

УДК 621.548

С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков, Е.Л. Выдута
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ РОТОРА ДАРЬЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ЕГО МАЛОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ

Применяемые для инженерных расчетов ротора Дарье вертикально-осевых ветроустановок математические модели в принципе не могут учитывать все аэродинамические явления, возникающие при обтекании ротора ветровым потоком, и влияние различных элементов конструкции на эффективность отбора и преобразования ротором энергии ветра, что приводит к отличию расчетных аэродинамических и энергетических характеристик ротора от фактических величин. Поэтому на этапе проектирования ветроустановки для проверки и корректировки результатов расчетов проводят физическое моделирование работы спроектированной конструкции на маломасштабных моделях в аэродинамических трубах. Из-за низкого числа Re маломасштабных моделей не выполняется условие динамического подобия, в результате чего их коэффициент мощности всегда меньше, чем у полноразмерного Н-ротора. Важной задачей при определении аэродинамики ротора Дарье является корректировка экспериментального значения коэффициента мощности, полученного при физическом моделировании маломасштабной модели, которая учитывает различие характеристик течения, определяемых различием числа Re модели и полноразмерного ротора. В настоящей работе представлены экспериментальные и расчетные значения коэффициента мощности физических моделей различного масштаба и полноразмерного ротора Дарье. По результатам проведенного анализа этих данных разработана методика, в которой применяют корректировку расчетного коэффициента мощности полноразмерного ротора Дарье с помощью коэффициента потерь мощности, представляющего собой отношение расчетного и экспериментального значений коэффициента мощности маломасштабной модели и являющегося функцией числа Re . В связи с тем, что в современной ветроэнергетике преимущественное коммерческое применение получили Н-роторы Дарье, в данной работе рассматривается именно эта модификация. Однако, полученные результаты могут использоваться и для других модификаций ротора Дарье, например, Ф-ротора или V-ротора.

Ключевые слова: ротор Дарье, математическая модель, физическая модель, коэффициент мощности, число Рейнольдса.

Застосовувані для інженерних розрахунків ротора Дар'є вертикально-осьових вітроустановок математичні моделі в принципі не можуть враховувати всі аеродинамічні явища, що виникають при обтіканні ротора вітровим потоком, і вплив різноманітних елементів конструкції на ефективність відбору та перетворення ротором енергії вітру, що призводить до відмінності розрахункових аеродинамічних і енергетичних характеристик ротора від фактичних значень цих величин. Тому на етапі проектування вітроустановки для перевірки і коригування результатів розрахунків проводять фізичне моделювання роботи спроектованої конструкції на маломасштабних моделях в аеродинамічних трубах. Через низькі значення числа Re маломасштабних моделей не виконується умова динамічної подоби, внаслідок чого їх коефіцієнт потужності завжди менше, ніж у повнорозмірного Н-ротора. Важливим завданням при визначенні аеродинаміки ротора Дар'є є коригування експериментального значення коефіцієнта потужності, отриманого при фізичному моделюванні маломасштабної моделі, яке враховує відмінність характеристик течії, що визначаються різницею чисел Re моделі і повнорозмірного ротора. У даній роботі представлено експериментальні та розрахункові значення коефіцієнта потужності фізичних моделей різного масштабу і повнорозмірного ротора Дар'є. За результатами проведеного аналізу цих даних розроблено методику, в якій застосовується коригування

розрахункового коефіцієнта потужності повнорозмірного ротора Дар'є за допомогою коефіцієнта втрат потужності, що представляє собою відношення розрахункового та експериментального значень коефіцієнта потужності маломасштабної моделі і є функцією числа Рейнольдса Re . У зв'язку з тим, що в сучасній вітроенергетиці переважне комерційне застосування отримали Н-ротори Дар'є, у даній роботі розглядається саме ця модифікація. Однак, отримані результати можуть використовуватися і для інших модифікацій ротора Дар'є, наприклад, Φ -ротора або V-ротора.

Ключові слова: ротор Дар'є, математична модель, фізична модель, коефіцієнт потужності, число Рейнольдса.

Mathematical models to engineering calculations of a VAWT Darrieus rotor basically cannot consider all aerodynamic phenomena on the rotor and influence of various structural elements on efficiency of extract and transformation of the wind power. As a result the designed aerodynamic and power characteristics of a rotor are differ from actual ones. Therefore at a design of the VAWT for verification and clarification of the calculation results the physical modelling of the small-scale models aerodynamics in the wind tunnels are spend. However, because of low number Re of small-scale models, the condition of dynamic similarity is not satisfied, therefore their power coefficient always is less, than at a full-size H-rotor. Therefore the important problem at the decision of aerodynamics of a Darrieus rotor is clarification of the experimental value of the small-scale model power coefficient considers distinction of characteristics of the current defined by distinction of number Re of model and the full-size rotor. In the present work experimental and computational values of the physical models power coefficient of the various scale and a full-size rotor are presented. By results of the spent analysis of these data the technique applying clarification of the computational power factor of the full-size Darrieus rotor by means of the losses factor of the capacity. The losses factor is the relation computational and experimental values of the small-scale model power coefficient and number Re function. Because in modern wind power primary commercial application was get by Darrieus H-rotors, in the given work this is considered. However, the received results can be used and for other modifications of the Darrieus rotor, for example, the Φ -rotor or V-rotor.

