

Інформаційні джерела

1. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков / А.М. Гильман, Г.В. Гостев, Ю.В. Егоров, Ю.В. Ясаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.
2. Темчин Г.И. Многоинструментальные наладки / Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1978. – 309с.
3. Денисюк В.Ю. Методика формування структури технологічної операції та інструментального налагодження для багатошпindelних токарних автоматів // “Перспективні технології та прилади”. Збірник наукових праць. Випуск №2. м. Луцьк, жовтень 2012 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2012. – С. 59–56.

УДК 621.548

Д.А. Дмитриев<sup>1</sup>, д.т.н., П.П. Ремизов<sup>2</sup>, С.А. Русанов<sup>1</sup>, к.т.н., А.А. Лобов<sup>1</sup>, к.т.н.

Херсонский национальный технический университет<sup>1</sup>

Научно-производственное предприятие «РЕМИЗЛАБ»<sup>2</sup>

ПРОГНОЗИРУЕМАЯ МОЩНОСТЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ «КАСКАД-3»

*Проверена работоспособность малой ветровой энергетической установки с вертикальным расположением турбин. Рассчитаны аэродинамические параметры потоков воздуха как динамические поля скоростей, давлений, изменяющихся во времени и в зависимости от входных условий ветровой нагрузки. Получены графики во времени вероятных значений крутящих моментов на осях турбин энергоустановки. Проведен структурный и параметрический анализ геометрических характеристик тканевого конфузора в зависимости от изменений скорости ветра на входе в установку.*

**Ключевые слова:** конфузор, набегающий поток ветра, моделирование, поле давлений, мощность, крутящий момент.

*Перевірено працездатність малої вітрової енергетичної установки з вертикальним розташуванням турбін. Розраховано аеродинамічні параметри потоків повітря як динамічні поля швидкостей, тисків, що змінюються в часі й залежно від входних умов вітрового навантаження. Отримано графіки у часі ймовірних значень крутних моментів на осях турбін энергоустановки. Проведено структурний і параметричний аналіз геометричних характеристик тканевого конфузору залежно від змін швидкості вітру на вході в установку.*

**Ключові слова:** конфузор, потік вітру, моделювання, поле тисків, потужність, крутний момент.

*The capacity of small wind power plant is tested with the vertical location of turbines. The aerodynamic parameters of blasts as dynamic fields of speeds, pressures time-varying and depending on the entrance terms of the wind loading are expected. Charts are got in time of credible values of twisting moments on the axes of turbines of энергоустановки. The structural and self-reactance analysis of geometrical descriptions of tissue contractor is conducted depending on the changes of speed of wind on included in setting.*

**Keywords:** contractor, appearing suddenly stream of wind, design, field of pressures, power, twisting moment.

**Постановка проблемы.** Ветроэнергетика в развитых странах играет значительную роль как часть энергетических систем, при этом в некоторых странах она является одной из главных составляющих альтернативной энергетики [1]. Известно [2], что одним из наибольших препятствий для использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) является их высокая стоимость. Широкий спектр типов ВЭУ предполагает значительные расходы еще на проектных этапах, а в удельных показателях это особенно заметно для малых ВЭУ, где отношение к стоимости изготовления опытных образцов будет значительным. Стоимость проектных работ можно снизить за счет использования численных расчетов в системах, как целевым образом предназначенных для расчетов ВЭУ [3], так и в универсальных CFD программах, таких как ANSYS CFX, ANSYS Fluent, Autodesk Simulation CFD, Comsol Multiphysics и др.

Далее представлены результаты применения подобных расчетов в рамках научно-исследовательской работы проведенной на кафедре «Основы конструирования» Херсонского национального технического университета (тема ГР № 2/2014 договор от 16.06.14г.) - "Розрахунок

очікуваних показників потужності оригінальної повітряної енергоустановки каркасного типу "КАСКАД-3" с теоретическими расчетами по компоновке и размерам, представленными заказчиком фирмой Юг-тент (г. Херсон) и разработчиком концепции Ремизовым П.П.[5].

