

ORCID: 0000-0002-9020-0027

Адрес для переписки: gosha\_eto\_ya@mail.ru

**ШЕПЕЛЕВА Елена Юрьевна**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 2198-3042

AuthorID (РИНЦ): 821672

ORCID: 0000-0003-4908-560X

Адрес для переписки: elena.arta2013@yandex.ru

**МАНАКОВА Елена Алексеевна**, студентка группы Э-151 энергетического института.

**ЗАХАРОВ Андрей Андреевич**, студент группы ЭТМ-151 факультета транспорта нефти и газа.

Для цитирования

Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В., Кропотин О. В., Смородин Г. С., Шепелева Е. Ю., Манакова Е. А., Захаров А. А. Ускоритель потока башенного типа для ветроэнергетической установки // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 55–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-55-59.

Статья поступила в редакцию 02.04.2018 г.

© А. А. Бубенчиков, Т. В. Бубенчикова, О. В. Кропотин,

Г. С. Смородин, Е. Ю. Шепелева, Е. А. Манакова,

А. А. Захаров

УДК 621.548

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-59-67

**А. А. БУБЕНЧИКОВ  
Т. В. БУБЕНЧИКОВА  
К. В. ХАЦЕВСКИЙ  
Г. С. СМОРОДИН  
Е. А. МАНАКОВА  
А. А. ПОГОРЕЛОВ  
И. А. ГАИБОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЕОБРАЗНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПОТОКА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В статье проведен анализ применения простейших конструкций ускорителей воздушного потока для выявления наиболее перспективной геометрии для исследования. Определена наилучшая геометрия многолопастной конструкции для применения ее в качестве ускорителя потока для ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. Определено максимальное ускорение потока и возможное увеличение мощности, вырабатываемой ветроэнергетической установкой. Достигнутое увеличение скорости составляет 52 %. Так как мощность зависит от скорости ветра в кубе, то такая конструкция позволит увеличить мощность, вырабатываемую ВЭУ, в три раза.

**Ключевые слова:** ускорители потока для ветроэнергетических установок, спиралеобразные ускорители потока, концентрация энергии ветра.

Среди возобновляемых источников энергии одним из самых распространенных является ветроэнергетика. Рост ветроэнергетики в развитых странах, особенно в Европе, длительное время был обусловлен проблемой глобального изменения климата [1–3].

Ветровая энергетика является наиболее привлекательным решением мировых энергетических проблем. Она не загрязняет окружающую среду

и не зависит от топлива. Более того, ветровые ресурсы присутствуют в любой части мира и их достаточно, чтобы обеспечить растущий спрос на электроэнергию [4].

Однако для реализации выработки электроэнергии за счет энергии ветра в регионах с низкими скоростями ветрового потока применение классических ветроустановок не дает ожидаемых результатов [5], в связи с чем встает вопрос о про-

ектировании новых конструкций ветроустановок, лишенных этих недостатков.

Согласно атласу ветров, средняя скорость ветра на территории Центральной России не превышает 3–5 м/с [6]. Большинство представленных на рынке ветроэнергетических установок (ВЭУ) спроектированы на скорость ветра 10 м/с [5] и при скорости потока в 3–5 м/с не вырабатывают свою заявленную мощность. Подобную информацию можно извлечь из паспортов производителей ВЭУ.

Для формирования новых источников ветровой энергии необходимо создание ВЭУ с концентратором ветровой энергии, способных эффективно работать в регионах с малыми скоростями ветрового потока.

Для повышения эффективности ветроагрегатов разрабатываются различные дополнительные конструкции, позволяющие увеличить скорость, плотность потока или добавить ему дополнительное вращение [7, 8].

Это конфузорно-диффузорные каналы башенного типа, ВЭУ с несколькими ветротурбинами, многоярусные многолопастные конструкции, установки с различными модификациями лопастей и конструкции с направляющими плоскостями. Также это комбинированные установки: гелиоветроустановки, гидроветроустановки и горизонтально-осевые ветроустановки с пневматическим способом передачи мощности потока [9–18]. Некоторые установки, по заверению авторов, позволяют увеличивать скорость потока в несколько раз. К сожалению, более 90 % этих изобретений так и остались на этапе патентования и не получили своей реализации. Вероятными причинами этого могут выступать большие габариты, а значит, и большая стоимость предложенных конструкций, вибрация и шум, недопустимые для людей и животных, несоответствие реальной конструкции заявленным характеристикам.

В настоящее время ниша ВЭУ с вертикальной осью вращения [19, 20], способных работать при низких скоростях ветрового потока, остаётся слабо развитой, и новые технические решения, не требующие создания сложных устройств, но позволяющих при этом существенно улучшать энергетические параметры и характеристики установок, представляют большой практический интерес.

