



УДК 535-7, 53.06

И.К. Кабардин, В.Г. Меледин, И.В. Наумов

*Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
630090, Новосибирск, Проспект Лаврентьева, 1, E-mail: kabardin@itp.nsc.ru*

## **ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НАЛЕДИ, ОСНОВАННЫЙ НА ЭФФЕКТЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

Представлен оптический метод измерения толщины слоя прозрачной наледи, основанный на эффекте полного внутреннего отражения на границе наледь-воздух. Вокруг светового источника малого размера под светорассеивающей поверхностью в измеряемой области формируется световое кольцо, диаметр которого пропорционален толщине наледи. При использовании нескольких источников света метод позволяет измерять поле толщин прозрачной наледи. Метод может быть использован для измерения толщины прозрачной наледи на лопастях роторов ветрогенераторов.

### **ЭФФЕКТ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ, ТОЛЩИНА СЛОЯ ПРОЗРАЧНОЙ НАЛЕДИ, МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время наблюдается интенсивный рост ветроэнергетики. Ее статус изменился от одиночных альтернативных источников энергии до промышленного использования в сетевых электростанциях. К началу 2015 года общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 369 гигаватт (2,5 % от общего количества произведенной человечеством электроэнергии). Некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику, в частности, на 2014 год в Дании с помощью ветрогенераторов производится 39 % всего электричества; на 2013 год — в Португалии — 23 %; на 2011 год — в Ирландии — 14 %, в Испании — 16 % и в Германии — 8 %. В связи с этим интерес к задачам ветроэнергетики у исследователей значительно возрос.

Одной из проблем, возникающей при эксплуатации ветрогенераторов в суровых климатических условиях России и северных стран, связана с изменением аэродинамики ротора ветрогенератора при обледенении его лопастей[1]. В случае крайней степени обледенения вследствие существенного изменения веса лопастей иногда даже становится невозможным запустить турбину в рабочем режиме, что может вызвать потери производства энергии в течение достаточно длительных промежутков времени[2]. Кроме того, накопление льда на лопастях турбины нарушает аэродинамику, может уменьшить количество произведенной энергии и перегрузить турбину[3]. Обледенение лопастей также ведет к лишней нагрузке на лопасти, что увеличивает их износ и усталость, сокращая время работы турбины[4]. Наличие наледи на лопастях при их вращении имеет опасность неконтролируемого отрыва ледяных кусков с краев лопатки. Это опасно для обслуживающего персонала, может повлиять на общественное признание использования энергии ветра или потребует использование больших площадей для ограждения вокруг

ветровых турбин [5]. Меры по предупреждению и борьбы с обледенением хорошо себя зарекомендовали, но, несмотря на существенный прогресс в этой области, существует недостаток надежных методов диагностики обледенения, необходимых для запуска и контроля работы антиобледенительных систем [6 – 8]. Предшественниками были испытаны различные методы и датчики, но все они пока не дают удовлетворительного результата [9].

Традиционно выделяются два основных типа обледенения: облачное обледенение и осадочное [10]. Облачное обледенение происходит, когда маленькие переохлажденные капли воды, составляющие облака и туман, осаждаются из воздуха и примерзают к лопасти ветрогенератора. В зависимости от размеров капель и температуры поверхности формируются различные типы обледенения. Из мелких капель, которые почти мгновенно замораживаются, образуется мелкий иней. Из средних капель, которые замораживаются немного медленней, получается крупный иней. Если иней скапливается на поверхности в виде слоя жидкости - образуется наледь. Наледь также формируется из ледяного дождя и при облачном обледенении с высокой влажностью при температурах, близких к нулю. Обледенение в виде наледи, как правило, гладкое, прозрачное и равномерно распределено по поверхности конструкции.

Поскольку показатели преломления воды ( $n = 1,33$ ) и прозрачного льда ( $n = 1,35$ ) незначительно отличаются, то для диагностики образования наледи можно применить методы, применяющиеся для диагностики пленок прозрачной жидкости. Известен оптический метод измерения мгновенной толщины слоя жидкости на основе эффекта полного внутреннего отражения [11, 12, 13]. Он был развит в этой работе.