Keywords: Darrieus rotor, mathematical model, physical model, power coefficient, Reynolds's number.

Введение. В настоящее время для инженерных расчетов роторов Дарье вертикально-осевых ветроустановок на этапе предварительного проектирования в основном применяются нетрудоемкие импульсные модели, поскольку современные методы вычислительной гидродинамики, являясь наиболее мощным математическим инструментом исследования аэродинамики роторов Дарье, требуют значительного расчетного времени. Математические модели в силу тех или иных допущений не могут учитывать все аэродинамические явления, возникающие при обтекании ротора ветровым потоком, и влияние всех элементов конструкции на эффективность отбора и преобразования ротором энергии ветра. Поэтому расчетные аэродинамические и энергетические характеристики Н-ротора могут значительно отличаться от фактических величин. Для проверки и корректировки результатов расчетов проводят физическое моделирование работы спроектированного полноразмерного ротора на маломасштабных моделях в аэродинамических трубах. Однако, из-за низкого числа Re маломасштабных моделей не выполняется условие их динамического подобия, в результате чего их коэффициент мощности всегда меньше, чем у полноразмерного Н-ротора. Важной задачей аэродинамики роторов Дарье является корректировка коэффициента мощности маломасштабных физических моделей, учитывающая различие характеристик течения (чисел Re) моделей, для получения достоверных значений коэффициента мощности полноразмерного ротора. В настоящей работе по результатам исследования расчетных и экспериментальных значений коэффициента мощности маломасштабных физических моделей и полноразмерного ротора Дарье как функции числа Re потока на лопасти, разработана методика корректировки

коэффициента мощности полноразмерного ротора Дарье, рассчитанного по импульсной модели с одним активным диском и одной трубкой тока.

Подобие течений в окрестности Н-ротора. При физическом моделировании Н-ротора Дарье на маломасштабных моделях в аэродинамических трубах применяется теория подобия обтекания ротора потоком жидкости, которая определяет условия и критерии подобия режимов течения жидкости в окрестности модели и полноразмерного ротора. Два физических процесса обтекания потоком жидкости маломасштабной модели и полноразмерного изделия будут подобными, если по известным характеристикам одного из них можно получить характеристики другого, путем перерасчета по коэффициентам пропорциональности. Тем самым теория подобия позволяет переносить на полноразмерные объекты результаты, полученные на моделях. Поэтому при разработке новых изделий в различных областях техники (самолетостроение, автомобилестроение, градостроение, ветроэнергетика и др.) физическое моделирование аэродинамики применяется очень широко. Например, при создании сверхзвукового самолета «Конкорд» в аэродинамических трубах были проведены испытания моделей различных масштабов – 1:60, 1:30, 1:8 [1], а при разработке вертикально-осевой ветроустановки ВЕСТА-420 мощностью 420 кВт характеристики Н-ротора Дарье исследовались в гидроканале на модели масштаба 1:120 и в аэродинамических трубах на моделях масштабов 1:27, 1:13 и 1:6.

Две системы считаются механически подобными, если в сходственных (геометрически подобных) точках этих систем и в соответственные моменты времени, все физические параметры явлений, происходящих в этих системах, будут пропорциональны, то есть будет выполняться геометрическое (пропорциональность сходственных геометрических элементов и равенство сходственных углов), кинематическое (параллельность и пропорциональность скоростей движущихся масс) и динамическое (пропорциональность действующих сил и соответствие уравнений движения с одинаковыми начальными и граничными условиями) подобие этих систем. При этом, пропорциональность физических параметров двух систем, даже при сильно отличающихся значениях, определяется равенством относительных безразмерных параметров или критериев подобия. Таким образом, теория подобия дает возможность обобщить результаты экспериментальных исследований маломасштабных моделей и по ним определить характеристики полноразмерной ветроустановки.

Н-ротор Дарье представляет собой систему вертикальных лопастей аэродинамического профиля, установленных на траверсах и вращающихся вокруг вертикальной оси. При вращении лопасти ротора образуют ометаемую цилиндрическую поверхность. При прохождении через ометаемую поверхность Н-ротора, набегающий поток дважды пересекается с траекторией лопастей: на наветренном и подветренном участках. При этом, в результате индукции скорость потока на наветренном и подветренном участках Н-ротора будет отличаться. Вихревые следы лопастей, образовавшиеся на наветренной части ротора, перемещаются вместе с потоком внутри Н-ротора и пересекаются с лопастями на подветренной части ротора. Картина обтекания Н-ротора зависит как от его геометрических параметров, так и от скорости набегающего потока и скорости вращения ротора. Вращающий момент Н-ротора создает тангенциальная составляющая подъемной силы, возникающая на лопастях аэродинамического профиля. Изменение положения лопасти относительно вектора скорости набегающего потока при ее движении по круговой траектории приводит к

циклическому изменению локальной скорости и угла атаки набегающего на лопасть Н-ротора потока.

