Study of Currents in the Wakes of Vortex Generators on the Blades of Wind Power Turbines

Savelov O.V., Kovalnogov V.N., Chukalin A.V., Kornilova M.I.
Ulyanovsk State Technical University,
Ulyanovsk, Russian Federation

***Abstract*.** The article considers the possibility of using vortex generators on the back of wind turbine blades. The main objective of the work is to select the optimal shape of vortex generators for effective boundary layer and separated flow control in the blade back region of wind turbines. To achieve this goal, the following tasks were set: determining the optimal shape of vortex generators installed on the blade backs of wind turbines; development of a model of a surface vortex generator for controlling the boundary layer and separated flows. The work also examines in detail the formation and development of separated flows. The most important result is obtaining data on the optimal shape of vortex generators on the blade backs and a prototype of a surface vortex generator for forming flat coherent vortex structures along the blade surface and three-dimensional spiral vortices for influencing the outer boundary of the boundary layer. It is established that surface vortex generators placed on the blade back make it possible to change the flow structure, reduce the energy and scale of turbulent vortices, increase the speed of air flow around the blade back, which contributes to an increase in lift and energy generation by wind power plants in a wide range of incoming flow velocities. The significance of the obtained results lies in the theoretical and experimental substantiation of the effectiveness of using vortex generators to control the boundary layer along the blade back, their optimal shape, and, ultimately, a method for increasing the coefficient of wind energy use by operating wind power plants.
***Keywords*:** wind energy system, aerodynamics, particle image velocimetry, vortex generator.

DOI: https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.11
UDC: 533.6.011.32

Studiul curenților din urmele generatoarelor de vârtej instalate pe palele turbinelor eoliene

Savelov O.V., Kovalnogov V.N., Ciukalin A.V., Kornilova M.I.
Universitatea Tehnică de Stat din Ulyanovsk, Ulyanovsk, Federația Rusă

Rezumat. Articolul analizează posibilitatea utilizării generatoarelor de vârtej pe spatele palelor turbinelor eoliene. Obiectivul principal al lucrării este de a selecta forma optimă a generatoarelor vortex pentru un control eficient al stratului limită și al fluxului separat în regiunea din spate a palelor turbinelor eoliene. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost stabilite următoarele sarcini: determinarea formei optime a generatoarelor vortex instalate pe spatele palelor turbinelor eoliene; dezvoltarea unui model de generator vortex de suprafață pentru controlul stratului limită și al fluxurilor separate. Lucrarea examinează, de asemenea, în detaliu formarea și dezvoltarea fluxurilor separate. Cel mai important rezultat este obținerea de date despre forma optimă a generatoarelor de vârtej de pe spatele palelor și a unui prototip de generator de vârtjde supvârtejurilorvortexuri spiralate tridimensionale pentru influențarea limitei exterioare a stratului limită. S-a stabilit că generatoarele de vortex de suprafață plasate pe spatele palei permit modificarea structurii fluxului, reducerea energiei și a amplorii vortexurilor turbulente, creșterea vitezei fluxului de aer în jurul spatelui palei, ceea ce contribuie la creșterea portanței și a generării de energie de către centralele eoliene într-o gamă largă de viteze de curgere la intrare. Semnificația rezultatelor obținute constă în fundamentarea teoretică și experimentală a eficacității utilizării generatoarelor de vortex pentru controlul stratului limită de-a lungul spatelui palei, forma lor optimă și, în cele din urmă, o metodă de creștere a coeficientului de utilizare a energiei eoliene prin operarea centralelor eoliene.
***Cuvinte-cheie*:** sistem energetic eolian, aerodinamică, velocimetrie a imaginii particulelor, generator de vortex.

© Savelov O.V., Kovalnogov V.N.,
Chukalin A.V., Kornilova M.I., 2025

Исследование течений в следе вихревых генераторов на лопастях ветроэнергетических установок

