

Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің Ғылым жаршысы (пәнаралық) =Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина (междисциплинарный). – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2024. -№ 4 (123). - Р. 86-96. - ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X

doi.org/ 10.51452/kazatu.2024.4(123).1794

УДК 621.311.25

Исследовательская статья

Обоснование уравнения регрессии при проведении экспериментальных исследований воздуховода ветроэнергетической установки для фермерских хозяйств

Курманов А.А.¹ , Курманов А.К.¹ , Хасенов У.Б.¹ , Аханов С.М.² ,
Кабдушева А.С.¹ , Калиев Б.К.¹ 

¹Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, Костанай, Казахстан

²Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан

Автор-корреспондент: А.С. Кабдушева: 9.12.1989@mail.ru

Соавторы: (1: АА) arachnid_@inbox.ru; (2: АК) kurmanov_ayap@mail.ru
(3: УБ) kstu-tt@mail.ru; (4: СМ) serik.ahanov@mail.ru; (5: БК) kaliyevb@mail.ru

Получено: 11-10-2024 **Принято:** 20-12-2024 **Опубликовано:** 30-12-2024

Аннотация

Предпосылки и цель. Повышение эффективности энергоснабжения производств Казахстана является важной задачей, для ее реализации принято несколько документов, в частности, большое внимание уделено нетрадиционным источникам энергии. Большой потенциал для нашей территории у ветроэнергетических установок. В результате анализа методов повышения их эффективности установлено возможное направление совершенствования – разработка формы воздуховода, это позволяет увеличить скорость воздушного потока. И как следствие, выработку электрической энергии в 2 и более раз. Целью исследования является повышение эффективности получения электрической энергии в ветроэнергетической установке для фермерских хозяйств за счет снижения зависимости от скорости ветра и определение наиболее подходящих технических параметров установки.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований применялись современные материалы и оборудование, прошедшие поверку в сертифицированных организациях. Методы исследования соответствуют современным подходам к решению научных задач.

Результаты. Для повышения эффективности получения электрической энергии в ветроэнергетической установке предлагается устройство за счет которого снижается зависимость от скорости ветра.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований получено уравнение регрессии, адекватно описывающее процесс работы воздуховода, прошедшее проверку на значимость коэффициентов, и получены оптимальные значения факторов.

Ключевые слова: инженерные исследования; ветроэнергетические установки; ветровая турбина; мощность; скорость ветра.

Введение

Ветроэнергетика – это динамично развивающаяся отрасль энергетической промышленности во многих странах мира, в том числе и в Казахстане [1, 2].

Казахстан стоит на пороге значительных изменений в своей энергетической политике, стремясь к диверсификации источников энергии и повышению экологической устойчивости [3,4]. Страна, обладающая значительными запасами углеводородов, традиционно зависела от ископаемого топлива в производстве электроэнергии. Однако глобальные вызовы, связанные с изменением климата и необходимостью сокращения выбросов углекислого газа, побуждают Казахстан искать альтернативные подходы к энергетике [4, 5]. В Казахстане ветроэнергетические

установки наиболее востребованы и экономически целесообразны для электроснабжения отдаленных фермерских хозяйств и объектов, так как проводить электричество на большие расстояния не выгодно [6, 7].

Нами предлагается устройство, снижающее зависимость от скорости ветра. Совершенствование ветроэнергетической установки для фермерских хозяйств заключается в изготовлении воздуховода состоящим из трех участков: конфузора, канала критики и диффузора, образующие поверхностей конфузора и диффузора, описываемое законами Вейбулла-Гнеденко, по аналогии с конструкцией ракетного двигателя, что позволяет достичь наибольших значений коэффициента полезного действия в условиях размещения установок в регионах с меняющейся скоростью ветра [8, 9]. Предлагаемая разработка обосновывается снижением зависимости от скорости ветра, следовательно данное направление является актуальным [10].

Материалы и методы

Для проведения экспериментов была изготовлена экспериментальная установка, разработан план эксперимента, подготовлено оборудование и измерительное обеспечение. Общий вид экспериментального воздуховода ветроэнергетической установки показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид экспериментального воздуховода

Воздуховод состоит из трех участков: конфузора, канала критики и диффузора по аналогии с реактивным двигателем.