Для упрощения схему обтекания потоком Н-ротора Дарье можно рассматривать как комбинацию течений в масштабе ротора и в масштабе лопасти ротора. Полное аэродинамическое подобие обтекания Н-ротора очень сложно воспроизвести, а предлагаемая разбивка на два отдельных процесса позволяет воспользоваться частичным подобием каждого из процессов в отдельности, путем обеспечения пропорциональности их основных параметров и равенства критериев подобия. При этом достаточно рассмотреть не все параметры и критерии подобия, а только те, которые являются основными в процессе обтекания отдельно для ротора и для лопасти. Для определения таких параметров и критериев подобия удобно использовать математические выражения характеристик, исследование которых является основной задачей математического и физического моделирования аэродинамики Н-ротора. В масштабе ротора основной энергетической характеристикой является мощность ротора, а в масштабе лопасти – это возникающая на профилированной лопасти тангенциальная составляющая подъемной силы, которая образует вращающий момент ротора.

Условия подобия течений в масштабе ротора. Геометрическое подобие модели и полноразмерного ротора заключается в обеспечении их одинаковой конфигурации (количества и формы лопастей, формы траверс и узлов крепления лопасти к траверсе), равенства коэффициентов пропорциональности длин лопастей и диаметров их вращения, а также равенства коэффициентов заполнения ротора, которые в настоящей работе определяются выражением

$$\sigma = \frac{nc}{2R}, \quad (1)$$

где n – число лопастей Н-ротора, c – длина хорды лопасти, R – радиус Н-ротора.

Кинематическое подобие модели и полноразмерного Н-ротора обеспечивается пропорциональностью величины и параллельностью направления скорости набегающего потока, а также пропорциональностью величин их скорости вращения. В ветроэнергетике пользуются безразмерным комбинированным параметром, который одновременно учитывает и скорость набегающего потока, и скорость вращения ротора. Таким безразмерным параметром относительной скорости вращения ротора является коэффициент быстроходности λ , определяющий отношение линейной скорости ротора ωR к скорости набегающего на ротор потока V_0

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость ротора.

Параллельность векторов скорости набегающего потока обеспечивается перпендикулярностью вектора скорости набегающего потока к оси вращения модели и Н-ротора.

Условия подобия течений в масштабе лопасти. Аэродинамическое подобие обтекания модели и полноразмерного Н-ротора в масштабе лопасти достигается выполнением геометрического подобия лопастей (пропорциональности размеров и формы лопастей), кинематического подобия лопастей (пропорциональности

величин локальної шкорооти набегающего на лопать модели и ротора потока и параллельности этих векторов, которая обеспечивается равенством углов атаки во всех азимутальных положениях лопастей) и динамического подобия лопастей (равенство сил вязкости, тормозящих движение жидкости в окрестности обтекаемой лопасти).

Геометрическое подобие в масштабе лопасти модели и полноразмерного Н-ротора в нашем случае обеспечивается равенством коэффициентов пропорциональности длин и хорд лопастей, а также одним аэродинамическим профилем поперечного сечения лопасти, одинаковой формой лопастей в плане, одинаковым положением точек установки лопасти на хорде и одинаковыми углами установки лопасти. Точкой установки лопасти называется точка касания или пересечения хорды лопасти с окружностью ее вращения. Положение точки установки лопасти определяется отношением ее координаты от передней кромки лопасти к длине хорды. Углом установки лопасти называется угол между хордой лопасти и касательной к окружности вращения лопасти.

Для определения критериев кинематического подобия лопастей модели и полноразмерного Н-ротора рассмотрим локальную шкорооту набегающего на лопать потока и угол атаки лопасти. Величина локальной шкорооты набегающего на лопать потока W складывается из шкорооты набегающего потока жидкости V_0 на Н-роторе и линейной шкорооты вращения лопасти ωR , и определяется уравнением:

$$W = V_{\text{инд}} \sqrt{\sin^2 \theta + (\lambda + \cos \theta)^2}, \quad (3)$$

где $V_{\text{инд}}$ – индуцированная шкороота потока на Н-роторе, θ – азимутальный угол положения лопасти на окружности вращения (начало отсчета находится в точке, где вектор линейной шкорооты лопасти направлен строго навстречу вектору шкорооты набегающего потока).

Из уравнения (3) следует, что локальная шкороота набегающего на лопать потока W маломасштабной модели, которая находится в азимутальном положении на окружности вращения определяемом углом θ и движется с коэффициентом быстроходности λ , будет пропорциональной локальной шкорооте набегающего потока жидкости на лопать полноразмерного ротора, находящейся в том же азимутальном положении и вращающейся с тем же коэффициентом быстроходности.

