

УДК 621.311.245

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ВЕТРОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦИЛИНДРОВ

В.В. Кириллов, З.Д. Сейдакматова

Рассмотрены традиционные методы утилизации ветра при помощи неподвижных лопастей на ветроколесе и количества преобразованной энергии, равной $P = 1/3$ от его ометаемой площади, и ветроколесе с вращающимися цилиндрами (эффект Магнуса). Обоснована величина утилизируемой мощности в зависимости от площади. Отмечена необходимость углубленной проработки конструкции возобновляемого независимого источника энергии для привода вращения для эффективного использования ветродвигателей с использованием вращающихся цилиндров на ветроколесе.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка; эффект Магнуса; ветроколесо; вращающийся цилиндр; лопасть ветроколеса.

АЙЛАНЫП ЖАТКАН ЦИЛИНДРЛЕРДИН КӨТӨРҮҮ КҮЧҮ ТЕОРИЯСЫНЫН НЕГИЗИНДЕ ШАМАЛ ЖАБДУУЛАРЫН ТҮЗҮҮ МАСЕЛЕСИ

В.В. Кириллов, З.Д. Сейдакматова

Бул макалада шамал дөңгөлөгүндө кыймылсыз калактардын жардамы менен шамалды керекке жаратуунун салттуу методдору жана ал камтыган аймакта жана айланып турган цилиндрлери (Магнус эффекти) бар шамал дөңгөлөгүндө $P = 1/3$ барабар энергиянын саны каралды. Аянтына жараша кубаттуулук чоңдугу негизделди. Шамал дөңгөлөгүндө айланып турган цилиндрлерди пайдалануу менен шамал кыймылдаткычын натыйжалуу пайдаланууда айландырууну аракетке келтирүү үчүн энергиянын кайра жаралуучу булактарынын конструкциясын тереңдетип иштеп чыгуу зарылдыгы белгиленди.

Түйүндүү сөздөр: шамал энергетикалык жабдуулары; Магнус эффекти; шамал дөңгөлөгү; айланып турган цилиндр; шамал дөңгөлөгүнүн калагы.

TO THE ISSUE OF THE ESTABLISHMENT OF WIND TURBINES ON THE BASIS OF THE THEORY THE LIFT FORCE ROTATING CYLINDER

V.V. Kirillov, Z.D. Seydakmatova

The article considers the traditional methods of wind utilization with the help of non-movable blades on the wind wheel and the amount of converted energy equal to $P = 1/3$ of its swept area, and the wind wheel with rotating cylinders mounted on the wind wheel (Magnus effect) and justifies the value of the utilized power from the same area. For the effective use of wind turbines using rotating cylinders on the wind wheel, an in-depth study of a renewable independent energy source for the rotation drive is necessary.

Keywords: wind power plant; Magnus effect; wind wheel; rotating cylinder; wind wheel blade.

Наиболее распространённым и доступным источником энергии на Земле является энергия ветра. В мире энергия ветра используется для выработки электрической энергии. Однако в отдельных регионах КР использование энергии ветра затруднено по причине его малой скорости.

Препятствует развитию ветровой энергетики горных территорий и несовершенство существующих разработок по преобразованию малой скорости ветрового потока.

