

УДК 533.7, 681.787.6

## **Экспериментальные исследования влияния обледенения на кинематику потоков и силовые параметры лопастей ветрогенераторов методами лазерной доплеровской анемометрии\***

**В.Г. Меледин, И.К. Кабардин, С.В. Двойнишников, К.И. Степанов,  
Д.Г. Мухин, М.Р. Гордиенко, С.В. Какаулин, В.Е. Ледовский,  
К.С. Зубанов, В.О. Зуев, Н.И. Яворский, Г.В. Бакакин**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: ivankabardin@gmail.com

Проведены экспериментальные исследования влияния обледенения на кинематические и силовые параметры рабочего элемента лопасти ветрогенератора с применением модифицированного метода лазерной доплеровской анемометрии. Моделирование арктических условий реализовано в специально сконструированном аэродинамическом климатическом стенде на основе оптически прозрачной трубы из оргстекла квадратного сечения 200×200 мм со следующими параметрами: скорость потока — до 20 м/с, температура — до –20 °С, относительная влажность — до 90 %. Насыщение влагой потока осуществлялось генераторами мелкодисперсного аэрозоля. Потоки генераторов аэрозоля оптимизировались с помощью лазерной доплеровской анемометрии. Проведены измерения скоростей потока на расстояниях до 400 мм за задним краем лопатки и силовых характеристик элемента лопасти, подвергшейся обледенению. Показано влияние обледенения на аэродинамические и силовые характеристики.

**Ключевые слова:** кинематические характеристики, лазерная доплеровская анемометрия, обледенение, силовые характеристики, лопасть, ветрогенераторы.

### **Введение**

Энергетические ветровые зоны России расположены в основном на побережье и островах Северного Ледовитого океана, поэтому развитие ветроэнергетики Арктики особенно актуально [1]. Климатической особенностью региона является проблема обледенения лопастей ветрогенераторов, существенно влияющая на эффективность, надежность и безопасность их работы [2]. Помимо критического влияния обледенения на КПД установок, отрыв кусков льда с кромок лопастей нагруженных ветрогенераторов во время работы способен повреждать технику и опасен для жизни и здоровья людей [3]. Существующие методы борьбы с обледенением на лопастях ветрогенератора обладают своими достоинствами и недостатками. Обоснование и развитие этих методов связано

---

\* Исследования в климатической трубе выполнены за счет гранта РНФ № 21-19-00205.

с применением численного моделирования обтекания обледеневших лопастей, опирающегося на экспериментальные исследования процессов обледенения лопасти самыми передовыми, в том числе лазерными, методами [4]. Традиционные оптические методы диагностики обледенения развиваются сравнительно давно и используются в ряде исследований [5–11]. Для верификации подобных моделей и численных расчетов особенно хорошо зарекомендовало себя применение метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) [12, 13].

Цель настоящей работы заключается в измерении методами лазерной доплеровской анемометрии профилей скорости потока вокруг элемента лопасти ветрогенератора в условиях обледенения и оценки влияния обледенения на аэродинамику и силовые характеристики лопастей ветрогенераторов.

Моделирование арктических условий выполнялось в специально сконструированном аэродинамическом климатическом стенде, включающим оптически прозрачный участок с оптимизированными с использованием ЛДА генераторами мелкодисперсного аэрозоля.

### Экспериментальная установка и методика эксперимента

Схема установки показана на рис. 1. Фотография климатической трубы и измерительного комплекса ЛАД-07Т для измерений профилей скорости потока приведена на рис. 2. Установка представляет собой замкнутую аэродинамическую климатическую трубу со следующими элементами: 1 — рабочий канал квадратного поперечного сечения (размеры по внутренней части — 200×200 мм), выполненный из органического стекла, 2 — испытуемый экспериментальный объект (элемент лопасти с формирующимся обледенением), 3 — охладитель воздуха, 4 — металлические вентиляционные каналы, 5 — хонейкомб, 6 — центробежный вентилятор с электродвигателем, 7 — проточный криотермостат LOIP FT-600, 8 — система подачи воды для формирования капельной влаги