Угол атаки лопасти α , являющийся углом между направлением локальной шкорооты потока W , набегающего на лопать, и хордой профиля поперечного сечения лопасти c , определяется уравнением

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}\right). \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что углы атаки зависят только от азимутального угла θ и коэффициента быстроходности ротора λ . Поэтому при одинаковом положении лопасти и одной и той же быстроходности ротора углы атаки модели и полноразмерного Н-ротора будут равными. Таким образом, при одном и том же коэффициенте локальной быстроходности модели и полноразмерного Н-ротора, для расположенных в одинаковом азимутальном положении лопастей обеспечивается

пропорциональность и параллельность векторов локальной скорости набегающих потоков жидкости, что говорит об их кинематическом подобии.

Условием динамического подобия лопастей модели и полноразмерного Н-ротора является равенство сил вязкости, которые тормозят относительное движение потока и лопасти. Критерием динамического подобия в нашем случае является число Рейнольдса – одна из основных характеристик течения вязкой жидкости, которая представляет собой отношение сил инерции и сил трения (вязкости) потока жидкости

$$Re = \frac{Wc}{\nu}, \quad (5)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Анализ условий подобия течений в окрестности модели и Н-ротора. Общие условия аэродинамического подобия маломасштабной модели и полноразмерного Н-ротора получаем объединением условий подобия в масштабе ротора и масштабе лопасти.

Условия геометрического подобия:

- одинаковая конфигурация Н-ротора (число лопастей, форма траверс и узлов крепления лопасти к траверсе);
- одинаковая форма лопастей в плане;
- одинаковое положение точек установки и равенство углов установки лопастей;
- равенство коэффициентов пропорциональности длин и хорд лопастей, а также диаметров их вращения;
- равенство коэффициентов заполнения ротора;
- одинаковый профиль поперечного сечения лопастей.

Условия кинематического подобия:

- равенство коэффициентов быстроходности;
- перпендикулярность вектора скорости набегающего потока к оси вращения Н-ротора.

Условие динамического подобия:

- равенство числа Re .

Анализ условий аэродинамического подобия приводит к нескольким выводам. Во-первых, обязательным требованием при физическом моделировании аэродинамики любого объекта, в том числе и Н-ротора, является геометрическое подобие его внешней формы и основных размеров – как в масштабе ротора, так и в масштабе лопасти. Во-вторых, для Н-ротора, как устройства, преобразовывающего энергию ветра, обязательными критериями подобия при моделировании в масштабе ротора являются коэффициент быстроходности λ и коэффициент заполнения σ . В-третьих, из выражения (5) для равенства критерия динамического подобия – числа Re , необходимо соблюдение определенных соотношений параметров маломасштабной модели и полноразмерного Н-ротора. Если размеры модели, а значит и хорда лопасти в k раз меньше, чем размеры и хорда лопасти полноразмерного Н-ротора, то для обеспечения равенства числа Re модели и Н-ротора, необходимо либо увеличить в k раз местную скорость набегающего на лопасть модели потока жидкости, либо поместить модель в поток жидкости с коэффициентом кинематической вязкости в k раз меньше, чем у воздушного ветрового потока.

Соблюдение равенства значений числа Re при физическом моделировании маломасштабных моделей в гидравлических и аэродинамических трубах и при натурном моделировании полноразмерного Н-ротора в условиях природного ветрового потока можно достичь увеличением локальной скорости потока, набегающего на модель. При увеличении в k раз скорости набегающего на лопасть модели потока, для сохранения величины коэффициента быстроходности модели (уравнение 2), линейную (или угловую) скорость лопасти модели также нужно увеличить в k раз. Однако увеличение скорости набегающего воздушного потока в аэродинамических трубах ограничивается несколькими причинами. В аэродинамических трубах при увеличении скорости потока свыше 100 м/с, возникает сжимаемость воздушной среды и нарушается подобие течения по числу Маха. При этом, для увеличения скорости воздушного потока необходимо увеличивать мощность привода аэродинамической трубы пропорционально третьей степени скорости потока. Кроме этого, увеличение скорости вращения лопасти не всегда возможно по условиям прочности модели. В гидродинамических трубах диапазон скоростей потока ограничен, поэтому увеличение скорости потока до необходимой величины часто технически невозможно.

Другим способом соблюдения равенства значений числа Re маломасштабных моделей и полноразмерного Н-ротора является применение жидкости с более низким коэффициентом кинематической вязкости жидкости. Для этого применяют гидродинамические трубы с потоком воды, коэффициент кинематической вязкости которой в 15 раз меньше, чем у воздуха. В аэродинамических трубах с повышенным давлением коэффициент кинематической вязкости воздуха уменьшают за счет использования сжатого воздуха. Однако данный способ менее эффективен, так как в гидравлических трубах он позволяет получить только одно фиксированное изменение коэффициента кинематической вязкости, а для изменений кинематической вязкости воздушного потока в широких пределах необходима специальная аэродинамическая труба.