Обледенение лопаток ротора ветротурбины происходит на передней кромке лопасти. Этот факт был замечен на многих ветроэлектростанциях и хорошо документирован [14]. Образование на лопастях льда сильно зависит от температуры воздуха и размера капель. Однако выработать какую-то общую закономерность здесь достаточно сложно, так как лед образуется по-разному в зависимости от указанных выше условий [15]. Обледенение на лопасти ротора также зависит от длины хорды лопатки ротора и скорости набегающего потока [16].

Методы детектирования обледенения могут быть разделены на прямые и косвенные. Прямые методы основаны на определении изменения некоторых свойств датчиков в результате нараста наледи. Косвенные методы основаны на отслеживании погодных условий, которые приводят к обледенению. Например, по определению точки росы, по измерению фактической мощности в зависимости от скорости ветра или по измерению частоты генерируемого шума.

Предыдущее исследование на тему методов диагностирования обледенения в приложении к ветряным турбинам позволяет сделать вывод, что лучшими местами расположения измерителей прямо на лопастях как можно ближе к краю лопасти [9]. Это связано в основном с тремя факторами. Первый фактор - обледенение зависит от скорости ветра. Скорость ветра на конце лопасти достигает гораздо большего значения, чем на оси. Второй фактор – лопасти могут подниматься на 80 метров выше, чем кабина турбины и достигать низшей границы облаков. Третий фактор - концы лопасти контактируют с большим объемом воздуха, и поэтому на них может образоваться большее количество льда.

Из обзора [9] доступных эффективных методов, которые полностью отвечают потребностям обнаружения обледенения на ветровых турбинах, пока не существует. Соответственно, требуется поиск и создание новых методов диагностики обледенения.

## **ОПИСАНИЕ МЕТОДА**

В работе предложен метод, основанный на явлении полного внутреннего отражения света границей раздела двух сред [11]. На твердой светорассеивающей поверхности под толщей наледи создается светящееся пятно. В результате преломления света на границе раздела сред лед-воздух и полного внутреннего отражения возникает изображение светового

кольца на светорассеивающей поверхности. Оценка геометрических параметров освещенной зоны дает информацию о толщине наледи и ее наклоне в зоне измерения. По главной диагонали эллипса, аппроксимирующего освещенную область, определяется толщина наледи.

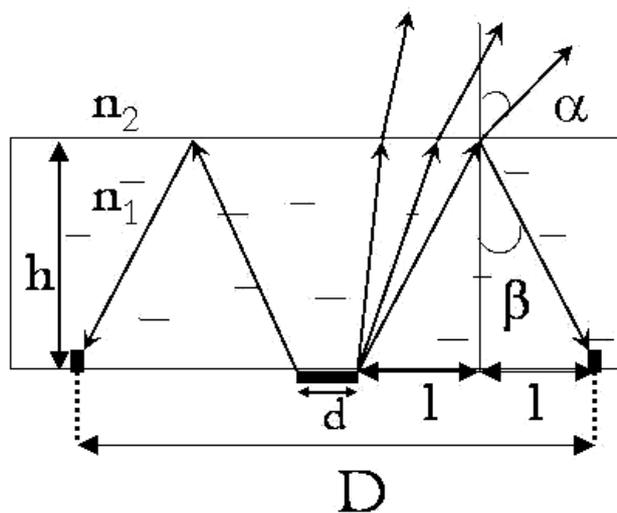


Рис. 1. Ход лучей.  $n_1$  - лед,  $n_2$  - воздух,  $d$  - размер источника,  $D$  - размер изображения,  $h$  - толщина наледи.

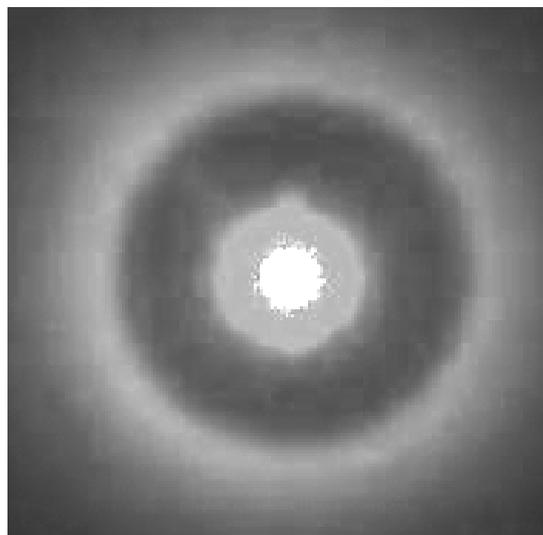


Рис. 2. Изображение, полученное при плоской поверхности наледи.