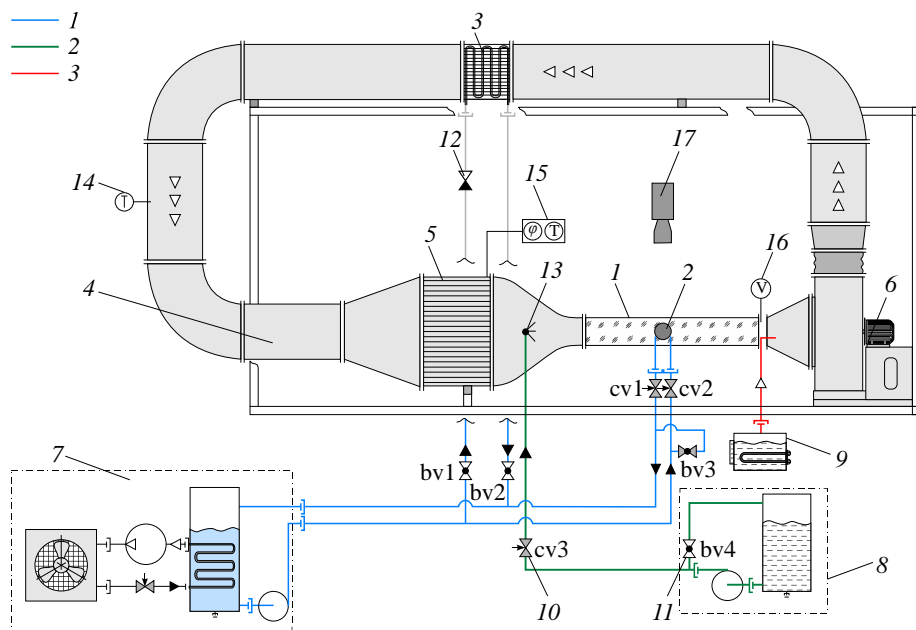


Рис. 1. Принципиальная схема климатической трубы для изучения обледенения.

Описание см. в тексте.

Рис. 2. Фотография климатической трубы и измерительного комплекса ЛАД-07Т для измерения профилей скорости потока.

в воздушном потоке, 9 — парогенератор, 10 — регулирующие вентили, 11 — шаровые краны, 12 — обратный клапан, 13 — форсунка распылительная, 14 — термопреобразователь сопротивления, 15 — датчик относительной влажности и температуры, 16 — термоанемометр, 17 — система фото-видео фиксации, также в систему входят трубопроводы и антифриз. Охладитель воздуха 3 представляет собой проточный трубный жидкостно-воздушный теплообменник NWP 700-400/2-R, имеющий высокую степень оребрения со стороны воздушного потока. Подвод и отвод охлаждающей жидкостью (антифриз) выполняется с помощью коллекторов.

Формирование стабильного воздушного потока в климатической аэродинамической трубе проводилось с использованием вентиляционных металлических каналов 4 с внутренними размерами 400×400 мм. Перед хонейкомбом 5 канал расширяется при помощи линейного диффузора до размеров 800×800 мм. После хонейкомба воздушный поток сужается при помощи профильного конфузора до необходимых размеров прозрачного рабочего участка 1 размером 200×200 мм. Подключение охладителя воздуха 3 к воздушным каналам производится через переходники с 400×400 на 400×700 мм. Воздушные каналы выполнены из оцинкованной углеродистой стали. Толщина стенки канала составляет 0,7 мм. Хонейкомб представляет собой вентиляционный канал квадратного сечения с внутренними размерами 800×800 мм. Внутри канала установлены вертикальные и горизонтальные пластины, формирующие в потоке сотовые структуры размером 3×3 мм квадратного сечения. Хонейкомб используется для выравнивания поля течения воздушного потока и для снижения уровня турбулентности. Центробежный вентилятор ВР 280-46-5,0 с электродвигателем мощностью 15 кВт предназначен для создания воздушного потока в климатической аэродинамической трубе. Для регулирования производительности вентилятора (скорости потока воздуха) электродвигатель подключен к сети через преобразователь частоты.

Проточный криотермостат LOIP FT-600 7 является циркуляционным охладителем и использовался для точного контроля температуры во внешних системах с закрытым контуром. Криотермостат имеет встроенный герметичный бак и насос подачи охлажденной жидкости. Температурный диапазон его работы составляет от – 25 до +40 °С, точность поддержания температуры — ± 0,5 °С.