Савелов О.В., Ковальногов В.Н., Чукалин А.В., Корнилова М.И.
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения вихревых генераторов на спинке лопастей ветроэнергетических установок. Основной целью исследования является подбор оптимальной формы вихревых генераторов для эффективного управления пограничным слоем и отрывными течениями в области спинки лопастей ветроэнергетических установок. Для достижения цели поставлены следующие задачи: определение оптимальной формы вихревых генераторов, устанавливаемых на спинке лопастей ветроэнергетических установок; разработка модели поверхностного вихревого генератора для управления пограничным слоем и отрывными течениями. В процессе исследования подробно рассмотрено формирование и развитие отрывных течений. Наиболее существенным результатом является получение данных об оптимальной форме вихревых генераторов на спинке спинки лопасти и предложен прототип поверхностного вихревого генератора для формирования плоских когерентных вихревых структур вдоль поверхности лопасти и трёхмерных спиралевидных вихрей для воздействия на внешнюю границу пограничного слоя. Установлено, что поверхностные вихревые генераторы размещенные на спинке лопасти позволяют изменить структуру потока, снизить энергию и масштаб турбулентных вихрей, увеличить скорость обтекания спинки воздушным потоком, что способствует увеличению подъёмной силы и генерации энергии ветроэнергетическими установками в широком диапазоне скоростей набегающего потока. Значимость полученных результатов заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании эффективности использования вихревых генераторов для управления пограничным слоем вдоль спинки лопастей, их оптимальной формы и в конечном итоге способа по увеличению коэффициента использования энергии ветра эксплуатируемыми ветроэнергетическими установками.

***Ключевые слова*:** ветроэнергетическая система, аэродинамика, измерение скорости частиц, вихревой генератор.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день исследование отрывных течений является одним из ключевых направлений исследований в области аэродинамики. Управление отрывными течениями позволяет повысить эффективность работы ветроэнергетической установки и снизить циклические механические нагрузки на лопасть [1].

Отрывные течения возникают при движении воздуха вдоль профиля лопасти. Суть этого явления заключается в том, что поток перестает двигаться вдоль поверхности и отходит от нее [2]. В результате образуются зоны рециркуляции (так называемые «воздушные мешки») — области отрывных течений, в которых поток образует замкнутые вихревые структуры с обратным течением жидкости или газа [3]. За такими зонами рециркуляции находится точка повторного присоединения, в которой поток снова присоединяется к поверхности до возникновения следующего «воздушного мешка» [4].

Определяющими факторами для возникновения отрывных течений являются вязкость и изменение давления вдоль поверхности. Необходимым условием срыва потока на поверхности является положительный градиент давления вдоль поверхности. Именно такие условия возникают, при обтекании лопастей ветротурбин, так как спинка лопасти имеет выпуклую форму, что и приводит к появлению градиента давления и отрыва потока в задней части спинки лопасти [5] (Рисунок 1). Отрыв потока наблюдается на профилях лопастей ветротурбин, угол атаки которых превышает определённое значение (10-15° для стандартных профилей NACA, от 16° для более современных аэродинамических профилей) [6].

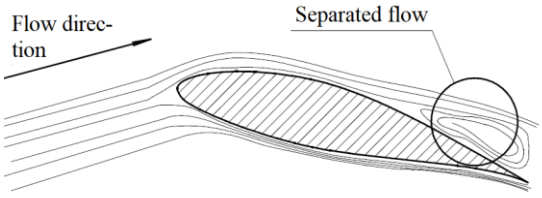


Fig. 1. The structure of the separated flow on the blade.

Рис. 1. Структура отрывных течений на лопасти.

Возникновение отрывных течений приводит к появлению высокого дополнительного аэродинамического сопротивления, снижению подъемной силы, а также увеличению циклических

механических нагрузок и, следовательно, к ускоренному износу конструкций.

Методы управления отрывными течениями исследуются со второй половины XX века [7, 8] и по сегодняшний день [9-13]. Одним из наиболее перспективных подобных методов является использование вихревых генераторов.

Вихревые генераторы представляют из себя пассивные устройства управления потоком, применяющиеся для задерживания его срыва на спинке лопастей ветроэнергетических установок.

Одной из ключевых проблем при эксплуатации вихревых генераторов является выбор их оптимальной формы, так как она напрямую зависит от аэродинамического профиля лопасти. Настоящая работа посвящена подбору формы вихревых для наиболее эффективного управления пограничным слоем и отрывными течениями в области спинки лопастей ветроэнергетических установок.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: определение и теоретическое обоснование эффективного размещения вихревых генераторов на спинке лопастей ветроэнергетических установок; разработка модели поверхностного вихревого генератора для управления пограничным слоем и отрывными течениями.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Отрыв потока следует рассматривать во взаимосвязи с переходом течения в пограничном слое из ламинарного состояния в турбулентное. Возникновение отрыва ускоряет переход к турбулентности. Однако отрыв турбулентного пограничного слоя происходит при более высоком градиенте давления, чем отрыв ламинарного пограничного слоя [5].

Именно на основании взаимосвязи между срывом потока и ламинарно-турбулентным переходом и применяют вихревые генераторы. Они позволяют минимизировать негативное влияние отрывных течений на ветроколесо, а также повысить стабильность работы ветроэнергетической установки.