Таким образом, при равенстве коэффициентов быстроходности практически нельзя обеспечить выполнение критерия динамического подобия течения, а именно, равенство числа Re маломасштабных моделей и полноразмерного Н-ротора. Это приводит к тому, что измеренные в гидравлических и аэродинамических трубах аэродинамические и энергетические характеристики маломасштабных моделей имеют значения намного ниже натурных результатов полноразмерного Н-ротора. Например, при уменьшении числа Re от $5 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^4$ коэффициент подъемной силы C_L симметричных профилей NACA, применяемых для лопастей Н-ротора, в диапазоне углов атаки до статического срыва потока, снижается в 8–9 раз, а коэффициент силы сопротивления C_D – увеличивается в 2–3 раза (рис. 1), в результате чего с уменьшением размеров Н-ротора его коэффициент мощности снижается. Например, при уменьшении числа Re от $5 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^4$ коэффициент подъемной силы C_L симметричных профилей NACA, применяемых для лопастей Н-ротора, в диапазоне углов атаки до статического срыва потока, снижается в 8–9 раз, а коэффициент силы сопротивления C_D – увеличивается в 2–3 раза (рис. 1), в результате чего с уменьшением размеров Н-ротора его коэффициент мощности снижается.

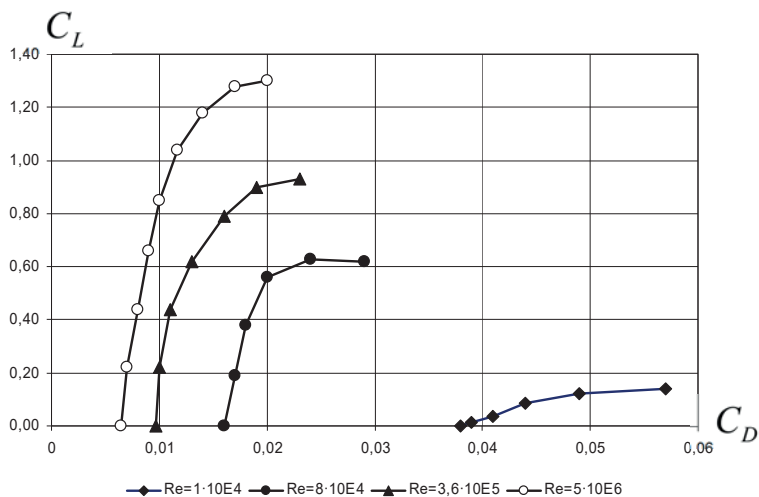


Рис. 1. Поляры профиля NACA 0018 для разных чисел Re [4]

Разработка методики определения коэффициента мощности полноразмерных роторов Дарье по результатам испытаний их маломасштабных моделей. Базовой идеей предлагаемой методики является вычисление расчетного коэффициента мощности маломасштабной модели и измерение фактического коэффициента мощности физической маломасштабной модели Н-ротора, определение потерь мощности физической модели относительно расчетной мощности математической модели и учет этих потерь для реальной конструкции полноразмерного ротора через эмпирический коэффициент потерь мощности.

Таблица 1.
Основные характеристики маломасштабных физических моделей и потока

Критерии подобия	Аэродинамическая модель I	Аэродинамическая модель II	Аэродинамическая модель III	Аэродинамическая модель IV
Диаметр ротора, D	0,92 м	0,92 м	4,5 м	12,5 м
Длина лопасти, H	0,98 м	0,98 м	4,5 м	
Хорда лопасти, c	0,12 м	0,12 м	0,416 м	1,7 м
Профиль лопасти	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0018
Количество лопастей	2	3	2	3
Заполнение, σ	0,26	0,39	0,185	0,277
Скорость потока – скорость лопасти	6,9 м/с – 375 об/мин 12,0 м/с – 500 об/мин 18,0 м/с – 525 об/мин	6,9 м/с – 375 об/мин 12,0 м/с – 500 об/мин 18,0 м/с – 525 об/мин	7,0 м/с 9,0 м/с 11,0 м/с 13,0 м/с	11,0 м/с 13,0 м/с 15,0 м/с

Быстроходность, λ	max 3,53	max 3,53	max 3,0	max 2,5
Диапазон чисел Re	$0,56 \times 10^5 - 3,4 \times 10^5$	$0,56 \times 10^5 - 3,4 \times 10^5$	$5,8 \times 10^5 - 1,1 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6 - 1,5 \times 10^6$
Кинематическая вязкость воздуха, ν	$1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	$1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	$1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	$1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$

Алгоритм построения предлагаемой методики состоит из нескольких последовательных этапов.

На этапе I проводят испытание в аэродинамических трубах физических моделей Н-ротора разных размеров, выполненных с условием соблюдения геометрического подобия (конфигурация ротора, форма лопастей, точка и угол установки лопастей, длина и хорда лопастей, заполнение ротора, профиль лопастей, диаметр ротора) и кинематического подобия (быстроходность, направление вектора скорости потока) полномасштабному ротору, с измерением фактических экспериментальных значений коэффициента мощности $C_{P_{\text{экс}}}$ этих моделей. Основные характеристики моделей и режимов обтекания моделей при испытаниях показаны в табл. 1.

