

А. Т. Янчат^{1}, И. К. Кабардин¹, С. В. Какаулин¹, М. Р. Гордиенко¹*

Оценка влияния нароста льда на аэродинамику потока за цилиндром методом ЛДА и цифровой трассерной визуализации

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: yanchat777@gmail.com

Аннотация. Использование метода фазовой триангуляции для измерения геометрических параметров наледи является важным направлением исследований в области метеорологии и инженерии. Наледь, формирующаяся на поверхности различных объектов в условиях холодных климатических условий, представляет серьезную угрозу для безопасности и эффективности работы технических систем. В данной работе представлена методика применения фазовой триангуляции для измерения нароста наледи. Описание метода включает в себя принцип его работы, а также его адаптацию для учета особенностей распространения оптических сигналов через среды с различными показателями преломления. Проведенные эксперименты подтверждают эффективность метода фазовой триангуляции и его применимость в реальных условиях.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, геометрические параметры наледи, преломление оптических сигналов, методика, инженерия безопасности

A. T. Yanchat^{1}, I. K. Kabardin¹, S. V. Kakaulin¹, M. R. Gordienko¹*

Assessment of Ice Build-up Influence on the Aerodynamics of the Flow Behind the Cylinder by the LDA Method and Digital Tracer Visualization

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: yanchat777@gmail.com

Abstract. The use of the phase triangulation method to measure the geometric parameters of ice is an important area of research in the field of meteorology and engineering. Ice formation on various surfaces in cold climatic conditions poses significant risks to the functionality and safety of technical systems. This paper introduces a method for employing phase triangulation to quantify ice accumulation. It details how the method operates, including its adaptation to accommodate the complexities of optical signal propagation through media with differing refractive indices. Experimental results validate the efficacy of the phase triangulation approach and its practical application in real-world scenarios.

Keywords: phase triangulation, ice accretion geometric parameters, optical signal refraction, methodology, safety engineering

Введение

Использование метода фазовой триангуляции для измерения геометрических параметров наледи представляет собой важную область исследований в метеорологии и технике безопасности. Наледь, образующаяся на поверхности раз-

личных объектов в холодных климатических условиях, может представлять серьезную угрозу для безопасности и эффективности работы технических систем.

Поэтому эта методика имеет особую важность. Измерения трехмерной геометрии объектов могут быть проведены с высокой точностью и надежностью, благодаря данному методу.

Описание метода

В данном исследовании раскрыто использование техники фазовой триангуляции. Для оценки геометрических характеристик наледи применен метод, основанный на использовании структурированного света. Представлен принцип его работы, а также модификация методики с учетом изменения направления оптических сигналов, изложен процесс настройки метода и процедуры измерения трехмерной формы объекта, что включает вычисление геометрических характеристик ледяных образований (рис. 1). Методика включает следующие этапы:

- 1) полигонализация объекта до и после образования наледи для восстановления его поверхности;
- 2) адаптивная фильтрация полигонов;
- 3) создание нормалей для построения поверхности;
- 4) определение локальной толщины наледи;
- 5) статистическая оценка толщины ледяного нароста.

Необходимо модернизировать данный метод, чтобы с его помощью можно было измерять геометрические параметры наледи.

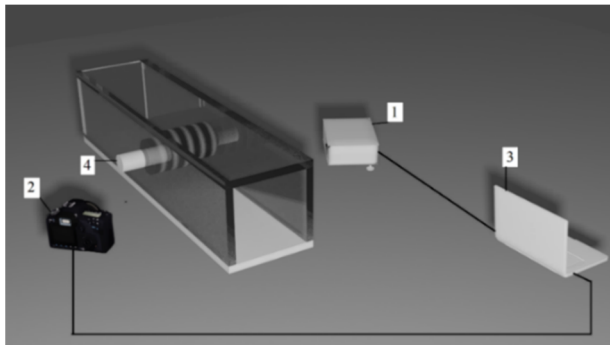


Рис. 1. Система измерения геометрических параметров наледи:

1 – проектор, 2 – фотоприемник, 3 – компьютер, 4 – объект

Для успешной адаптации метода следует учитывать следующие факторы:

– нужно выбрать оптимальные настройки измерительного устройства, чтобы облегчить минимизацию ошибки при выполнении измерений трехмерных форм на поверхности льда;

– при распространении луча необходимо учитывать отклонения от прямолинейной траектории, вызванные пространственным изолятором экспериментальной области, который представляет собой прозрачные стенки. Это описывается следующей формулой:

$$n_1 \sin \varepsilon = n_2 \sin \varepsilon', \quad (1)$$

где ε – угол падения, ε' – угол преломления, n_1 – показатель преломления первой среды, n_2 – показатель преломления второй среды.