На сегодняшний день вихревые генераторы широко используются на летательных аппаратах [14]. Они представляют из себя небольшие лопасти (рисунок 2).

Эффективность вихревых генераторов зависит от многих факторов:

- формы и размера вихревых генераторов;
- расстояния между ними;
- места расположения вихревых генераторов на лопасти;
- условий эксплуатации вихревых генераторов [15].

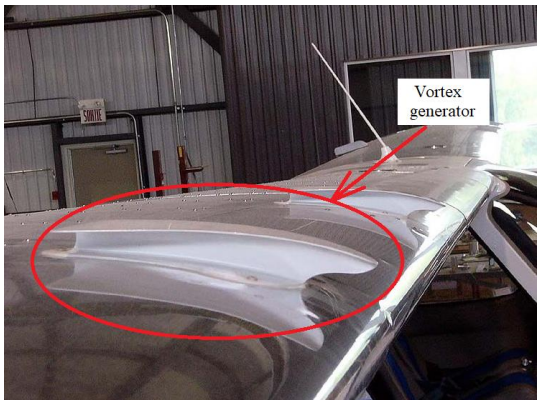


Fig. 2. Vortex generators on the wings of aircraft.

Рис. 2. Вихревые генераторы на крыльях летательных аппаратов.

Помимо увеличения подъёмной силы вихревые генераторы также увеличивают и лобовое сопротивление лопасти. Поэтому при проектировании и установке вихревых генераторов необходимо добиваться максимального увеличения подъёмной силы и минимального увеличения лобового сопротивления лопасти.

Принцип работы устройства представлен на рисунке 3 и заключается в следующем: Вихревые генераторы устанавливаются на спинку лопасти ветроэнергетической установки в месте отрыва потока. Как правило, это расстояние зависит от индивидуальных особенностей аэродинамического профиля лопасти и угла Питча — угла наклона лопастей ветроколеса относительно плоскости вращения ротора ветроэнергетической установки [6]. Они генерируют турбулентные вихри на спинке лопасти. Эти вихри перемешивают поток с более высокой скоростью и пограничный слой, где скорость ниже. Благодаря этому перемешиванию пограничный слой турбулизируется, его скорость увеличивается [16]. Как было описано выше, отрыв турбулентного пограничного слоя происходит при более высоком градиенте

давления, поэтому при использовании вихревых генераторов отрывные течения возникают значительно позже, чем без них.

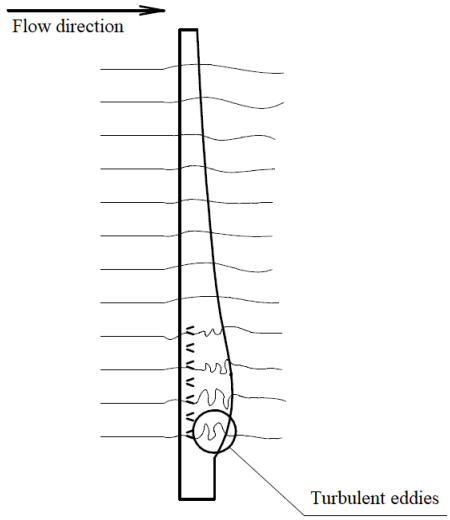


Fig. 3. The principle of operation of vortex generators.
Рис. 3. Принцип работы вихревых генераторов.

Вихревые генераторы могут иметь различную конфигурацию. Возможные формы вихревых генераторов представлены на рисунке 4 [17].

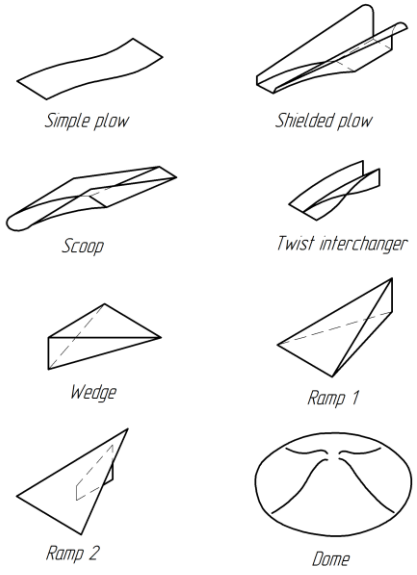
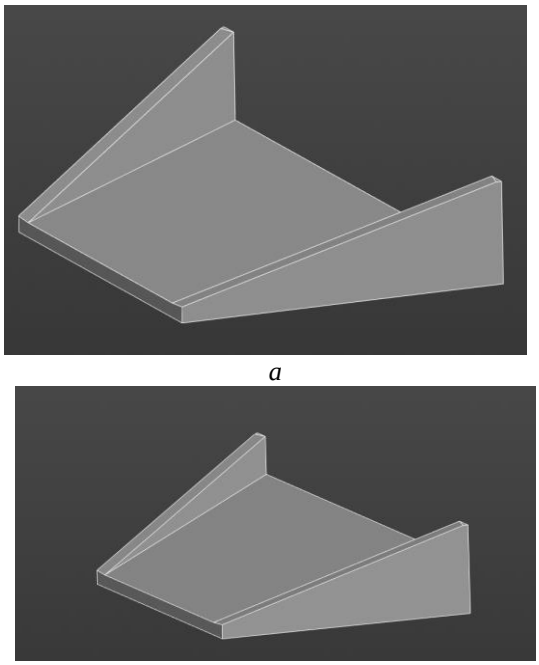