**Анализ предыдущих исследований.** Согласно [1] максимальный (теоретический) коэффициент использования энергии ветра при работе поверхности как силы сопротивления не может быть больше  $\xi_{\max} = 0,192$ . При этом оптимальной скоростью поверхности является  $v_{\text{нов}} = v_g / 3$ , где  $v_g$  - скорость ветра. Таким образом, при набегании потока на лопасть с некоторой скоростью  $v_n$  (она может отличаться от скорости ветра на удалении от установки) и движении лопасти с окружной скоростью  $v_n^r = v_n / 3$ , получим предельную мощность (в соответствии с [1])

$$N = C_x F \frac{\rho}{2} (v_n - v_n^r)^2 v_n^r = C_x F \frac{\rho}{9} v_n^3,$$

где коэффициент лобового сопротивления, для поверхностей, поставленных перпендикулярно потоку, равен  $C_x = 1,3$ ,  $F = 2,5 \cdot 0,5 = 1,25$  – площадь поверхности лопасти. Тогда

$$N = 1,3 \cdot 1,25 \cdot \frac{1,2}{9} v_n^3 = 0,22 v_n^3,$$

что в пределах скоростей потока от 0 до 20 м/с даст возможные мощности (рис.1).

Известно разделение гидродинамических задач на внешнюю, внутреннюю и смешанную [3], при этом смешанная задача понимается как движение жидкости или газа внутри каналов сложной формы с одновременным обтеканием тел. Смешанная задача обычно рассматривается применительно к движению жидкости через, например, зернистый слой твердого материала, когда она перемещается как внутри каналов между частицами, так и одновременно обтекает твердые частицы – эти условия наблюдаются в процессах фильтрования, массопередачи в аппаратах с насадками и т. д. Однако условия для смешанной задачи наблюдаются и в области альтернативной энергетики при работе погружных свободнопоточных осевых лопастных турбин для малых и микро ГЭС [5], при работе ветроэнергетических установок (ВЭУ) с воздухопроводными устройствами (диффузорными, конфузорными, комбинированными) [1]. В таких устройствах основной поток разделяется на две составляющие – внутреннюю, проходящую непосредственно через установку, и внешнюю, огибающую ее. Единой методики расчета подобных устройств не существует, что обусловлено не только сложностью задачи, но и широким перечнем оборудования, которое соответствует указанной области.

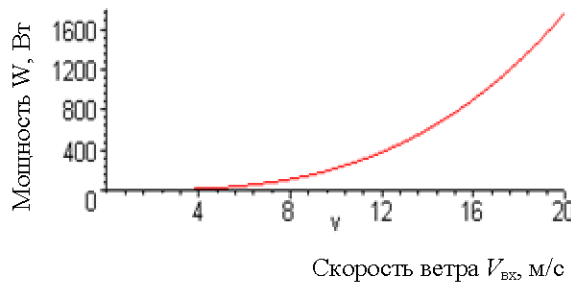


Рис.1. Теоретически возможная мощность при скорости ветра на лопатке согласно [1]

Представляет интерес смешанная задача, которая возникает при работе ветроэнергетической установки с воздухопроводным конфузорным устройством (расчеты по договору ГР №02/14 от 16.06.14 по компоновке [4]). Основной проблемой при проектировании подобных устройств является выбор правильной геометрии воздухопроводных устройств. Как указывается в [1, 2], использование воздухопроводных устройств потенциально может привести к увеличению скорости в 1,5...1,8 раз с одновременным увеличением перепада давлений на ветроколесе и ростом коэффициента использования энергии ветра, что может позволить эксплуатировать ВЭУ в регионах с пониженными среднегодовыми значениями скорости ветра.

