

К.Кусаиынов, С.Е.Сакипова, Н.Н.Омаров

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Мақалада айнымалы ағында цилиндрлік элементті желқозғалтқыштың қарқындылығын талдау қарастырылған. Айналмалы цилиндрлі желқозғалтқыш Магнус эффектісіне негізделген. Тімді параметрлерді алу үшін айналыстағы цилиндрлік элементтің және конус тәрізді лопастаның аэродинамикалық сипаттамасының есебі жүргізілді. Ағынның әр түрлі шарттарында Магнус күшінің және желқозғалтқышының қуатының есептеулері жасалды. Алынған нәтижелер келешекте желқозғалтқыштар жұмысын арттыруға мүмкіндік береді. Магнус эффектісіне негізделген желқозғалтқыштың сипаттамасы, ерекшелігі келтірілген. Бірдей шарттарда цилиндрлікпен салыстыра отырып, конус тәріздес айналмалы элементті қолданғанда көтеру күшінің артатыны анықталды.

In article are considered features of a wind turbine with rotating elements. Use wind turbine with rotating elements in an air stream provides occurrence of Magnus effect. For revealing optimum parameters calculation of aerodynamic characteristics of rotating cylindrical elements and blades in the form of the truncated cone is lead. There are calculation of influence of Magnus effect on aerodynamic characteristics and capacities of a wind turbine under various conditions of a flow. The received results allow to define possible ways of improvement of work of a wind turbine with Magnus effect. It is shown, that with other things being equal use of a rotating element in the form of the truncated cone leads to increase in elevating force in comparison with the cylinder.

В ветродвигателе с вращающимися цилиндрами используется эффект Магнуса, который заключается в появлении дополнительной подъемной силы (силы Магнуса) при вращении цилиндра в поперечном потоке. Аналогично подъемной силе эта сила может быть использована для вращения ветроколеса и при подборе оптимальных условий, как геометрических, так и аэродинамических, может иметь достаточно большую величину. В связи с этим исследуются наиболее оптимальные формы вращающихся элементов ветродвигателя, которые могли бы обеспечить возникновение максимально возможной по величине силе Магнуса.

Ветродвигатель (ВД) с эффектом Магнуса имеет ряд существенных отличий от традиционных лопастных ВД. В настоящее время отсутствуют точные методы определения характеристик ВД с эффектом Магнуса. Это связано с тем, что возле вращающегося цилиндра обтекание является существенно трехмерным из-за растекания воздушного потока от центра ветроколеса к его периферии. Трехмерность обтекания особенно усиливается вблизи концевых поверхностей, где под действием центробежных сил формируется радиальное течение. Кроме того, течение на вращающемся цилиндре зависит от переходных процессов в пограничном слое, которые влияют на положение точек отрыва потока. С другой стороны, экспериментальные исследования, проведенные для ВД с эффектом Магнуса, показывают необходимость использования вращающихся цилиндров переменного сечения.

Сложный трехмерный характер обтекания цилиндра с отрывом пограничного слоя не позволяет в настоящее время получить строгое теоретическое решение. Для выявления оптимальных параметров проведен расчет аэродинамических характеристик вращающихся цилиндрических элементов, при этом изменялась частота вращения цилиндрического элемента. Скорость воздушного потока приравнивалась экспериментальному значению и менялась в диапазоне от 2,0 м/с до 15 м/с. В предварительном расчете использовалась наиболее простая форма цилиндров с одинаковым диаметром по всей длине (однородные цилиндры).

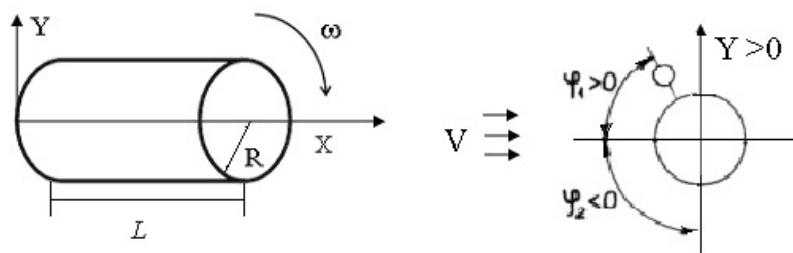


Рис. 1. Схема цилиндрического элемента постоянного сечения

На рисунке 1 показана простейшая форма: R — радиус вращающегося цилиндрического элемента и L — длина. В расчетах также используется безразмерная характеристика — относительное удлинение $\lambda = R/L$.