Fig. 4. Configurations of vortex generators.

Рис. 4. Конфигурации вихревых генераторов.

Исследование [18] показывает, что наименьшим лобовым сопротивлением обладают вихревые генераторы треугольной формы, а наибольшим — прямоугольные. На основании данного исследования в экспериментах для оценки эффективности вихревых генераторов применялись вихревые генераторы треугольного типа.

Для проведения экспериментального исследования методом цифровой велосиметрии изображения были предложены конфигурации вихревых генераторов, представленные на рисунке 5.



a

b

a — triangular paired (VG1), b — triangular paired with a ramp (VG2).

Fig. 5. Types of vortex generators used in the experiment.

a — треугольные парные (ВГ1), b — треугольные парные с рампой (ВГ2).

Рис. 5. Типы вихревых генераторов, использованные в эксперименте.

Согласно различным исследованиям, высота вихревых генераторов должна составлять 20-50% от толщины пограничного слоя в зоне отрыва потока (в зависимости от аэродинамического профиля лопасти) Меньшая высота не обеспечивает достаточную эффективность, а большая создаёт слишком сильное лобовое сопротивление [14, 19]. При проведении экспериментов исследовались треугольные вихревые генераторы высотой 3 мм. Высота рампы ВГ2 — 1,5 мм.

Для достижения максимальной эффективности вихревые генераторы

устанавливаются ближе к основанию лопастей ветроэнергетической установки. Это связано с тем, что длина хорды лопасти и угол атаки ближе к её концу значительно уменьшаются, в связи с чем отрывные течения не возникают, и установка вихревых генераторов не требуется [20].

Помимо смещения отрывной зоны ближе к выходной кромке лопасти ветроэнергетической установки, применение вихревых генераторов также позволит снизить амплитуду вибраций. Это позволить снизить циклические механические нагрузки на лопасти и увеличить срок её эксплуатации [21].

Экспериментальные исследования проводились методом цифровой велосиметрии изображения в аэродинамической трубе при различных скоростях потока (15 м/с, 22 м/с, 27 м/с). Скорость потока измерялась при помощи цифровых манометров RGK PM-12 (точность измерений при 25°C ±0.5%).

Определение полей средней скорости потока проводилось на основе статистической обработки данных для каждого результата по 40 снимкам измерений мгновенных полей скорости потока. Минимальное смещение трассеров, вычисленное с помощью интерполяции при обработке PIV-изображений, составило около 0,55 пикселя, неопределённости составляющих скорости в сечениях x и y были рассчитаны как 0,36 м/с и 0,13 м/с соответственно. Неопределённость пульсаций скорости при PIV-анализе была оценена как составляющая менее 4,5% от основной скорости потока [22].

Вихревые генераторы устанавливались на профиль DU21 (рисунок 6) с длиной хорды c = 300 мм на расстоянии 30% от длины хорды от входной кромки лопасти (рисунок 7). Размещение обусловлено экспериментальным определением точки отрыва потока на спинке лопасти методом PIV. Угол атаки α = 10°.

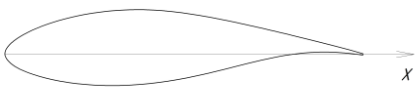


Fig. 6. Airfoil DU21.

Рис. 6. Аэродинамический профиль DU21.

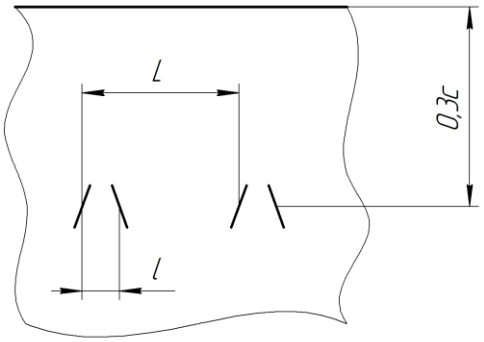


Fig. 7. Installation of vortex generators on a blade fragment.

