

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА БАШЕННОГО ТИПА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Работа направлена на определение геометрических параметров концентратора для максимального ускорения проходящего через него воздушного потока. Представлены варианты конструкции ускорителя потока башенного типа от простой конструкции к сложной с добавлением дополнительных конструкций, позволяющих исключить срывание и нежелательное закручивание воздушного потока в теле канала. Получена конструкция, позволяющая увеличить скорость воздушного потока в 3 раза.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка с концентратором, ускоритель воздушного потока башенного типа, оптимальная геометрия конфузурного канала.

Проведенные исследования показали наличие эффекта ускорения воздушного потока на конструкциях с сужающимися конфузурными каналами различной формы. В работе представлен процесс моделирования и испытания конструкции концентратора башенного типа, для определения его наилучших геометрических параметров и достижения максимального ускорения, проходящего через него, воздушного потока

Исходя из [1 – 14] была выбрана следующая конструкция башенного типа (рис. 1), представляющая собой усеченную шестиугольную пирамиду над шестиугольной пирамидой в основании, вертикально пересеченную шестью плоскостями в пространстве, между которыми образуется конфузурный канал со входом в нижней части и выходом в верхней. Над конструкцией устанавливается одно и более ветроколесо для захвата потока, поступающего из концентратора.

Для анализа выбранной конструкции были проведены конечно-элементные исследования и измерения в лаборатории (рис. 2). Так как модель осесимметрична, ее опытный образец представлял собой половину ускорителя с тремя конфузурными каналами (секторами), которых достаточно для оценки потока, направленного от одного источника. Экспериментальные измерения проводились