Ветроэнергетическая установка работает следующим образом, воздушный поток входит в конфузор, при переходе из конфузора в канал критики его скорость возрастает из-за резкого сужения, и при переходе в диффузор создается разрежение в результате возрастания объема и, связанное с этим, падение скорости, что дополнительно повышает скорость воздушного потока в канале критики. Ветрогенератор закреплен в канале критики в зоне максимального воздушного потока. Виды кривых аппроксимирующие формулы при проектировании поверхностей воздуховода описываются законами Вейбулла-Гнеденко.

Коэффициент корреляции реальных поверхностей конфузора и диффузора с теоретическими зависимостями составляет более 0,74.

В качестве средства измерения воздушного потока использовался сертифицированный измеритель параметров микроклимата «Метеоскоп-М», представленный на рисунке 2 [11].

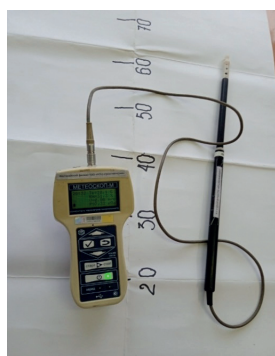


Рисунок 2 – Измеритель параметров микроклимата «Метеоскоп-М»

На рисунке 3 представлен процесс замера скорости воздушного потока анемометром со стороны конфузора.

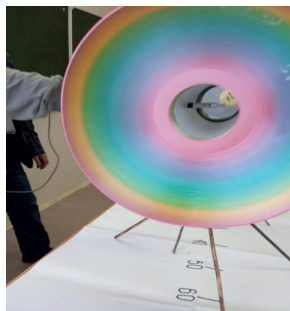


Рисунок 3 – Вид анемометра со стороны конфузора

С целью повышения качества контроля скорости применялся микро-анемометр для определения скорости воздушного потока СТ44098 [11] (рисунок 4). Это стабильный, безопасный и надежный миниатюрный цифровой анемометр, широко используемый в горнодобывающей, электрической, металлургической, нефтехимической, энергосберегающей, навигационной, производстве вентиляторов, вытяжной вентиляции, спорте и многих других отраслях промышленности. Разрешением 0,1 м/с, точность показания 5%, температура окружающей среды до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью 0,1. Кроме этого, изготовлены канал критики представленный на рисунке 5, диаметром 150 мм, и соответствующие конфузторы и диффузоры трех различных диаметров кривизны в соответствии с таблицей 2.



Рисунок 4 – Профессиональный мини-анемометр



Рисунок 5 – Установка мини-анемометра в канал критики ветроэнергетической установки

План экспериментов и уровни варьирования факторов представлены в таблице 1 и 2.

Таблица 1 – План эксперимента Песочинского

№ п/п	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y ₁ (расстояние до анемометра)
1	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	2,354
2	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	2,482
3	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	2,43
4	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	2,245
5	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	2,252
6	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	2,362
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	2,385
8	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	2,44
9	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	2,102
10	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	2,32
11	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	2,542
12	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	2,29
13	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,444

Таблица 2 – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Код	Уровень варьирования факторов					Интервал варьирования
		150	0	250	+	350	
X1 – длина корпуса (мм)	-	150	0	250	+	350	100
X2 – входной дефлектор (конфузор) (радиус кривизны, мм)	-	110	0	135	+	160	25
X3- выходной дефлектор (диффузор) (радиус кривизны, мм)	-	95	0	110	+	125	15

Для изучения влияния диаметра канала критики на скорость воздушного потока в нем, и как следствие, производительности ветрогенератора потребовались дополнительные экспериментальные исследования. Поэтому было подготовлено оборудование и изготовлены детали экспериментальной установки.

На первом этапе проводили измерение скорости воздушного потока без использования ветроэнергетической установки. Для этого использовали бытовой вентилятор, имеющий два режима скорости воздушного потока. На следующем этапе использовали конфузор, канал критики и диффузор диаметрами 100, 125 и 150 мм.