При поперечном обтекании вращающегося цилиндра на него действует подъемная сила и возникающая сила Магнуса, 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. При оптимальных условиях обтекания цилиндра данная сила может на порядок и более превосходить подъемную силу лопасти, что и позволяет использовать ее для вращения ветроколеса. Силы сопротивления тоже играют существенную роль, определяя его быстроходность и затраты мощности на вращение цилиндров. Сила Магнуса Y в общем виде выражается формулой [1–3]

$$Y = \rho \cdot V \cdot \Gamma \cdot L, \quad (1)$$

где ρ — плотность среды (воздуха); V — скорость потока; Γ — циркуляция, создаваемая вращением цилиндра; L — длина цилиндра.

Циркуляцию для реального, отрывного обтекания можно представить следующим образом:

$$\Gamma = K_0 \Gamma_0 = K_c (2\pi R^2 \omega), \quad (2)$$

где Γ_0 — циркуляция при безотрывном обтекании цилиндра; K_r — коэффициент, учитывающий влияние отрыва потока; R — радиус цилиндра; ω — частота вращения цилиндра.

Коэффициент K_r , в соответствии с [2] и с учетом данных эксперимента, может быть определен по формуле

$$K_r = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2\pi}, \quad \phi_1 \geq \phi_2, \quad (3)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 — положение точек отрыва потока на верхней и нижней сторонах цилиндра (рис. 1).

При безотрывном обтекании, а также непосредственно на поверхности цилиндра $K_r = 1$, что соответствует случаю $\phi_1 + \phi_2 = 2\pi$. При $\phi_1 + \phi_2 = \pi$ коэффициент K_r будет равняться 0,5. Для реального, отрывного обтекания цилиндра в интересующей нас области чисел Рейнольдса ($Re = VD/\nu > 10$, где D — диаметр цилиндра; ν — коэффициент кинематической вязкости среды) в большинстве случаев $K_c \leq 0,5$ [2–3].

Введем безразмерные коэффициенты силы Магнуса Y цилиндра:

$$C_{y1} = \frac{Y}{q \cdot S_1}, \quad (4)$$

где $q = \rho V^2/2$ — скоростной напор; $S = dL$ — площадь цилиндра в плане.

Введем также параметр θ — относительную скорость вращения цилиндра

$$\theta = \frac{\omega \cdot D}{2V} = \frac{\pi D n_y}{60V}, \quad (5)$$

где n_y — частота вращения цилиндра (об/мин).

Из (1), (2), (4), (5) следует

$$C_{y1} = K_r \cdot 2\pi\theta, \quad (6)$$

в частности,

$$C_{y1} = 2\pi\theta \quad \text{при } K_r = 1, \quad (7)$$

$$C_{y1} \leq \pi\theta \quad \text{при } K_r < 0,5, \quad (8)$$

в том числе

$$C_{y1} < 0 \quad \text{при } K_r < 0 \quad (9)$$

Из (6) при необходимости можно определить коэффициент K_r , используя экспериментальные данные для C_{y1} (обратная задача):

$$K_r = C_{y1} / 2\pi\theta. \quad (10)$$

Значение $C_{y1} = \pi\theta$ при $K_r = 0,5$ (7) является максимальным (асимптотическим) для реального, отрывного обтекания цилиндра, что следует из экспериментальных данных. При наличии прямых конечных поверхностей, согласно имеющимся к настоящему времени экспериментальным данным,

$C_{y1} \leq \pi\theta$ и $C_{x1} > 0$, причем в области $\theta < 0,5$ коэффициент C_{y1} может принимать отрицательные значения.