Процессы обледенения, как правило, сопровождаются наличием в воздухе значительного количества капельной влаги в виде аэрозоля, дождя, мокрого снега и брызг от водоемов. Для имитации капельной влаги в потоке воздуха перед экспериментальным объектом создавался распыл воды с различной интенсивностью и размерами капель



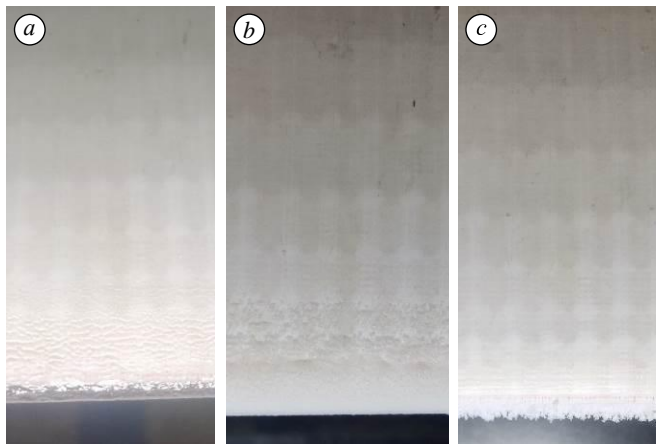


Рис. 3. Фотографии прозрачной наледи (а), инея (b) и изморози (с) на передней кромке лопатки.

с помощью генераторов аэрозоля. Для этой цели использовались различные типы форсунок, которые устанавливались в ядро потока.

На стенде наблюдалось три типа обледенения: в форме прозрачной наледи, в виде инея и в виде изморози (рис. 3). Процесс образования наледи нестационарен и плохо воспроизводится при физическом моделировании, поэтому в настоящей работе было принято решение изготавливать элементы лопаток с помощью трехмерной печати, чтобы форма не менялась во времени. В качестве элементов лопаток применялся профиль RG-15. Формы обледенения, использованные в данном исследовании, предоставлены коллегами профессора Вирка М.Ш. из Арктического университета Нарвика в рамках работ консорциума по борьбе с обледенением — CoarIce [14]. Профили наледи приведены на рис 4, 5. Лопатки изготавливались из нескольких частей и склеивались. Хорда

лопасти *C* составляла 200 мм. Пример сборки элемента лопасти показан на рис. 6. Фотография лопатки с искусственно созданной наледью на передней кромке в форме изморози представлена на рис. 7.

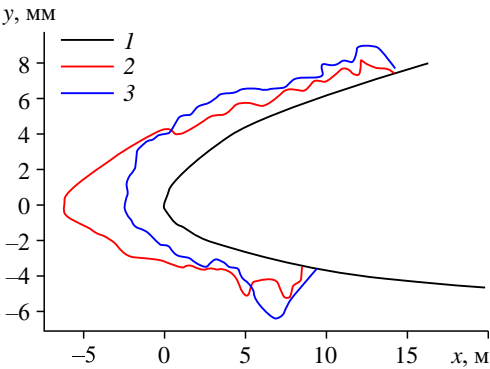


Рис. 4. Профили передней кромки при различных типах обледенения. Профиль элементов лопаток RG-15 без наледи (1), с наледью в форме инея (2) и в форме изморози (3) при  $C = 200$  мм.

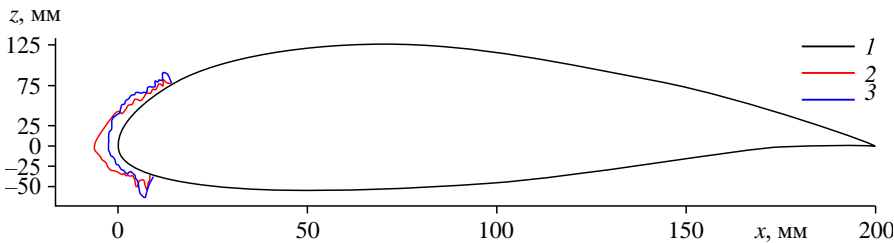


Рис. 5. Профили лопаток при различных типах обледенения: без наледи (1), в форме инея (2) и в форме изморози (3) при  $C = 200$  мм.

