

7. Heo J.H., Im S.H., Noh J.H., Mandal T.N., Lim C.S., Chang J.A., Lee Y.H., Kim H., Sarkar A., Nazeeruddin M.K., Graetzel M., Seok S.I. Efficient inorganic-organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and polymeric hole conductors // Nat. Photon. – 2013. – Vol. 7. – P. 486–491. <https://doi:10.1038/nphoton.2013.80>.

8. Duong T., Peng J., Walter D., Xiang J., Shen H., Chugh D., Lockrey M., Zhong D., Li J., Weber K. Perovskite Solar Cells Employing Copper Phthalocyanine Hole-Transport Material with an Efficiency over 20% and Excellent Thermal Stability // ACS Energy Lett. – 2018. – Vol. 3. – P. 2441. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.8b01483>.

UDC 621.548.2

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРУСНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**Танашева Н.К.** Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Карагада, Казахстан

**Бурков М.А.** Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Карагада, Казахстан

### *Анотация*

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований парусной ветроэнергетической установки с использованием модели, управляемой системой лопастей. Основная цель исследования заключалась в изучении влияния различных параметров на аэродинамические характеристики установки. Для проведения исследований был создан экспериментальный макет установки, оснащенный парусными лопастями. Исследования проводились при различных углах отклонения парусных лопастей: 0°, 30°, 60° и 90°. Кроме того, варьировалась скорость воздушного потока в диапазоне от 3 до 15 м/с. Все эксперименты были выполнены в аэродинамической трубе Т-1-М, предназначенной для точных измерений сил и моментов, действующих на установку. Результаты исследования показали, что с увеличением скорости воздушного потока увеличивается частота вращения вала ветроэнергетической установки. Максимальная частота вращения вала достигается при нулевом отклонении парусных лопастей ( $\alpha = 0^\circ$ ). Основные аэродинамические характеристики установки, такие как частота вращения ветротурбины, были измерены и проанализированы в зависимости от угла отклонения и скорости потока.

На основе полученных данных была построена зависимость частоты вращения парусной ветроустановки в зависимости от скорости воздушного потока. Отмечено, что с увеличением скорости потока нагрузка возрастает, что важно для оптимизации работы и эффективности ветроэнергетических установок. Таким образом, проведенные исследования предоставляют важные данные для дальнейшего совершенствования дизайна и управления парусными ветроэнергетическими установками, а также для оптимизации их работы в различных климатических условиях.

*Ключевые слова:* парусная лопасть, ветроэнергетическая установка, ветротурбина, угол отклонения лопастей, частота вращения, аэродинамическая труба Т-1-М.

### **Введение**

Казахстан, благодаря своему уникальному географическому положению, обладает значительным потенциалом для использования ветроэнергетики с целью производства электроэнергии и снижения зависимости от традиционных энергоресурсов, таких как нефть и газ. В последние годы страна активно развивает эту отрасль, привлекая зарубежные инвестиции и строя новые ветропарки, что способствует достижению энергетической независимости и снижению выбросов парниковых газов. На значительной части территории Казахстана скорость ветра достигает 3-4 м/с, а на открытых участках она может достигать 6 м/с и выше [1].

Технологии в области ветроэнергетики часто включают в себя ветрогенераторы с лопастными роторами, применяемые в турбинных ветровых электростанциях. Однако такие установки сталкиваются с проблемами, связанными с непредсказуемостью скорости и направления ветра, а также ограниченным рабочим диапазоном скоростей. В Казахстане эффективность применения таких технологий сильно ограничена [2].

Одним из вариантов решения этой проблемы является использование парусных ветроэнергетических установок. В отличие от традиционных лопастных турбин, парусные установки могут генерировать электрическую энергию уже при скорости ветра 3 м/с [5]. Они работают на основе кинетической энергии ветра, которая преобразуется в механическую энергию вращения вала под воздействием аэродинамической силы подъема, действующей на поверхность паруса.