Чтобы минимизировать ошибки, были подобраны специальные параметры оптических элементов (фотоприемник и проектор), а также характеристики метода (частота фазовой модуляции).

Результаты фазовых измерений плоского объекта изображены на рис. 2. Эти отклонения также являются важными для оценки точности измерения трехмерной геометрии плоского объекта и уровня шума. При расчете погрешности трехмерной геометрии плоского объекта необходимо выполнить аппроксимацию измеренных точек плоскостью. Затем нужно вычислить стандартное отклонение точек от аппроксимирующей плоскости:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n}}. \quad (2)$$

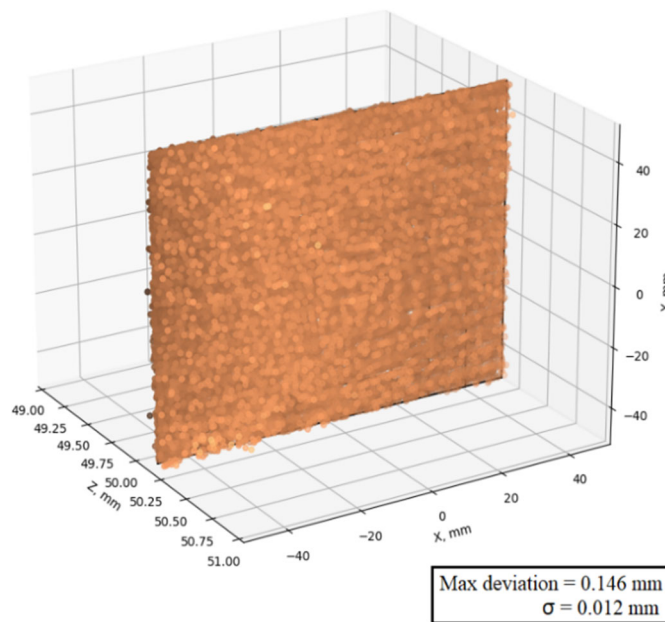
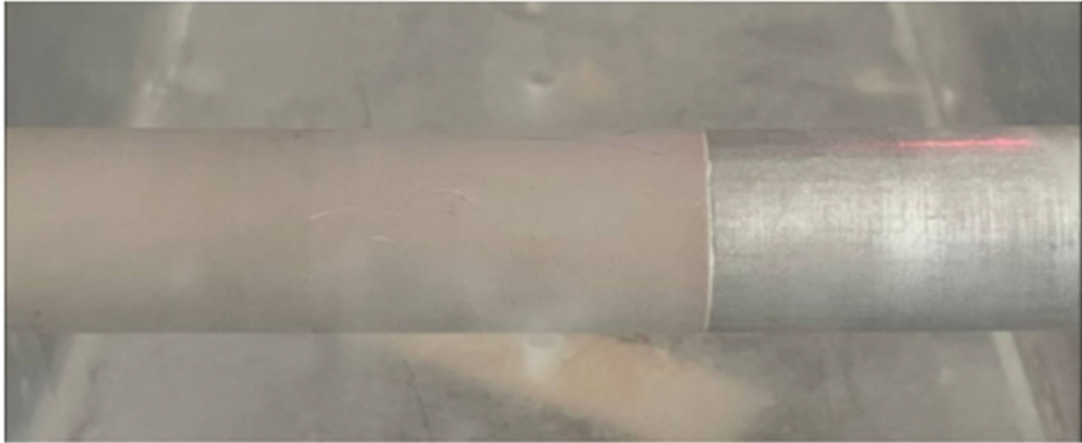


Рис. 2. Результаты измерения плоской поверхности в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов

Результаты

Результаты экспериментов, проведенных на ограниченной модели ветроэнергетической установки и цилиндрической поверхности (рис. 3), описаны в данной работе. Измерения геометрических параметров наледи были осуществлены.