Испытания проводились в ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского. Модели I и II испытывались в дозвуковой вертикальной аэродинамической трубе Т-105 непрерывного действия. Открытая рабочая часть трубы длиной 7,5 м имеет диаметр 4,5 м. Скорость потока воздуха до 40 м/с обеспечивает число Re (на длине 1 м) до $2,4 \times 10^6$ и создается вентилятором мощностью 450 кВт. Модели III и IV испытывались в дозвуковой горизонтальной аэродинамической трубе Т-101 непрерывного действия. Открытая рабочая часть трубы длиной 24 м выполнена в виде эллипса 24×14 м. Скорость потока воздуха до 52 м/с обеспечивает число Re (на длине 1 м) до $3,6 \times 10^6$ и создается двумя вентиляторами суммарной мощностью 30 МВт.

Полученные экспериментальные значения коэффициента мощности $C_{P_{\text{экс}}}$ моделей I, II, III и IV сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет коэффициента потерь мощности Н-ротора маломасштабных моделей

Модель	Среднее число Re	Заполнение	Экспериментальный коэффициент мощности, $C_{P_{\text{экс}}}$	Расчетный коэффициент мощности, $C_{P_{\text{расч}}}$	Коэффициент потерь мощности, k_P
I	$2,0 \times 10^5$	0,26	0,22	0,387	1,759
II	$2,0 \times 10^5$	0,39	0,19	0,334	1,760
III	$8,5 \times 10^5$	0,185	0,41	0,456	1,114
IV	$1,3 \times 10^6$	0,277	0,41	0,423	1,031

На этапе 2 выполняют вычисление расчетных значений коэффициента мощности $C_{P_{\text{расч}}}$ маломасштабных моделей Н-ротора, как функции основных безразмерных проектных параметров ротора Дарье: коэффициента заполнения σ , коэффициента быстроходности λ , а также аэродинамических коэффициентов подъемной силы C_L и сопротивления C_D профиля лопасти ротора для чисел Re лопасти, реализуемых при испытании физических моделей.

Для определения расчетного коэффициента мощности моделей и Н-ротора, наиболее рациональной является импульсная модель с одним активным диском и одной трубкой тока, описанная в работах [5], [6]. Это связано с тем, что, во-первых, из всех устройств, использующих подъемную силу профилированных лопастей, Н-ротор Дарье имеет самую низкую быстроходность, что позволяет применять модель, основанную на импульсной теории, так как коэффициент индукции ротора Дарье не превышает предельной величины $a = 0,4$, при которой еще выполняются допущения о потенциальном течении идеальной жидкости. Во-вторых, при расчете коэффициента мощности как функции коэффициентов быстроходности и заполнения ротора Дарье и характеристик профиля лопасти, более сложные и трудоемкие вихревые модели и модели вычислительной гидродинамики, по точности результатов для целей проектирования практически не имеют преимущества перед импульсными моделями. В-третьих, импульсная модель с одной трубкой тока и одним активным диском позволяет произвести расчет со значительно меньшими затратами времени, чем другие модели.

В соответствии с импульсной моделью с одной трубкой тока и одним активным диском, коэффициент мощности Н-ротора определяется выражением

$$C_{P_{расч}} = \frac{\lambda_{инд} \sigma \bar{V}_{инд}^3}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\sin^2 \theta + (\lambda_{инд} + \cos \theta)^2] (C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha) d\theta, \quad (6)$$

где $\lambda_{инд}$ – локальный коэффициент быстроходности Н-ротора, σ – коэффициент заполнения Н-ротора, $\bar{V}_{инд}$ – относительная индуцированная скорость потока на Н-роторе, C_L и C_D – коэффициенты подъемной силы и сопротивления профиля лопасти, θ – азимутальный угол расчетных положений лопасти на окружности вращения, α – угол атаки лопасти относительно локального потока.

Необходимо отметить, что однодисковая однотрубчатая импульсная модель несколько переоценивает прогнозируемую величину коэффициента мощности по сравнению с экспериментальными данными, полученными на моделях различного масштаба [2, 3]. Это связано с такими особенностями модели, как применение для моделирования Н-ротора одного активного диска и, соответственно одной величины индуцированной скорости потока для наветренной и подветренной половин реального ротора, пренебрежением концевыми эффектами лопастей конечной длины, пренебрежением влияния динамического срыва потока и другими трехмерными эффектами, пренебрежением виртуальным изгибом локального потока, набегающего на лопасть.

На этапе 3 определяют относительные потери мощности физических моделей Н-ротора относительно расчетной мощности их математической модели. Сначала по данным табл. 2 строят график зависимости расчетного и экспериментального коэффициента мощности маломасштабных моделей от числа Рейнольдса на их лопасти, показанный на рис. 2. Расстояние между кривыми $C_{P_{расч}}$ и $C_{P_{эксп}}$ определяет потери мощности физической маломасштабной модели относительно величины, рассчитанной с помощью импульсной однодисковой однотрубчатой модели в зависимости от числа Рейнольдса лопасти модели Н-ротора. Как

отмечалось выше, данные потери мощности связаны с отличием реального трехмерного потока от применяемой двумерной математической модели и с нестационарностью аэродинамики Н-ротора.

