

И. К. Кабардин^{1}, С. В. Двойнишников¹, В. О. Зуев¹, В. Е. Ледовский¹*

Развитие комплексного метода оценки влияния формы наледи на аэродинамику обледеневшего профиля лопасти на основе метода ЛДА и метода фазовой триангуляции

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Аннотация. Оптоэлектронный метод бесконтактных измерений основан на фазовой триангуляции. Устройство, реализующее метод, содержит осветитель (источник структурированного освещения) и фотоприемник, смещенный в пространстве относительно осветителя. Источник и детектор подключены к компьютеру, который контролирует измерения и выполняет обработку данных. Профиль поверхности трехмерных больших объектов сложной формы измеряется следующим образом. Объект последовательно освещается проецируемыми структурированными изображениями (серия кадров с изображениями параллельных полутонных полос). Интенсивность проецируемых полос в поперечном направлении изменяется по периодическому закону с линейным сдвигом начальной фазы. Изображения объектов, полученные с направления, отличного от направления освещения, содержат искажения структурированных изображений, которые кодируют информацию о профиле поверхности. В качестве элементов лопаток использован профиль RG-15. Формы обледенения использовались на основе полученных в этой работе. Лопатки изготавливались из нескольких частей и склеивались. Моделирование обледенелой лопасти реализовано в специально-сконструированном аэродинамическом климатическом стенде. Потоки генераторов аэрозоля оптимизировались с помощью лазерной доплеровской анемометрии. Выполнены измерения скоростей потока на расстояниях до 400 мм за задним краем лопатки и силовых характеристик элемента лопасти, подвергшегося обледенению. Показано влияние обледенения на аэродинамические и силовые характеристики.

Ключевые слова: ветроэнергетика, обледенение, многопараметрическая триангуляция, диагностика наледи, лопасть ветрогенератора

I. K. Kabardin^{1}, S. V. Dvoinishnikov¹, V. O. Zuev¹, V. E. Ledovsky¹*

Development of the Phase Triangulation Method for Studying the Influence of the Form of Ice on the Aerodynamics of the Iced Blade Profile

¹ S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. The optoelectronic method of non-contact measurements is based on phase triangulation. The device that implements the method contains an illuminator (a source of structured illumination) and a photodetector displaced in space relative to the illuminator. The source and detector are connected to a computer that controls the measurements and performs data processing. The surface profile of three-dimensional large objects of complex shape is measured as follows. The object is sequentially illuminated by projected structured images (a series of frames with images of parallel half-tone stripes). The intensity of the projected bands in the transverse direction varies according to a

periodic law with a linear shift of the initial phase. Images of objects taken from a direction other than the direction of illumination contain distortions of structured images that encode information about the surface profile. The profile RG-15 is used as the elements of the blades. Forms of icing were used based on those obtained in this work. The blades were made from several parts and glued together. Modeling of an iced blade was implemented in a specially designed aerodynamic climate stand. The flows of aerosol generators were optimized using laser Doppler anemometry. The flow velocities were measured at distances up to 400 mm behind the trailing edge of the blade and the power characteristics of the blade element subjected to icing. The effect of icing on aerodynamic and power characteristics is shown.

Keywords: wind power, icing, multiparameter triangulation, ice diagnosis, wind generator blade

Введение

Рост количества ветроэлектростанций в холодном и влажном климате стабильно наблюдается. Одной из важных задач при эксплуатации ветрогенераторов в таких условиях является борьба с обледенением лопастей [2]. Не существует надежных методов дистанционной диагностики обледенения [3]. Дистанционные методы измерения очень важны в различных секторах энергетики [4–7]. Разработка и совершенствование методов дистанционной диагностики обледенения - крайне актуальная задача в ветроэнергетике.

Целью работы является разработка метода многопараметрической триангуляции для прецизионной диагностики трехмерной геометрии наледи.

Оптоэлектронный метод бесконтактных измерений основан на фазовой триангуляции [8]. Устройство, реализующее метод (рис. 1), содержит осветитель (источник структурированного освещения) и фотоприемник, смещенный в пространстве относительно осветителя. Источник и детектор подключены к компьютеру, который контролирует измерения и выполняет обработку данных. Профиль поверхности трехмерных больших объектов сложной формы измеряется следующим образом. Объект последовательно освещается проецируемыми структурированными изображениями (серия кадров с изображениями параллельных полутонных полос). Интенсивность проецируемых полос в поперечном направлении изменяется по периодическому закону с линейным сдвигом начальной фазы. Изображения объектов, полученные с направления, отличного от направления освещения, содержат искажения структурированных изображений, которые кодируют информацию о профиле поверхности. Для каждой точки изображения контролируемого объекта восстанавливается зависимость интенсивности от порядкового номера кадра. Начальная фаза прогнозируемого периодического сигнала рассчитывается по этой зависимости. Декартовы координаты точки в пространстве определяются на основе значений локальной фазы, координат точки на изображении и калибровочных коэффициентов. Набор координат всех точек соответствует желаемому профилю поверхности трехмерного объекта.