Рис. 7. Установка вихревых генераторов на фрагменте профиля лопасти.

Координаты профиля в основных сечениях представлены в Таблице 1.

Table 1.

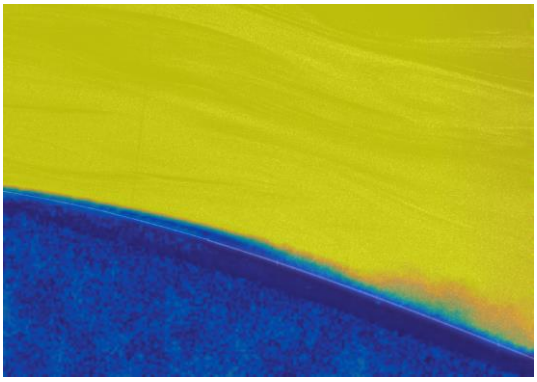
The coordinates of the DU21 airfoil in the main sections.

x/c	y/c
1	0.00194
0.9	0.02869
0.8	0.05336
0.7	0.07624
0.6	0.09759
0.5	0.1147
0.4	0.12394
0.3	0.12175
0.2	0.10648
0.1	0.07843
0.05	0.05348
0	0
0.05	-0.04449
0.1	-0.06306
0.2	-0.08134
0.3	-0.08692
0.4	-0.08134
0.5	-0.06636
0.6	-0.04408
0.7	-0.0193
0.8	-0.00023
0.9	0.00646
1	-0.00194

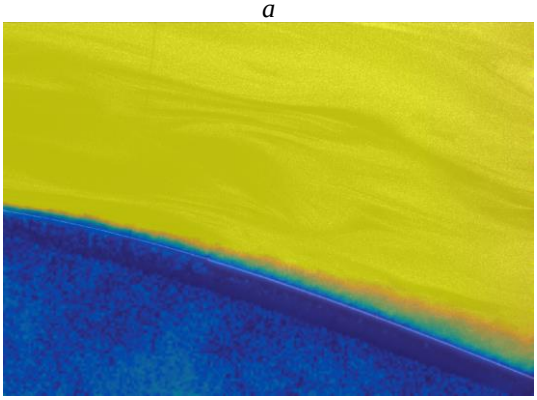
Максимальная относительная толщина аэродинамического профиля составляет 20,94%c (на расстоянии 0,314c от входной кромки). Максимальная кривизна поверхности составляет 2,3% (на расстоянии 0,697c от

входной кромки). Относительный радиус передней кромки составляет 2,3%.

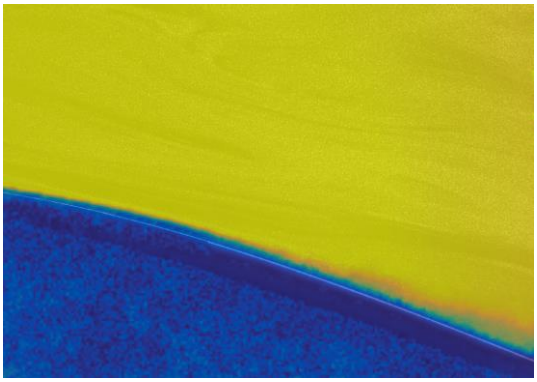
Картины распределения скоростей, полученные при проведении PIV-эксперимента со скоростью потока, равной 15 м/с, представлены на рисунке 8.