Известно, что аэродинамические характеристики ВД с вращающимися цилиндрами зависят от достаточно большого числа параметров — геометрических, кинематических и энергетических. Согласно общепринятым стандартным расчетам [1–3] основными кинематическими и энергетическими характеристиками ВД являются: θ — относительная скорость вращения цилиндров, Z — быстроходность ВД, N_k — его мощность и $N_{вр}$ — затраты мощности на вращение цилиндров. Мощность элемента N_k аналогично лопастному двигателю можно определить по известной формуле [3, 4]:

$$N_k = \eta \frac{\rho V^3}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \eta \frac{\pi \rho V^3 D^2}{8}, \quad (11)$$

где η — коэффициент мощности.

Коэффициент мощности η определяется отношением

$$\eta = \frac{N_k}{N_\infty}, \quad (12)$$

где N_∞ — мощность набегающего ветрового потока, которая выражается формулой (11) при $\eta = 1$.

Расчеты, согласованные с практическими испытаниями, показывают, что коэффициент η может изменяться в пределах от нуля до $\eta_{\max} = 0,593$, где η_{\max} — максимальное теоретическое значение, которое следует из условия идеального обтекания цилиндрического элемента или ветроколеса [1, 3, 4].

Кроме формулы (11), мощность вращения N_k , может быть определена по результатам тарировки при различной нагрузке на генератор (создаваемой дискретными значениями тока возбуждения и сопротивления на выходе генератора), согласно которым может быть выражена в виде следующей функции [1]:

$$N_k = K_N \cdot n_k^2 = 0,55 \cdot 10^{-3} \cdot G^2 \cdot n_k^2, \quad (13)$$

где n_k — частота вращения ветроколеса; K_N и G — тарировочные коэффициенты мощности.

Используемый далее тарировочный параметр $G = 42,6 \cdot \sqrt{K_N}$, который имеет размерность $(\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с})^{-2}$, варьируется в диапазоне $G \div 1-6$. Подставляя в (13) значения (11), (12), получим:

$$G \cdot Z = 1,4 \cdot \sqrt{\rho \eta V}, \quad (14)$$

где Z — быстроходность ветроколеса равна

$$Z = \frac{\pi D n_k}{60V}. \quad (15)$$

Для исследуемой модели с диаметром $D = 50$ мм при заданных условиях эксперимента, считая $\rho = 1,2 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$, вместо (14) получим обобщающее соотношение:

$$G \cdot Z = 5,5 \cdot \sqrt{\eta V}. \quad (16)$$

Полученные зависимости позволяют определить параметры ветроколеса λ , θ , G , R и рассчитать его основные характеристики η , Z для заданных условий эксперимента. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на моделях ВД и на отдельных вращающихся цилиндрах [1, 2], с учетом некоторых известных теоретических данных [3, 4] позволяют получить достаточно близкие к точным полуэмпирические зависимости для определения характеристик ветроколеса и оптимизации его параметров. Мощность ветроколеса, согласно (13), равна

$$N_x = Q \cdot (V - V_0)^2, \quad (17)$$

где базовая часть Q ($\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}$) выражается в виде

$$Q = K_N \cdot E^2 = \frac{0,55 \cdot 10^{-3} \cdot G^2}{(\alpha_0 + K_\lambda \cdot G^2)^2}. \quad (18)$$

Приравнявая (11) и (17), получим выражение для коэффициента мощности:

$$\eta = \frac{8Q \cdot (V - V_0)^2}{\pi \rho V^3 D^2}. \quad (19)$$

Для испытуемой модели в условиях эксперимента получим следующую расчетную формулу для мощности:

$$\eta = 0,6Q \frac{(V - V_0)^2}{V^3}. \quad (20)$$

Тогда быстроходность ветроколеса Z (15) для этой модели с учетом (16), (20) имеет вид:

$$Z = 4,2 \frac{\sqrt{Q}}{G} \cdot \frac{(V - V_0)}{V}. \quad (21)$$

Из (20), (21) следует, что для ВД данного типа расчетные значения $\eta(V)$ уменьшаются с ростом скорости V .