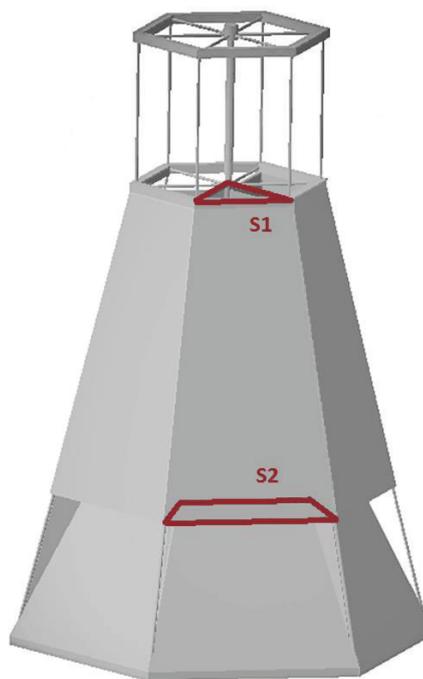


Рис. 1. Внешний вид концентраторной установки

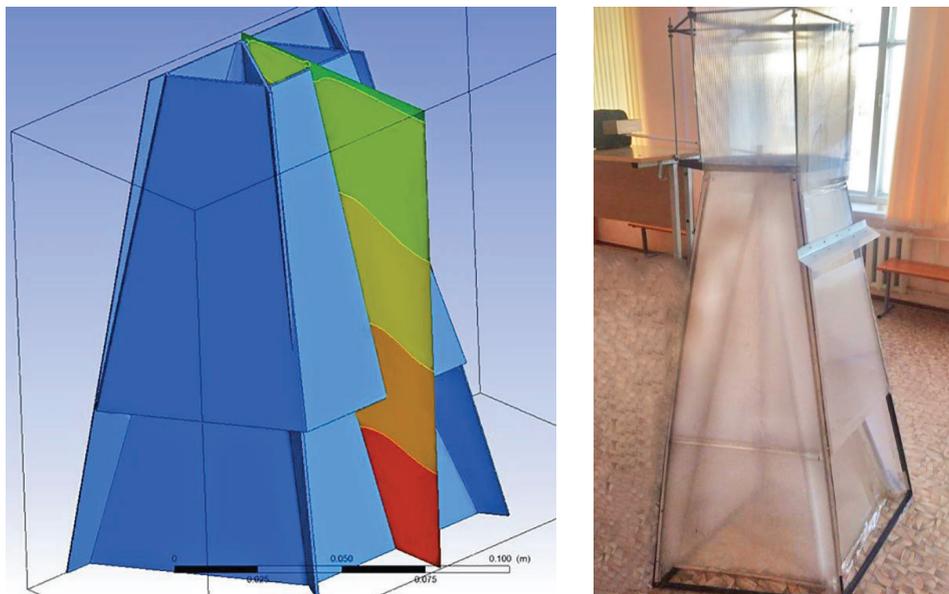


Рис. 2. Конечно-элементная модель и опытный образец ускорителя потока

отдельно для каждого из секторов при одном источнике воздушного потока, установленном перпендикулярно среднему каналу.

В качестве испытательного полигона использовалось помещение длиной 15 м, шириной 6 м и высотой 3,5 м, в котором максимально исключалось влияние отражения потока от ограждающих конструкций. Воздушный поток создавался осевыми вентиляторами мощностью 650 Вт, установленными на конструкциях, позволяющих менять высоту и угол их расположения.

Измерения скорости воздушного потока проводились в трех плоскостях. Это площадь на подходе к концентратору  $S_3$ , площадь на входе в концентратор  $S_2$  и площадь на выходе  $S_1$  (рис. 3а).

Первый опытный образец имел простейшую конструкцию с прямой задней стенкой концентратора (рис. 3б).

Высота установки 150 см, диаметр вершины 60 см, диаметр основания внутренней пирамиды 120 см, внешней 140 см.

Форма основания концентратора, выделенная пунктирной линией на рис. 2, представляет собой трапецию в соответствии с рис. 4, в которую входит воздушный поток. Для определения оптимальных параметров конструкции высота  $h_3$  (рис. 4) площади  $S_3$  увеличивалась с шагом в 10 см.

Площадь выхода потока в вершине концентратора  $S_1$  имеет форму равностороннего треугольника в соответствии с рис. 5а.

Внутренняя часть у основания концентратора, в соответствии с рис. 5б, также имеет форму трапеции.

В соответствии с точками на рис. 4, 5 были произведены измерения скорости потока анемометром Testo 416, каждая из точек замерялась в течение двух минут, а средняя скорость за период принималась за скорость данной точки. Затем были найдены средние арифметические значения скорости для площадей  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  и занесены в табл. 1 как средние значения скорости через площадь в целом. Во время измерений площадь  $S_1$  оставалась неизменной и составляла 364,16 см<sup>2</sup>.

По данным табл. 1 видно, что на высоте  $h_3$  от 50 до 90 см скорость воздушного потока на вы-

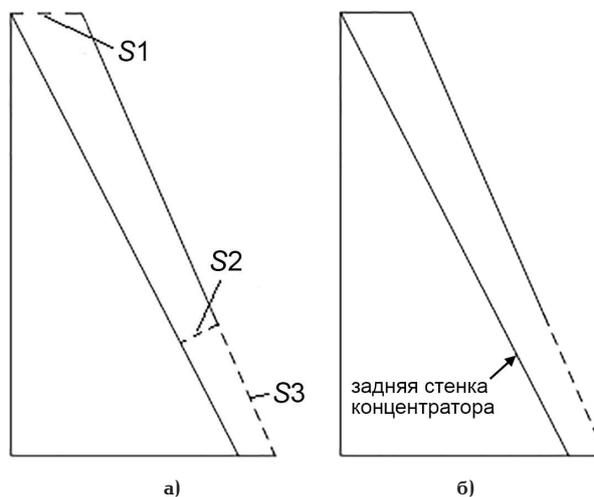


Рис. 3. а) площади проведения измерений; б) концентратор

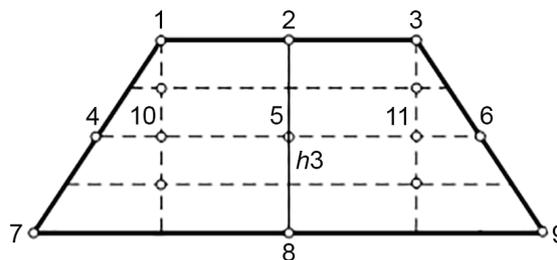


Рис. 4. Область входа ветрового потока  $S_3$

ходе из концентратора остается почти неизменной. Аналогичную ситуацию можно наблюдать и на соотношении скоростей потока на входе в основание к скорости в вершине канала (рис. 6а). Значения площадей внутренней части и основания концентратора и сведены в табл. 2.