11:42
 $T=12,6$



а)

15:45
 $T=-7,7$



б)

Рис. 3. Исследуемый цилиндрический объект: а) в начале эксперимента, б) в конце эксперимента

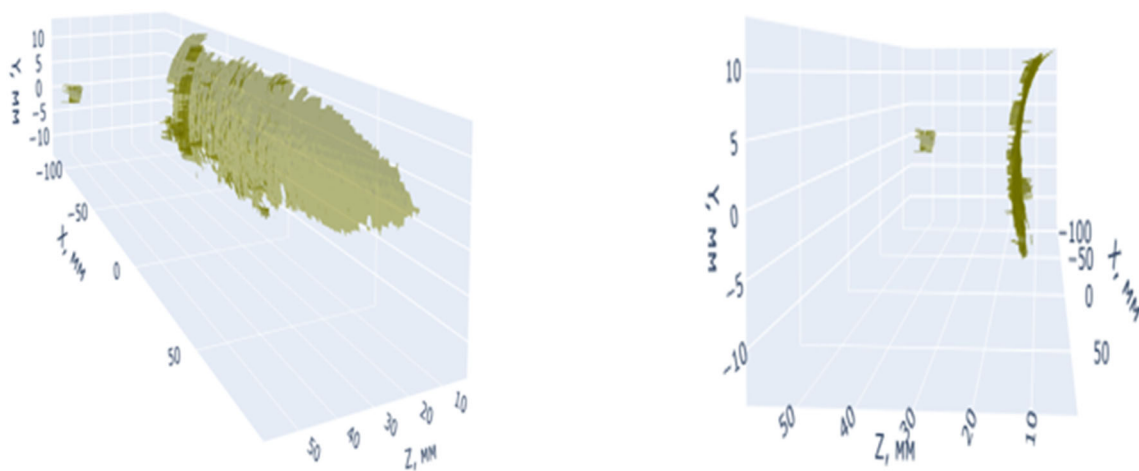
Полученные результаты подтверждают эффективность метода фазовой триангуляции и его применимость в реальных условиях. Построены поверхности (рис. 4), и измерены соответствующие профили скорости потока (рис. 5).

Метод фазовой триангуляции является эффективным инструментом для измерения геометрических параметров наледи в условиях преломления оптических сигналов. Разработка программно-аппаратного комплекса и его успешное тестирование на ограниченных моделях подтверждают его потенциал для практического применения.

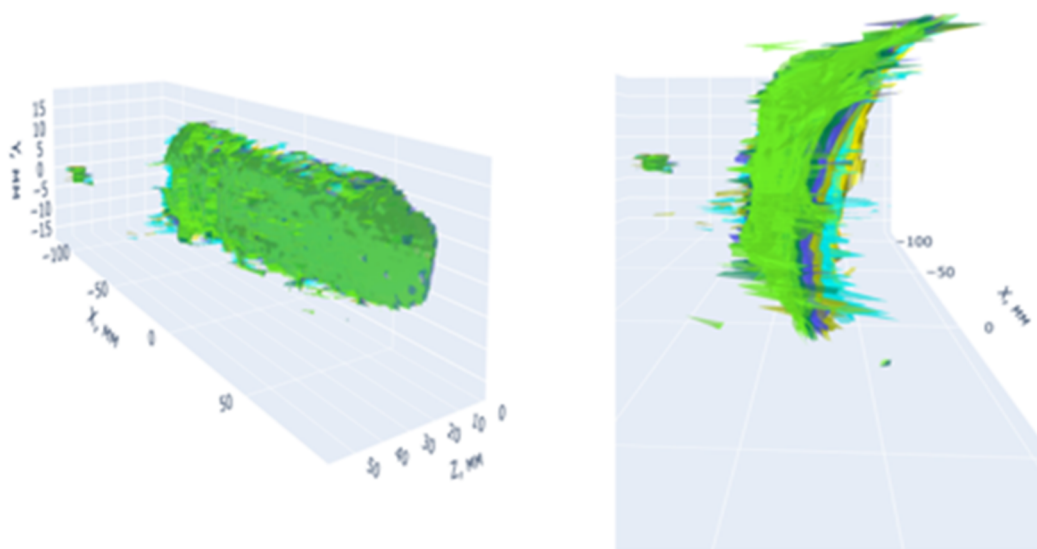
Результаты экспериментов говорят о высокой точности и достоверности измерений, проведенных с использованием данного метода. Это открывает новые

перспективы для применения метода фазовой триангуляции в различных областях, где требуется измерение геометрических параметров объектов.