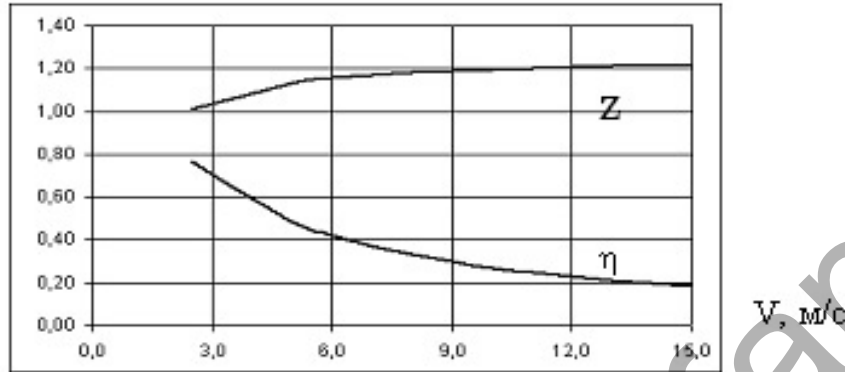


Рис. 2. Зависимость расчетной мощности и быстроходности от скорости потока при постоянном параметре Q

Результаты расчетов, приведенные на рисунке 2, показывают, что в точке при минимальной скорости коэффициент η имеет максимум, который при достаточно большой величине Q может существенно превосходить максимальное теоретическое значение $\eta_{\max} = 0,593$, но это противоречит реальной картине.

Выполнение условия $\eta < \eta_{\max}$ можно обеспечить соответствующим выбором параметра G , от которого зависит мощность N_K (4), что возможно путем соответствующего изменения формы цилиндров (переменному сечению, форме и степени закругления торцевой поверхности) таким образом, чтобы обеспечить более плавное обтекание и уменьшить срыв вихрей с боковых поверхностей вращающегося цилиндра

Определим затраты мощности на вращение цилиндров исходя из реальных условий и на основе экспериментальных данных. Полные затраты мощности на вращение цилиндров представляют собой сумму составляющих

$$\sum N_{ep} = N_u + N_s + N_e + N_n, \quad (22)$$

где затраты мощности: N_u — на трение о воздух внешней поверхности цилиндра; N_s — электрические потери в двигателях вращения цилиндров; N_e — потери на трение во внутреннем пространстве цилиндра; N_n — потери в подшипниках цилиндра.

Основной вклад в (22) дают N_u и N_s , которые обозначим N_{ep} . Для определения величины N_{ep} используем результаты измерений [3–8], проведенные на поперечно обтекаемых цилиндрах с диаметром $d = 50$ мм и удлинением $\lambda = 2$ и 4 при скоростях потока $V = 0$ и 12 м/с ($Re = 1,4–10$). Обработка экспериментальных данных показала, что зависимости $N(\lambda)$ и $N(V)$ имеют выраженный нелинейный характер. При удлинении $\lambda = 4$ значения мощности в неподвижной среде на 30–40 % выше, чем при наличии потока. Представим составляющую N_u в следующем виде:

$$N_u = K_u = qV\theta^3 DL, \quad (23)$$

где K_u — коэффициент пропорциональности, который определяется подстановкой в (23) измеренных значений N_u и других величин.

Подставляя известное значение плотности воздуха, получим значения для $K_u = 0,0089$ и $0,009$. Суммарные затраты мощности N_{ep} на вращение цилиндра, согласно (23), составят

$$N_{ep} = K_m \cdot qV\theta^3 D^2 \lambda. \quad (24)$$

Расчетные значения по (24) достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными [4–8], разница составляет не более 3 %. Значения N_{ep} , определенные по формуле (24), относятся только к поперечно обтекаемому цилиндру при однородных условиях, т.е. при $D = \text{const}$.