Исследуемая конструкция была выбрана таким образом, чтобы оценить влияние изменения площади на подходе к концентратору  $S_3$  на ускорение

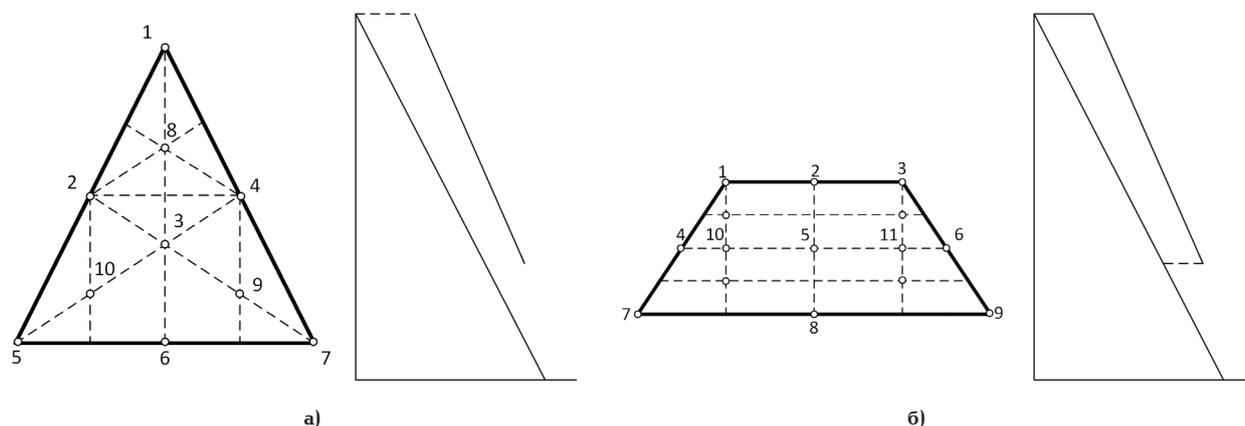


Рис. 5. Площади входа в концентратор с точками измерения:  
а) вершина концентратора S1; б) внутренняя площадь S2 у основания конфузорного канала