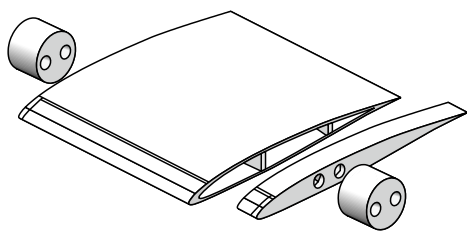


Рис. 6. Модель лопадки ветрогенератора.

Для проведения экспериментов были выбраны следующие параметры: скорость набегающего потока — 0–12,5 м/с, длина хорды — 0,2 м, число Рейнольдса — до 250000, размер капель — от 3 до 1000 мкм, температура потока — от 0 до –30 °С, углы атаки лопадки — от 0 до 20 °С.

Лопатки помещались в прозрачный канал климатической трубы (рис. 6). Шаг измерения по оси  $z$  составлял 1 мм, шаг перемещения по оси  $x$  — 10 мм, углы атаки принимали значения: 0, 4, 8, 12, 16, 20 градусов, скорость набегающего потока — 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 м/с.

Исследования изменения кинематических характеристик вокруг элементов лопастей с образованием обледенения проводились при различных входных условиях с использованием измерительного оборудования ЛДА. Для этого были изготовлены модели участков лопастей, имитирующие участки лопастей реальных ветрогенераторов (рис. 6–8). Расположение лопаток для измерения кинематических характеристик при различных углах атаки изображено на рис. 9.

Для проведения исследований использовался метод лазерной доплеровской анемометрии, развитый для возможности изучения гидрогазодинамических процессов в вихревых системах. Кратко перечислим введенные улучшения. Выполнена модификация оптической схемы на основе комбинации дифракционного коммутационного расщепителя пучка с главным объективом, что позволяет применять лазеры с ограниченной когерентностью, большим полоском и большей мощностью и надежностью. Реализована новая методика адаптивного выделения доплеровской частоты. Применены адаптивная спектральная коррекция и адаптивная спектральная фильтрация, позволившие проводить измерения на более высоких скоростях, а также метод острой фокусировки. Повышено

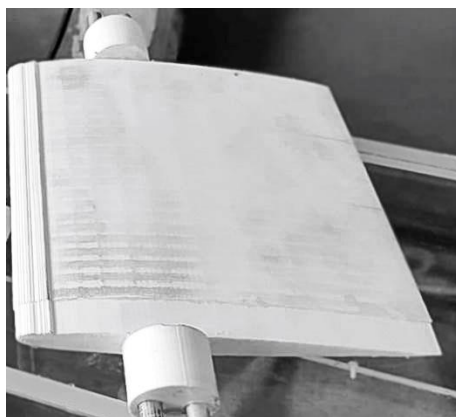


Рис. 7. Фотография лопадки с искусственно созданной наледью в форме изморози.



Рис. 8. Фотография элемента лопасти в рабочем участке.

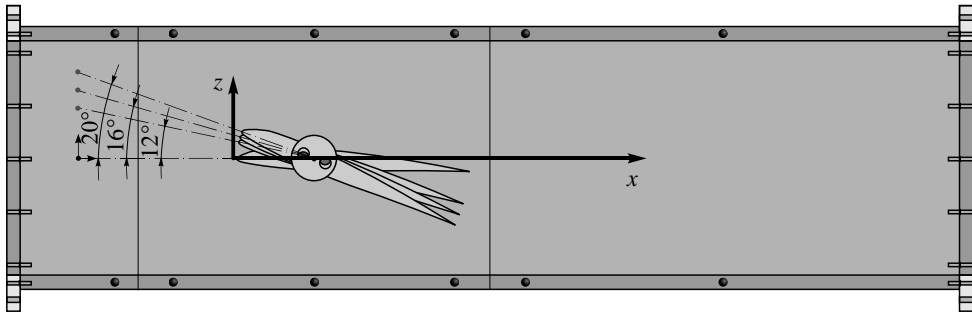


Рис. 9. Схема расположения лопаток в рабочем участке климатической трубы и расположение относительно нее системы координат для измерения компонент скоростей.

отношение сигнал/шум за счет использования полной мощности лазерного излучения в каждом оптическом измерительном канале. Более подробно про измерительную схему ЛДА и сделанные модификации можно прочитать в работах [12, 13].

