

03

## Экспериментальные и теоретические исследования эффективности автономных компактных многоэтажных ветроэлектростанций

© Т. Кунакбаев,<sup>1</sup> Н.К. Танашева,<sup>2,3</sup> А.Н. Дюсембаева,<sup>3</sup> К.М. Шаймерденова,<sup>3</sup> Б.М. Сагитжанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 050040 Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Институт прикладной математики, 100026 Караганда, Казахстан

<sup>3</sup> Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, 100026 Караганда, Казахстан

e-mail: kutulegen@mail.ru, nazgulya\_tans@mail.ru, aikabesoba88@mail.ru birlik.sagitjanov@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 4 мая 2019 г.

Принято к публикации 15 мая 2019 г.

Проведено исследование компактных многоэтажных ветроэлектростанций, создаваемых авторами впервые в мире. Показана их эффективность за счет автономности, компактности и использования явления сквозняка, возникающего между этажами. За счет этого компактные многоэтажные ветроэлектростанции будут иметь определенные преимущества по сравнению с обычными ветроэлектростанциями и отдельными ветрогенераторами такой же мощности.

**Ключевые слова:** многоэтажные ветроэлектростанции, скорость ветра, моделирование, эксперимент.

DOI: 10.21883/JTF.2020.01.48658.64-19

### Введение

Актуальность альтернативных, возобновляемых и экологически чистых источников энергии во всем мире очевидна.

На данный момент в Казахстане не выпускаются ветродвигатели отечественной разработки. Создание ветродвигателей большой мощности (MW) требует высоких технологий, которые в Казахстане в ближайшее время создать будет очень трудно. Поэтому для Казахстана является актуальным создание малых конкурентноспособных ветродвигателей, которые разрабатываются многими учеными.

Увеличить мощность предлагаемой нами ветроустановки до любой желаемой величины можно за счет установки на ее этажах необходимого количества малых ветродвигателей [1].

В Казахском национальном университете им. аль-Фараби под руководством к.ф.-м.н., доцента кафедры механики Кунакбаева Т. в 2011 г. предложена конструкция оригинальной автономной компактной многоэтажной ветроэлектростанции (КМВЭС), не имеющей аналогов в мире.

Применение автономных КМВЭС ориентировано в первую очередь на обеспечение электроэнергией изолированных от центральной энергосети регионов, трудности снабжения электроэнергией которых заключаются в необходимости обеспечения их различными видами топлива, наносящими существенный вред экологии, и в транспортировке самой электроэнергии по электросетям, на которых происходят значительные потери энергии, особенно в зимнее время (эффект обледенения).

В КМВЭС нуждаются различные предприятия малого и среднего бизнеса, крестьянские хозяйства, посты на железнодорожных путях, экологические и метеорологические посты, пограничные заставы и армейские посты, малые хозяйствующие субъекты — мельницы и маслобойки, частные дома и т.п. [1].

Целью настоящей работы являются экспериментальные и теоретические исследования эффективности автономных компактных многоэтажных ветроэлектростанций и демонстрация их преимуществ по сравнению с обычными ветроэлектростанциями и отдельными ветрогенераторами такой же мощности.

### Методика исследования

В настоящей работе использованы экспериментальные и теоретические методы исследования. Экспериментальные исследования проводились посредством испытаний в полевых условиях (поселок Байтуган Нуринаского р-на Карагандинской обл. Республики Казахстан) опытного образца компактной трехэтажной ветроэлектростанции (КТВЭС) мощностью до 3 kW [1] (рис. 1).

КТВЭС представляет собой трехэтажную конструкцию, и состоит из каркаса, на этажах и крыше которого располагаются ветрогенераторы различного типа и различной мощности (рис. 2).

Ветровые электростанции, как правило, занимают большое пространство. Для их строительства используются малозаселенные и не вовлеченные в экономическую деятельность регионы. КМВЭС имеют следующие преимущества по сравнению с обычными ветроэлектро-



Рис. 1. Опытный образец КТВЭС мощностью до 3 kW.