Эффект полного внутреннего отражения возникает на границе раздела двух сред с разными коэффициентами преломления. Явление преломления лучей на границе раздела сред описывается законом Снелиуса:  $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$  (рис. 1).

На поверхности лазером формируется точечный источник света. На границе раздела лед-воздух, проходящие под углом меньшим предельного угла отражения, лучи света преломляются и выходят из жидкости. Лучи, проходящие под углом, большим предельного угла отражения, отражаются к светорассеивающей поверхности. В результате преломления и отражения на границе раздела возникает изображение, напоминающее кольцо (рис. 2). По его геометрическим параметрам толщина пленки жидкости восстанавливается по следующей формуле:

$$h = \frac{D - d}{4 \operatorname{tg}(\arcsin(\frac{n_2}{n_1}))}. \quad (1)$$

При наличии волн на поверхности жидкости или наледи изображение принимает форму нескольких дуг, расположенных вблизи источника света (рис. 3). Метод позволяет проводить полевые измерения. Для этого на светорассеивающей поверхности формируется множество источников света. Каждый источник света формирует свое изображение кольца, несущего информацию о параметрах наледи в его окрестности. По изображениям вычисляются толщины наледи или пленки жидкости в окрестности источников света, и, далее, производится интерполяция. Метод измерения поля толщин иллюстрирует рис. 4. Для получения множества изображений был использован набор полупроводниковых лазеров

### Алгоритм обработки изображений

Обработка изображения, подобного показанному на рис. 5 исходному изображению  $I_0$ , выполняется на компьютере. Для определения толщины необходимо измерить диаметр светлой окружности. Сначала выравниваем контраст (рис. 6)

$$I_1 = B(I_0),$$

где  $B$  – оператор выравнивания гистограммы яркостного распределения.

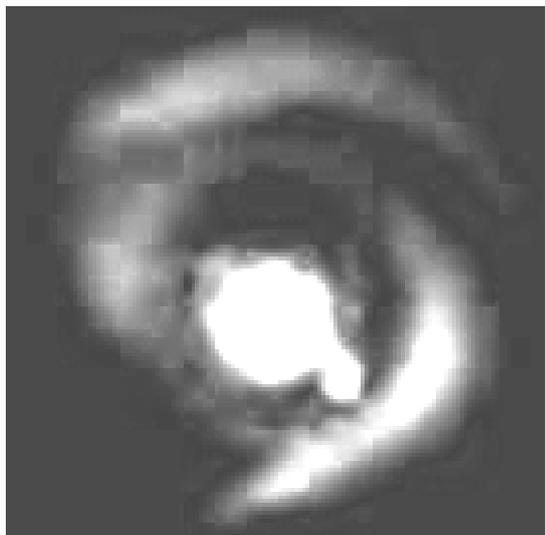


Рис. 3. Изображение при наличии неоднородностей на поверхности наледи

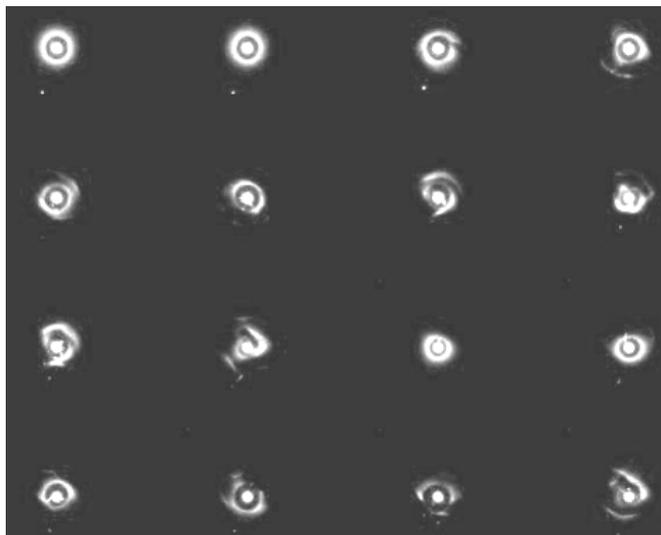


Рис. 4. Измерение поля толщин наледи

Затем с помощью порогового преобразования выделяем область источника (рис.7) и локализуем его центр

