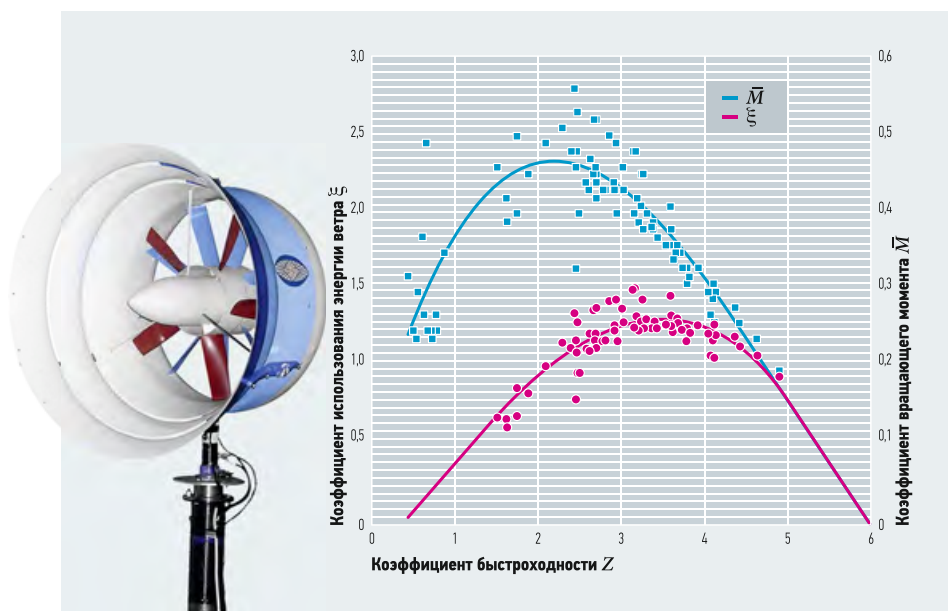


Рис. 3. Модель ДВЭУ мощностью 200 Вт (а — в рабочей части аэродинамической трубы, б — безразмерный момент вращения турбины $\bar{M}$ и коэффициент использования энергии ветра ξ в зависимости от коэффициента быстроходности Z)

1. Д. де Рензо. Ветроэнергетика. Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1982. 272 с.
2. Байшагиров Х.Ж., Каримбаев Т.Дж. О разработке и создании малой композиционной ветроэнергетической установки с диффузором (ВЭУД). Сб. докл. 3-й Межд. конф. «Возобновляемая и малая энергетика '2006». — М.: ВВЦ, 18–19.10.2006.
3. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е., Митрофьевич В.В., Колосов А.Д., Пономарёв М.В. Численное моделирование турбулентного течения внутри ветродвигателя с учётом сил на рабочем колесе // Инженерно-физический журнал, 2003. Т. 76. №6. С. 45–48.

Principles of generation of aerodynamic design of diffuser augmented wind turbines for high efficiency. Pp. 90–92.

L. A. Maslov, Doctor of Engineering Sciences, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI); **V. V. Mitrofovich**, **A. Yu. Onin**, **A. E. Usachov**, Doctor of Engineering Science; **S. V. Gribkov**, PhD, Research-and-production enterprise "VES", Ltd.

-
1. D. de Renzo. Vetrojenergetika [Wind power]. Moscow. Jenergoatomizdat ["Energoatomizdat" Publishers]. 1982. 272 p.
 2. Bajshagirov H.Zh., Karimbaev T.Dzh. O razrabotke i sozdanii maloj kompozicionnoj vetrojenergeticheskoy ustanovki s diffuzorom (VJeUD) [About development and creation of small composite wind power installation with the diffuser (VEUD)]. Sb. dokl. 3-j Mezhd. konf. "Vozobnovljaemaja i malaja jenergetika '2006" [Proc. of the 3rd International conference "Renewable and Small-scale Power '2006"]. Moscow. All-Russia Exhibition Centre. October 18–19, 2006.
 3. Isaev S.A., Baranov P.A., Usachov A.E., Mitrofovich V.V., Kolosov A.D., Ponomarjov M.V. Chislennoe modelirovanie turbulentnogo techenija vnutri vetrodvigatelja s uchjotom sil na rabochem kolese [Numerical modeling of turbulent flow in a wind turbine taking into account forces on the driving wheel]. Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Engineering and physical magazine]. 2003. Vol. 76. No. 6. Pp. 45–48.