Для разрабатываемой нами ВЭУ с ускорителем потока были поставлены следующие условия:

- ускорение воздушного потока в 2–2,5 раза вместо 20–40 % у аналогов;
- увеличение надежности;
- исключение элементов динамики с возвратным движением при необходимости в ориентации системы по ветру и организации дополнительной устойчивости (в отличие от мачтовых ВЭУ);
- экологическая безопасность (сниженный уровень шума, отсутствие негативного влияния на птиц) для чего предлагается разместить ветроколеса в теле концентратора;
- возможность эффективно работать в регионах с малой ветровой нагрузкой (до 3 м/с);
- приемлемая стоимость, габариты и внешний вид.

Некоторые условия в совокупности осуществить очень сложно, потому что некоторые вихревые установки имеют очень сложную форму конфузурных каналов и саму конструкцию в целом, что не только увеличивает стоимость установки, но и усложняет ее эксплуатацию.

Известно, что идеальный концентратор — это сужающаяся труба, закрученная в пространственную логарифмическую спираль со спиральными направляющими внутри [21, 22]. Создание, эксплуатация и ремонт такого ускорителя очень сложны, поэтому в ходе работы предлагалось провести исследование ряда промежуточных конструкций от простого к сложному с указанием эффекта от изменения геометрии и внедрения дополнительных элементов в узлы конструкции. Для этого были произведены проектирование, изготовление и экспериментальные исследования серии моделей ускорителей потока. Теоретические исследования проводились на основе методов гидро- и аэродинамики с использованием математического моделирования при помощи программы Ansys CFX.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории при помощи системы нагнетания воздуха, анемометров, тихоходного генератора GS-0,5 для исследования ВЭУ с ускорителем под нагрузкой.

В ходе эксперимента изменялись следующие параметры:

- радиус закругления лопастей, влияющий на длину лопастей (чем больше радиус, тем меньше длина лопасти при тех же габаритах установки);
- количество лопастей;
- направление движения потока воздуха на входе конфузора;
- наклон вихревого (линейного) подъема потока в теле конфузурных каналов, путем добавления потокообразующих площадей (мосты различной формы).

В первом приближении был проведен анализ возможности использования логарифмической спирали в качестве направляющих в основании ускорителя (рис. 1).

За основу для моделей были предложены три варианта с различной длиной дуги  $AB$ ,  $AC$  и  $AD$ , для каждой из которых были созданы трех-, пяти- и семилопастные конструкции (рис. 2).

В итоге было получено девять моделей, различающихся длиной дуги и числом лопастей. Пример геометрии пятилопастной конструкции с длиной дуги  $AB$  и  $AC$  представлен на рис. 3.

Далее для удобства все созданные модели были обозначены номерами, согласно рис. 4.

Отметим, что основные размеры для всех моделей во всех экспериментах остаются неизменными:

- высота 1,5 м;
- вписанный диаметр основания 1,4 м;
- вписанный диаметр вершины 0,6 м.

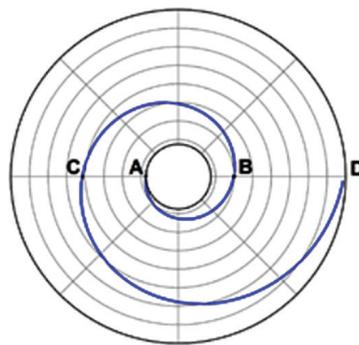


Рис. 1. Пример логарифмической спирали в основании ускорителя

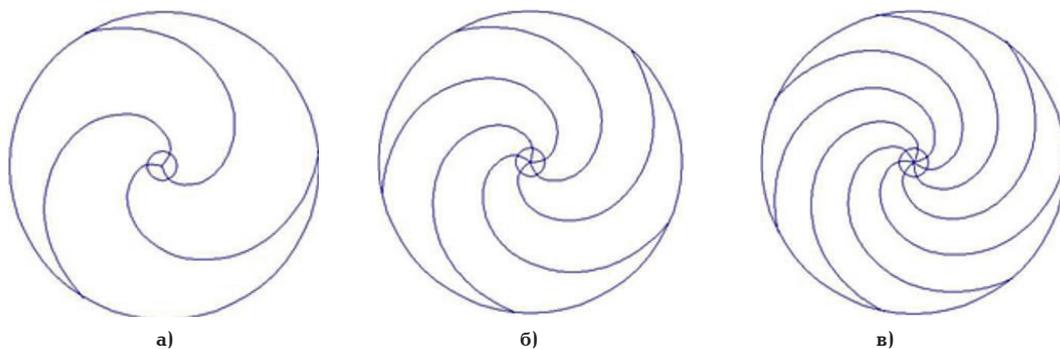


Рис. 2. Примеры основания конструкции: а) три лопасти; б) пять лопастей; в) семь лопастей