$$I_2 = P(I_1, \text{level}_0), (X_c, Y_c) = C(I_2).$$

Здесь:  $P$  – бинарное пороговое преобразование с порогом  $\text{level}_0$ ,  $C$  – оператор определения центра области. Далее применяем морфологический оператор расширения исходный источник (рис.6). Минимальная измеряемая толщина

$$M = U(X_c, Y_c, R).$$

Здесь:  $U$  – множество точек маски с центром в точке  $X_c, Y_c$  радиусом  $R$ .

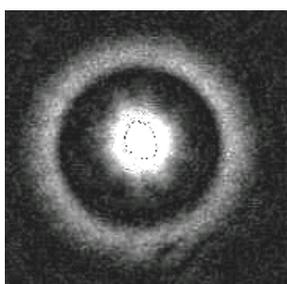


Рис. 5. Исходное изображение

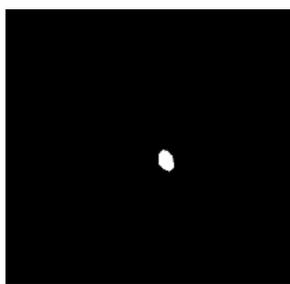


Рис. 6. Область светового источника

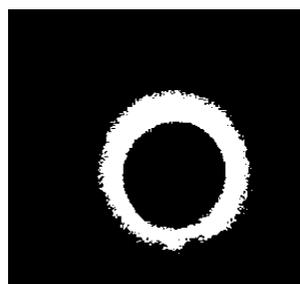


Рис. 7. Обработанное изображение

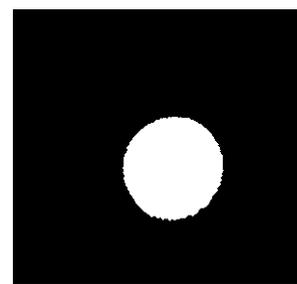


Рис. 8. Финальное изображение

Вычитаем расширенную маску из исходного изображения. Выравниваем контраст:

$$I_3 = I_0 \setminus M, I_4 = B(I_3).$$

Делаем два пороговых преобразования с разными значениями порогов и находим их разность (рис. 8)

$$I_5 = P(I_4, \text{level}_1), I_6 = P(I_4, \text{level}_2), I_7 = I_5 \setminus I_6.$$

Маскируем изображение внешнего кольца:

$$I_8 = F(I_7, \text{white}), I_9 = F(I_8, \text{black}).$$

Здесь:  $F$  – оператор заливки внешней области заданным цветом. Определяем геометрические параметры эллипса

$$I_6 = F(I_5), D = PR(I_6).$$

Здесь:  $PR$ - оператор определения параметров области.

Была проведена калибровка на пластинах льда ( $n_2=1,35$ ) известной толщины. Установка (рис. 9) состоит из лазера, камеры и пластины льда. Лед замораживался на светорассеивающей поверхности. Пучок света лазера формировал изображение в плоскости светорассеивающей поверхности. Изображение фиксировалось камерой и программно обрабатывалось по описанному выше алгоритму. Полученные результаты представлены на рис. 10 (ромб – известная толщина, квадрат – измеренная толщина). По оси  $Y$  отложена толщина в миллиметрах. Расхождение измерений известной толщины и измеренной толщины не превышало 10 %

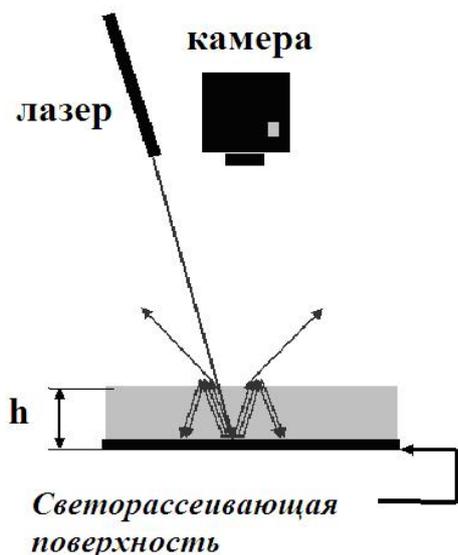


Рис 9. Установка для калибровки на пластинах наледи.