Таблица 1

## Результаты замеров ветрового потока через концентратор

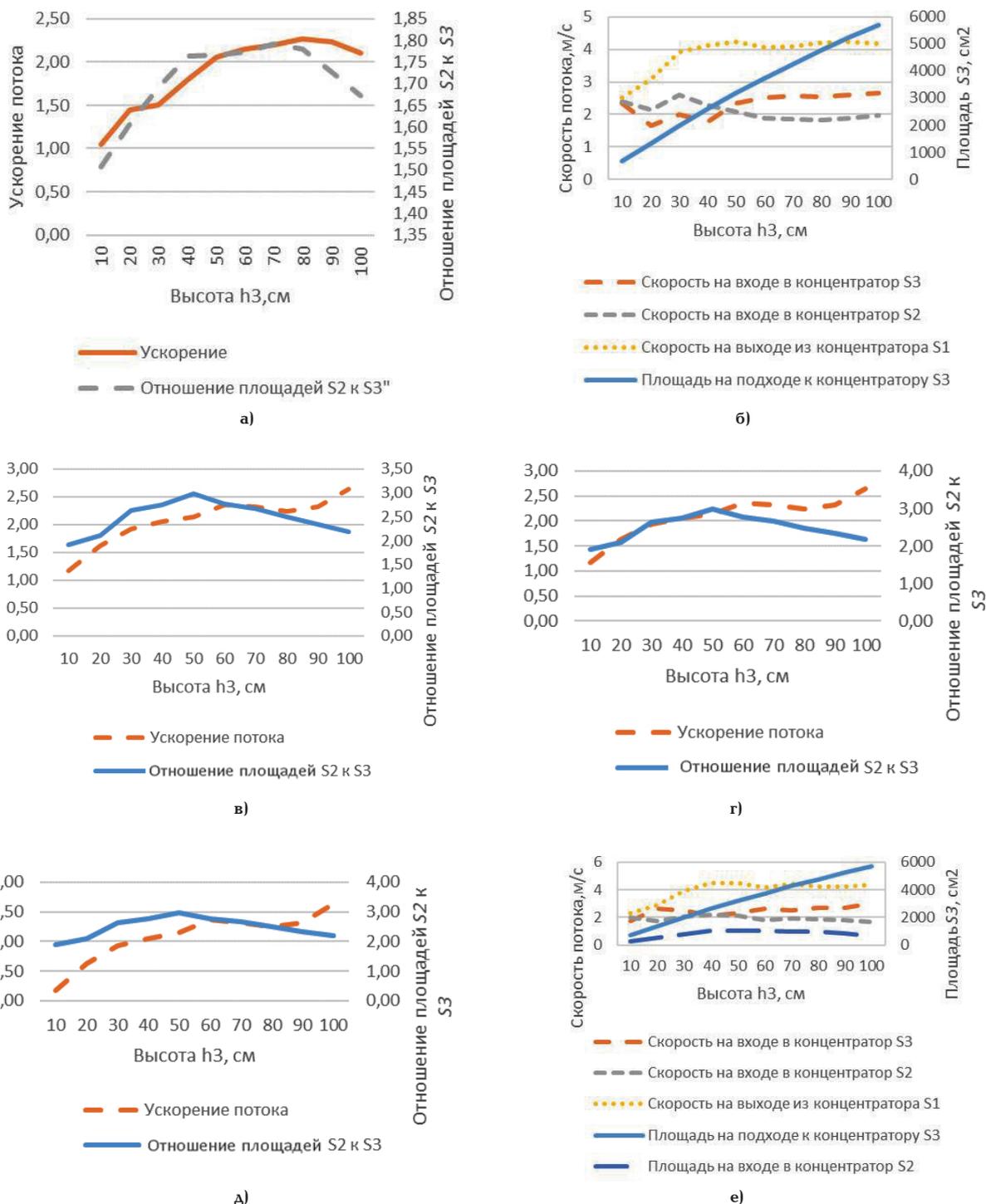
Концентратор с прямой задней стенкой					Концентратор с нижним изгибом задней стенки на 10 см					Третий образец концентратора с изогнутым торцом на высоте 80 см				
Высота плоскости входа S3, см	Скорость на входе в S3, м/с	Скорость на входе в S2, м/с	Скорость на входе в S1, м/с	(Ускорение)	Высота плоскости входа S3, см	Скорость на входе в S3, м/с	Скорость на входе в S2, м/с	Скорость на выходе в S1, м/с	(Ускорение)	Высота плоскости входа S3, см	Скорость на входе в S3, м/с	Скорость на входе в S2, м/с	Скорость на входе в S1, м/с	(Ускорение)
10	2,4	2,33	2,5	1,04	10	2,15	1,43	2,97	1,38	10	1,96	1,71	2,29	1,17
20	2,14	1,66	3,1	1,45	20	2,54	1,62	3,67	1,44	20	1,76	2,63	2,87	1,63
30	2,6	2,0	3,91	1,50	30	2,59	1,43	3,98	1,53	30	2,02	2,5	3,9	1,93
40	2,28	1,78	4,11	1,80	40	2,1	1,74	4,48	2,13	40	2,2	2,09	4,52	2,05
50	2,07	2,34	4,25	2,05	50	2,08	1,97	4,61	2,21	50	2,09	2,3	4,48	2,14
60	1,89	2,52	4,07	2,15	60	1,76	2,4	4,70	2,67	60	1,77	2,64	4,18	2,36
70	1,86	2,58	4,08	2,19	70	1,87	2,46	4,49	2,40	70	1,91	2,5	4,43	2,31
80	1,86	2,54	4,22	2,27	80	1,86	2,18	4,53	2,43	80	1,87	2,72	4,2	2,24
90	1,72	2,59	4,23	2,24	90	1,78	2,92	4,51	2,53	90	1,82	2,69	4,22	2,31
100	1,89	2,65	4,17	2,11	100	1,68	3,02	4,35	2,59	100	1,65	3,02	4,35	2,63

потока. Так, согласно табл. 2, площадь на входе в концентратор S2 при увеличении S3 ( $h3 = 50 - 70$  см) остаётся практически неизменной (рис. 6а), а изменение скоростей не зависит от изменения S3 (рис. 6б). Для дальнейшей оптимизации конструкции было решено создание опытного образца с возможностью изменения площади S2.