**Цель исследований** - теоретическое определение в числовом виде основных прогнозируемых технических показателей воздушной энергоустановки по предложенной концепции заказчика.

- построение параметрической модели действующих на конструкцию динамических сил и моментов;
- нахождение параметрических связей согласно реальным размерам конструкции энергоустановки;
- разработка прикладной методики оценки мощности воздушной энергоустановки;
- моделирование влияния рабочих давлений и входных скоростей ветра на мощность энергоустановки;
- расчет действующих моментов и усилий, которые обеспечивает энергоустановка.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

- оформление протоколов моделирования с описанием законов аэродинамики во время работы энергоустановки;
- поиск способов структурной перестройки поверхностей конфузора для повышения ожидаемой мощности.

Ветроустановка представляла собой каркасную конструкцию вертикально-осевого типа с конфузорным воздуховодным устройством рис.2 (разработчик Ремизов П.П. [4]).

В работе использовалась расчетная методика, разработанная в работе [5], при этом общая задача была разбита на несколько этапов: упрощенная 2D модель, использованная для получения начальных базовых данных по работе ВЭУ, 2D модель со свободным пространством вокруг ВЭУ, полная 3D модель ВЭУ. Расчетная область для последних двух случаев состояла из 3 подобластей: свободного пространства вокруг ВЭУ, внутреннего стационарного пространства ВЭУ и круговой области, охватывающей лопадки, для задания вращающегося расчетного домена. Дополнительными расчетами была также произведена оценка аэродинамического сопротивления корпуса ВЭУ с конфузором без учета вращающегося домена. Расчетная сетка для полной 3D модели ВЭУ насчитывала более 3 млн. ячеек, сеточная независимость была проверена путем выполнения расчетов для одного из режимов на более густой и более разреженной сетках. Использовалась стандартная для таких случаев  $k-\varepsilon$  модель турбулентности с масштабируемыми пристеночными функциями. Граничные условия учитывали специфику задачи: на входе в расчетную область задавалась средняя скорость набегающего воздушного потока, задавались также условия симметрии для центральной части, выход в атмосферу. На стенках задавалось граничное условие No Slip Wall.

Согласно Рис.1 для достижения максимальной мощности ВЭУ не необходимо увеличить скорость потока на лопадке за счет захвата воздушного потока фронтальной частью конфузора и усиления скорости в местах расположения турбин на участке А-В (рис. 3, 4).

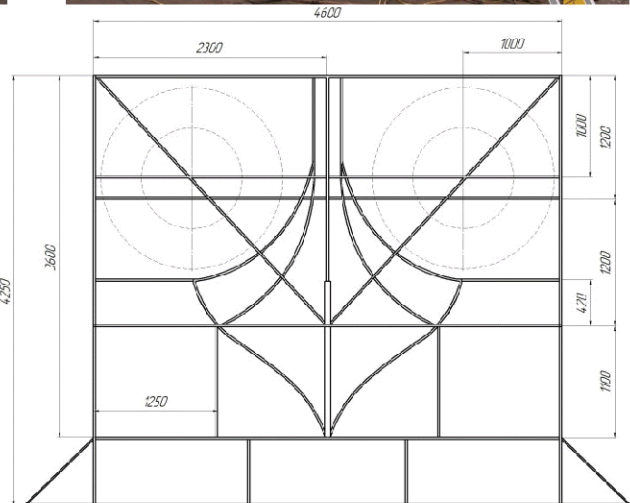


Рис.2. Общий вид и компоновка, изготовленной ВЭУ "КАСКАД-3"