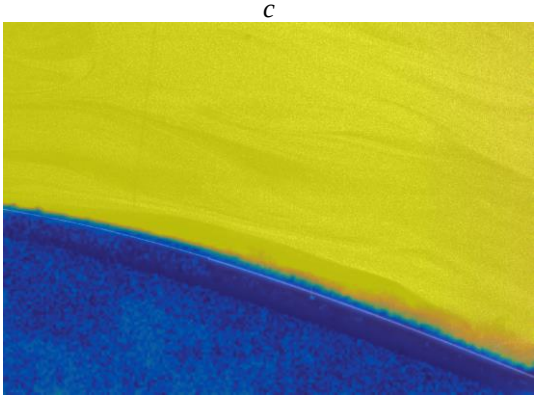
a



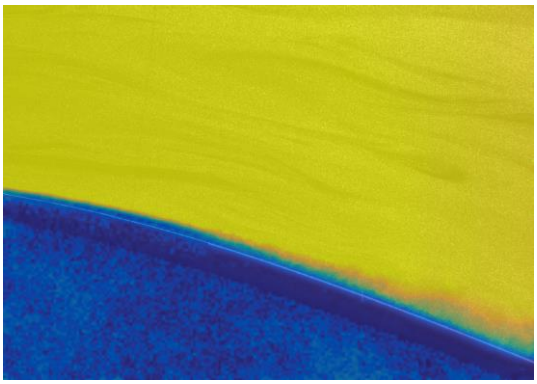
b



c



d



e

a — without vortex generators, b — VG1 (L = 31 mm, l = 13 mm), c — VG1 (L = 62 mm, l = 13 mm), d — VG1 (L = 62 mm, l = 39 mm), e — VG2 (L = 62 mm, l = 13 mm).

Fig. 8. Velocity magnitude distribution (air flow speed u = 15 m/s).

a — без вихревых генераторов, b — ВГ1 (L = 31 mm, l = 13 mm), c — ВГ1 (L = 62 mm, l = 13 mm), d — ВГ1 (L = 62 mm, l = 39 mm), e — ВГ2 (L = 62 mm, l = 13 mm).

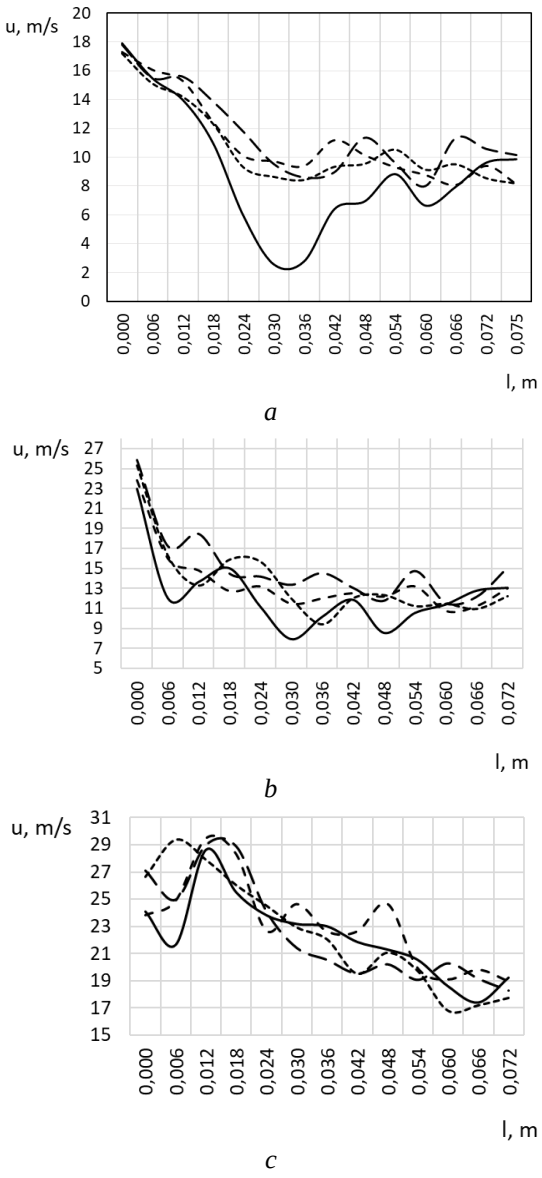
Рис. 8. Распределение величин скорости (скорость потока воздуха u = 15 м/с).

С учётом результатов, полученных при исследовании парных треугольных вихревых генераторов, установленных на различном расстоянии L друг от друга, при последующих исследованиях вихревые генераторы, имеющие другую форму, устанавливались на расстоянии L = 62 мм.

Картины, аналогичные рисунку 8, были получены также при экспериментальных исследованиях со скоростями потока u = 22 м/с и u = 27 м/с.

Как видно на рисунке 8, на спинке лопасти за вихревыми генераторами образуются турбулентные вихри, в результате образования которых появляется область с более высокой скоростью.

Графики распределения скоростей вблизи спинки лопасти представлены на рисунке 9. Сплошной линией обозначена скорость вдоль лопасти без вихрегевых генераторов, короткий пунктир — с вихревыми генераторами при l = 13 мм, длинный штрих — с вихревыми генераторами при l = 39 мм, точки — с вихревыми генераторами с рампой (l = 13 мм).



a — u = 15 м/с, b — u = 22 м/с, c — u = 27 м/с.

Fig. 9. Velocity distribution on the back of a blade fragment for various types of vortex generators.

a — u = 15 м/с, b — u = 22 м/с, c — u = 27 м/с.