Описание метода

Обработка фазовых изображений начинается с определения распределения интенсивности в структурированных (фазовых) изображениях, представленных в работе [9]:

$$I_i(x, y) = A(x, y)(1 + V(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \delta_i)), i \in 1 \dots N - 1, \quad (1)$$

где $I_i(x, y)$ – функция яркости на i -м кадре; $A(x, y)$ – функция яркости фона; $V(x, y)$ – коэффициент видимости; $\varphi(x, y)$ – функция фазы; δ_i – фазовый сдвиг между близкими измерениями; N – количество измерений.

Для расчета функции фазы $\varphi(x, y)$ применяется подход распознавания кадров с произвольным ступенчатым сдвигом. Перепишем формулу (1) в виде

$$I_i = A + B \sin \delta_i + C \cos \delta_i;$$

$$\varphi = - \arctg (B / C); \quad (2)$$

$$v = \sqrt{B^2 + C^2} / A,$$

где параметры A , B и C вычисляются из условия, которое требует минимизации функционала расхождения между экспериментальными и численными значениями:

$$S(A, B, C) = \sum_{i=1}^N (I_i - A + B \sin \delta_i + C \cos \delta_i)^2,$$

со всеми частными производными равными нулю,

$$\partial S / \partial A = \partial S / \partial B = \partial S / \partial C = 0.$$

Таким образом, получается система линейных уравнений, а коэффициенты A , B и C находятся после решения системы. Требуемое значение фазы φ определяется из (2). Метод идентификации фазовых изображений стабилен при наличии существенных вариаций рассеивающих параметров поверхности изучаемого объекта. Метод является бесконтактным и может быть эффективно реализован на базе детектирующей камеры с динамическим диапазоном интенсивности [10].

Лабораторные эксперименты проводились на термостратифицированном ветровом бассейне Института прикладной физики РАН. Длина лотка составляла 10 м. Сечение воздуховода 0,4×0,4 м. Скорость ветра изменялась от 0 до 40 м/с. Подробное описание этой установки и принципы построения и управления воздушным потоком в ней представлены в [2, 3]. Фотография установки представлена на рис. 2.

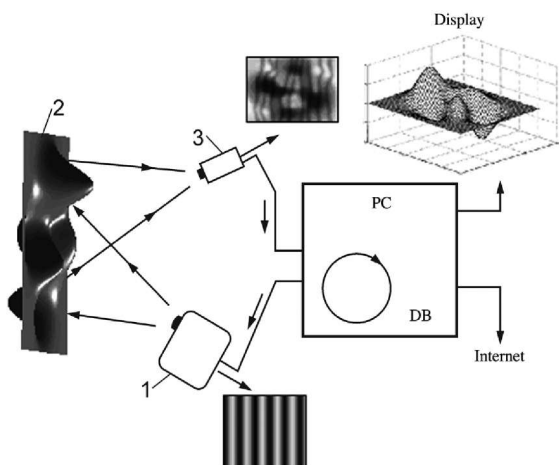


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса: 1, 3 – источник и детектор освещения; 2 – тестовый объект; ПК – персональный компьютер; БД – база данных



Рис. 2. Фотография экспериментального стенда

Результаты

Предложенный подход экспериментально продемонстрирован на установке (фотография представлена на рис. 2). Фотография изучаемой наледи представлена на рис. 3. В качестве объекта тестирования метода был выбран элемент лопасти ветрогенератора с профилем RG-12 шириной 200 мм. Элемент лопасти помещался в климатическую аэродинамическую трубу со скоростью потока 3 м/с и температурой $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для повышения влажности в климатическую трубу добавлялся поток аэрозоля. В качестве источника структурированного оптического излучения использовался цифровой ЖК-проектор NEC VT570 (NEC Display Solutions, Германия) с разрешением 1920×1068 пикселей. Камера DMK Imaging source использовалась в качестве детектора оптического излучения для получения изображения. Источник и детектор были подключены к компьютеру для выполнения процедуры измерения, обработки данных и отображения результатов. Выбор недорогих устройств с низким разрешением и простой линзой призван продемонстрировать целостность работы и высокую стабильность предложенных подходов.