### Экспериментальные результаты и обсуждение

Проведены измерения средней скорости потока на расстояниях  $x = -50, -100, -150$  мм перед лопаткой и на расстояниях  $x = 50, 100, 150, 200$  и  $250$  мм после заднего края лопатки при разных углах атаки (рис. 10–14). Для измерения скорости потока в качестве трассеров добавлялись частицы глицерина. Размер капель глицерина принимал значения от 3 до 1000 мкм. На рис. 13 приведены отдельные профили при различных значениях  $x$ , а на рис. 14 — при различных значениях  $z$ .

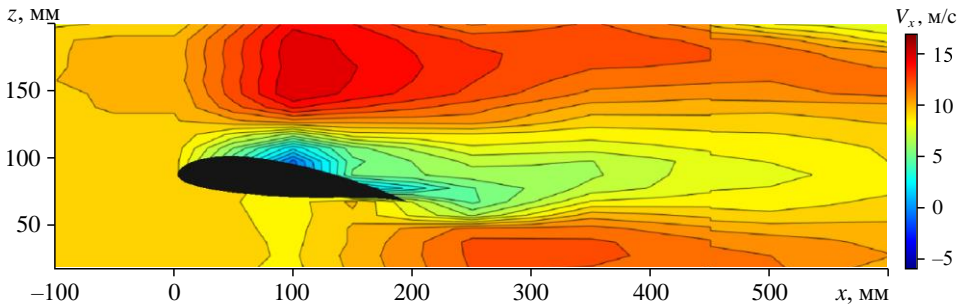


Рис. 10. Карта расходной компоненты скорости при обдувании лопатки RG-15 без обледенения. Скорость набегающего потока — 10 м/с; угол атаки лопатки — 16°.

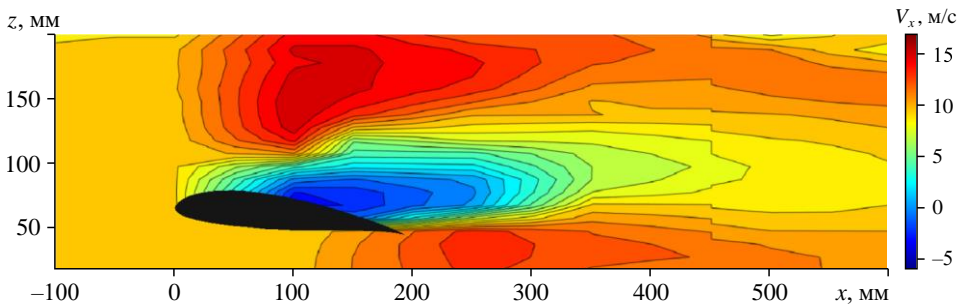


Рис. 11. Карта расходной компоненты скорости при обдувании лопатки RG-15 с обледенением в форме наледи. Скорость набегающего потока — 10 м/с; угол атаки — 16°.



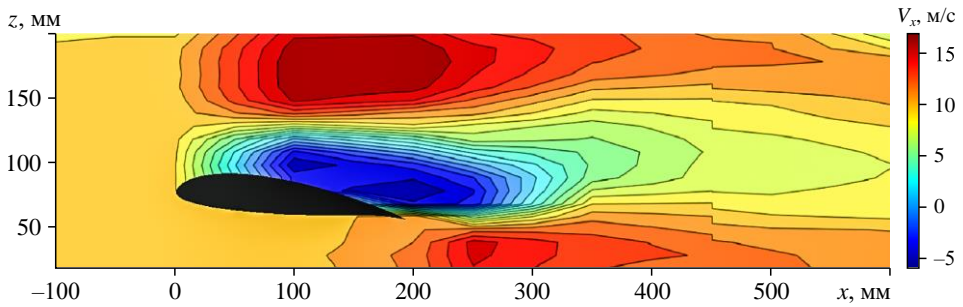


Рис. 12. Карта расходной компоненты скорости при обдувании лопатки RG-15 с обледенением в форме изморози.

Скорость набегающего потока — 10 м/с; угол атаки —  $16^\circ$ .