Рис. 9. Распределение скоростей на спинке фрагмента лопасти для различных типов вихревых генераторов.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам экспериментальных исследований, использование вихревых генераторов позволит сместить отрывную зону на спинках лопастей ветроэнергетических установок ближе к выходной кромке, что позволяет увеличить эффективную площадь взаимодействия между потоком и лопастями.

По результатам цифровой велосиметрии изображений, скорость потока на спинке лопасти ветроэнергетической установки при использовании вихревых генераторов наиболее сильно повышается при их эксплуатации в условиях более низких скоростей потока. Из этого можно сделать вывод, что установка вихревых генераторов на спинках лопастей по всей длине нецелесообразна.

При использовании ВГ1 (l = 39 мм) локальное повышение скорости достигает 34.2% (8.6 м/с на гладком фрагменте лопасти, 11.6 м/с при использовании вихревых генераторов). Прочие результаты экспериментальных исследований при потоке со скоростью 15±0.075 м/с: локальное повышение скорости при использовании ВГ1 (l = 13 мм) составляет 15.2%, при использовании ВГ2 — 23.1%. Результаты исследований эффективности при потоке со скоростью 22±0.115 м/с: локальное повышение скорости при использовании ВГ1 (l = 39 мм) – 19.9%, при использовании ВГ1 (l = 13 мм) составляет 7.6%, при использовании ВГ2 — 11%. Результаты исследований эффективности при потоке со скоростью 27±0.135 м/с: локальное повышение скорости при использовании ВГ1 (l = 39 мм) — 1.5%, при использовании ВГ1 (l = 13 мм) — 3.8%, при использовании ВГ2 — 0.1%. Исходя из результатов ряда проведённых экспериментов, неопределённость была оценена как составляющая менее 4.5% от основной скорости потока.

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что при одинаковых скоростях потока и одинаковом расстоянии l ВГ2 приводят к более эффективному дроблению «воздушных мешков», образующихся при отрыве потока на спинках лопастей эффективнее, чем ВГ1. При этом увеличение расстояния L также позволяет повысить эффективность работы вихревых генераторов.

В данном исследовании подтверждена возможность применения вихревых генераторов как инструмента для эффективного управления отрывными течениями, а также проведена экспериментальная оценка эффективности влияния вихревых генераторов различной конфигурации на пограничный слой на спинке лопасти ветроэнергетических установок.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда. № 25-79-00146, https://rscf.ru/project/25-79-00146/.

Библиография (References)

[1] Kharitonov B.P. *Avtonomnye vetroelektricheskiye ustanovki* [Autonomous wind power plants]. Moscow, 2006. 280 p.

[2] Hansen O.L.M., Aerodynamics of wind turbines. Third Edition. Abingdon, 2015. 174 p.

[3] Davletshin I.A., Dushin N.S., Mikheev N.I. Vikhrevaya struktura pristenochnogo techeniya pri obtekanii poperechnykh vystupov pul'siruyushchim potokom [Vortex structure of wall flow when a pulsating flow flows around transverse protrusions]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii - Modern Science: Research, Ideas, Results, Technologies*, 2012, no. 2(10), pp. 200-206.

[4] Guvernyuk S.V., Chulyunin A.Yu., Metastabil'nye otryvnye struktury pri turbulentnom obtekanii kruglykh i oval'nykh lunok [Metastable separated structures in turbulent flow around circular and oval dimples]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 17, pp. 43-46.

[5] Zanin B.Yu., Zverkov I.D., Kozlov V.V., Pavlenko A.M. O novykh metodakh upravleniya dozvukovymi otryvnymi techeniyami [On new methods of controlling subsonic separated flows]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika - Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Physics*, 2007, vol. 2, no. 1, pp. 10-18.

[6] Vahl H.M., Pechlivanoglou G., Nayeri C.N., Paschereit C.O. [Vortex Generators for Wind Turbine Blades: A Combined Wind Tunnel and Wind Turbine Parametric Study]. *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. Copenhagen, 2012, pp. 1-16.

[7] Gogish L.V., Neiland V.Ya., Stepanov G.Yu. *Teoriya dvumernykh otryvnykh techeniy* [Theory of two-dimensional separated flows]. Moscow, 1975. 132 p.

[8] Sychev V.V., Ruban A.I., Sychev V.V., Korolev G.L. *Assimptoticheskaya teoriya otryvnykh techeniy* [Asymptotic theory of separated flows]. Moscow, 1987. 256 p.