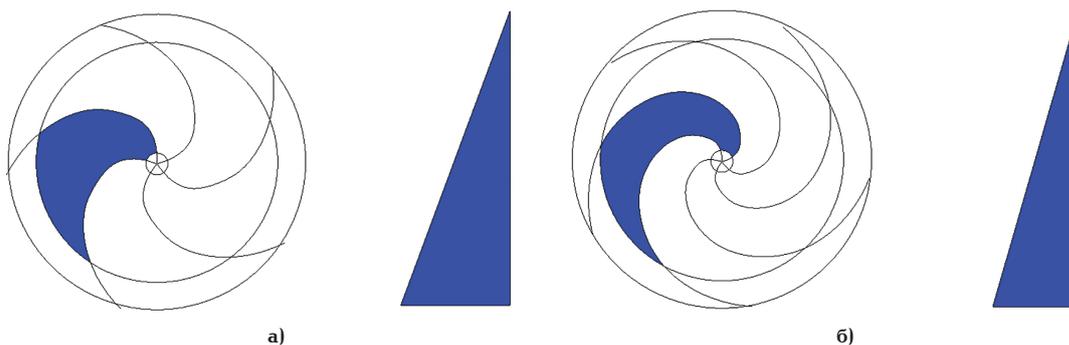


Рис. 3. Геометрия входа и выхода канала пятилопастного ускорителя:  
а) конструкция с длиной дуги АВ; б) конструкция с длиной дуги АС

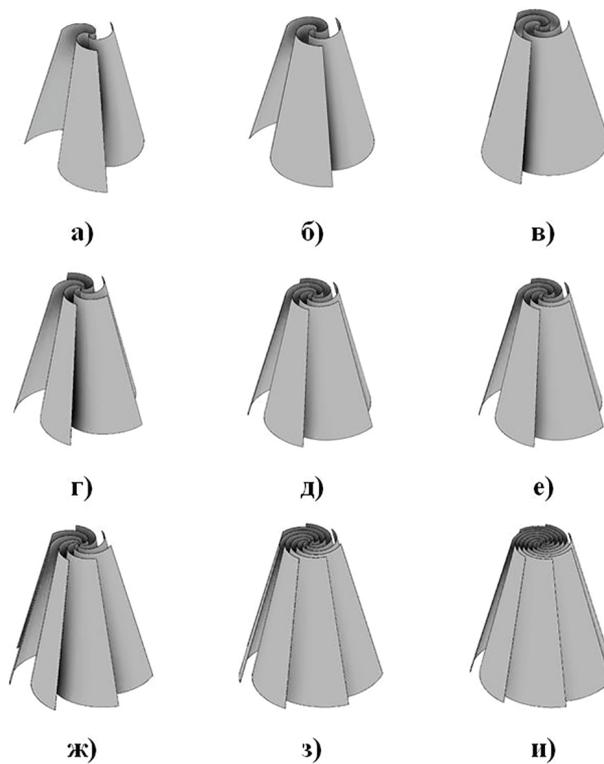


Рис. 4. Варианты конструкций моделей:  
а) трехлопастная с длиной дуги АВ;  
б) трехлопастная с длиной дуги АС;  
в) трехлопастная с длиной дуги АД;  
г) пятилопастная с длиной дуги АВ;  
д) пятилопастная с длиной дуги АС;  
е) пятилопастная с длиной дуги АД;  
ж) семилопастная с длиной дуги АВ;  
з) семилопастная с длиной дуги АС;  
и) семилопастная с длиной дуги АД

## Результаты измерений

Модель ТРЕХЛОПАСТНАЯ												
Средняя скорость набегающего потока 3 м/с												
№ модели	Модель 1		Модель 2		Модель 4		Модель 5		Модель 7		Модель 8	
	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	4,544	1,555	5,01	1,53	4,613	1,907	4,613	1,907	4,613	1,907	5,34	1,77
Ускорение в ... раз	2,92		3,29		3,26		3,08		2,42		3,01	
Средняя скорость набегающего потока 5 м/с												
№ модели	Модель 1		Модель 2		Модель 4		Модель 5		Модель 7		Модель 8	
	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	7,52	2,58	7,57	2,87	8,34	2,36	8,58	2,69	7,616	3,17	9,06	2,64
Ускорение в ... раз	2,9		2,63		3,55		3,18		2,39		3,42	
Модели при скорости потока 1,5 м/с												
№ модели	Модель 4 (5 лопастей)						Модель 5 (5 лопастей)					
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=72^\circ$		$\alpha=144^\circ$		$\alpha=0^\circ$		$\alpha=45^\circ$		$\alpha=90^\circ$	
	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	1,312	0,574	0,89	0,368	0,289	0,0494	2,607	1,34	2,81	1	1,172	0,48
Ускорение в ... раз	2,286		2,418		5,85		1,946		2,81		2,442	
№ модели	Модель 7 (7 лопастей)						Модель 5 (3 лопасти)					
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=51,4^\circ$		$\alpha=102,8^\circ$		$\alpha=154,2^\circ$		$\alpha=0^\circ$		$\alpha=120^\circ$	
	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	1,017	0,394	1,075	0,678	0,364	0,253	0,446	0,104	1,37	0,575	0,279	0,269
Ускорение в ... раз	2,58		1,59		1,44		4,29		2,38		1,04	
Модель 8 (7 лопастей)												
Угол поворота	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=51,4^\circ$		$\alpha=102,8^\circ$		$\alpha=154,2^\circ$		$\alpha=0^\circ$		$\alpha=120^\circ$	
	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	1,306		0,524		1,573		0,689		0,388		0,155	
Ускорение в ... раз	2,49		2,28		2,5		2,797					