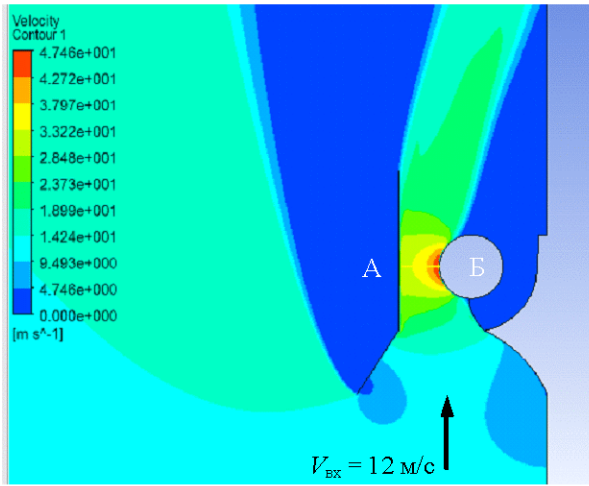


Рис.3. Поле скоростей воздушного потока «идеальной» модели - конфузор без лопаток на турбине, на входе 12 м/с

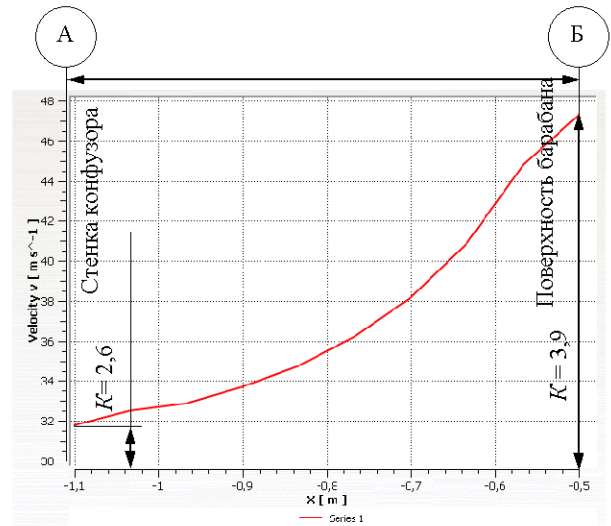


Рис.4. Эпор скоростей на линии А-Б (просвет), по рис.8 ( $K$ - коэффициент усиления скорости)

В соответствии с расчетной методикой [5] первоначальный расчет проводился для нулевой угловой скорости ротора (принудительное заклинивание ротора), с целью определения максимальных моментов, действующих на ось ротора. Расчет показал значительную чувствительность решения к текущему углу поворота ротора барабана (рис. 5), отрицательные значения момента соответствуют необходимому направлению вращения), что характерно для вертикально-осевых ветроустановок.

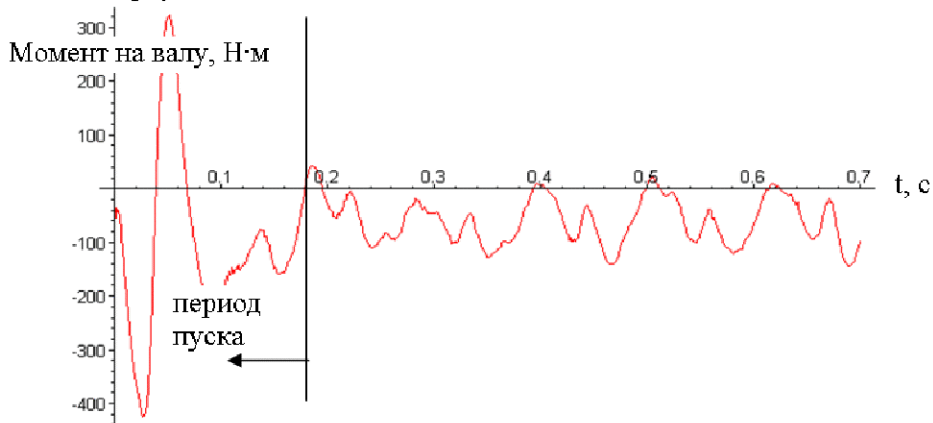


Рис. 5. Результаты расчета крутящего момента на оси турбины

Дальнейшие расчеты проводились для различных скоростей равномерного вращения барабана. Расчеты велись в нестационарной постановке с получением анимации полей скоростей и давлений в ВЭУ. Аппроксимируя полученные средние моменты, определяли возможные для снятия с одного барабана мощности (характеристика установки) – рис.6.