Потом определяют коэффициент потерь мощности, который представляет собой отношение расчетного коэффициента мощности модели $C_{P_{расч}}$ к экспериментальному коэффициенту мощности модели $C_{P_{эксп}}$:

$$k_p = \frac{C_{P_{расч}}}{C_{P_{эксп}}} . \tag{7}$$

Полученные расчетные значения коэффициента потери мощности k_p моделей I, II, III и IV сведены в табл. 2.

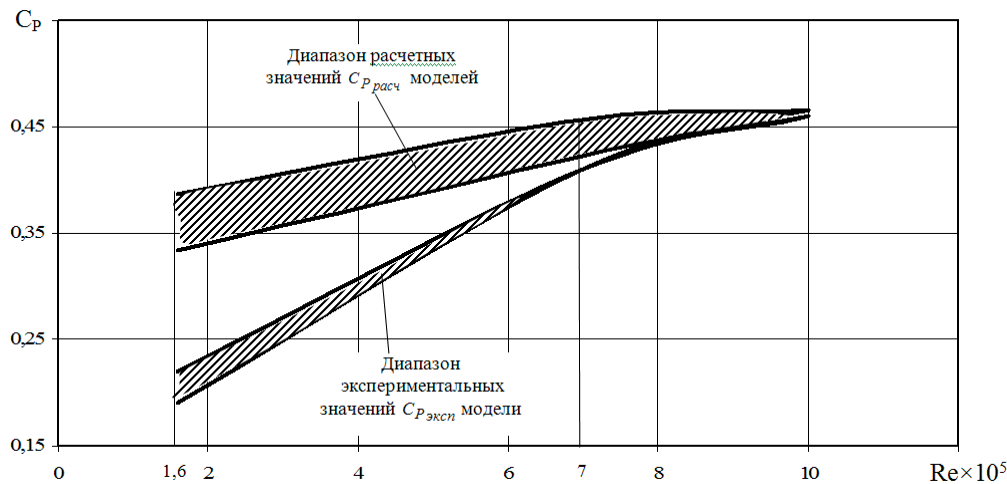


Рис. 2. Зависимость расчетного и экспериментального коэффициента мощности маломасштабной модели от числа Рейнольдса

На этапе 4 определяют экспериментальную величину коэффициента мощности $C_{P_{эксп}}$ полноразмерного Н-ротора. В качестве полноразмерного ротора был принят Н-ротор ветроустановки ВЕСТА 0020 мощностью 20 кВт с диаметром 7,2 м, длиной лопасти 5,0 м, профилем лопасти НАСА 0018 с хордой 0,7 м, двумя лопастями и коэффициентом заполнения 0,195, который испытывался в аэродинамической трубе Т-101 с максимальной частотой вращения 95 об/мин при скорости потока 12,0 м/с, что обеспечивает быстроходность на уровне 3,0.

Полученный экспериментальный коэффициент мощности $C_{P_{эксп}}$ полноразмерного Н-ротора показан в табл. 3.

Таблица 3

Расчет коэффициента потерь мощности Н-ротора маломасштабных моделей

Полноразмерный Н-ротор	Среднее число Re	Заполнение	Экспериментальный коэффициент мощности, $C_{P_{эксп}}$	Расчетный коэффициент мощности, $C_{P_{расч}}$	Коэффициент потерь мощности, k_p

Ветроустановка VESTA 0020	$1,0 \times 10^6$	0,195	0,46	0,465	$\sim 1,0$
------------------------------	-------------------	-------	------	-------	------------

На этапе 5 по формуле (6) вычисляют расчетное значение коэффициента мощности $C_{P_{расч\,p}}$ полноразмерного Н-ротора ветроустановки VESTA 0020 мощностью 20 кВт, как функции основных безразмерных проектных параметров ротора Дарье: коэффициента заполнения σ , коэффициента быстроходности λ , а также аэродинамических коэффициентов подъемной силы C_L и сопротивления C_D профиля лопасти ротора для чисел Re лопасти, реализуемых при испытании.

Полученное расчетное значение коэффициента мощности Н-ротора $C_{P_{расч\,p}}$ показано в табл. 3.

На этапе 6 по формуле (7) определяют относительные потери мощности полноразмерного Н-ротора относительно расчетной мощности его математической модели в виде коэффициента потерь мощности k_P .

Полученное расчетное значения коэффициента потери мощности ротора показано в табл. 3.