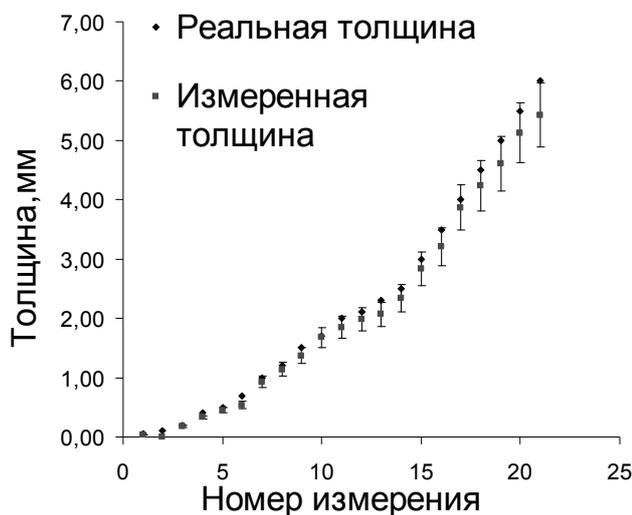


Рис. 10. Сравнение измеренной и известной толщин наледи.

Следует заметить, что у метода есть ограничения, связанные с конечностью размера источников света. Теоретически, для точечных источников, измеряемая толщина слоя прозрачной жидкости ограничена длиной волны,  $h \sim \lambda$ . В случае протяженного источника кольцо будет наблюдаться, до тех пор, пока освещенная область, полученная в результате отражения от границы раздела лед-воздух, не перекроет область источника. Минимальная толщина определяется по формуле:

$$h_{\min} = \frac{d}{2 \operatorname{tg}(\arcsin(\frac{n_2}{n_1}))}. \quad (2)$$

Коэффициенты преломления воздуха  $n_1 = 1$ , льда  $n_2 = 1,35$ . Тогда для размера источника  $d=0,1$  мм минимальная толщина оценивается как  $h_{\min} = 0,05$  мм.

## Применение метода для диагностики наледи на лопастях

Применение метода для диагностики наледи в натуральных измерениях представлена ниже (рис. 11). Был проведен следующий эксперимент. Замороженный на подложке слой наледи освещался лучом лазера с расстояния 10 м. Толщина наледи в экспериментах составляла 4,4 мм. Создаваемое лазером изображение регистрировалось цифровым фотоаппаратом Cannon E400D с телескопическим объективом. Полученное изображение обрабатывалось на компьютере.

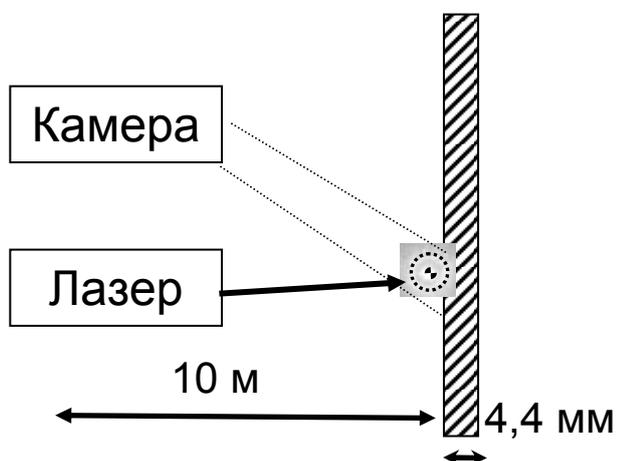


Рис. 11. Измерение наледи толщиной 4,4 мм на удалении 10 м



Рис. 12. Иллюстрация диагностики наледи на лопастях ветрогенератора

Диагностика наледи на лопастях ветрогенератора возможна аналогичным образом (рис. 12). Для создания измеряемых изображение возможно применение нескольких лазеров, что позволяет производить диагностику в нескольких точках. Регистрация изображений с помощью телескопических объективов не вызывает сложностей.