В результате проведенных испытаний на конфузорном канале с прямой задней стенкой (рис. 3б)

были получены максимальные значения отношений скорости воздушного потока на входе к скорости потока на выходе для высоты площади трапеции S3, равной 80 см. Ускорение потока составило 2,27 раза.

Второй опытный образец был выполнен с конфузорными каналами с изогнутой формой задней стенки, представленной на рис. 7. Данные изменения были направлены на поиск оптимальной гео-



**Рис. 6. Визуализация зависимостей:**  
 а) зависимость ускорения и отношения площадей S2 к S3 от высоты h3; б) зависимость скоростей и площади S3 от высоты h3; в) зависимость скоростей, площади S2 и S3 от высоты h3; г) зависимость ускорения и отношения площадей S2 к S3 от высоты h3; д) зависимость скорости от площади внутренней части концентратора; е) зависимость скорости от площади вершины

метрии для максимального увеличения скорости воздушного потока на выходе из концентратора.

В ходе испытаний на данном образце были проведены аналогичные измерения скорости потока и ускорения. Результаты измерений были сведены в табл. 1.

На данном образце концентратора получилось достичь большего ускорения, чем на первом. Для данной модели максимальное ускорение было получено на высоте  $h_3 = 60$  см. Средняя скорость потока

на выходе S1 составила 4,7 м/с, а скорость на входе в S3 1,76 м/с, что соответствует ускорению потока внутри канала в 2,67 раза при соотношении площадей S2 к S3, равном 2,76. Отметим, что при проведении эксперимента изменялись значения площадей S3 и S2, а значение S1 оставалось неизменным и составляло 364,16 см<sup>2</sup>.

Полученные зависимости скоростей от площадей и ускорения потока от отношения S2 к S3 представлены на рис. 6в, г.

Таблица 2

## Замеры внутренних площадей

Высота, см	Площадь S2, см <sup>2</sup>	Площадь S3, см <sup>2</sup>
10	549	680
20	585	1340
30	616	1980
40	642	2600
50	643,5	3175
60	646	3735
70	652,5	4270
80	648	4760
90	629	5265
100	609	5700

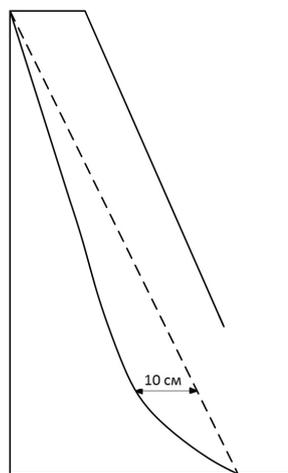


Рис. 7. Концентратор с нижним изгибом задней стенки на 10 см

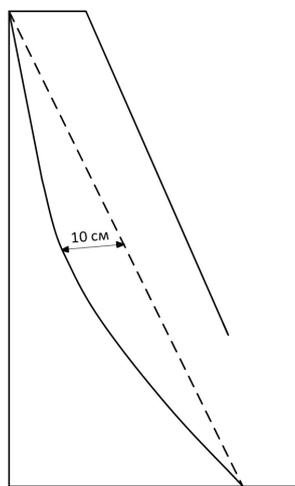


Рис. 8. Третий образец концентратора с изогнутым торцом на высоте 80 см

Очевидно, что при увеличении внутренней площади  $S_2$  скорость потока на выходе из концентратора и соотношение скоростей увеличивается. Это увеличение ограничено конструкцией ускорителя и величиной прогиба задней стенки. Однако увеличение вдавливания не дает прямо пропорционального эффекта. Испытания показали, что при увеличении отношения  $S_2$  к  $S_3$  более чем в 3 раза ускорение не увеличивалось, а даже немного уменьшалось. Это связано с запиранием избыточного потока в теле канала, который закручивается и препятствует получению желаемого эффекта ускорения. Отметим также, что для получения максимального эффекта конфузурный канал должен обладать достаточной длиной для формирования потока и минимальным сопротивлением для его движения.