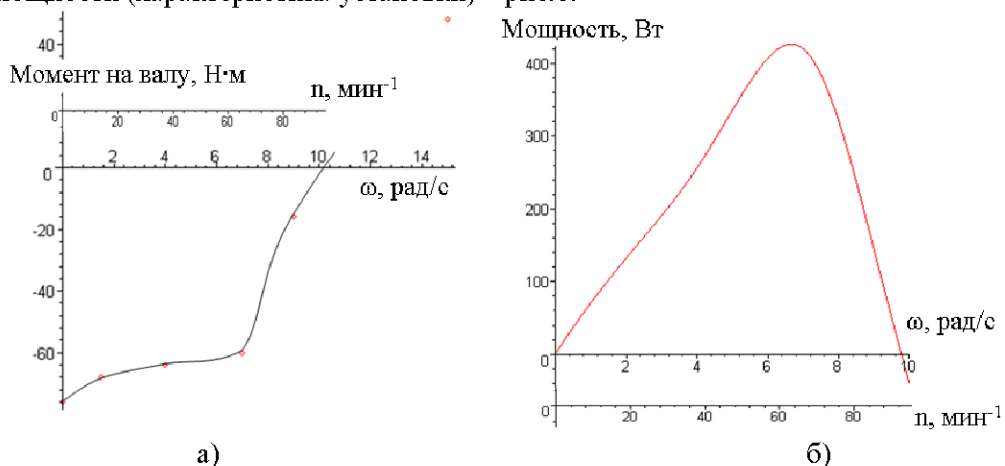


Рис. 6. Итоговые графики ожидаемых момента (а) и мощности (б) ВЭУ «КАСКАД-3» при минимальной скорости ветра на входе в конфузор 5 м/с



Однако у подобных конструкций есть недостатки: возникновение отрывов потока (снижение эффективности), увеличение осевого усилия на конструкцию, усложнение ВЭУ, при этом известны различные приемы улучшения конструкций ВЭУ с воздухопроводными устройствами, как пример – использование наружных щелей в стенках диффузоров [1]. Моделирование работы подобных устройств позволяет оценить степень повышения эффективности работы ВЭУ от использования воздухопроводных приспособлений. На рис. 7 показана двумерная модель течения в ВЭУ «КАСКАД-3» с графиками профиля скорости потока на входе в аппарат и выравнивания ее среднего значения во времени (ВЭУ представлена только одним ветроколесом с заданием симметричных граничных условий).

Картина течения является достаточно сложной, с образованием крупномасштабных вихрей за конфузуром с воздуховодом. График показывает, что средняя скорость устанавливается на уровне 3 м/с (при скорости ветра 12 м/с) с пиковым значением 4 м/с. Указана стрелками также зона выноса потока из конфузора. Как видно из конфигурации потока, объем воздуха попадающий в установку соответствует просвету «коридора» по миделю – между барабаном по лопасти до стенки.

Необходимо подчеркнуть, что работа конфузора в открытом потоке принципиально отличается от аналогичных сужений каналов для внутренней задачи (например, течение в трубах Вентури), т.к. у среды есть возможность обойти гидродинамическое препятствие, которым является ВЭУ. Были проведены серии численных расчетов, которые показывают некоторое увеличение скорости потока в просвете. ВЭУ для данной 3D задачи (в связи с симметрией моделировалась  $\frac{1}{4}$  части), при этом для обнаружения принципиальной возможности повышения скорости потока расчеты производились без учета лопаток. Для диапазона скоростей набегающего потока от 5 до 12 м/с скорость в просвете увеличивалась примерно в 1,8 раза, что соответствует данным [1], где, как уже указывалось, ожидаемое повышение скорости составляет 1,5...1,8 раз. Однако последующим моделированием (с ветроколесом и лопатками в отдельном вращающемся домене) установлено значительное влияние лопаток и мгновенного угла поворота турбины как местного сопротивления сложной формы на распределение полей скорости и давления в зоне конфузора.