Дальнейшее совершенствование метода и его аппаратной реализации позволит расширить область его применения и повысить точность измерений. Это может способствовать улучшению процессов мониторинга и контроля объектов, подверженных образованию наледи, и повышению безопасности в соответствующих областях.



а)



б)

Рис. 4. Результаты измерения поверхности наледи методом фазовой триангуляции: а) геометрия наледи, б) динамика процесса нароста льда

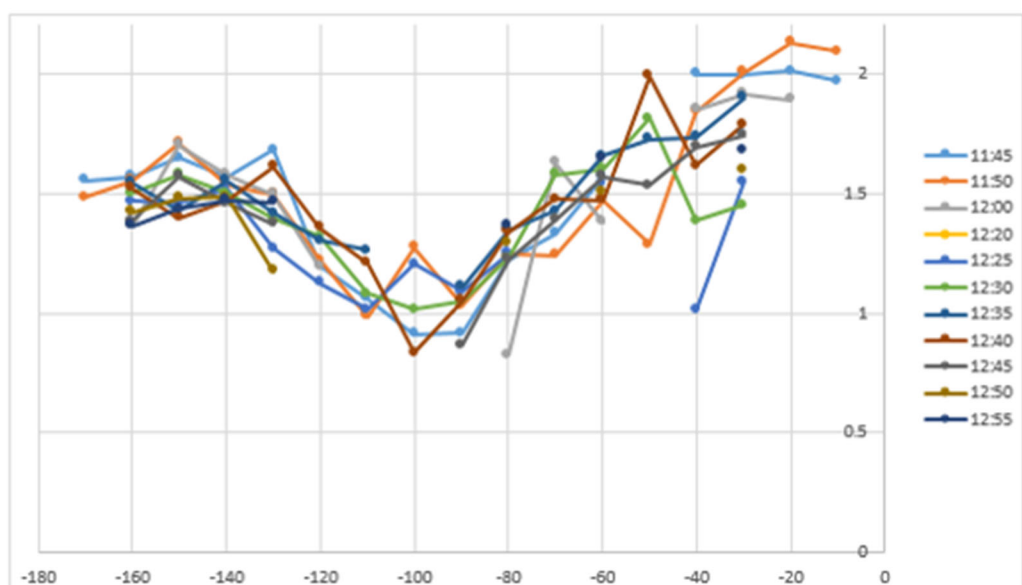


Рис. 5. Графики профилей скорости

Заключение

Метод фазовой триангуляции представляет собой мощный инструмент для измерения геометрических параметров наледи. Исследования, проведенные в рамках данного текста, показывают его эффективность и применимость в реальных условиях.

Адаптация метода для учета преломления оптических сигналов и разработка программно-аппаратного комплекса для проведения измерений дали положительные результаты. Эксперименты, проведенные на ограниченной модели ветроэнергетической установки и на цилиндрической поверхности, подтвердили точность и надежность метода.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.О. Зуев, С.В. Двойнишников, В.Г. Меледин, В.В. Рахманов, О.Ю. Садбаков, И.К. Кабардин. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – №1. – С. 115–126.
2. Meledin V. G., Dvoinishnikov S. V., Kabardin I. K., Chubov A. S., Bakakin G. V., Kabardin A. K., Pavlov V. A., Pravdina M. Kh. and Yavorsky N. I. Development of the laser doppler anemometry method for kinematic parameters diagnostics of turbulent flow in the near wall region // IOP Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2057. – P. 012096 DOI: 10.1088/1742-6596/2057/1/012096.
3. И.К. Кабардин Экспериментальное исследование кризиса течения в вихревой трубе Ранка-Хилша методом ЛДА // Теплофизика и аэромеханика. – 2022. – Т.9. – № 5. – С. 709–717.

© А. Т. Янчат, И. К. Кабардин, С. В. Какаулин, М. Р. Гордиенко, 2024