Экспериментально установлено существенное влияние наледи на аэродинамику лопасти. Показано, что наличие наледи значительно ослабляет скорость потока вблизи лопатки, а также приводит к более раннему образованию зон возвратного течения по сравнению с лопаткой без обледенения. Наиболее ярко влияние наледи на аэродинамику течения проявлялось при образовании зон возвратного течения. Построенные поля расходной проекции скорости (рис. 10–12) показали, что при образовании наледи зона возвратного течения в случае отрыва потока оказывается почти в два раза больше, чем для лопатки без обледенения, а значения отрицательной проекции скорости интенсивнее на 50 %.

Рисунки 15, 16 позволяют оценить воздействие обледенения лопастей на силовые характеристики ветротурбины. Установлена зависимость коэффициента подъемной силы от скорости набегающего потока и углов атаки элемента лопасти ветрогенератора. Результаты экспериментов показали, что обледенение влияет на коэффициент подъемной силы для всех значений углов атаки и скоростей набегающего потока.

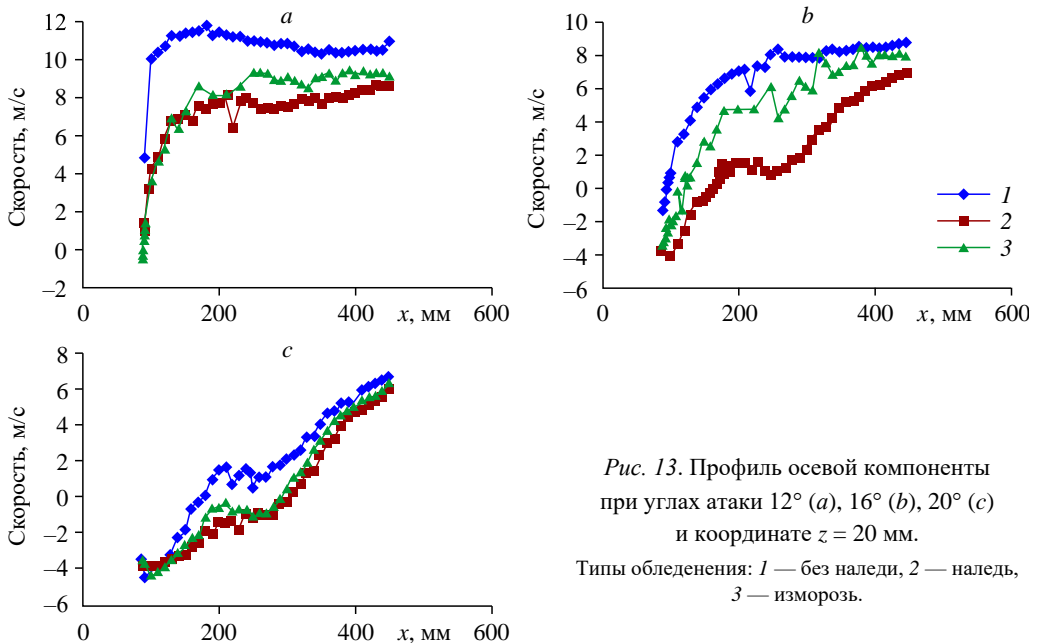


Рис. 13. Профиль осевой компоненты при углах атаки  $12^\circ$  (a),  $16^\circ$  (b),  $20^\circ$  (c) и координате  $z = 20$  мм.

Типы обледенения: 1 — без наледи, 2 — наледь, 3 — изморозь.