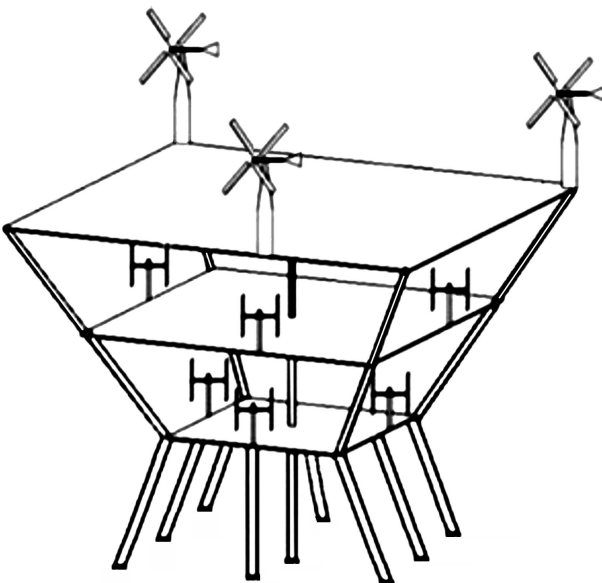


Рис. 2. Эскиз конструкции КТВЭС.

станциями и отдельными ветрогенераторами такой же мощности [1]:

1. Экономия территории: КТВЭС занимает территорию в несколько раз меньшую, чем обычная ветроэлектростанция такой же мощности с ветротурбинами, расположенными в один этаж на земле.

2. Пространство между этажными перекрытиями образует воздушный коридор, способствующий эффективному протеканию ветрового потока, подобного тому,

который развивается в аэродинамической трубе (явление сквозняка). Тем самым увеличивается коэффициент использования энергии ветра.

3. Простота конструкции КТВЭС, ее сборки и разборки (как казахская юрта) по сравнению с отдельными ветрогенераторами большей высоты такой же мощности.

4. Опорная конструкция отдельного ветрогенератора большой мощности менее устойчива, чем многоэтажная опорная конструкция КТВЭС той же мощности.

5. Более стабильное использование энергии ветра из-за расположения ветрогенераторов на разных высотах, так как скорость ветрового потока меняется в зависимости от высоты.

6. Возможность комбинации разных видов ветротурбин с разными скоростями вращения.

7. Увеличение коэффициента использования энергии ветра за счет расположения ветротурбин на верхних этажах, где скорость ветра обычно выше.

Основным элементом КТВЭС является ветротурбина, преобразующая энергию стихийного ветрового потока в механическую энергию вращения вала, которую, в свою очередь, можно преобразовать в электрическую и тепловую. На внутренних этажах КТВЭС выгоднее применять карусельные ветротурбины типа Дарье с вертикальной осью вращения. Установка на этажах многоэтажных ветроэлектростанций именно карусельных ветротурбин типа Дарье необходима для выполнения условия компактности КТВЭС, так как ветровой поток завихряется только вокруг каждой ветротурбины, а при установке на этажах ветротурбин пропеллерного типа с горизонтальной осью вращения за каждой такой ветротурбиной образуется турбулентный след, который отрицательно влияет на остальные ветротурбины и тем самым уменьшается величина коэффициента использования энергии ветрового потока.

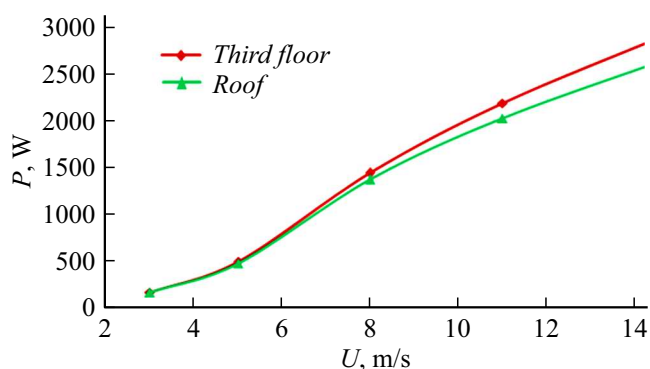
Для условия компактности многоэтажных ветроэлектростанций нами ранее было показано, что количество ветротурбин не должно превышать трех, иначе происходит отрицательный эффект их взаимного затенения от ветрового потока [1].

Теоретические исследования проводились посредством методов аэродинамического моделирования с использованием стандартных ЭВМ-программ.