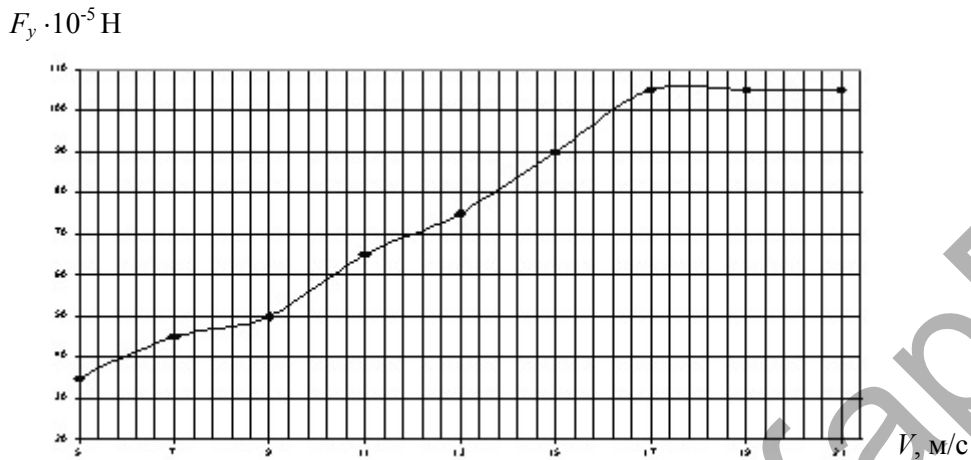


Рис. 3. Зависимость подъемной силы от скорости потока для гладкого конуса с вращением

Известно, что достаточно высокая эффективность ВД может быть достигнута, если удлинение цилиндров будет увеличено до $\lambda = 14\text{--}15$, что по ряду параметров близко к предельному значению и ограничено возможностями практического изготовления. Дальнейшее повышение эффективности возможно только путем соответствующего изменения формы цилиндров или другими способами управления течением. Поэтому были проведены эксперименты, в которых с помощью аэродинамических весов определялась подъемная сила для вращающихся элементов в виде поперечно обтекаемого усеченного конуса и цилиндров с закругленными торцами. Результаты экспериментальных измерений подъемной силы, возникающей при обтекании усеченного конуса с гладкой и шероховатой поверхностью, приведены на рисунках 3 и 4. В обоих случаях вращение усеченного конуса происходит навстречу воздушному потоку.

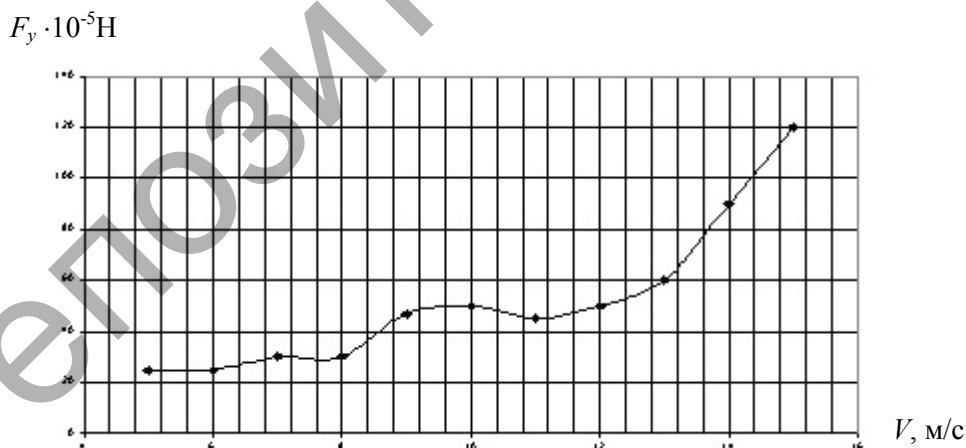


Рис. 4. Зависимость подъемной силы от скорости потока для шероховатого конуса с вращением

Качественно характер зависимостей повторяет данные, полученные для цилиндра. Подъемная сила, к которой добавляется сила Магнуса, возрастает с увеличением скорости набегающего потока. Шероховатость обтекаемой поверхности усиливает эффект увеличения максимума подъемной силы, влияние частоты вращения будет исследовано в дальнейшем.

Таким образом, при прочих равных условиях использование вращающегося элемента в виде усеченного конуса приводит к увеличению подъемной силы по сравнению с цилиндром. К примеру, при скорости воздушного потока 18 м/с изменением диаметра поперечного сечения можно достичь возрастания подъемной силы в более чем 2,5 раза.