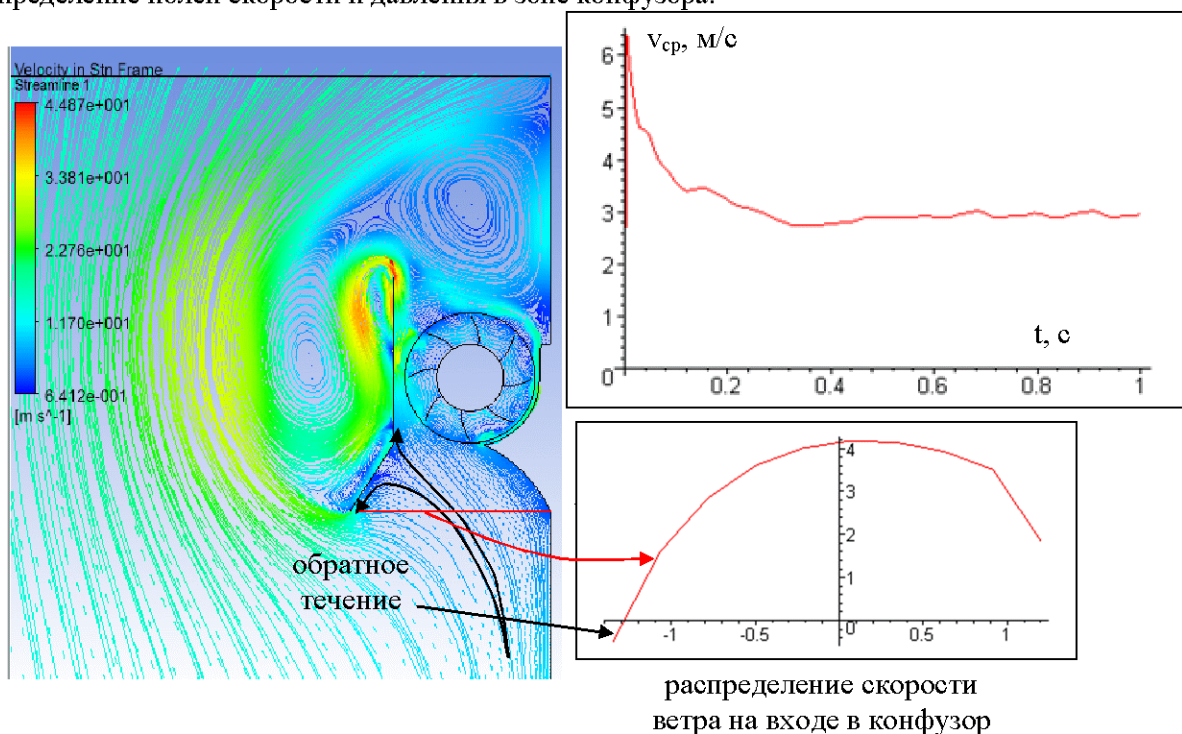


Рис. 7. Двумерная модель течения в ВЭУ «КАСКАД-3»

Расчет полной 3D модели для смешанной задачи (рис. 8) позволил определить распределение скоростей и давлений во всех областях, и сопоставить с натурными данными измерения скорости воздуха чашечными анемометрами моделей МС-13 ГОСТ 6376-74 и АРИ-49 ГОСТ7193-74 при работе прототипа.