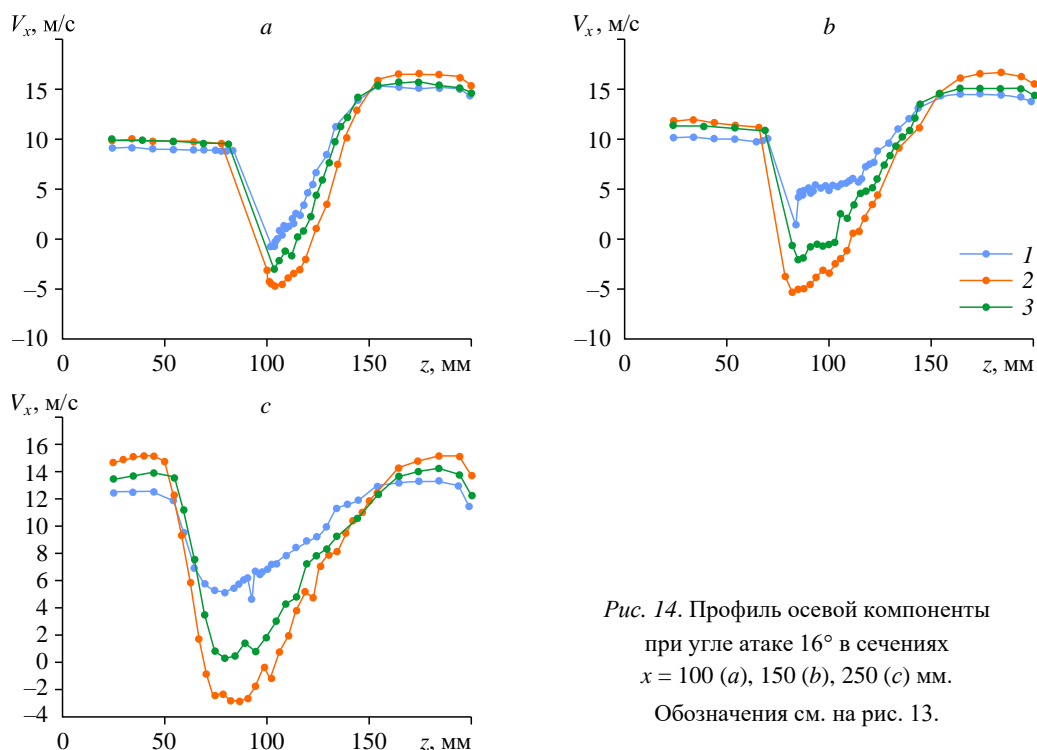


Рис. 14. Профиль осевой компоненты при угле атаки  $16^\circ$  в сечениях  $x = 100$  (а),  $150$  (б),  $250$  (с) мм. Обозначения см. на рис. 13.

Измерение коэффициента подъемной силы проводилось с помощью системы рычагов и весов. К элементу лопасти крепились рычаги и передавали крутящий момент на весы. Перед этим измерительная система калибровалась с помощью образцовых грузов. Экспериментально показано, что значение коэффициента подъемной силы для лопасти с инеем на 10 % меньше, чем значение коэффициента подъемной силы для лопасти без наледи, а для обледенения в форме наледи оно меньше, чем в последнем случае на 20 %. Максимум коэффициента подъемной силы для элементов лопастей ветрогенераторов без обледенения и с обледенением в виде наледи и изморози достигался при угле атаки  $8^\circ$  (рис. 15, 16).

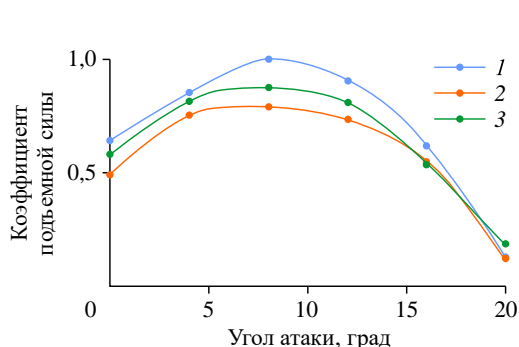


Рис. 15. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки. Обозначения см. на рис. 13.

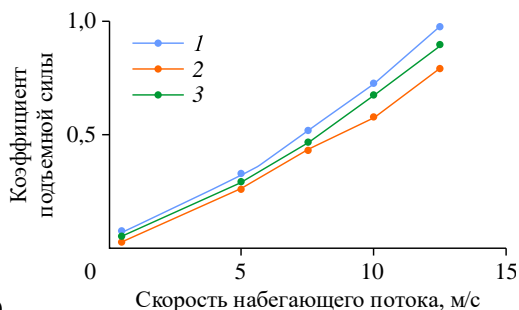


Рис. 16. Зависимость коэффициента подъемной силы от скорости набегающего потока при угле атаки  $8^\circ$ . Обозначения см. на рис. 13.