Для обеспечения устойчивой выработки энергии ветроэнергетическими установками

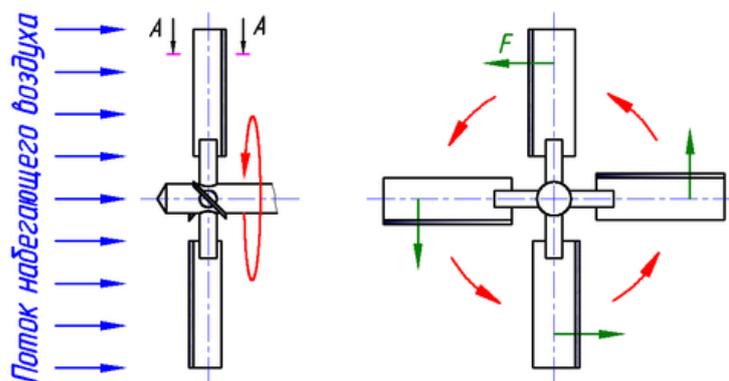


Рисунок 1 – Крыльчатое четырёхлопастное ветроколесо

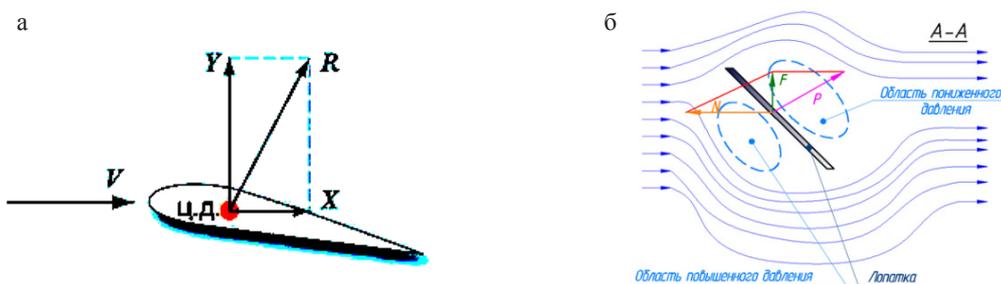


Рисунок 2 – Сечение крыла и аэродинамическое взаимодействие сил с набегающим ветропотоком V (а); картина распределения энергии, показывающая отбор мощности от набегающего ветропотока, равной $1/3$ (б)

(ВЭУ) с заданной площадью ветродвигателя, необходимо разработать такую конструкцию, в которой будет использован повышенный коэффициент отбора мощности от существующего ветропотока. Классические традиционные ВЭУ и их конструкции с различными профилями и конфигурацией практически обеспечивают максимум отбора энергии ветра как $C_{P_{\max}} = 0.35-0.4$, при том, что теоретический расчёт коэффициента отбора мощности предполагает $C_{P_{\text{идеаль}}} = 0.59$.

Действующие ветродвигатели с лопастными преобразователями используются для выработки электрической энергии в основном на равнинной местности и обладают большими размерами. Вместе с тем, известны многочисленные предложения (иногда даже реализованные) по использованию других видов рабочих схем движения, например, колебательного, парусного и цилиндрические.

Лопастная система ветродвигателя (ветроколесо) может иметь различное конструктивное исполнение. У современных ветродвигателей

лопастная система выполнена в виде жестких лопастей (рисунок 1) с крыловым профилем в поперечном сечении (иногда в этом случае используют термины “крыльчатые” формы Жуковского, или пропеллерные, ветродвигатели).

Число лопастей в ветродвигателе может быть различным – от одной лопасти до двадцатичетырёх и более. Число лопастей зависит от интенсивности ветропотока: в регионах с высокой скоростью ветропотока число лопастей минимально, т. е. одна-три; на территории с умеренным ветровым потенциалом используют многолопастные конструкции с числом от трёх до двадцати и более лопастей.

Принцип и схема, поясняющая традиционное взаимодействие воздушного потока с различными конфигурациями лопастей, в том числе с лопастями “профиля Жуковского”, показан на рисунке 2, а, б. Взаимодействие циркуляции бесконечного шнура, вызванного набегающим ветропотоком, со скоростью ветропотока обеспечивает отбор максимальной мощности: $P = 1/3$, и зависит от диаметра лопасти ветроустановки.