Результаты и обсуждение

Обработка результатов экспериментов проводилась на основании исследований Ф.С. Новик и Я.Б. Арсова [12].

$$Y=2,444 - 0,016375x_1 - 0,044125 x_2 - 0,00625 x_3 - 0,1175 x_1 x_2 - 0,01375 x_1 x_3 + 0,07825 x_2 x_3 - 0,07425 x_1^2 + 0,05625 x_2^2 - 0,01 x_3^2$$

Уравнение регрессии после определения значимости коэффициентов по критерию Стьюдента, и адекватности модели на основании критерия Фишера [12], прошло обработку программой Mathcad, как показано на рисунках 6-13.

При $x_3 = 0$ (const), x_1 и x_2 – варьируются.

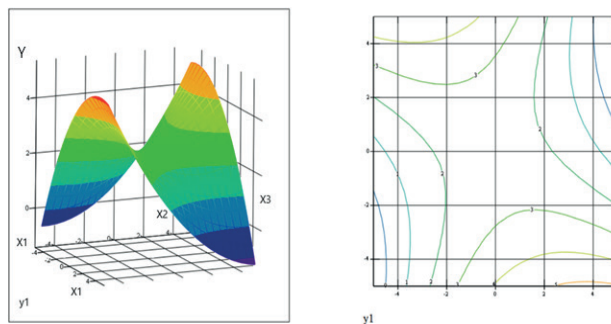


Рисунок 6 – Значение функции при $x_3 = 0$ (const), x_1 и x_2 – варьируются

При $x_2 = 0$ (const), x_1 и x_3 – варьируются.

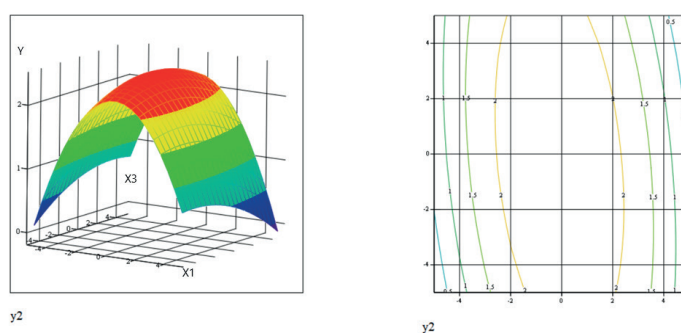


Рисунок 7 – Значение функции при $x_2 = 0$ (const), x_1 и x_3 – варьируются

При $x_1 = 0$ (const), x_2 и x_3 – варьируются.