Однако существующие модели парусных ветроэнергетических установок часто не имеют механизмов регулирования угла отклонения лопастей, что снижает их эффективность при различных условиях ветра. Новизной является разработка управляемой системы лопастей в форме треугольного паруса, которая позволяет оптимизировать работу установки [6]. Это позволяет уменьшить нагрузку на установку при высоких скоростях воздушного потока и повысить ее общую эффективность.

**Цель** текущего исследования заключается в изучении аэродинамических характеристик парусной ветроэнергетической установки с использованием управляемой системы лопастей в форме треугольного паруса.

В данном исследовании проведены эксперименты с макетом восьмилопастной парусной ветроэнергетической установки с целью изучения влияния направления потока на аэродинамические характеристики. Данные измерялись не менее пяти раз, чтобы обеспечить надежность результатов и учесть возможные вариации в условиях эксперимента. Для проведения исследований создана ветротурбина с управляемой системой лопастей, исследования проводились в аэродинамической трубе Т-1-М со следующими условиями (Таблица 1).

Таблица 1. Основные параметры экспериментального исследования

Параметры парусной ветротурбины	
Диаметр ветроколеса (d)	0,429 [m]
Площадь сечения модели (s)	0,145 [m <sup>2</sup> ]
Радиус ветроколеса (R)	0,215 [m]
Плотность воздуха	1,21[kg /m <sup>3</sup> ]
Кинематическая вязкость	14,9*10 <sup>-5</sup> [Pa·s]
Параметры аэродинамической трубы Т-1-М	
Диаметро трубы	0,5 [m]
Длина трубы	0,8 [m]

На рисунке 1 изображена схема экспериментального макета восьмилопастной парусной ветроэнергетической установки.

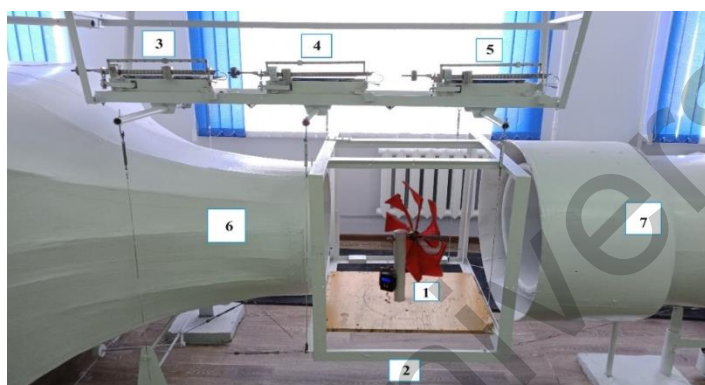


Рисунок 1 Экспериментальная парусная ветроэнергетическая установка:

На рисунке 1 показана подготовленная для проведения экспериментов парусной ветроэнергетическая установка, где:

- 1 - парусные лопасти ветроэнергетической установки.
- 2 - рама для крепления макета с аэродинамическими весами.
- 3 - весы для измерения силы лобового сопротивления.
- 4-5 - весы для измерения подъемной силы.
- 6 - конфузор.
- 7 - диффузор аэродинамической трубы [7-8].

Угол отклонения лопастей играет ключевую роль в энергоэффективности работы ветроэнергетической установки, поскольку определяет направление и скорость воздушного потока, проходящего через ветротурбину. На Рисунке 2 представлен принцип отклонения лопастей от  $\alpha = 0^\circ$ , до  $\alpha = 60^\circ$ .

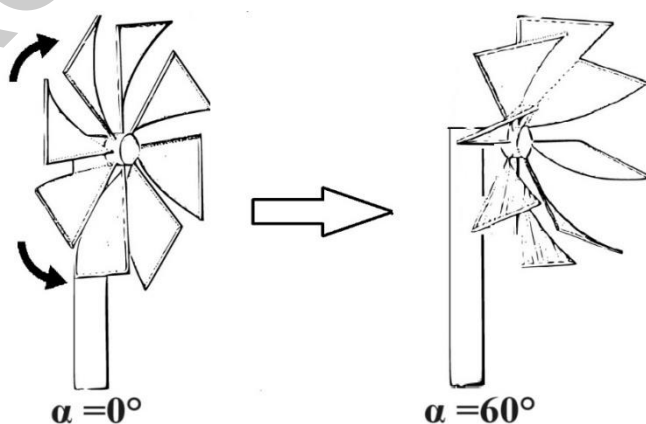


Рисунок 2 Регулировка угла отклонения ( $\alpha$ ) лопастей парусной ветроэнергетической установки. Эксперименты проводились в контролируемых условиях, что позволило детально изучить работу установки в различных режимах.