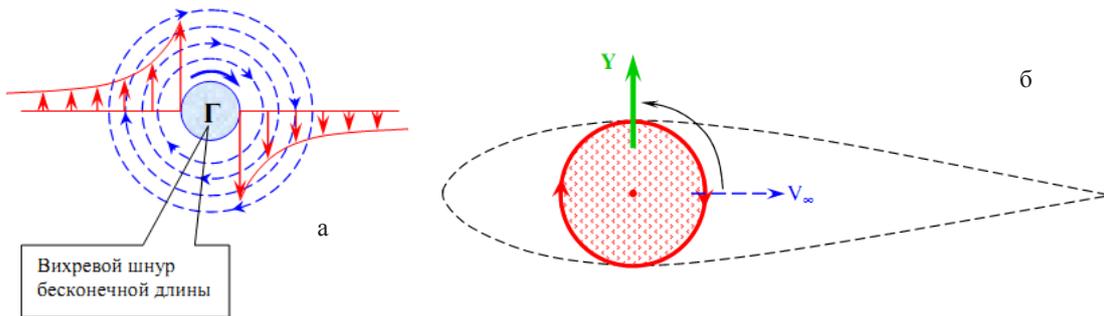


Рисунок 3 – Подъемная сила Жуковского с использованием вращающихся цилиндров:
 а – генератор вихревого шнура; б – совмещение цилиндра с профилем Жуковского

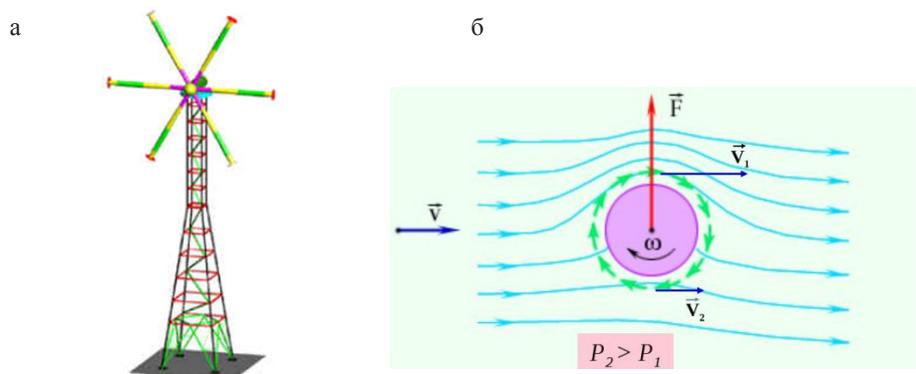


Рисунок 4 – Общий вид ВЭУ с цилиндрами (а);
 теоретические особенности ветродвигателя, использующего эффект вращения цилиндров (б)

К настоящему времени развитие конструкций ветроустановок с горизонтальной осью вращения практически исчерпано. Это обусловлено тем, что для получения большой мощности необходимо увеличивать ометаемую площадь, а значит, увеличивать размеры лопастей. Это, в свою очередь, ведёт к необходимости увеличения размеров опорной конструкции – башни, таким образом, стоимость ветроустановки возрастает в кубической зависимости. Кроме того, существующие в настоящее время разработки маломощных автономных конструкций не удовлетворяют потребителей по мощностным и массогабаритным параметрам, кроме того, широко используемые в мире лопастные ветрогенераторы показали неустойчивую работу при малых скоростях ветра.

Согласно классической теории бироторные ветроустановки достигают максимального отбора коэффициента мощности C_p при коэффициенте торможения $\alpha = 0,33$ или $1/3$ от диаметра ветро-

колёс ветродвигателя или сечения. Наибольшее же значение идеальной величины составляет $C_p = 0,64$. В результате математических преобразований получим мощность ветроустановки, работающей на основе вращающихся цилиндров:

$$P = P_0 \cdot 0,64. \quad (1)$$

Аналогичное решение было получено и профессором Твайделлом.

Таким образом, можно полагать, что теоретическая мощность БВЭУ любого типа лежит в пределах $1,185P_0 > P_{\text{БВЭУ}} > 0,64P_0$ при значениях коэффициента торможения $0,33^3 \approx 0,2$.

Ветроустановки с цилиндрическими преобразователями, использующими эффект Магнуса (рисунок 3), обладают определёнными преимуществами (по сравнению с лопастными), которые проявляются при низких, но наиболее часто повторяющихся скоростях ветра 2–6 м/с.