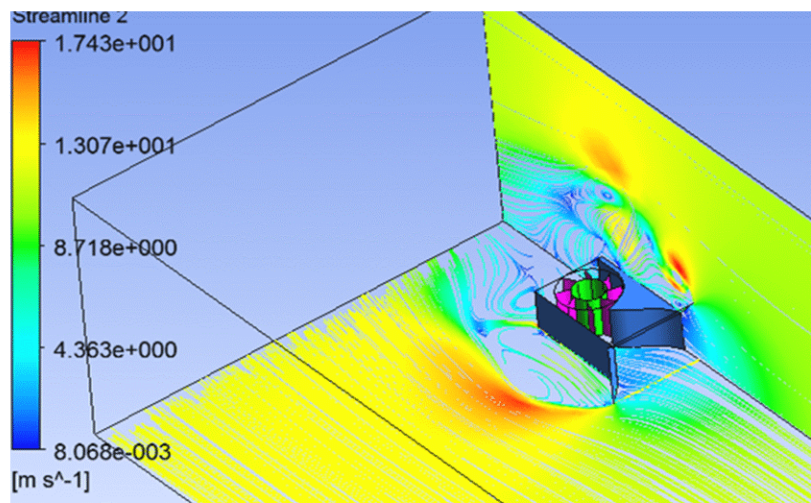


Рис. 8. Результаты решения смешанной задачи обтекания ветровым потоком 3D модели ВЭУ

Проведенные натурные экспериментальные исследования распределения скоростей подтвердили расчетные данные по обтеканию ВЭУ.

На основании проведенных расчетных исследований были выработаны предложения по обеспечению максимальной мощности ВЭУ "Каскад-3" данной компоновки, среди которых: для уменьшения аэродинамического сопротивления ВЭУ на входе в конфузор необходимо предусмотреть открытые боковые зоны на уровне осей турбин и возможность выхода воздуха из застойных зон лопаток за тыльной частью рассекателя; возможно снижение негативного влияния отрыва вихрей за лопатками ВЭУ на распределение давления во внутренней зоне конфузора за счет уменьшения количества лопаток совместно с увеличением их ширины (уменьшение диаметра барабана турбины) без потерь мощности ВЭУ "Каскад-3"; изменение (уменьшение) угла раскрытия конфузора для сдвига точки расслоения набегающего потока во внутреннюю часть ВЭУ.

#### Информационные источники

1. Янсон Р.А. Ветроустановки: Учеб. пособие / Под редакцией М.И. Осипова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. – 36 с.
2. Рензо Д, Зубарев В.В. Ветроэнергетика. – Москва. :Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
3. Приходько А.А., Редчиц Д.А. Компьютерное моделирование аэродинамики подвижных роторов ветроагрегатов Дарье и Савониуса // Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы. – 2006. – Т. 2. – С. 120-142.
4. Пат. № 91379 Україна, МПК F03B 13/10. Енергетичний пристрій «КАСКАД-3»/ Ремізов П.П. - № а2013 11898; Заявлено 09.10.2013; Надрук. 10.07.2014; Бюл. №13/
5. Ремізов П. П. Моделирование работы турбины гидродинамического устройства "Каскад-М" / П. П. Ремізов, С. А. Русанов, Д. А. Дмитриев // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. - 2012. - № 2/8. - С. 64-67.
6. Фатеев Е.М. – Ветро двигатели и ветроустановки – Москва, 1948.

УДК 621.822

А.А. Ткачук, к.т.н., Т.В. Дуляницька  
Луцький національний технічний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ФОРСУВАННЯ ВИПРОБУВАНЬ ПІДШИПНИКІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ

*В статті розглянуто методика форсування випробувань підшипників на довговічність, що ґрунтується на застосуванні математичного апарату Вейбулла. Наведено результати стендових випробувань підшипників.*

**Ключові слова:** підшипник, довговічність, втома металу, форсування випробувань.

*В статье рассмотрена методика форсирования испытаний подшипников на долговечность, которая основывается на применении математического аппарата Вейбулла. Приведены результаты стендовых испытаний подшипников.*

**Ключевые слова:** подшипник, долговечность, усталость металла, форсирование испытаний.