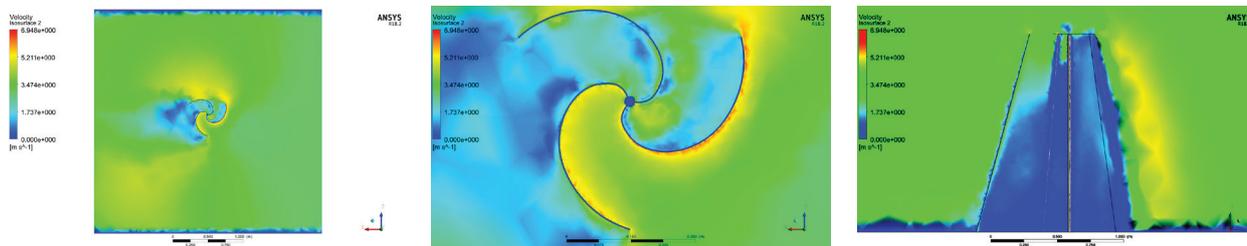


Рис. 5. Аналитическое моделирование в программе Ansys на примере модели № 1

В ходе экспериментов было выявлено, что при ускорении потока (соотношение средней скорости на входе в канал и на выходе) с уменьшением скорости на входе уменьшается, а с увеличением становится больше. Поэтому основной интерес состоял в анализе ускорителя при малых скоростях ветра приближенным к средней скорости нашего региона. Были заданы скорости 3 и 5 м/с и проведены исследования конструкций в программе Ansys. Примеры распределения потока для трехлопастной модели представлены на рис. 5.

Результаты измерений при скорости 3 м/с, когда поток направлен перпендикулярно площади входа канала (рис. 6), представлены в табл. 1.

Аналогичные измерения были проведены при скорости набегающего потока 5 м/с (табл. 1).

После аналитического моделирования были созданы макеты предложенных конструкций. Для них были проведены экспериментальные исследования при различной скорости ветра. Измерения проводились для всех каналов конструкций для определения работы в условиях, приближенных к реальным. На первом этапе измерялась скорость на подходе к конструкции и в точках, где будут в дальнейшем находиться входы в каналы ускорителя. После

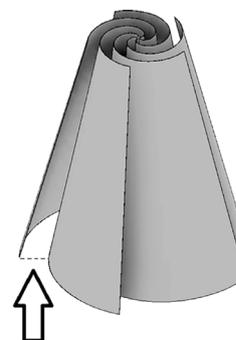


Рис. 6. Направление потока при анализе модели в программе Ansys

определения средней скорости потока от источника были проведены основные эксперименты.

Отметим, что при измерениях использовалась система вентиляторов, которая не способна корректно задать ламинарный поток. Но таких условий вполне достаточно для оценки параметров ускорения

Таблица 2

Результаты измерений трех вариантов моста

№ модели	Модель 5, мост 1				Модель 5, мост 2				Модель 5, мост 3			
	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 72^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 72^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 72^\circ$	
Угол поворота	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	1,196	0,596	1,021	0,471	1,166	0,461	1,166	0,461	1,2635	0,644	1,2635	0,644
Ускорение в ... раз	2,007		2,168		2,529		2,065		1,962		1,25	
№ модели	Модель 4, мост 1				Модель 4, мост 2				Модель 4, мост 3			
	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 72^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 72^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 72^\circ$	
Угол поворота	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	1,276	0,753	1,006	0,427	1,481	0,557	1,012	0,495	1,312	0,889	0,993	0,642
Ускорение в ... раз	1,693		2,351		2,65		2,263		1,475		1,545	