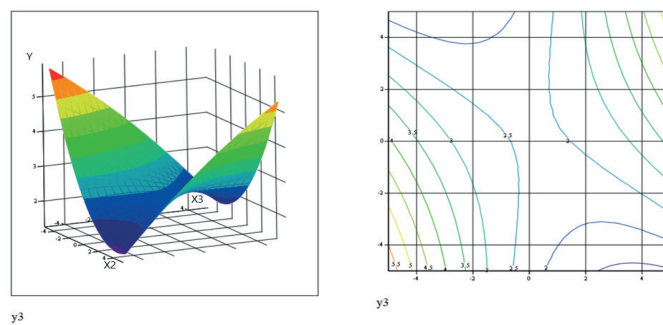


Рисунок 8 – Значение функции при $x_1 = 0$ (const), x_2 и x_3 – варьируются

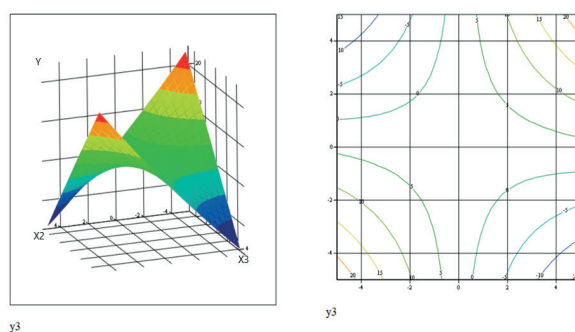


Рисунок 9 – Значение функции от факторов u^3

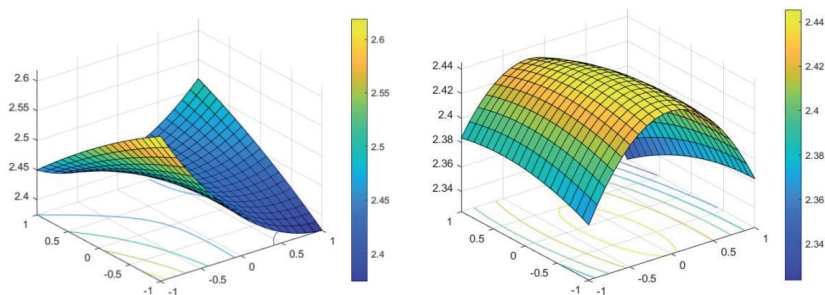


Рисунок 10 – Значение функции от факторов X_1

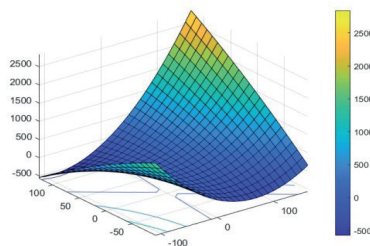


Рисунок 11 – Значение функции от факторов X_2

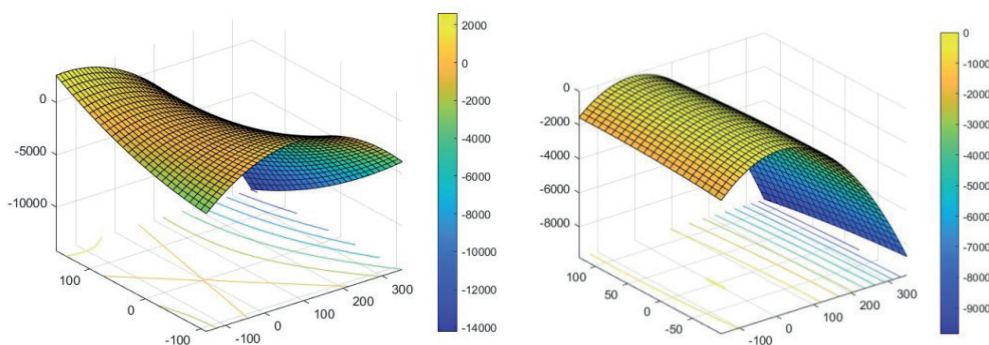


Рисунок 12 – Значение функции от факторов X_3

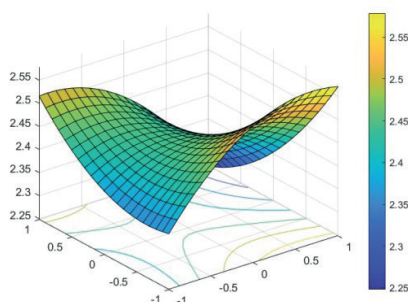


Рисунок 13 – Значение функции от всех факторов (-1, 0, 1)

В кодированном варианте (-1, 0, 1).

Максимальное значение функции от всех факторов ($X_1=1, X_2=-1, X_3=-1$) $Y=3,368$

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблицах 3-6.

В результате проведения экспериментальных исследований с пятикратной повторностью были получены скорость воздушного потока без применения и с применением воздухопроводов, диаметрами 100, 125 и 150 мм.

Таблица 3 – Скорость воздушного потока вентилятора

Показатель	Расстояние до мини-анеометра, см.							
	20		30		40		50	
	Режим работы вентилятора							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Скорость воздушного потока, м/с	2,65	2,55	2,55	2,867	2,65	2,85	2,25	2,75

Таблица 4 – Скорость воздушного потока в канале критики диаметром 125 мм

Показатель	Расстояние до мини-анеометра, см.							
	30		35		40		45	
	Режим работы вентилятора							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Скорость воздушного потока, м/с	длина канала критики 350 мм							
	2,65	3,0	3,25	3,35	2,55	2,75	2,15	2,4
	длина канала критики 250 мм							
	2,25	2,65	2,65	2,85	2,25	2,55	2,05	2,25
длина канала критики 300 мм								
	2,55	2,85	2,65	3,0	2,25	2,55	2,05	2,25

Таблица 5 – Скорость воздушного потока в канале критики диаметром 150 мм

Показатель	Расстояние до мини-анеометра, см.							
	30		35		40		45	
	Режим работы вентилятора							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Скорость воздушного потока, м/с	длина канала критики 350 мм							
	3,15	3,65	2,75	3,15	2,4	2,85	2,65	3,15
	длина канала критики 250 мм							
	2,55	2,85	2,85	3,5	2,75	3,65	2,4	2,75
длина канала критики 300 мм								
	2,85	3,25	3,15	3,35	2,65	3,0	2,4	2,75