Список литературы

1. Бычков Н.М. Ветродвиатель с эффектом Магнуса. 1. Результаты модельных исследований // Теплофизика и аэромеханика. — 2004. — Т. 11. — № 4. — С. 583–596.
2. Бычков Н.М. Ветродвиатель с эффектом Магнуса. 2. Характеристики вращающегося цилиндра // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12. — № 1. — С. 59–175.
3. Бычков Н.М. Ветродвиатель с эффектом Магнуса. 3. Расчетные характеристики ветроколеса // Теплофизика и аэромеханика. — 2008. — Т. 15. — № 2. — С. 583–596.
4. Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е., Никитина Л.А. Особенности аэродинамики вращающегося цилиндра в потоке // Промышленная теплотехника. — Киев, 2003. — № 4. — Т. 25. — С. 279–281.
5. Акылбаев Ж.С., Кусаиынов К., Сакипова С.Е. и др. Исследование подъемной силы вращающегося цилиндра при поперечном обтекании турбулентным потоком газа // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование. — Алматы: КазНУ, 2003. — С. 78.
6. Kusaiynov K., Sakipova S.E. Aerodynamics of the cylinder in a cross flow // Eurasian Physical Technical Journal. — Karaganda: KarSU. — 2004. — Vol. 4. — № 1. — P. 71–75.
7. Kusaiynov K., Sakipova S.E., Nikitina L.A. Aerodynamics of the transversally streamlined rotated barrel // Methods of aerophysical research: Materials of 12th international conference. ICMAR-2004. — Novosibirsk, 2004. — Vol. 4. — P. 195–198.
8. Кусаиынов К., Жуматаева Г.С., Рузанов К.А., Хасенов А.К. Турбулентный след за усеченным конусом / Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 5-й междунар. конф. — Астана, 2006. — С. 55–58.

УДК 533.601; 621.548

Б.Р.Нусупбеков¹, Н.Т.Исембергенов²¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;²Казахский национальный технический университет им. К.И.Сатпаева, АлматыСОЗДАНИЕ МАЛОБОРОТИСТОГО БЕЗРЕДУКТОРНОГО
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Қазақстан Республикасының жел шарттарын қанағаттандыратын желэлектрлік қондырғылар баяу жұмыс істейтін жел қозғалтқыштардың құрылымына тәуелді. Сондықтан төмен айналымды генераторды жасау және құру өзекті техникалық мәселе болып отыр. Генераторды жасау кезінде біз синхронды төмен айналымды бүйірлік генератордың әр түрлі нұсқаларын қарастырдық. Төмен айналымды генератордың 1-нұсқадағы құрылымының ерекшелігі — қуаттың артуына мүмкіндік беретін генераторда екі статорының болуы. Ал төмен айналымды генератордың 2-нұсқадағы құрылымының ерекшелігі — берілген генератордың бір статорлы болып жасалуында. Тұрақты магнитті генератор бүйірлік статордан тұрады және якорь орамасымен полюсті шығыңқысы бар ортада орналасқан. Қоздырғыш ретінде тұрақты магниттер қолданылған, бұл кезде магнит өрісі түзу тізбектей алмасуы керек.

Wind power installation to a large extent depend on the chosen design slow-speed wind turbine, which corresponds to the wind conditions of our Republic of Kazakhstan. Therefore, the development and creation of low-return generator is an actual technical problem. In the course of a generator, we have developed and manufactured various options for low-return of end of synchronous generators. The peculiarity of design 1-st version of the low-return generator is that the generator has two stator, thus increasing capacity. Design features 2-nd low-return version of the generator is that this version of the generator is designed with a single stator. Permanent magnet generator consists of an end-around the circumference of the stator and the tabs are located pole with coil anchor. As the excitation used permanent magnets, with the polarity of the magnetic fluxes must rotate in direct sequence.

Исследования ветроэнергетического потенциала в ряде мест по территории Казахстана, проведенные в рамках проекта Программы развития ООН по ветроэнергетике, показывают наличие хорошего ветрового климата и условий для строительства ветроэлектрической станции (ВЭС) в Южной зоне (Алматинская, Жамбылская, Южно-Казахстанская области), в Западной зоне (Мангистауская и Атырауская области), в Северной зоне (Акмолинская область) и в Центральной зоне (Карагандинская область). Наличие свободного пространства позволяет развивать мощности ВЭС до тысяч МВт. На Юге и Западе Казахстана спрос на ветроэнергетику появится уже к 2015 г., что обусловлено возрастающим дефицитом электроэнергии и ростом цен на газ, используемый на местных электростанциях,