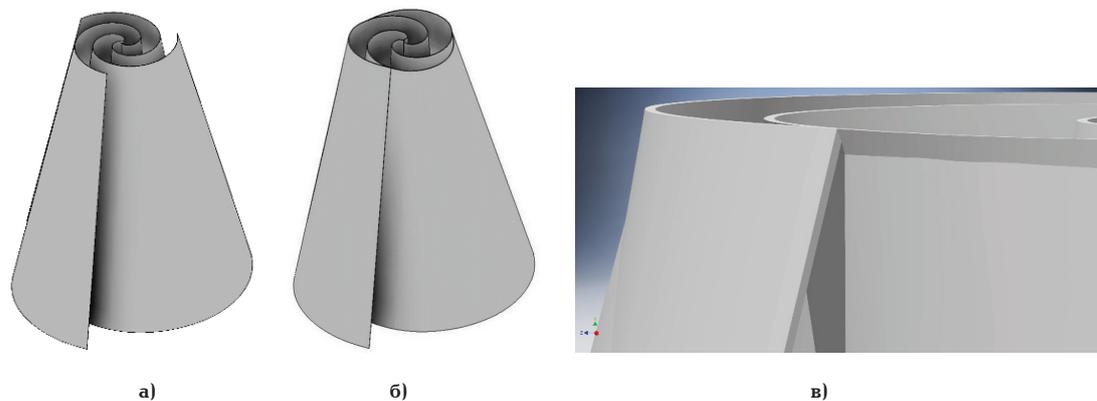


Рис. 7. Варианты исполнения верхней части конструкции: а) исходная спиралевидная конструкция; б) внешний вид конструкции с измененной конструкцией области выхода; в) контакт двух лопастей в измененной конструкции

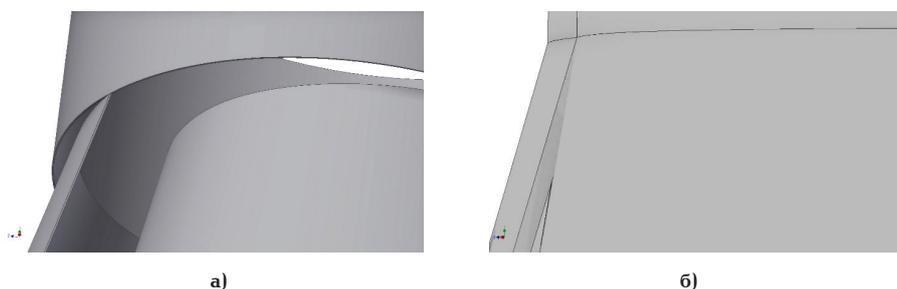


Рис. 8. Варианты исполнения верхней части конструкции при добавлении блока с лопастями: а) контакт блока с ветролопастями на исходной конструкции; б) плотный контакт блока с ветролопастями на измененной конструкции

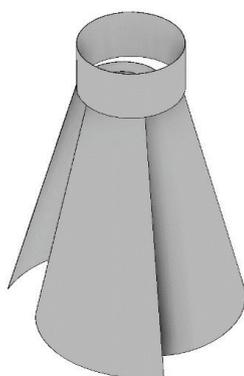


Рис. 9. Конструкция ускорителя с установленным сверху блоком для лопастей

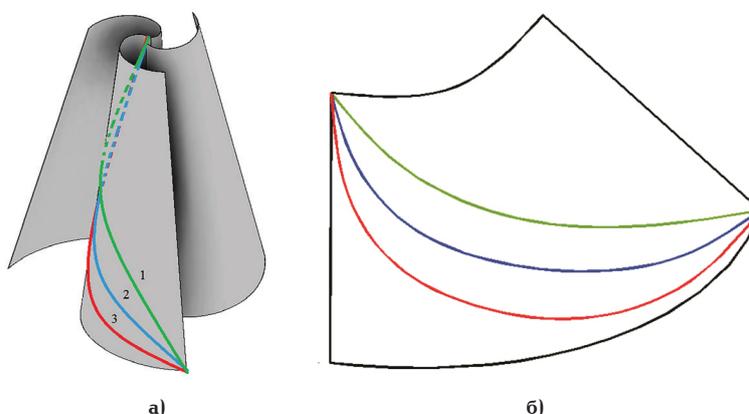


Рис. 10. Исполнение трех вариантов мостов в канале конструкции: а) положение мостов на трехлопастной конструкции; б) грани мостов на развороте лопасти ускорителя

ния различных конструкций, так как измерения проводились одновременно на входе и на выходе из канала группой анемометров с регистрацией на ПК в реальном времени, позволяя оценить картину, приближенную к реальным условиям изменения потока.

Все измерения проводились в одинаковых условиях при минимальном вмешательстве в эксперимент. Такие же измерения проводились и для пяти- и семилопастных конструкций.

Результаты измерений моделей с наибольшим полученным ускорением для этих конструкций представлены в табл. 1–2.