На этапе 7 по данным таблиц 2 и 3 строим график зависимости коэффициента потерь мощности от числа Re . Данная кривая хорошо аппроксимируется следующей функцией:

$$k_P = \begin{cases} 8,86 \cdot 10^{-13} \cdot Re^2 - 1,886 \cdot 10^{-6} \cdot Re + 2,0001, & \text{если } Re \text{ меньше } 1 \cdot 10^6 \\ 1,0, & \text{если } Re \text{ больше } 1 \cdot 10^6 \end{cases} \quad (8)$$

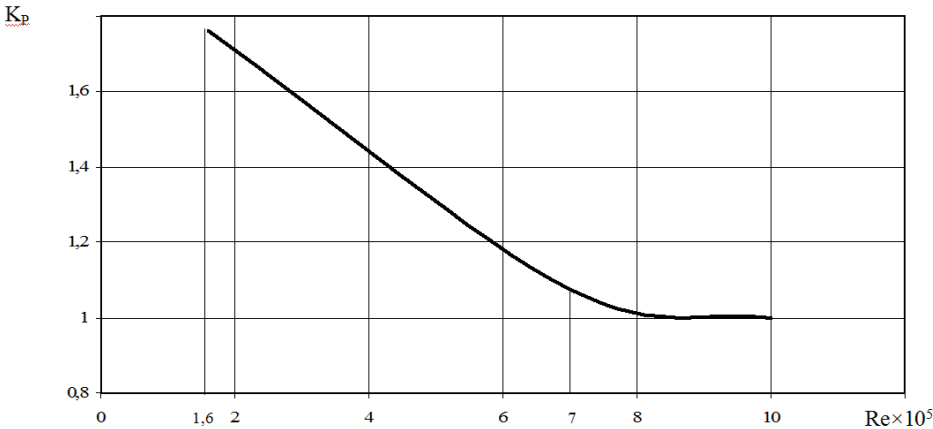


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь мощности от числа Рейнольдса

На этапе 8 прогнозируемый коэффициент мощности полномасштабного Н-ротора определяется по формуле:

$$C_P = \frac{1}{k_P} C_{P_{расч\,p}}. \quad (9)$$

Выводы. В результате представленных исследований получены соотношения, позволяющие по коэффициенту мощности физической маломасштабной модели Н-ротора любых размеров, определенному при испытании модели в аэродинамической трубе при низких числах Re , прогнозировать коэффициент мощности полноразмерного ротора, работающего при числах Re , превышающих $1 \cdot 10^6$.

Библіографічні посилання

1. Мхитарян, А. М. Аэродинамика [Текст] / А. М. Мхитарян. – М.: Машиностроение, 1976. – 449с.
2. Danao, L. A. D. The Influence of Unsteady Wind on the Performance and Aerodynamics of Vertical Axis Wind Turbines [Текст] / L. A. D. Danao // PhD Thesis, University of Sheffield, 2012. – 219 p.
3. Paraschivoiu, I. Wind Turbine Design: with Emphasis on Darrieus Concept [Текст] / I. Paraschivoiu. – Politechnic International Press, 2002. – 2002. – P. 346–349.
4. Sheldahl, R. E. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180 degrees angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines [Текст] / R. E. Sheldahl, P. C. Klimas. – SAND80-2114, Sandia National Laboratories, 1981. – 118 p.
5. Templin, R. J. Performance Theory for the NRC Vertical Axis Wind Turbine [Текст] / R. J. Templin // Technical Report LTR-LA-160, National Research Council Canada, National Aeronautical Establishment Laboratory, 1974. – 17 p.
6. Wilson, R. E. Aerodynamic performance of wind turbine [Текст] / R. E. Wilson, R. B. S. Lissaman, S. N. Walker. – Washington, 1976. – 194 p.

Надійшла до редколегії 05.11.2019

UDK 533.6.011.35

R. I. Peka, E. V. Kravets
Oles Honchar Dnipro National University

DEPENDENCE OF THE PROFILE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS ON THE SURFACE HEATING AT SUBSONIC VELOCITY OF FLOWING AROUND

Показана актуальність задачі по совершенствованию современного воздушного транспорта. Проведен краткий обзор некоторых работ, посвященных теоретическим, экспериментальным и численным исследованиям влияния теплообмена на аэродинамические характеристики профиля крыла при его обтекании. Приведена математическая модель сопряженной задачи гидродинамики и теплообмена с учетом k - ϵ модели турбулентности. Выполнено двумерное моделирование дозвукового обтекания профиля NACA-23012 вязкой несжимаемой жидкостью методом конечных элементов с применением стандартной k - ϵ модели турбулентности в изотермической постановке, а также при нагреве (охлаждении) нижней (верхней) поверхностей профиля. В результате численного моделирования получены графические зависимости коэффициента подъемной силы от чисел Рейнольдса в диапазоне $Re = 10^4 \div 10^7$ для случаев изотермического обтекания, а также при последовательном нагреве верхней и нижней поверхностей, соответствующих разности температур 100 К. Для $Re = 10^4 \div 10^5$ приведены кривые аэродинамических коэффициентов профиля при одновременном нагреве верхней и охлаждении нижней поверхностей профиля по отношению к температуре потока «на бесконечности» для разности температур поверхностей профиля, лежащих в диапазоне $\Delta T = 0 \div 100$ К.