Таблица 6 – Сравнительный эксперимент для канала критики диаметром 100 мм

№	Расстояние, мм					
	200	300	400	500	600	700
Замер скорости воздушного потока без устройства						
2	-	2,4	2,37	2,2	2,14	1,93
Замер скорости воздушного потока через устройство (расстояние до мини-анеометра)						
3	-	2,62	2,54	2,36	2,3	2,07
Замер скорости воздушного потока через устройство (расстояние до края конфузора)						
	Эффект	9,1%	7,2%	7,2%	7,4%	7,25%

Для оптимального варианта диаметра канала критики 150 мм и расстоянии 400 мм скорость ветра без устройства – 2,37 м/с, с применением устройства – 3,65, а именно разница 35,07%.

На рисунке 14 представлен график влияния диаметра канала критики на скорость воздушного потока ветроэнергетической установки. Связь между длиной канала критики и скоростью воздушного потока представлена на рисунке 15.

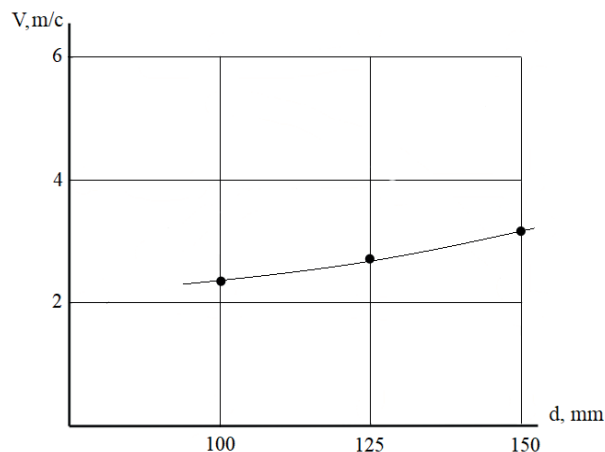


Рисунок 14 – Влияние диаметра канала критики на скорость воздушного потока ветроэнергетической установки

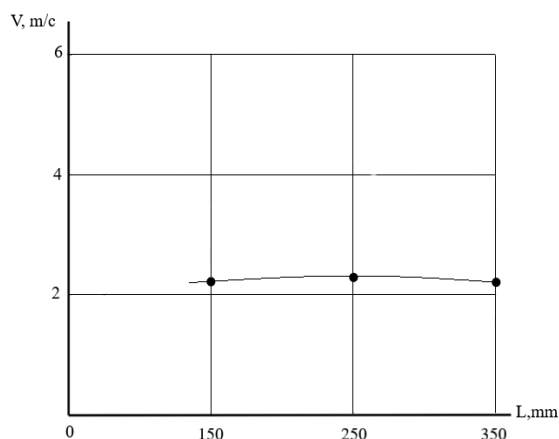


Рисунок 15 – Связь между длиной канала критики и скоростью воздушного потока

Для установления связи между скоростью потока и диаметром канала критики были проведены дополнительные эксперименты, здесь криволинейные зависимости между двумя переменными выражены в виде кривых линий регрессии и соответствующих им математических уравнений.

Заключение

В результате проведения экспериментальных исследований, можно сделать вывод, что полученная модель значима, и экспериментальными исследованиями установлены связи диаметра канала критики с параметрами конфузора и диффузора:

- увеличение диаметра канала критики и связанные с ней конфузора и диффузора повышают производительность ветрогенератора;

- при диаметре канала критики 100 мм, длине канала критики 250 мм, радиус кривизны конфузора 110 мм, а диффузора 95 мм, эти соотношения справедливы при увеличении диаметра канала критики.

Повышение эффективности ветрогенератора с применением устройства, состоящего из конфузора, канала критики и диффузора достигает 35,07%.

Вклад авторов

АА, АС и БК: Концептуализировали и оформили исследование, провели всесторонний поиск литературы, проанализировали собранные данные и подготовили рукопись. АК, УБ, С.М.:

провели окончательную редакцию и вычитку рукописи. Все авторы прочитали, просмотрели и одобрили окончательную редакцию рукописи.