Для получения достоверных данных скорость воздушного потока варьировалась в диапазоне от 3 м/с до 15 м/с. Эти значения были выбраны для имитации как умеренных, так и сильных ветровых условий, характерных для реальных сценариев эксплуатации.

Важно отметить, что исследования не проводились при значениях угла  $\alpha$ , превышающих  $60^\circ$ , так как предварительные данные показали резкое падение эффективности.

Для точного измерения ключевых параметров использовались специализированные приборы. Число оборотов ветротурбины измерялось с помощью цифрового лазерного фототахометра АТ-8, который обеспечивает высокую точность и оперативность считывания данных.

Скорость набегающего воздушного потока измерялась с помощью чашечного анемометра Skywath Atmos.

Эти измерительные инструменты, упомянутые в источниках [9-10], являются стандартными и надёжными средствами для аэродинамических исследований, что гарантирует достоверность полученных результатов.

### Полученные результаты и их обсуждения

На основе экспериментальных данных (Рисунок 3) установлена зависимость числа оборотов вала парусной ветроэнергетической установки ( $n$ ) от скорости ветра ( $V$ ) и угла отклонения парусных лопастей ( $\alpha$ ).

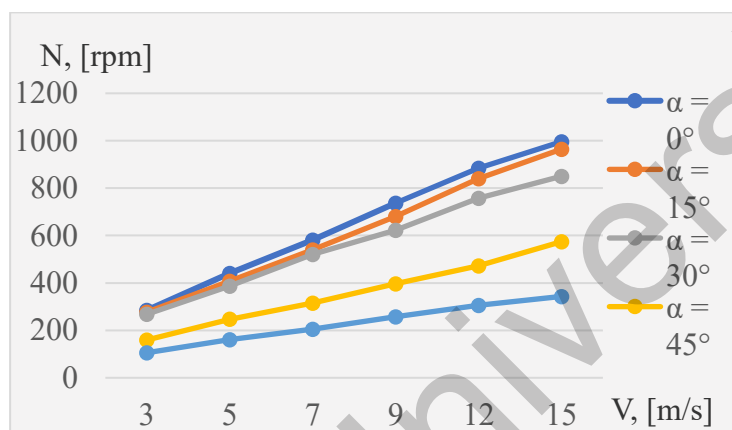


Рисунок 3 Зависимость количества оборотов ( $N$ ) парусной ветроэнергетической установки от скорости ветра ( $V$ ) и угла отклонения парусных лопастей ( $\alpha$ ).

Согласно полученным данным, максимальное значение достигается при нулевом угле отклонения лопастей ( $\alpha=0^\circ$ ). В этом положении установка демонстрирует наибольшую эффективность в захвате энергии ветра. При увеличении скорости ветра от 3 м/с до 15 м/с, частота вращения вала плавно возрастает, что является прямым следствием увеличения динамического давления воздуха на лопасти. Это подтверждается данными: при  $U=3$  м/с скорость вращения составляет  $n=285$  об/мин, а при  $U=15$  м/с она достигает пикового значения  $n=995$  об/мин.

Так же зафиксировано, что изменение угла отклонения лопастей существенно влияет на работу установки. При увеличении угла отклонения до  $\alpha=60^\circ$  число оборотов вала стремительно падает. Это свидетельствует о том, что лопасти теряют свою способность эффективно преобразовывать энергию ветра, так как уменьшается площадь их взаимодействия с воздушным потоком. Минимальная частота вращения вала ветротурбины составляет  $n=205$  об/мин ( $\alpha=60^\circ$  при  $U=3$  м/с) и  $n=342$  об/мин ( $U=15$  м/с).