Третий рабочий образец был изготовлен в соответствии с рис. 8, где задняя стенка конфузурного канала была вогнута на 10 см на высоте 80 см от основания, для сравнения показателей с первым образцом, у которого на данной высоте были наибольшие значения ускорения. Эксперимент производился аналогичным образом, и значение площади  $S_3$  при изменении  $h_3$  оставалось неизменным (табл. 2).

При увеличении высоты  $h_3$  максимальная скорость на выходе из концентратора  $S_3$  достигалась на высоте  $h_3 = 40 - 50$  см, а максимальное ускорение на высоте 100 см было равно 2,63, или 263 %, что на 4 % меньше, чем у второго образца. Если учесть погрешность измерительного прибора 5 %, то разницу между вторым и третьим образцом можно считать не существенной и выбор той или иной конструкции может быть обоснован сложностью монтажа и стоимостью материалов.

Анализируя рис. 6д, е, можно сделать вывод, что данная конструкция имеет две оптимальные геометрии, при которых достигается максимальное ускорение и максимальная скорость на выходе из  $S_3$ . Согласно рис. 6д, максимальное ускорение соответствует  $h_3 = 60$  см и  $h_3 = 100$  см.

Рассмотренная конструкция имеет множество недостатков, но она проста в изготовлении и монтаже и будет являться той отправной точкой, с которой будут сравниваться все последующие конструкции.

Для улучшения аэродинамических свойств концентратора нужно избегать резких изменений конструкции конфузурных каналов (острые углы и обрывы поверхности), предотвращая образования завихрений, перемешивания и пульсаций воздушного потока. Такой ламинарный поток достигается плавностью исполнения конструкции канала и дополнительными козырьками на входе в концентратор (рис. 9а).

Результатом экспериментов с данной конструкцией стало увеличение скорости потока через площади  $S_2$  и  $S_3$  на 4–7 % в зависимости от высоты  $h_3$ , что, несомненно, является положительным эффектом. Также было определено, что изменение длины козырька от 10 до 50 см не оказывает ощутимого влияния на ускорение потока. Изменение ускорения колебалось в районе 3 %, что можно списать на погрешность измерений. Дальнейшего увеличения козырька не производилось с целью ограничения габаритов установки.

Структура потока на выходе  $S_3$  также изменялась в зависимости от конструкции конфузурных каналов. Так, скорость потока в точках 5–7 и 9–10 (рис. 9б) значительно превышала значения в точках

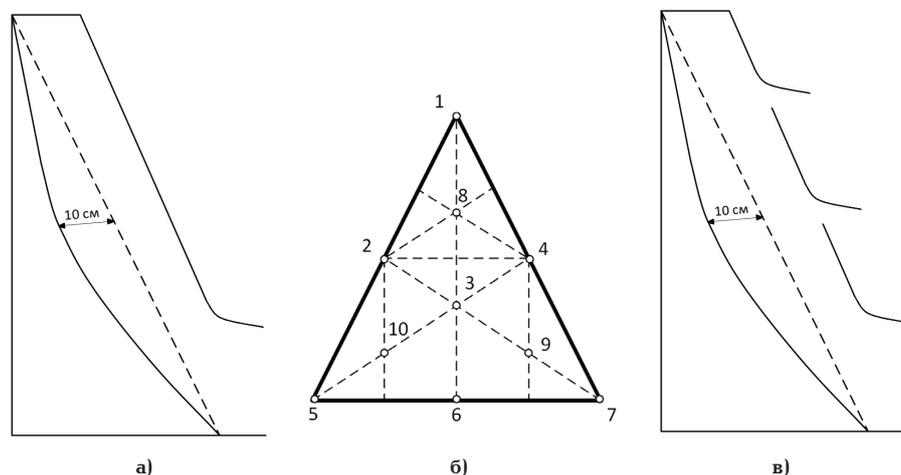


Рис. 9. Исполнение геометрии внешней стенки конфузорного канала:  
 а) исполнение концентратора с козырьком; б) расположение точек измерения  
 в плоскости S1; в) исполнение с дополнительными каналами

1, 8, 2 и 4. Что создает особые условия для проектирования ветроколеса, устанавливаемого над выходом из концентратора.