После измерений простейших конструкций были отброшены варианты моделей № 3, 6, и 9. Они обладали избыточно длинным каналом, в котором поток встречал максимальное торможение, к тому же по количеству затрат на изготовление данных моделей превосходят остальные.

Далее были рассмотрены два варианта исполнения верхней части конструкции (рис. 7). Второй вариант (рис. 7б, в) облегчает вариант монтажа при добавлении верхнего блока, содержащего лопасти ветроколеса (рис. 8–9). Проведенная серия экспериментальных исследований показала, что результирующее ускорение от изменения формы выход-

Результаты измерений лучших вариантов

№ модели	Модель 7 (семилопастная)						Модель 1 (трехлопастная)			
	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 120^\circ$		$\alpha = 102,8^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 120^\circ$	
Угол поворота	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	1,517	0,668	1,606	0,515	0,339	0,132	1,3867	0,531	0,325	0,123
Ускорение в ... раз	2,27		3,12		2,56		2,61		2,64	

Таблица 4

Результаты измерений ускорения потока при различном угле ориентации площади входа к набегающему потоку

№ модели	Модель 4, мост 2 (пятилопастная)							
	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 45^\circ$		$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 75^\circ$	
Угол поворота	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
Средняя скорость, м/с	1,2195	0,459	1,314	0,3678	0,294	0,231	1,012	0,495
Ускорение в ... раз	2,66		3,58		1,27		2,263	

ной геометрии изменяется минимально и вариант исполнения можно выбрать любой без изменения полезных свойств конструкции.

Далее были рассмотрены варианты добавления мостов в каналы контракции для дополнительного и более плавного подъема потока. Были смоделированы и исследованы три варианта мостов для каждой конструкции, исполнение которых представлено на рис. 10.

Определение наилучшей геометрии моста проводилась сначала в программном комплексе Ansys, затем проверялась и корректировалась на экспериментальной модели. Результаты изменений в лабораторных условиях представлены в табл. 2.

В действительности вариантов исполнения моста было более шестнадцати. Исполнение № 1 и № 3 представлены как граничные варианты очень пологого и самого крутого подъема моста для анализа их использования при возможном упрощении конструкции. В табл. 3. внесены результаты по лучшей геометрии — модель № 4, мост № 2.

Аналогичные работы были проведены с остальными моделями.

После нахождения оптимальной геометрии был проведен анализ угла атаки потока для определения наилучшего ускорения. Опыт проводился путем поворота конструкции вокруг своей оси с шагом в  $15^\circ$ . В табл. 4 представлены результаты измерений ускорения потока при различном угле ориентации площади входа к набегающему потоку. Наилучшим оказался угол в  $45^\circ$ , а худшим  $90^\circ$ .

На следующем этапе был проведен анализ коэффициента ускорения при различной скорости потока на оптимальной конструкции с мостом моделей № 4 и № 5.

Система нагнетания воздуха была представлена вентилятором 1 кВт. Известно, что при увеличении расстояния от источника, скорость потока умень-

шается. Для определения зависимости скорости потока воздуха от расстояния до площади входа в конфузориальный канал была проведена серия экспериментов.

В дальнейшем были проведены серии экспериментов при различной скорости набегающего потока для подтверждения и корректировки полученных на начальном этапе результатов.

После анализа всех конструкций были выбраны оптимальные конструкции и проведены измерения ускорения относительно набегающего потока. В итоге оно подтвердилось на всех установках и находилось в диапазоне 40–52 %, что в итоге позволяет увеличить мощность, вырабатываемую ВЭУ, в 2 раза.

Итогами проведенных исследований стали следующие результаты:

1. Создано двенадцать моделей концентраторных установок, три трех-, пяти- и семилопастных и три шестилопастных.
2. Проведен анализ применения простейших конструкций, представляющих собой лопасти, имеющие в основании спираль Архимеда.
3. Проведен анализ исполнения верхней части конструкции для упрощения монтажа и обеспечения дополнительной жёсткости.
4. Проведен анализ использования дополнительных мостов в канале для дополнительного подъема и ускорения потока.
5. Проанализированы и выбраны граничные варианты геометрии исполнения мостов, которые можно использовать при необходимости упрощения монтажа конструкции.
6. Выбрана оптимальная геометрия с максимальным КПД для трех-, пяти- и семилопастных конструкций.
7. Для определения зависимости ускорения от скорости ветра для оптимальных конструкций

проведены экспериментальные исследования при различной скорости набегающего потока.

8. Наилучшей геометрией для применения ее в качестве ускорителя потока для ВЭУ с вертикальной осью вращения выявлена пятилопастная конструкция с поворотом с мостом № 2 (модель № 4). Достигнутое увеличение скорости составляет 52 %. Так как мощность зависит от скорости ветра в кубе, то такая конструкция позволит увеличить мощность, вырабатываемую ВЭУ, в три раза.