### Заключение

В ходе работы был успешно разработан и испытан экспериментальный прототип парусной ветроэнергетической установки. Испытания проводились в контролируемых условиях аэродинамической трубы Т-1-М, что позволило получить точные и достоверные данные о его аэродинамических свойствах и поведении в различных условиях.

Результаты позволили зафиксировать четкую зависимость скорости вращения вала ветрогенератора от скорости воздушного потока. Было установлено, что при увеличении скорости ветра частота вращения вала также растет. Максимальная частота вращения вала была зафиксирована на уровне  $n=995$  об/мин при скорости воздушного потока, равной  $V=15$  м/с. Данный показатель является важным ориентиром для проектирования, так как он демонстрирует высокий потенциал установки.

Однако, высокая частота вращения, достигаемая при сильном ветре, может иметь и негативные последствия. Было отмечено, что такие обороты могут привести к повышенному износу механических компонентов оборудования, а также к увеличению шума и вибраций. Это подчеркивает необходимость разработки системы, которая сможет регулировать и ограничивать скорость вращения. Полученные данные будут использованы для определения оптимального угла наклона парусных лопастей, который позволит контролировать обороты и предотвращать перегрузки.

Полученные результаты создают основу для разработки ветроэнергетической установки, способной эффективно использовать ветровые ресурсы. Благодаря внедрению системы управления углом отклонения лопастей, можно будет добиться не только более высокой производительности, но и обеспечить долговечность и надежность оборудования. Это позволит создать более совершенную и конкурентоспособную установку, адаптирующуюся к различным условиям эксплуатации.

#### Список использованной литературы

1. Msigwa, G. Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives. / G. Msigwa, J.O. Ighalo, P.S. Yap // *Science of The Total Environment*. — 2022. — Vol.849. P. 157755.
2. Zhao, M., Taheri, E. Control of flow past a circular cylinder using a rotating control rod. / M. Zhao, E. Taheri // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol.10(5) — P.608.
3. Tanasheva, N.K., Bakhtybekova, A.R., Shuyushbayeva, N.N., Tussupbekova, A.K., Tleubergenova, A.Z.. Calculation of the Aerodynamic Characteristics of a Wind-Power Plant with Blades in the Form of Rotating Cylinders. / N.K. Tanasheva, A.R., Bakhtybekova, N.N. Shuyushbayeva, A.K. Tussupbekova, A.Z. Tleubergenova. // *Technical Physics Letters*. — 2022. — Vol. 48(2). P. 51–54.
4. Ezadi, Yazdi, M.J. Features of the flow over a rotating circular cylinder at different spin ratios and Reynolds numbers: Experimental and numerical study. / M.J. Ezadi, Yazdi, A.S. Rad., A.B. Khoshnevis. // *The European Physical Journal Plus*. — 2019 — Vol.134(189), P.1–21.
5. Limacher, E.J., Wood, D.H. An impulse-based derivation of the Kutta–Joukowski equation for wind turbine thrust. / E.J., Limacher, D.H. Wood. // *Wind Energy Science*. — 2021 — Vol. 6(1). P. 191–201.
6. Tanasheva, N.K. Aerodynamic Characteristics of a Rotating Cylinder in the Form of a Truncated Cone. / N.K. Tanasheva, L.V. Chirkova, A.N. Dyusembaeva, K.K. Sadenova / *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2020 — Vol.93, P.551–555.
7. Кунакбаев, Т. Экспериментальные и теоретические исследования эффективности автономных компактных многоэтажных ветроэлектростанций. / Т. Кунакбаев, Н.К. Танашева, А.Н. Дюсембаева, К.М. Шаймерденова, Б.М. Сагитжанов // *Журнал технической физики*. — 2020 — Vol. 90(1), P. 42–45.
8. Тлеубергенова, А.Ж. Исследование аэродинамических сил треугольной лопасти ветротурбины при низких скоростях ветра. / Н.К. Танашева, К.М. Шаймерденова, Л.Л. Миньков, С.Ж. Узбергенова // *Eurasian Physical Technical Journal*. — 2021. — Vol. 4 (38). — С. 59–64.
9. Ran, Y.. Review of passive control of flow past a circular cylinder. / Z. Deng, H. Yu, W.
10. Chen, D. Gao // *Journal of Visualization*. — 2023 — Vol.26(1). P 1–44.
11. Yao, J. Influence of inflow turbulence on the flow characteristics around a circular cylinder. / W. Lou, G. Shen, Y. Guo, Y. Xing // *Applied Sciences*. — 2019 — Vol 9(17). P. 3595.