Известны успешно работающие системы (рисунок 4), в которых вместо лопастей используют вращающиеся цилиндры.

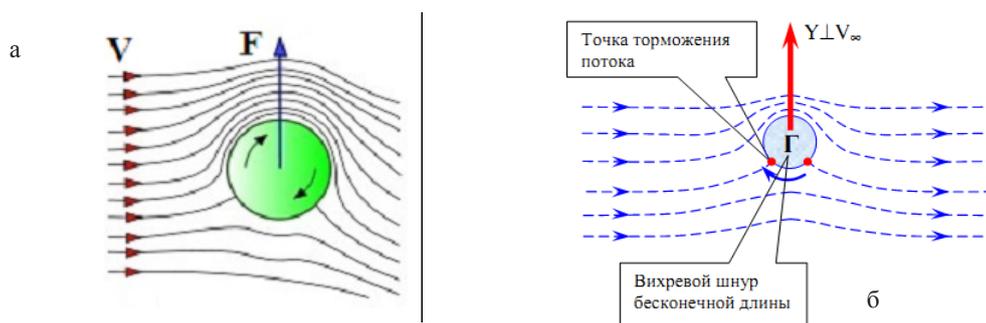


Рисунок 5 – Взаимодействие ветропотока с вращающимся цилиндром, помещённым в газовый поток (теория Жуковского) (а); направление подъёмной силы (б)

Ветроустановки с вращающимися цилиндрами обладают повышенной эффективностью, почти в два раза превышающей классические конструкции с аналогичной мощностью. Для сравнения мощностных параметров следует обратиться к рисункам 2, б и 3, б, где видно, что отбор мощности от ветропотока (рисунок 2, б) составляет $C_p = 1/3$, а на рисунках 4, б; 5, а – $C_p = 2/3$. Особенность этих систем заключается в дополнительном потреблении энергии на собственные нужды принудительного вращения привода цилиндров (рисунок 5).

Наличие недостатков, присущих ветроустановкам с горизонтальной осью вращения ветроколеса, использующих эффект Магнуса, в основном, объясняется следующими обстоятельствами. Требуется сторонняя энергия для вращения цилиндров, которая обеспечит независимое и в широком диапазоне регулируемое вращение, и сам процесс регулируемого вращения, который можно достичь двумя методами:

первый – использовать аккумуляционный подход и электропривод для обеспечения вращения цилиндров, что приводит к дополнительным потерям исходной вырабатываемой мощности;

второй – кинематический подход, т. е. придать вращение от действующей скорости ветропотока, что также снизит получение исходной мощности и дополнительно усложнит кинематическую схему привода цилиндров, следовательно, увеличит стоимость изделия и снизит надёжность эксплуатации.

В общем виде сила Магнуса Y выражается формулой:

$$Y = \rho \cdot V \tilde{A} L, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды; V – скорость набегающего потока, \tilde{A} – циркуляция, создаваемая вращением цилиндра; L – длина цилиндра.

Циркуляция для реального, отрывного обтекания описывается следующим образом:

$$\tilde{A} = K_A \left(2\pi R^2 \cdot \omega \right), \quad (3)$$

где K_A – коэффициент, учитывающий влияние отрыва потока (при безотрывном обтекании ≥ 1); R – радиус цилиндра; ω – частота вращения цилиндра.

При оптимальных условиях обтекания цилиндра энергия на порядок и более превосходит подъёмную силу лопасти Жуковского, что позволяет использовать ее для вращения ветроколеса. Силы сопротивления также играют существенную роль, определяя его быстроходность и затраты мощности на вращение цилиндров. Исследования, проведенные на предмет работоспособности ветроустановки, работающей на подъёмной силе Жуковского, показали достаточно весомые преимущества и несущественную разницу между теоретическими и экспериментальными результатами. Дальнейшие исследования будут продолжены на изготовленном экспериментальном образце установки (рисунок 6). Для глубоких экспериментов необходима аэродинамическая установка, позволяющая создавать регулируемый диапазон потока ветровой энергии.