Список литературы

- 1 *Об утверждении Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан на 2023-2029 годы.* (01.11.2024). <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P14000007245>.
- 2 *Ветроэнергетика.* (01.11.2024). <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
- 3 Botha, P., Mills, G. (01.11.2024). Stewart Island Wind Investigation. *Roaring40s Wind Power Limited*. <https://www.mbie.govt.nz/dmsdocument/5768-stewart-island-wind-investigation>
- 4 McNeill, R. (01.11.2024). *A Proposed Way Forward to Deal with Electricity Supply at Stewart Island.* Venture Southland. <https://www.southlanddc.govt.nz/assets/Siesa/docs/11.pdf>.
- 5 *International Renewable Energy Agency (IRENA).* (01.11.2024) Power System Flexibility for the Energy Transition. <https://www.irena.org/publications/2018/Nov/Power-system-flexibility-for-the-energy-transition>.
- 6 *Техническое описание ветряной турбины Fuhrländer FL-100.* (01.11.2024). <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/279-fuhrlaender-fl-100-astos>
- 7 Li, C. et al. (2016). Evaluation of wind energy resource and wind turbine characteristics at two locations in China. *Technology in Society*, 47, 121-128. DOI: 10.1016/j.techsoc.2016.09.003.
- 8 Суббота, АМ, Джулгаков, ВГ, (2018). Повышение эффективности ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения. *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского*, 1(85), 77-85.
- 9 Константинова, СВ. (2013). Типы ветродвигателей. Новые конструкции и технические решения. *Энергетика и ТЭК*. 1, 16-20.
- 10 Ветроэнергетическая установка. (2023). Патент РК № 8884: Курманов АК., Курманов А.А., Салыков Б.Р., Хасенов У.Б., Бюл. №1268.2.
- 11 Сертификат о проверке №ВА10-01-33039. (2020). Измеритель параметров микроклимата. *Алматинский филиал АО «НацЭКС» аттестат аккредит. №KZ.P.02.0687*.
- 12 Новик, ФС, Арсов, ЯБ, (1980). *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов.* Москва: Машиностроение.

References

- 1 *Ob utverjdenii Kontseptsii razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa Respubliki Kazahstan na 2023 – 2029 gody.* (01.11.2024). <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P14000007245>.
- 2 *Vetroenergetika.* (01.11.2024). <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
- 3 Botha, P., Mills, G. (01.11.2024). Stewart Island Wind Investigation. *Roaring40s Wind Power Limited*. <https://www.mbie.govt.nz/dmsdocument/5768-stewart-island-wind-investigation>
- 4 McNeill, R. (01.11.2024). *A Proposed Way Forward to Deal with Electricity Supply at Stewart Island.* Venture Southland. <https://www.southlanddc.govt.nz/assets/Siesa/docs/11.pdf>.
- 5 *International Renewable Energy Agency (IRENA).* (01.11.2024) Power System Flexibility for the Energy Transition. <https://www.irena.org/publications/2018/Nov/Power-system-flexibility-for-the-energy-transition>.
- 6 *Tehnicheskoe opisanie vetryanoi turbiny Fuhrländer FL-100.* (01.11.2024). <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/279-fuhrlaender-fl-100-astos>
- 7 Li, C., et al. (2016). Evaluation of wind energy resource and wind turbine characteristics at two locations in China. *Technology in Society*. 47, 121-128. DOI: 10.1016/j.techsoc.2016.09.003.
- 8 Subbota, AM, Djulgakov, VG. (2018). Povyshenie effektivnosti vetroenergeticheskoi ustanovki s vertikalnoi osyu vrasheniya. *Natsionalnyi aerokosmicheskii universitet im. N.E. Jukovskogo*, 1(85), 77-85.
- 9 Konstantinova, SV. (2013). Tipy vetrodvigatelei. Novye konstruksii i tehnicheckie resheniya. *Energetika i TEK*. 1, 16-20.
- 10 Vetroenergeticheskaya ustanovka (2023). Patent RK № 8884: Kurmanov AK., Kurmanov A.A., Salykov B.R., Hasenov U.B., Bul. №1268.2.

11 Sertifikat o poverke №VA10-01-33039. (2020). İzmeritel parametrov mikroklimate. *Almatinskii filial AO «NatsEkS» attestat akkredit. № KZ.R.02.0687.*

12 Novik, FS, Arsov, YAB, (1980). *Optimizatsiya protsessov tehnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov.* Moskva: Maşinostroenie.