Более плавное распределение потока по площади S1 можно достичь, выполняя дополнительные каналы на внешней грани конфузора (рис. 9в), опытный образец с которым представлен на рис. 2.

Использование такой конструкции (рис. 9в) позволяет выровнять поток по плоскости S1 и дополнительно увеличить его скорость за счет вспомогательного действия закона Бернулли.

В итоге для данной конструкции было получено максимальное ускорение потока, равное 294 % при наличии двух вспомогательных каналов с направляющими (козырьками) над входом высотой 10 см. Стоит отметить, что применение дополнительных каналов может привести как к увеличению скорости, так и к её снижению. При малой скорости на входе поток может, не достигая площади S3, выйти через дополнительные отверстия и не оказать полезного действия. Поэтому применение таких конструкций ограничено условиями их использования. Данный образец показал хорошее ускорение при скорости набегающего потока в диапазоне 4–5 м/с, но абсолютно не работал при скорости менее 3 м/с. Так что оптимальной конструкцией, способной работать в широком диапазоне скоростей, предлагается именно второй вариант с внешним козырьком (рис. 9а), в котором путем изменения задней стенки конфузорного канала можно выбрать оптимальную конструкцию для регионов со скоростью 2–3 м/с, 3–5 м/с и т.д.

**Выводы.** Проведено моделирование и экспериментальное исследование концентратора воздушно-го потока башенного типа:

При наличии одного источника воздушного потока, установленного перпендикулярно входу в конфузорный канал, ускорение воздушного потока для исходной конструкции составило 2,27 раза.

При округлении задней стенки конфузорного канала уменьшается сопротивление в теле канала, увеличивается внутренняя площадь входа и увеличивается скорость потока. Максимальное значение ускорения потока для такой конструкции составило 2,67 раза.

В результате поиска оптимальной геометрии были найдены несколько конструкций с наилучшими

соотношениями площадей входа, выхода и ускорением потока. Максимальное значение ускорения, полученное в результате измерений, составило 2,73 раза.

Для улучшения аэродинамических свойств концентратора и предотвращая образование перемешивания и пульсаций воздушного потока был добавлен козырек на внешнюю грань концентратора. Итогом эксперимента стало увеличение скорости через площадь S3 на 4–7 % в зависимости от высоты внешней грани концентратора и длины козырька. Также было установлено, что изменение длины козырька от 10 до 50 см не оказывает ощутимого влияния на ускорение потока. Изменение ускорения колебались в районе 3 %, что можно списать на погрешность измерений. Дальнего увеличения козырька не производилось с целью ограничения габаритов установки.

Установлено, что структура потока на выходе из концентратора также изменяется в зависимости от его конструкции. При заданных конструкциях конфузорного канала поток распределялся плотнее к внешней стенке концентратора, что создает особые условия для проектирования ветроколеса.

Более равномерного распределения потока по площади выхода можно достичь, выполняя дополнительные каналы на внешней грани конфузора. Использование такой конструкции позволяет выровнять поток по плоскости выхода и дополнительно увеличить его скорость за счет вспомогательного действия закона Бернулли, однако использование таких конструкций ограничено условиями их применения.

Выбрана оптимальная конструкция конфузорного канала ускорителя потока для ветроэнергетической установки, способной работать в широком диапазоне скоростей, для регионов с малым ветровым потенциалом.