Положение источника и детектора оптического излучения было выбрано для поддержки измерений в пространстве $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ м. Расстояние до измеряемого объекта составляло около 1 м, а расстояние между источником и детектором составляло 0,5 м. Измерения проводились с использованием серии структурированных изображений. Количество кадров N составляло 200. Пример структурированной подсветки на цилиндре можно увидеть на рис. 4. При калибровке были проведены измерения 250 градуировочных мишеней, расположенных в разных точках пространства с погрешностью установки координат менее 0,5 мм. Максимальный разброс измеряемых точек в плоскости не превышал 0,3 мм, а стандартное отклонение по всему пространству измерения оценивалось в 0,114 мм, т. е. относительная погрешность составила 0,057 % от диапазона измерения. Аналитически погрешность можно оценить в 0,062 %.



Рис. 3. Фотография наледи на лопасти

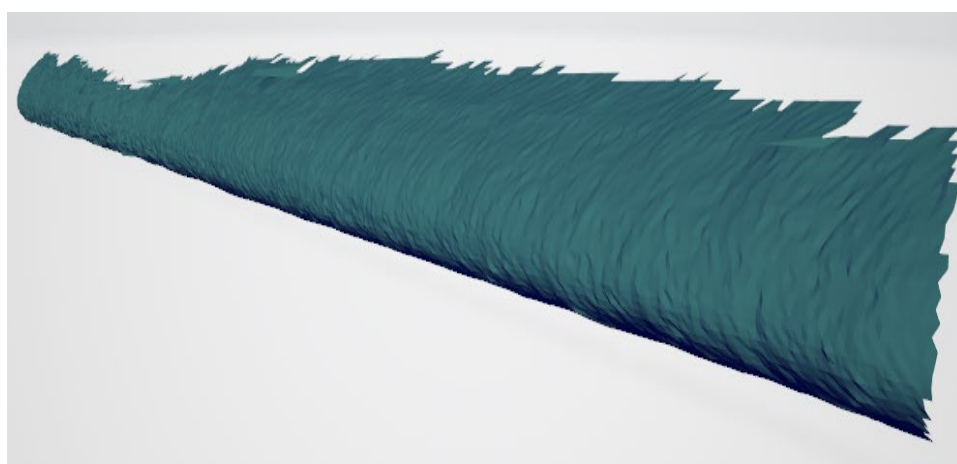


Рис. 4. Измеренная поверхность наледи при времени обледенения 25 минут

Поле толщин представлено на рис. 4. Для измерения поля толщин использовался программно-аппаратный комплекс, как в [8]. Профили поверхности наледи в срединном сечении, полученные с интервалом 5 минут, представлены на рис. 5. Процесс образования наледи нестационарен и плохо воспроизводится при физическом моделировании. Элементы лопаток изготавливались с помощью 3D печати, чтобы форма не менялась во времени.

В качестве элементов лопаток использован профиль RG-15. Формы обледенения использовались на основе полученных в этой работе. Лопатки изготавливались из нескольких частей и склеивались. Моделирование обледенелой лопасти реализовано в специально сконструированном аэродинамическом климатическом стенде на основе оптически прозрачной трубы из оргстекла квадратного сечения 200×200 мм, со скоростью потока до 20 м/с, температурой до -20 °С и относительной влажностью до 90 %. Насыщение влагой потока осуществлялось генераторами мелкодисперсного аэрозоля. Поток генераторов аэрозоля оптимизировались с помощью лазерной доплеровской анемометрии.