#### Библиографический список

1. Лисицын А. Н., Задорожная Н. М. О перспективах ветроэнергетики в современном мире // Инновационные технологии в науке и образовании: сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф., 25 августа 2017 г. Пенза, 2017. С. 36–42.

2. Ростовщикова А. А. Возобновляемые и нетрадиционные источники энергии // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XIX Междунар. симп. им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 70-летию юбилею Победы советского народа над фашистской Германией, 6–10 апреля 2015 г.: в 2 т. Томск, 2015. Т. 2. С. 729–733.

3. Перспективы мировой ветроэнергетики / Пер. и ред. русской версии докл.: С. Алексеева, А. Брандт, Е. Грачева [и др.] // GWEC G, Greenpeace International, DLR, Ecofys Consultancy. 2006. 60 с.

4. Перминов Э. М., Рустамов Н. А. О перспективах возобновляемой энергетики // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 11. С. 19–28.

5. Морозов Д. А. Синтез ветроустановки малой мощности с вертикальной осью вращения: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2011. 141 с.

6. Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П. П. [и др.]. Атлас ветров России = Russian Wind Atlas. М.: Можайск – Терра, 2000. 551 с. ISBN 5-7542-0067-6.

7. Соколовский Ю. Б., Соколовский А. Ю. Повышение эффективности ветровых энергетических установок // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 9 (127). С. 28–37.

8. Байрамов Ф. Д., Галимов Н. С., Иванов В. А. Пути повышения эффективности ветродвигателей роторного типа с вертикальной осью вращения в мегаполисе // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 2. С. 99–102.

9. Пат. 2387871 Российская Федерация, МПК F03D 1/04. Ветроэлектростанция / Занегин Л., Петров Ю., Сучанкова Е. № 2008144736/06; заявл. 12.11.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.

10. Пат. 2369772 Российская Федерация, МПК F03D 11/00, F03D 3/04. Выработка электроэнергии с размещением ветрогенератора в вертикальном вытяжном воздуховоде при проектировании жилых зданий / Тебуев В. В. № 2007126567/06; заявл. 12.07.2007; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.

11. Пат. 2432493 Российская Федерация, МПК F03D 3/04. Карусельная ветряная турбина / Головенкин Е. Н., Холодков И. Х., Задорин В. И., Кесельман Г. Д. № 2009103375/06, заявл № 02.02.2009, опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30.

12. Пат. № 2422673 Российская Федерация, МПК F03D 3/06, F03D 3/04. Ветроэнергетический генератор / Сигаев В. П. № 2010105075/06, заявл. 15.02.2010, опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18.

13. Пат. 2403439 Российская Федерация, МПК F03D 9/00, F03D 3/04. Способ преобразования энергии ветра и устройства для его реализации / Смолич Р., Буряк А., Медведев Д., Буряк Н. № 2008128194/06, заявл. 10.07.2008, опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.

14. Пат. 2399789 Российская Федерация, МПК F03D 3/04. Ветровая турбина / Ярыгин Л. А., Ермаков И. Г. № 2009117210/06; заявл. 05.05.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.

15. Пат. 2390654 Российская Федерация, МПК F03D 3/04. Ветроэлектростанция / Сигаев В. П. № 2009115533/06; заявл. 24.04.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15.

16. Пат. 2386853 Российская Федерация, МПК F03D 3/04. Вихревая ветряная турбина / Коломацкий С. И., Коломацкий Д. С., Коломак Е. С., Лебедев И. Г. № 2009104009/06; заявл. 09.02.2009; опубл. 20.04.2010, Бюл. № 11.

17. Пат. 2383775 Российская Федерация, МПК F03D 3/04. Ветроэнергетический ротор / Эршов М. В., Стребков Д. С., Таныгин В. В. № 2008125261/06; заявл. 24.06.2008; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7.

18. Галась М. И., Дымковец Ю. П., Акаев Н. А. О целесообразности создания вертикально-осевых ветроэлектрических установок мегаваттного класса // Энергетическое строительство. 1991. № 3. С. 33–37.

19. Турян К. Дж., Стрикленд Дж. Х., Берг Д. Э. Мощность ветроэлектрических агрегатов с вертикальной осью вращения // Аэрокосмическая техника. 1988. № 8. С. 105–121.

20. Lee Young-Tae, Lim Hee-Chang. Power performance improvement of 500W vertical axis wind turbine with salient design parameters // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2016. Vol. 10, no. 1. P. 84–88.

21. Бубенчиков А. А., Горлинский Н. А., Щербинов В. В., Сикорский С. П., Кулак К. С. Концентраторы потоков для ветроэнергетических установок // Молодой ученый (специальный выпуск Омского государственного технического университета). 2016. № 28 (132.2). С. 10–14.