## Заключение

Выполнено экспериментальное исследование влияния обледенения на кинематику потока и силовые параметры лопасти ветрогенератора методом лазерной доплеровской анемометрии, адаптированным к условиям экспериментов. Моделирование арктических условий проведено на основе специально сконструированного климатического стенда для следующих диапазонов значений параметров: скорость потока — до 0–12,5 м/с, относительная влажность — до 90 %, число Рейнольдса — до 250000, размер капель — от 3 до 1000 мкм, температура потока — от 0 до –30 °С, углы атаки лопатки — от 0 до 20 °С. В работе выполнены измерения скоростей потока на расстояниях до 400 мм за задним краем лопатки, также измерены аэродинамические и силовые характеристики элемента лопасти ветрогенератора, подвергнувшегося обледенению. Проведена оценка влияния обледенения лопастей на силовые характеристики ветротурбин. Экспериментально показано, что обледенение влияет на коэффициент подъемной силы для всех значений углов атаки и скоростей набегающего потока. Установлено, что коэффициент подъемной силы для лопасти с инеем на 10 % меньше, чем коэффициент подъемной силы для лопасти без наледи, и меньше в случае обледенения в виде наледи по сравнению с последним на 20 %. Установлено, что максимум коэффициента подъемной силы для элементов лопастей ветрогенераторов без обледенения и с обледенением в виде наледи и изморози достигается при угле атаки 8°.

Полученные новые экспериментальные результаты по влиянию обледенения на кинематику потока и силовые параметры лопастей ветрогенераторов важны как для верификации численных моделей, так и дальнейшего совершенствования ветроэнергетической техники для арктических энергетических ветровых зон России.

## Список литературы

1. Wei K., Yang Y., Zuo H., Zhong D. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine // *Wind Energy*. 2020. Vol. 23. P. 433–457.
2. Гринац Э.С., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Экспериментальные и теоретические исследования процессов обледенения наномодифицированных супергидрофобных и обычных поверхностей // *Вестн. МГОУ. Сер.: Физика-математика*. 2013. № 3. С. 84–92.
3. Okulov V., Kabardin I., Mukhin D., Stepanov K., Okulova N. Physical de-icing techniques for wind turbine blades // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 6750–1–6750–16.
4. Virk M.S., Hu Q., Jiang X. Study of ice accretion on horizontal axis wind turbine blade using 2d and 3d numerical approach // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 166236–166245.
5. Kabardin I.K., Dvoynishnikov S.V., Gordienko M.R., Kakaulin S.V., Ledovsky V.E., Gusev G.G., Zuev V.O., Okulov V.L. Optical methods for measuring icing of wind turbine blades // *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 20. P. 6485–1–6485–12.
6. Кабардин И.К. Экспериментальное исследование кризиса течения в вихревой трубе Ранка – Хилша методом ЛДА // *Теплофизика и аэромеханика*. 2022. Т. 29, № 5. С. 709–717.
7. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Моделирование таяния льда на вертикально расположенной подложке // *Теплофизика и аэромеханика*. 2022. Т. 29, № 4. С. 665–670.
8. Каприлевская В.С., Павленко А.М., Козлов В.В., Крюков А.В. Течение за трехмерным элементом шероховатости на модели стреловидного крыла // *Теплофизика и аэромеханика*. 2022. Т. 29, № 3. С. 337–346.
9. Клеменков Г.П., Приходько Ю.М., Пузырев Л.Н., Харитонов А.М. Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15, № 4. С. 563–572.
10. Кашеваров А.В., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л. Влияние ледяных кристаллов на эволюцию барьерного льда на модели крыла // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28, № 1. С. 21–28.
11. Кашеваров А.В., Стасенко А.Л. Эволюция пленки воды и барьерного льда на поверхности тела при плоском обтекании воздушным потоком // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26, № 2. С. 237–245.

12. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю., Кабардин И.К. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 115–126.
13. Meledin V.G., Dvoinishnikov S.V., Kabardin I.K., Chubov A.S., Bakakin G.V., Kabardin A.K., Pavlov V.A., Pravdina M.Kh., Yavorsky N.I. Development of the laser doppler anemometry method for kinematic parameters diagnostics of turbulent flow in the near wall region // IOP J. of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 2057. P. 012096-1–012096-6.
14. Jin J.Y., Virk M.Sh. Study of ice accretion and icing effects on aerodynamic characteristics of DU96 wind turbine blade profile // Cold Regions Sci. and Technology. 2019. Vol. 160. P. 119–127.

*Статья поступила в редакцию 18 апреля 2023 г.,  
после доработки — 25 сентября 2023 г.,  
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*