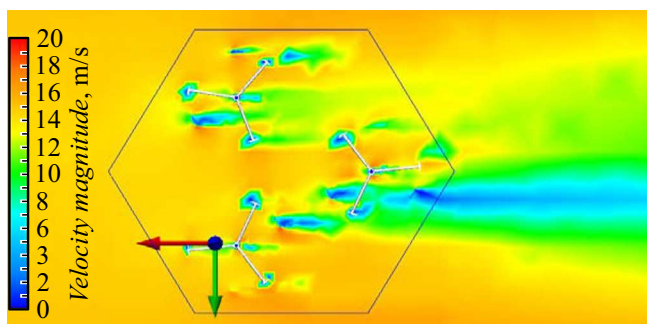
## Результаты экспериментальных и теоретических исследований

Полевые испытания КТВЭС проводились в разные времена года при различных скоростях ветра. На рис. 3 приведены графики усредненных результатов экспериментов по сравнению с показателями суммарных мощностей трех одинаковых ветрогенераторов с лопастями типа „тропоскино“ профиля НАСА на третьем этаже и на крыше КТВЭС (фото на рис. 1).

Результаты сравнения показывают (рис. 3), что величина мощности, вырабатываемой ветрогенераторами,



**Рис. 3.** Зависимости суммарных мощностей трех ветрогенераторов с лопастями типа „тропоскино“ профиля НАСА от скорости воздушного потока, измеренные на третьем этаже и на крыше КТВЭС.



**Рис. 4.** Картина течения между ветротурбинами при скорости набегающего воздушного потока 15 м/с.

установленными на третьем этаже компактной трехэтажной ветроэлектростанции между этажными перекрытиями, где происходит более направленный ветровой поток (эффект сквозняка), в среднем на 5–10% больше, чем величина мощности, вырабатываемой ветрогенераторами, установленными на крыше компактной трехэтажной ветроэлектростанции, где нет направленного ветрового потока.

Этот установленный факт доказывает основную идею преимущества КМВЭС перед обычными наземными ветроэлектростанциями по значению коэффициента использования энергии ветрового потока. Имеется в виду, что процессы взаимодействия ветрового потока и ветротурбин на крыше КМВЭС и на земной поверхности аналогичны. При этом видно, что при больших скоростях ветрового потока это преимущество увеличивается.

Естественно, встает вопрос сравнения по стоимости киловатта вырабатываемой мощности. Это сравнение можно будет произвести в будущем при разработке серийных образцов КМВЭС. Однако уже сейчас можно предполагать, что стоимость серийных образцов КМВЭС будет меньше стоимости обычных наземных ветроэлектростанций, так как высокие мачты ветротурбин сложны в изготовлении, используют более до-

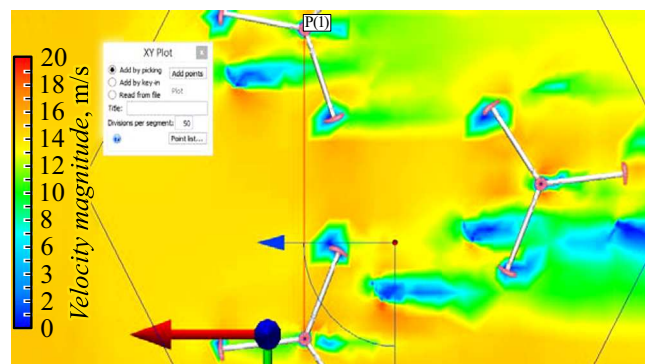
рогие материалы и менее устойчивы, чем конструкция многоэтажных ветроэлектростанций. Более того, конструкции многоэтажных ветроэлектростанций более просты в обслуживании, они могут быть сборными и разборными, как казахские юрты, что делает возможной их передислокацию (при необходимости).

Эффективность КМВЭС в первую очередь зависит от оптимально-минимального взаимного расположения ветротурбин для выполнения условия компактности. Его критерием является начало появления ламинарного течения воздушного потока между ветротурбинами.

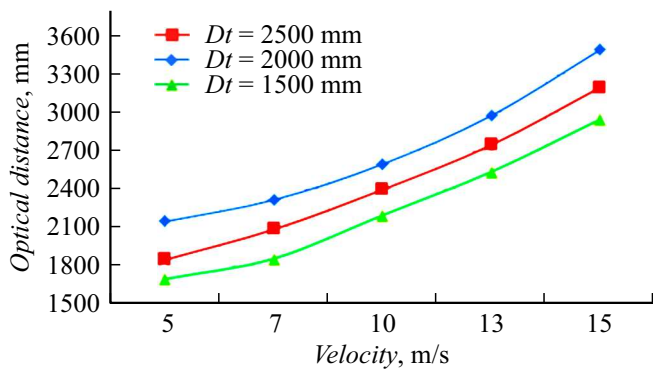
Нами рассмотрено аэродинамическое моделирование турбулентного течения, которое проводилось в рамках трехмерных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS). Этот подход к моделированию турбулентности применяется сейчас при решении практических задач наиболее широко.