22. Тахо-Годи А. З. Концентратор воздушного потока для ветроэлектрической станции, управляемый следящей системой с контуром оптимального регулирования угла раскрутки // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (14). С. 3056–3058.

**БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 4357-5273

AuthorID (РИНЦ): 512777

ORCID: 0000-0002-2923-1123

AuthorID (SCOPUS): 57188871772

ResearcherID: D-7850-2014

Адрес для переписки: [privetomsk@mail.ru](mailto:privetomsk@mail.ru)

**БУБЕНЧИКОВА Татьяна Валерьевна**, аспирантка кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

AuthorID (SCOPUS): 57190581588

Адрес для переписки: [antech-energo@mail.ru](mailto:antech-energo@mail.ru)

**ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID (РИНЦ): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

**СМОРОДИН Георгий Сергеевич**, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 7481-6122

AuthorID (РИНЦ): 872737

ORCID: 0000-0002-9020-0027

Адрес для переписки: [gosha\\_eto\\_ya@mail.ru](mailto:gosha_eto_ya@mail.ru)

**МАНАКОВА Елена Алексеевна**, студентка группы Э-151 энергетического института.

**ПОГОРЕЛОВ Александр Андреевич**, студент группы Э-151 энергетического института.

Для цитирования

Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В., Хацевский К. В., Смородин Г. С., Манакова Е. А., Погорелов А. А., Гаилов И. А. Исследование спиралеобразных ускорителей потока для втро-

Статья поступила в редакцию 02.04.2018 г.

© А. А. Бубенчиков, Т. В. Бубенчикова, К. В. Хацевский, Г. С. Смородин, Е. А. Манакова, А. А. Погорелов, И. А. Гаилов

УДК 621.313  
DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-67-71

Т. А. НОВОЖИЛОВ<sup>1</sup>  
А. Н. НОВОЖИЛОВ<sup>2</sup>  
Е. М. ВОЛГИНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>Павлодарский государственный  
университет имени С. Торайгырова,  
г. Павлодар,  
Республика Казахстан

## ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Традиционно для измерения тока в элементах электроэнергетических систем и построения релейной защиты этих элементов используются трансформаторы тока. Однако основным недостатком трансформаторов тока является ограничение на установку, вызванное необходимостью врезки в измеряемую цепь там, где проводник имеет значительные размеры. Этому недостатку лишены магнитные трансформаторы тока различного вида. В предлагаемой работе рассмотрены особенности конструкции токопроводов различных промышленных предприятий и предложены рекомендации по выбору места установки магнитных трансформаторов тока на этих токопроводах.

**Ключевые слова:** релейная защита, токовые защиты, токопроводы, магнитные трансформаторы тока.

Традиционно для измерения тока в элементах электроэнергетических систем и построения релейной защиты этих элементов используются трансформаторы тока (ТТ). В соответствии с [1, 2] они включаются в разрыв цепи. Несомненными достоинствами ТТ являются высокая точность измерения, значительная отдаваемая мощность, высокая надежность, а также хорошая помехозащищенность от влияния внешних магнитных полей, вызванных токами в других токоведущих частях установленного электрического оборудования [2]. К недостаткам ТТ, особенно высоковольтных, следует отнести большие габариты, материалоемкость и высокую стоимость. Однако основным недостатком ТТ является ограничение на установку, вызванное необходимостью врезки в измеряемую цепь. То есть его очень сложно установить там, где есть ограничение по размерам места установки, а проводник имеет значительные размеры, по которому проходят большие токи. К таким местам, например, можно отнести короткую сеть руднотермических печей ферросплавного производства, токопроводы электролизных установок и электрических станций.

Значительной части недостатков ТТ лишены магнитные трансформаторы тока (МТТ) различного вида [3–5]. Однако известная область использования МТТ в электроэнергетике в настоящее время [5–7] ограничена использованием на защиты линий с односторонним питанием и силовых трансформаторов на напряжение 35–220 кВ, в первую очередь, на подстанциях без выключателей на стороне высокого напряжения. В связи с этим предлагается оценить возможную область использования МТТ в электроэнергетике.

**Короткая сеть руднотермической печи.** Упрощенная схема производственного комплекса «руднотермическая печь» приведена на рис. 1, где 1 — печной трансформатор; 2 — короткая сеть; 3 — электроды руднотермической печи; 4 — стена между печными трансформаторами и печью; 5 — шины высокого напряжения; 6 — трансформаторы тока релейной защиты; 7 — выводы низкого напряжения трансформатора; 8 — привод РПН; 9 — магнитные трансформаторы тока.

Печной трансформатор мощностью 5–18 МВт выполняется однофазным составным. В его состав