#### Библиографический список

1. Пат. 2422673 Российская Федерация, МПК F 03 D3/06, F 03 D3/04. Ветроэнергетический генератор / Вигаев В. П. № 2010105075/06; заявл. 15.02.10; опубл. 27.06.11, Бюл. № 18.
2. Пат. 2403439 Российская Федерация, МПК F 03 D9/00, F 03 D3/04. Способ преобразования энергии ветра и устройство для его реализации / Смолич Р. Н., Буряк А. Н., Буряк Д. А.,

Буряк Н. Н. № 2008128194/06; заявл. 10.07.08; опубл. 10.11.10, Бюл. № 31.

3. Пат. 2399789 Российская Федерация, МПК F 03 D 3/04. Ветродвижитель / Ярыгин Л. А., Ермаков И. Г. № 2009117210/06; заявл. 05.05.09; опубл. 20.09.10, Бюл. № 26.

4. Пат. 2390654 Российская Федерация, МПК F 03 D 3/04. Ветроэнергетическая установка / Вигаев В. П. № 2009115533/06; заявл. 24.04.09; опубл. 27.05.10, Бюл. № 15.

5. Пат. 2386853 Российская Федерация, МПК F 03 D 3/04. Вихревая ветроустановка / Коломацкий С. И., Коломацкий Д. С., Коломацкий Е. С., Лебедев И. Г. № 2009104009/06; заявл. 09.02.09; опубл. 20.04.10, Бюл. № 11.

6. Пат. 2383775 Российская Федерация, МПК F 03 D 3/04. Роторная ветроустановка / Ерхов М. В., Стребков Д. С., Таныгин В. В. № 2008125261/06; заявл. 24.06.08; опубл. 10.03.10, Бюл. № 7.

7. Пат. 2182985 Российская Федерация, МПК F 03 D 3/04. Вихревой ветродвижитель / Бубнов В. А., Овсянников В. М., Осокин А. А. № 2000128629/06; заявл. 17.11.00; опубл. 27.05.02, Бюл. № 15.

8. Пат. 2189495 Российская Федерация, МПК F 03 D 3/04. Башенный ветродвижитель / Кобелев Н. С., Захаров И. С., Рыбалкин О. М. № 2000126411/06; заявл. 19.10.00; опубл. 20.09.02, Бюл. № 26.

9. Пат. 2038511 Российская Федерация, МПК F 03 D 3/04. Башенный ветродвижитель / Рачков А. С. № 5003190/06; заявл. 01.08.91; опубл. 27.06.95.

10. Rowe J. Vertical axis wind turbine. US patent 6740989; filed August 21st, 2002; published May 25th, 2004.

11. Simnacher L. W. Apparatus for storing and using wind energy. US patent 8143740; filed February 12th, 2009; published 27th, 2012.

12. Kamenov K. G. Hybrid water pressure energy accumulating wind turbine and method. US patent; filed April 8th, 2009; published October 4th, 2011.

13. Пат. 2348831 Российская Федерация, МПК F 03 D 11/00. Способ и устройство системы Волкова для производства энергии методом «парашютного захвата» / Волков А. Е. № 2007106976/06; заявл. 26.02.07; опубл. 10.03.09, Бюл. № 7.

14. Пат. 2167336 Российская Федерация, МПК F 03 D 1/04. Ветроагрегат / Бальзаников М. И., Евдокимов С. В., Галиц-

кова Ю. М. № 2000101247/06; заявл. 17.01.00; опубл. 20.05.01, Бюл. № 14.

**БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 4357-5273

AuthorID (РИНЦ): 512777

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

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

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

**ЕРЕМИН Евгений Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение», декан машиностроительного института ОмГТУ.

SPIN-код: 2894-2461

AuthorID (РИНЦ): 175269

Адрес для переписки: [weld\\_techn@mail.ru](mailto:weld_techn@mail.ru)

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

Адрес для переписки: [emoe@omgups.ru](mailto:emoe@omgups.ru)

#### Для цитирования

Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В., Еремин Е. Н., Харламов В. В. Исследование ускорителей воздушного потока башенного типа для ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С 38–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-38-44.

Статья поступила в редакцию 05.02.2018 г.

© А. А. Бубенчиков, Т. В. Бубенчикова, Е. Н. Еремин, В. В. Харламов