В расчетах задач подобного рода обычно используют SST „ $k\omega$ “ модель турбулентности (модель Ментера), однако решатель Autodesk Simulation CFD обладает более широким арсеналом моделей турбулентности для решения других задач. Технология расчета Accelerant в Autodesk Simulation CFD состоит из нескольких передовых интеллектуальных компонентов, каждый из которых оптимизирован для быстрого и эффективного получения максимально точных и надежных результатов:

- решающий модуль Accelerant — система решения разреженных матриц Крылова, использующая два уровня предобуславливания. Каждый уровень контролируется допуском на отсечку и строится в процессе факторизации. После завершения факторизации он используется в петле итеративной конвергенции;
- интеллектуальное управление решением задач — Autodesk Simulation CFD
- автоматически подбирает параметры конвергенции и временной шаг;
- автоматическая оценка конвергенции — благодаря отслеживанию процесса и автоматической остановке моделирования при достижении нужного значения пользователь точно знает, когда подбор нужного решения будет завершен.



**Рис. 5.** Выбор точек для замера аэродинамических характеристик.



**Рис. 6.** Зависимости оптимально минимального расстояния между ветротурбинами от скорости течения воздушного потока при различных диаметрах ( $Dt$ ) ветротурбин.

Произведя аэродинамическое моделирование, получаем картину одного из случаев течения между ветротурбинами (рис. 4).

Для замера аэродинамических характеристик, в частности скорости, необходимо воспользоваться инструментом „XY Plot“, выставить точки, между которыми будет проведена линия (рис. 5), вдоль которой замеряется изменение скорости, в нашем случае — между лопастями ветротурбин. При этом критерием появления необходимого ламинарного течения будет являться равенство скоростей течения воздушного потока между ветротурбинами со скоростью набегающего потока. В этот момент идет фиксация оптимально минимального расстояния между осями ветротурбин.

В качестве примера полученные результаты аэродинамического моделирования приведены на графиках (рис. 6).

Вышеприведенный способ аэродинамического моделирования позволяет определять оптимально минимальные расстояния между ветротурбинами различных диаметров и переходить к непосредственному проектированию КМВЭС любой мощности. При этом нет необходимости в дорогостоящих прототипах, ускоряется вывод инновационной продукции на рынок.

## Заключение

На основе полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

— результаты экспериментальных исследований подтверждают преимущество эффекта „сквозняка“, используемого в конструкции компактной многоэтажной ветроэлектростанции;

— методом аэродинамического моделирования определены оптимально минимальные расстояния между ветротурбинами при различных скоростях течения воздушного потока и диаметрах ветротурбин.

Таким образом, проведены экспериментальные и теоретические исследования эффективности автономных компактных многоэтажных ветроэлектростанций, позволяющие проектировать конкурентноспособные автономные, экологически чистые, возобновляемые источники энергии.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Кунакбаев Т., Нигметов Д., Туреханова В. // Вестник КазНУ. Серия: математика, механика, информатика. 2016. Т. 2. Вып. 89. С. 103–109.
- [2] Танашева Н.К., Кунакбаев Т.О., Дюсембаева А.Н., Шуюшибаева Н.Н., Дамекова С.К. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 11. С. 1628–1631. [Tanasheva N.K., Kunakbaev T.O., Dyusembaeva A.N., Shuyushbayeva N.N., Damekova S.K. // Tech. Phys. 2017. Vol. 62. N 11. P. 1631–1633.]
- [3] Абдрахманов Р.С., Якимов Ф.В. // Известия РАН. 2010. Вып. 5. С. 54–57.
- [4] Кусаинов К., Танашева Н.К., Миньков Л.Л., Нусупбеков Б.Р., Степанова Ю.О., Рожкова А.В. // ЖТФ. 2015. Т. 86. Вып. 2. С. 150–152. [Kusaiynov K., Tanasheva N.K., Min'kov L.L., Nusupbekov B.R., Stepanova Yu.O., Rozhkova A.V. // Tech. Phys. 2015. Vol. 61. N 2. P. 229–301.]
- [5] Танашева Н.К., Шуюшибаева Н.Н., Мусенова Э.К. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 17. С. 60–70. [Tanasheva N.K., Shuyushbayeva N.N., Mussenova E.K. // Tech. Phys. Lett. 2018. Vol. 44. N 9. P. 787–789.]