[9] Ozkan M., Erkan O. Control of a boundary layer over a wind turbine blade using disturbed passive roughness. *Renewable Energy*, 2022, vol. 184, pp. 421-429.

[10] Bouterra S., Belamadi R., Djemili A., Ilinca A. Flow separation control and aeroacoustic effects of a leading-edge slat over a wind turbine blade. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 22, p. 5597.

[11] Petrov A.S., Slitinskaya A.Yu. [Methods of Attenuation of Tear-off Currents on the Wings of Subsonic Aircraft in the Operational Speed Range]. *Sbornik tezisov nauchno-prakticheskoy konferentsii aspirantov pamyati A.K. Martynova* [Collection of Abstracts of the Scientific and Practical Conference of Postgraduate Students in Memory of A.K. Martynov]. Zhukovskiy, 2022, pp.61-63. (In Russian).

[12] Abdolahipour S. Review on Flow Separation Control: Effects of Excitation Frequency and Momentum Coefficient. Frontiers in Mechanical Engineering, 2024, vol. 10, pp. 1-23.

[13] Thompson E., Goza A. Adjoint-Based Optimal Actuation for Separated Flow Past an Airfoil. *Physics of fluids*, 2025, vol. 37, no. 3, pp. 1-45.

[14] Ozden M., Genc M.S., Koca K. Passive flow control application using single and double vortex generator on S809 wind turbine airfoil. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 14, p. 5339.

[15] Tsipenko V.G., Sagaidak M.V., Shevyakov V.I. [On Improving Aircraft Aerodynamics with Vortex Generators]. *Sbornik trudov XXV Vserossiyskogo seminara po upravleniyu dvizheniem i navigatsii letatel'nykh apparatov* [Collection of Proc. of the XXV All-Russian Seminar on Aircraft Motion Control and Navigation]. Samara, 2022, pp. 122-126. (In Russian).

[16] Jayanarasimhhan K., Balasubramanian N.K. An overview of flow control in aerodynamic surfaces using vortex generators. *Physics of fluids*, 2025, vol. 37, no. 3, p. 031307.

[17] Gyatt G.W. Development and Testing of Vortex Generators for Small Horizontal Axis Wind Turbines. Cleveland, 1986. 41 p.

[18] Bo L. Hua C., Suanghou D. Vortex generator design and application on the flow control of top-mouted subsonic intake at high angle of attack. *Journal of Vibroengineering*, 2014, vol. 16, no. 2, pp. 808-817.

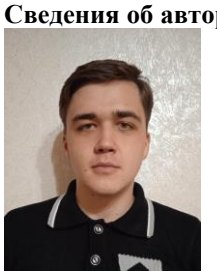
[19] Ye Q., Avallone F., Der Velden W.V., Casalino D. Effect of vortex generators on NREL wind turbine: aerodynamic performance and far-field noise. *Journal of Physics: Conference series*, 2020, vol. 1618, p. 052077.

[20] Zhao Z., Jiang R., Feng J., Liu H., Wang T., Shen W., Chen M., Wang D., Liu Y. Researches of vortex generators applied to wind turbines: a review. *Ocean engineering*, 2022, vol. 253, p. 111266.

[21] Naqash T.M., Alam M.M. A State-of-the-Art Review of Wind Turbine Blades: Principles, Flow-Induced Vibrations, Failure, Maintenance, and Vibration Suppression Techniques. *Energies*, 2025, vol. 18, no. 13, p. 3319.

[22] Matsubara T., Shima Y. Aono H., Ishikawa H., Segawa T. Effects of Jet Induced by String-type Plasma Actuator on Flow Around Three-Dimensional Bluff Body and Drag Force. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 4, p. 872.

Сведения об авторах.



Oleg Vladimirovich Savelov
Master.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University.
Russian Federation.
Area of scientific interests: the boundary layer.
E-mail: saviolov.oleg@yandex.ru
ORCID: 0009-0008-6727-0052.

Andrey Valentinovich Chukalin
Candidate of Technical Sciences
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University.
Ulyanovsk, 432027, Russian Federation.
Area of scientific interests: the boundary layer.
E-mail: chukalin.andrej@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3023-3393.

Vladislav Nikolaevich Kovalnogov
Doctor of Technical Sciences
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University.
Ulyanovsk, 432027, Russian Federation.
Area of scientific interests: computational gas dynamics.
E-mail: kvn@ulstu.ru
ORCID: 0000-0002-1907-3790.

Maria Igorevna Kornilova
Candidate of Technical Sciences
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University.
Ulyanovsk, 432027, Russian Federation.
Area of scientific interests: wind energy.
E-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6418-6105.