Шаруа қожалықтары үшін жел энергетикасы қондырғысының құбырына эксперименттік зерттеулер жүргізу кезіндегі регрессия теңдеуінің негіздемесі

Курманов А.А., Курманов А.К., Хасенов У.Б., Аханов С.М.,
Кабдушева А.С., Калиев Б.К.

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Қазақстан өндірістерін энергиямен жабдықтау тиімділігін арттыру маңызды міндет болып табылады, оны іске асыру үшін бірнеше құжаттар қабылданды, атап айтқанда, дәстүрлі емес энергия көздеріне көп көңіл бөлінді. Біздің аумағымыз үшін жел энергетикасы қондырғыларының әлеуеті зор. Олардың тиімділігін арттыру әдістерін талдау нәтижесінде жетілдірудің мүмкін бағыты анықталды-каналдың пішінін әзірлеу, бұл ауа ағынының жылдамдығын арттыруға мүмкіндік береді. Нәтижесінде электр энергиясын өндіру 2 есе немесе одан да көп. Зерттеудің мақсаты – жел жылдамдығына тәуелділікті азайту және қондырғының ең қолайлы техникалық параметрлерін анықтау арқылы фермалар үшін жел қондырғысында электр энергиясын өндірудің тиімділігін арттыру.

Материалдар мен әдістер. Эксперименттік зерттеулер жүргізу үшін сертификатталған ұйымдарда тексеруден өткен және өздерінің сәйкестік сертификаттары бар заманауи материалдар мен жабдықтар қолданылды. Зерттеу әдістері ғылыми мәселелерді шешудің заманауи тәсілдеріне сәйкес келеді: мәселенің жай-күйін талдау және жел энергетикалық қондырғыларын жіктеу негізінде ең оңтайлы сындарлы шешім ретінде каналды жетілдіру қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Нәтижелер. Жел энергетикасы қондырғысында электр энергиясын алу тиімділігін арттыру үшін жел жылдамдығына тәуелділікті төмендететін құрылғы ұсынылады.

Қорытынды. Жүргізілген эксперименттік зерттеулердің нәтижесінде коэффициенттердің маңыздылығын тексеруден өткен каналдың жұмыс процесін барабар сипаттайтын регрессия теңдеуі алынды және факторлардың оңтайлы мәндері алынды.

Кілт сөздер: инженерлік зерттеулер; жел электр станциялары; жел турбинасы; қуат; жел жылдамдығы.

Substantiation of the regression equation during experimental studies of the duct of a wind power plant for farms

Aidar A. Kurmanov, Ayap K. Kurmanov, Uralbay B. Khasenov, Beibit K. Kaliev,
Almira S. Kabdusheva, Serik M. Akhanov

Abstract

Background and Aim. Improving the efficiency of energy supply to Kazakhstan's industries is an important task, several documents have been adopted for its implementation, in particular, much attention is paid to non-traditional energy sources. Wind power plants have great potential for our territory, as a result of the analysis of methods to increase their efficiency, a possible direction of improvement has been established -the development of an air duct shape, this allows increasing the air flow rate. And as a result, the generation of electric energy by 2 or more times. The purpose of the study is to increase the efficiency of a wind power plant in farm conditions by improving its air duct. The aim of the study is to increase the efficiency of generating electric energy in a wind power plant for farms by reducing dependence on wind speed and determining the most appropriate technical parameters of the installation.

Materials and methods. Modern materials and equipment that have been verified in certified organizations and have their own certificates of conformity were used to conduct experimental studies. The research methods correspond to modern approaches to solving scientific problems: based on the analysis of the state of the issue and the classification of wind power plants, it was concluded that it is necessary to improve the duct as the most optimal constructive solution.

Results. To increase the efficiency of generating electric energy in a wind power plant, a device is proposed due to which the dependence on wind speed is reduced.

Conclusion. As a result of the conducted experimental studies, a regression equation was obtained that adequately describes the process of duct operation, which has been tested for the significance of coefficients, and optimal values of factors were obtained.

Keywords: : engineering research; wind power plants; wind turbine; power; wind speed.