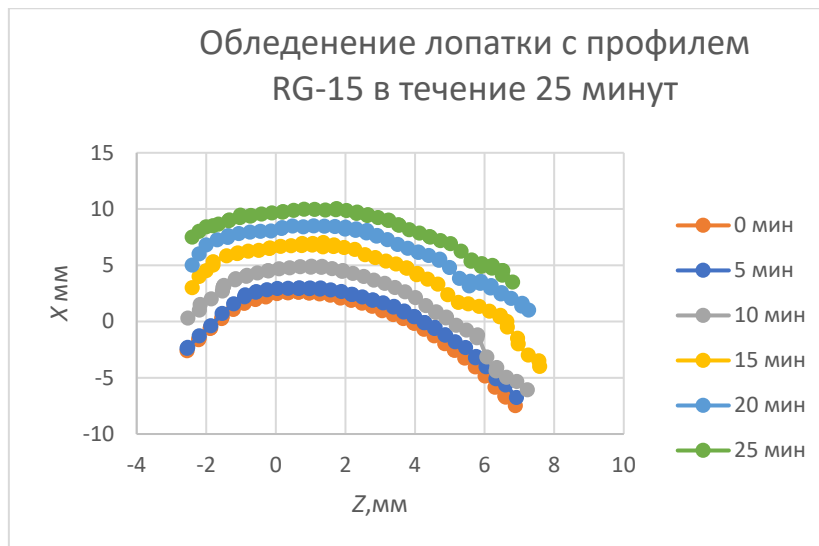


Рис. 5. Профили поверхности наледи в срединном сечении, полученные с интервалом 5 минут

Выполнены измерения скоростей потока на расстояниях до 400 мм за задним краем лопатки и силовых характеристик элемента лопасти, подвергнутого обледенению. Показано влияние обледенения на аэродинамические и силовые характеристики рис. 6. Для проведения экспериментов выбраны следующие параметры: скорость набегающего потока от 0 до 12,5 м/с, длина хорды – 0,2 м, число Рейнольдса до 250000, размер капель от 3 мкм до 1000 мкм, температура потока от 0 °С до –30 °С, углы атаки лопатки от 0 до 20 градусов. Лопатки помещались в прозрачный канал климатической трубы. Шаг измерения по оси Z составлял 1 мм, шаг перемещения по оси X составлял 10 мм, углы атаки принимали значения 0°; 4°; 8°; 12°; 16°; 20°, скорость набегающего потока принимала значения 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 м/с.

Обсуждение

Экспериментально показано существенное влияние наледи на аэродинамику лопасти. Установлено, что наличие наледи существенно ослабляет скорость потока вблизи лопатки. Показано, что наличие наледи приводит к более раннему образованию зон возвратного течения по сравнению с лопаткой в отсутствии обледенения.

Наиболее ярко влияние наледи на аэродинамику течения проявлялось при образовании зон возвратного течения. Построенные поля расходной проекции скорости (рис. 6) показали, что при образовании наледи зона возвратного течения в случае отрыва потока оказывается почти в 2 раза большей, чем для лопатки без обледенения, а значения отрицательной проекции скорости интенсивнее на 50 %. Результаты экспериментов подтверждают работоспособность и надежность предложенного оптико-электронного метода трехмерных измерений крупных объектов, основанного на пространственно-временной модуляции источника оптического излучения. Метод является бесконтактным, устойчивым к су-

ществленным изменениям светорассеивающих свойств поверхности измеряемого объекта и может быть реализован на основе детектирующей камеры с ограниченным динамическим диапазоном. Новый метод калибровки компенсирует оптические искажения элементов измерительной системы.