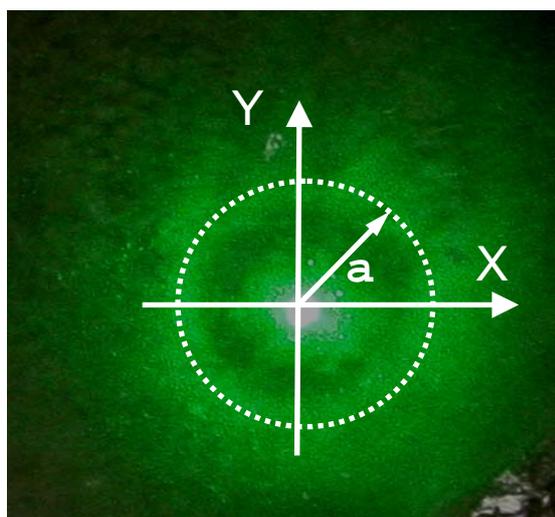


Рис. 13. Регистрируемое в экспериментах изображение

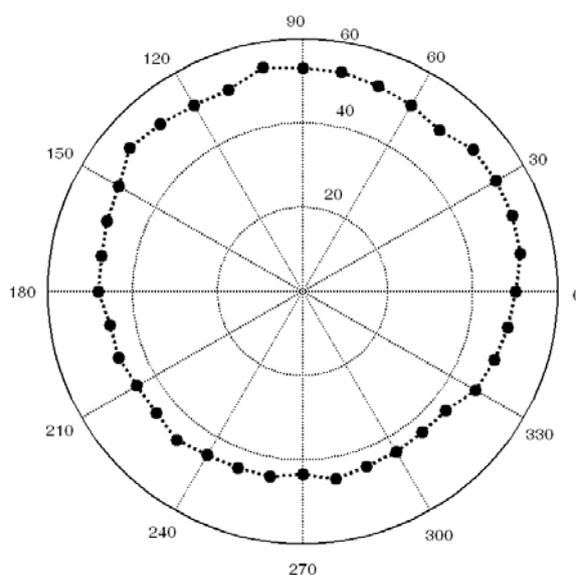


Рис. 14. Распределение точек на изображении измеряемого кольца.

На рис. 13 показано зарегистрированное в эксперименте изображение. Изображение обрабатывалось с помощью описанного выше алгоритма. Распределение точек на изображении измеряемого кольца показано на рис. 14. Рассчитанное по формуле (4.4) распределение толщин от угла показано на рис. 15.