ЭОЖ 517.51

### АРАЛАС ТЕГІСТІК ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ НИКОЛЬСКИЙ–БЕСОВ КЕҢІСТІКТЕРІ ҮШІН ЕНУ ПАРАМЕТРЛЕРІ ЖАЙЫНДА

**Төлеуғазы Е.,** М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университетінің Қазақстан филиалы, Астана, Қазақстан

**Кервенев Қ.Е.,** академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан

**Искаков С.А.,** академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан

**Чечкин Г.А.,** М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, Мәскеу, Ресей

**Бекмағанбетов К.А.,** академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан

Дифференциалдық тендеулерді зерттеу барысында функциялар кеңістіктерінің ену теориясы аса маңызды бағыттардың бірі болып табылады. Бұл теорияның алғашқы іргелі нәтижелері С.Л. Соболевтің [1] классикалық еңбектерінде ұсынылған. Атап айтқанда, Соболев енгізген кеңістіктер әртүрлі метрикалардағы функциялардың тегістік сипаттамалары арасындағы байланыстарды терең талдауға мүмкіндік берді. Осы тұрғыдан алғанда, ену теоремалары функциялардың қасиеттерін сипаттауда ғана емес, сонымен қатар әртүрлі функционалдық кеңістіктер арасындағы өзара қатынастарды нақтылауда қуатты құралға айналды.

Соболев еңбектерінен кейін бұл теория қарқынды дами түсті. Оның әрі қарай дамуына және жаңа функциялар класстарын анықтап, олардың құрылымдық ерекшеліктерін жан-жақты зерттеуге С.М. Никольский [2], О.В. Бесов [3], П.И. Лизоркин [4], Х. Трибель [5], Й. Берг пен Й. Лёфстрем [6] сынды белгілі ғалымдар айрықша үлес қосты. Бұл зерттеулердің дамуына екі негізгі фактор түрткі болды. Біріншіден, теорияның өзінің ішкі құрылымдық мәселелерінің маңыздылығы мен логикалық толықтығын қамтамасыз етуге бағытталған ғылыми қызығушылық. Екіншіден, алынған нәтижелердің қолданбалы маңызы зор болды, атап айтқанда жуықтау теориясында, математикалық физиканың шектік есептер теориясында, есептеу әдістерінде және функционалдық анализдің әртүрлі салаларында бұл теорияның нәтижелері кеңінен пайдаланылды.

1960-жылдары С.М. Никольский [7], А.Д. Джабраилов [8] және Т.И. Аманов [9] еңбектерінде басым аралас туындылары бар кеңістіктер жүйелі түрде зерттеле бастады. Мұндай кеңістіктер классикалық Соболев және Бесов кеңістіктерінің жалпыламасы болып саналады. Олардың құрылымдық ерекшеліктерін зерттеуде ену теоремалары мен интерполяциялық қасиеттерді айқындау ерекше орын алады. Бұл бағыттағы зерттеулер кейінгі кезеңде А.П. Унинский, Е.Д. Нұрсұлтанов, К.А. Бекмағанбетов, Е. Төлеуғазы және басқа да ғалымдардың еңбектерінде өз жалғасын тауып, ену теориясы мен жуықтау теориясының жаңа нәтижелерімен толықтырылды.