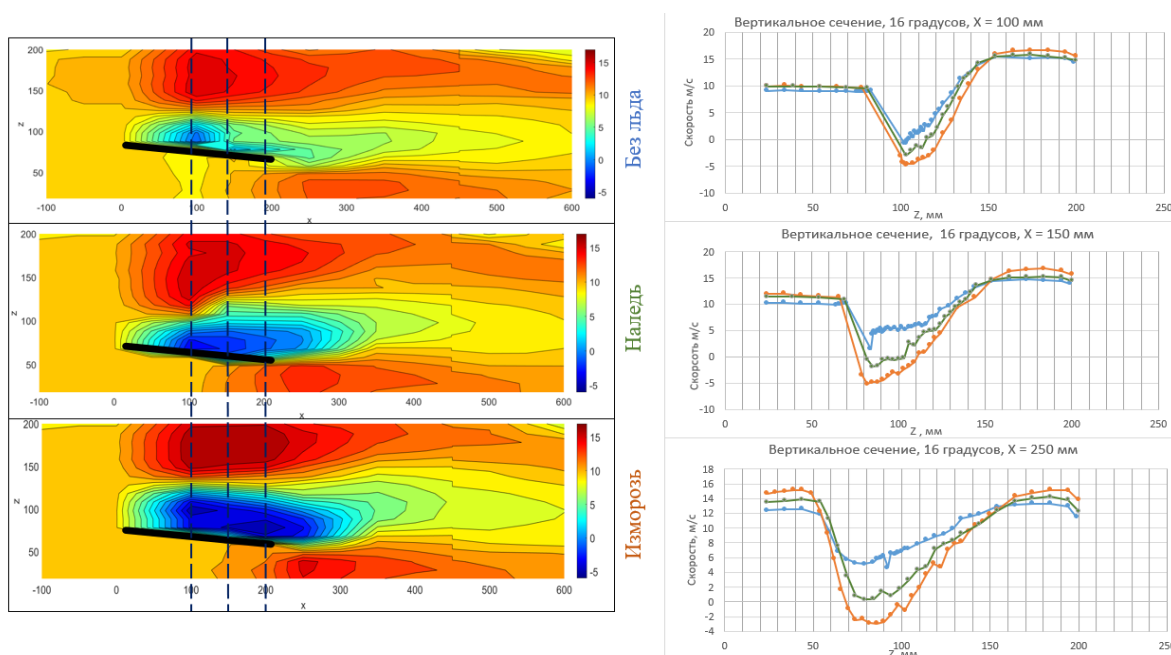


Рис. 6. Поля осевой компоненты скорости и профили скорости при трех различных геометриях лопатки, без наледи, с обледенением в виде наледи и изморози

Заключение

Предложен метод фазовой триангуляции для бесконтактной реконструкции профиля поверхности крупных объектов сложной формы, особенно перспективный для машиностроительных технологий. Он отличается высокой степенью надежности и стойкостью к изменениям в широком диапазоне оптических свойств поверхности объектов, а также к аддитивным шумам на изображениях (блики, шум оптоэлектронного тракта и т. д.). Достоверные данные можно получить с помощью недорогой оптоэлектронной схемы, состоящей из фотоприемника с низким разрешением, обычного объектива и маломощного источника структурированного освещения. Измерены аэродинамические и силовые характеристики элемента лопасти ветрогенератора, подвергшегося обледенению.

Полученные результаты демонстрируют работоспособность оптоэлектронного метода бесконтактного измерения профиля поверхности крупных объектов сложной формы и перспективы его дальнейшего развития.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ronsten G. Svenska erfarenheter av vindkraft i kallt klimat – nedisning, iskast och avisning Elforsk rapport. 2004. b.
2. ISO 12494. 2001. Atmospheric icing of structures.
3. Siefert H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climate // Wind engineering. - 2003. - Vol. 3. - C. 69-79.
4. Anufriev I. S., Anikin Y. A., Fil'kov A. I., Loboda E. L., Agafontseva M. V., Kasymov D. P. et al. Investigation into the structure of a swirling flow in a model of a vortex combustion chamber by laser doppler anemometry // Technical Physics Letters. - 2013. – Vol. 39 - C. 30-32.
5. Anufriev I. S., Kopyev E. P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Process Technol. - 2019. – Vol. 192, No. 4. – P. 154–169.
6. Alekseenko S. V., Anufriev I. S., Glavniy V. G., Krasinsky D. V., Rakhmanov V. V., Salomatov V. V. et al. Study of 3D flow structure and heat transfer in a vortex furnace // Heat Transfer Research. - 2016. – Vol. 47. – P. 653–667.
7. Sergiyenko O. Yu., Ivanov M. V., Tyrsa V. V., Kartashov V. M., Rivas-López M., Hernández-Balbuena D., Flores-Fuentes W., Rodríguez-Quiñonez J. C., Nieto- Hipólito J. I., Hernandez W. Tchernykh A. Data transferring model determination in robotic group // Robotics and Autonomous Systems by (Elsevier). - 2016. - Vol. 83. - C. 251-260.
8. Dvoynishnikov S. V., Anikin Y. A., Kabardin I. K., Kulikov D. V., Meledin V. G. An optoelectronic method of contactless measurement of the profile of the surface of large complexly shaped objects // Measurement science and thechnology. - 2016. - No. 59. - C. 21–27.
9. Dvoynishnikov S. V., Meledin V. G., Glavnyi V. G., Naumov I. V., Chubov A. S. Estimation of optimal frequency of spatial modulation of the radiation of 3D measurements // Measurement science and thechnology. - 2016. - Vol 58, No. 5. - C. 506–511.
10. Dvoynishnikov S. V., Rakhmanov V. V., Kabardin I. K., Meledin V. G. Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. - 2019. - Vol. 145. - C. 63-70.

© И. К. Кабардин, С. В. Двоинишиников, В. О. Зуев, В. Е. Ледовский, 2023