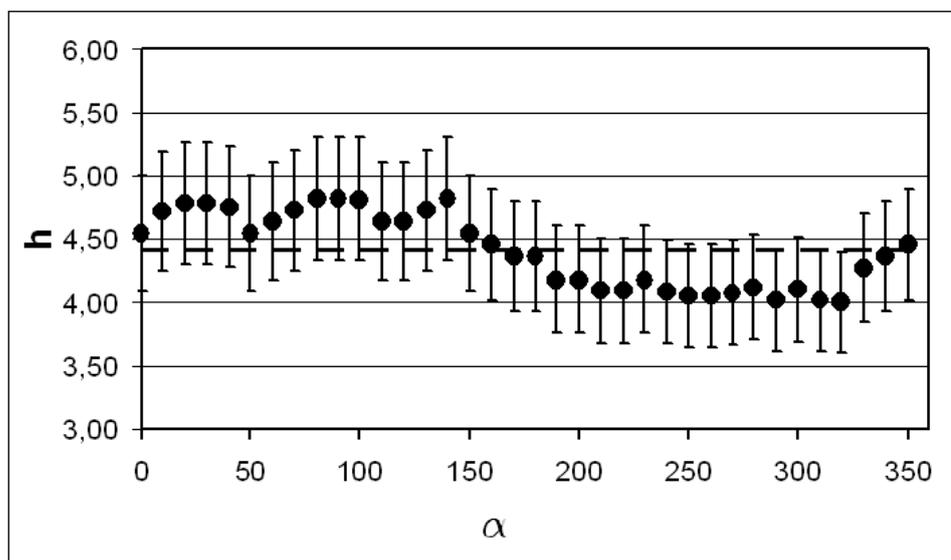


Рис. 15. Распределение измеренной толщины в зависимости от угла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит метод, основанный на эффекте полного внутреннего отражения и позволяющий измерять толщину прозрачной наледи. Метод позволяет проводить измерения дистанционно. Метод позволяет проводить диагностику толщин, как льда, так и воды. Метод не требует установки в лопасть, дешев и прост в обслуживании. Позволяет проводить измерения в нескольких точках. Оптический метод измерения мгновенной толщины слоя прозрачного льда успешно реализован в опытной измерительной установке. Проведена калибровка установки на образцовых пластинах прозрачного льда в диапазоне 1-10 мм. Достигнута погрешность измерения менее 10% в реальном эксперименте.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта РФФИ 15-08-00186 и гранта РФФИ № 14-01-31413 мол\_a, а также при помощи стипендии президента СП-1515.2015.1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Homola M.C.** Icing of Wind Turbines Vindforsk projects, a survey of the development and research needs //Elforsk report 129 P. ([http://www.elforsk.se/Global/Vindforsk/Survey%20reports/12\\_13\\_report\\_icing.pdf](http://www.elforsk.se/Global/Vindforsk/Survey%20reports/12_13_report_icing.pdf))
2. **Ronsten, G.** Svenska erfarenheter av vindkraft i kallt klimat – nedisning, iskast och avisning// Elforsk rapport, 2004. – 109 p.
3. **Jasinski W.J., Noe S.C., Selig M.S., Bragg M.B.** Wind turbine performance under icing conditions// Transactions of the ASME, Journal of Solar Energy Engineering, 1998. Vol. 120. P. 60 – 65.
4. **Ganander H., Ronsten G.** Design load aspects due to ice loading on wind turbine blades// Proceedings of the conference BOREAS VI. 2003. p. 49 – 55.
5. **Siefert H.** Technical requirements for rotor blades operating in cold climate// Wind engineering. 2003. Vol. 23, № 1. p.69-79.

6. **Peltola, E., Laakso, T., Antikainen, P., Peuranen, S.** Prevention of icing effects// Proceedings of the 2003 BOREAS VI conference. 2003. P 107-129.
7. **Kimura, S., Sato, T., Freitag, H., Tammelin, B.** Icing wind tunnel test for a new ice detector// Proceedings of the 2005 BOREAS VII Conference. 2005. P. 47-53.
8. **Horbaty, R.** Wind energy in cold climates — The Swiss experience// Proceedings of the 2005 BOREAS VII conference. 2005. P. 111-117.
9. **Homola M.C., Per J. Nicklasson, Per A. Sundsbø** Ice sensors for wind turbines// Cold Regions Science and Technology. 2006. Vol.6, №2. p. 125 – 131
10. **ISO 12494:2001**, Atmospheric icing of structures.
11. **Kabardin I. K., Meledin V. G., Eliseev I. A. and Rakhmanov V. V.** Optical measurement of instantaneous liquid film thickness based on total internal reflection // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20, № 4. P. 407 – 415.
12. **Меледин Г.В.** Физика в задачах: экзаменационные задачи с решениями. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 272 с.
13. **E.T. Hurlburt, T.A. Newell** Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows//Experiments in Fluids. –1996. – Vol. 21. – P. 357 – 362.
14. **Makkonen L.** Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines// Wind engineering, 2001. Vol. 25, № 1. p. 25-29.
15. **Homola M.C** The dependence of icing severity on chord length// Proceeding of EWEC conference. 2009. p. 37-51
16. **Fuchs L., Szasz R.L.** Ice accretion on wind-turbines//Proceeding of IWAIS XIII. 2009. p 139-143.

I. K. Kabardin, V.G. Meledin, I.V. Naumov

*Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*  
630090, Novosibirsk, Lavrentyeva ave., 1, E-mail: kabardin@itp.nsc.ru

## THE OPTICAL METHOD OF TRANSPARENT ICE LAYER THICKNESS MEASUREMENT, BASED ON TOTAL INTERNAL REFLECTION

*An optical method of measuring the transparent ice thickness, based on the effect of total internal reflection by the transparent ice — gas interface, is presented. The light circle, whose diameter is proportional to the ice thickness and eccentricity is proportional to the slope gradient of the ice surface in the measurement region, is formed around a small-size light source in the plane of diffuser surface. Using several light sources, the method allows measurement of the transparent ice thickness field. This method can be applied for transparent ice thickness measurements on a rotor blade of wind turbine.*

TOTAL INTERNAL REFLECTION, TRANSPARENT ICE LAYER THICKNESS, IMAGE PROCESSING VIA MORFOLOGICAL OPERATION