Исследования работоспособности конструкции были проведены в естественных условиях при действующей скорости ветропотока, равной $V = 6,5_{\text{м/с}}$. В результате были определены необходимые параметры аэродинамического стенда. Актуальность создания аэродинамического



Рисунок 6 – Опытно-экспериментальный образец устройства, работающего на принципе вращающихся цилиндров



Рисунок 7 – Фрагмент узла вращающегося цилиндра с приводами подъемной силы Жуковского



Рисунок 8 – Тестирование опытного образца установки

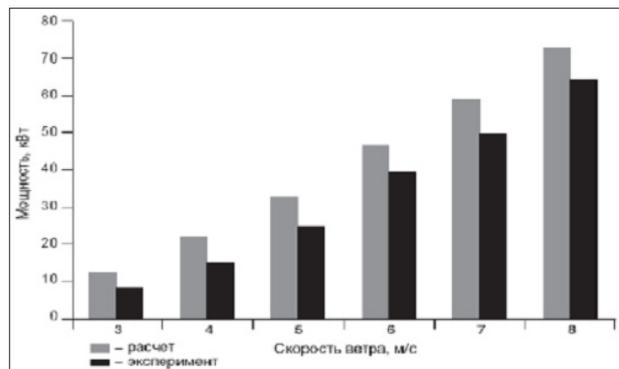


Рисунок 9 – Диаграмма результатов испытаний ВЭУ с ротором Магнуса

стенда заключается также в необходимости тестирования различных профилей при создании новых образцов ветроустановок и оптимизации узлов различной конструкции, к примеру, на рисунке 7 представлен один из вращающихся цилиндров.

При поперечном обтекании вращающегося цилиндра (рисунок 7) на него действуют подъемная сила, а также силы сопротивления поступательному движению и вращению. Наиболее значительной из них является сила Магнуса, которая направлена по нормали к набегающему потоку и к оси цилиндра. На рисунке 8 представлен экспериментальный образец установки, проходящей пробное тестирование в реальных условиях.

Следует отметить, что, с одной стороны, роторные установки такого типа обладают высокой эффективностью (рисунок 9), что подтверждается диаграммой экспериментальных исследований с различными по мощности и горизонтальным расположением оси вращения оси (в случае применения устройств, повышающих подъемную силу Магнуса). Они менее требовательны к направлению ветра, чем наиболее распространенные крыльчатые ветроустановки, требующие принудительного поиска ветропотока. С другой стороны, для этих ветроустановок необходима энергия для вращения цилиндров.

Исходя из выше изложенного будущее ветроустановок, использующих эффект Магнуса, будет зависеть от конструкторских разработок

с вращающимися цилиндрами, что напрямую связывает с эффективностью преобразования и использования энергии ветра.

Перечень использованной литературы

Васьков А.Г. Ветроэнергетика: учебное пособие / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев М.: Изд-во МЭИ, 2016. 384 с.

Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. М.: Сельхозиздат, 1948. С. 12, 273, 293, 489, 492–494, 543.

Основы аэродинамики и динамики полёта. Рига: Ин-т транспорта и связи, 2010. С. 105.

Шефтер Я.И. Использование энергии ветра / Я.И. Шефтер. М.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.

Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. М.: Энергоиздат, 1990. С. 195–239.

Дерюгина Г.В. Исследование факторов и математических моделей, влияющих на проектные показатели энергоэффективности ветро-дизельных комплексов / Г.В. Дерюгина, Н.Д. Карпов, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 8. С. 44–49.

Аккозиев И.А. Ветроэлектрическая станция в составе энергосистемы Кыргызстана / И.А. Аккозиев, Б.М. Максатов, Г.В. Дерюгина, Т.А. Шестопалова // Вестник КРСУ. 2018. Том 18. № 12. С. 24–28.

Кириллов В.В. Разработка автономной бироторной ветроэнергетической установки малой мощности: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Кириллов; научн. рук. д-р техн. наук. А.Дж. Обозов. Бишкек, 2004.