

03

Локальная теплоотдача дискретно-шероховатой поверхности с наклонными выступами

© Н.Д. Богданов, И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев, Р.Р. Шакиров, А.А. Паерелий

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ „Казанский научный центр РАН“, Казань, Россия
E-mail: bogdan_nik_29@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 марта 2025 г.

В окончательной редакции 5 апреля 2025 г.

Принято к публикации 5 апреля 2025 г.

Проведены измерения локальных коэффициентов теплоотдачи и локальной скорости для теплообменной поверхности с выступами, расположенными под углом 45° к потоку. Использованы выступы высотой 1.4 % от гидравлического диаметра. На основе термографических измерений температуры получены поле и профиль безразмерного коэффициента теплоотдачи. Оптическим методом SIV измерены локальные значения скорости на характерном расстоянии от поверхности. Установлена качественная взаимосвязь между измеренными значениями теплоотдачи и скорости.

Ключевые слова: наклонные выступы, интенсификация теплоотдачи, оптические измерения, распределение коэффициента теплоотдачи, поле скорости.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.13.60702.20304

Установка выступов под углом к потоку является одним из способов интенсификации теплообмена в каналах [1]. Такое расположение выступов может способствовать достижению более высоких значений теплогидравлической эффективности в сравнении с выступами, установленными перпендикулярно потоку [2,3]. Подобные теплообменные поверхности актуальны в системах тепловой защиты энергетических установок, например лопаток турбин, сопел реактивных двигателей и т.д.

Настоящая работа посвящена выявлению основных особенностей механизма формирования процесса теплоотдачи в интенсифицированном (шероховатом) канале. Цель работы — получение зависимости коэффициента теплоотдачи от гидродинамических параметров потока на локальном уровне.

Для решения данной задачи была использована экспериментальная установка, включающая в себя компрессор, систему критических сопел и канал прямоугольного сечения, присоединенный к ресиверу. В качестве рабочего тела использовался воздух с параметрами окружающей среды. Рабочий участок длиной 0.455 м был размещен в области установившегося течения — ближе к концу канала длиной 2.6 м и сечением 0.18×0.02 м (гидравлический диаметр $d = 0.036$ м). Средняя полоса нижней стенки рабочего участка представляла собой печатную плату размером 0.455×0.15 м. Нагрев платы проводился постоянным электрическим током, что обеспечивало граничное условие на стенке $q_w = \text{const}$. Измерение температуры стенки проводилось на расстоянии 0.3 м от начала рабочего участка. Были приняты меры для минимизации потерь тепла в окружающую среду. Подробное описание метода измерений и его метрологических характеристик дано в работе [3].

Эксперименты проводились при среднерасходной скорости потока в канале $u = 9.8$ м/с. При этом значение числа Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру, составляло $Re = ud/\nu = 2.35 \cdot 10^4$. Температура потока на входе была равна 24°C .

Нижняя стенка рабочего участка была покрыта пластиковыми накладками с выступами в виде полуцилиндров высотой $h = 0.5$ мм, что составляло 1.4 % от гидравлического диаметра. Выступы были установлены чередующимися рядами под углами 45 и -45° к потоку, между рядами выступов имелись зазоры шириной 10 мм. Шаг расположения выступов составлял 10 мм. Геометрия расположения выступов хорошо видна на поле безразмерного коэффициента теплоотдачи (рис. 1). Представленный фрагмент полностью охватывает по ширине два ряда выступов на характерной длине. Малые толщины накладок (0.5 мм) и печатной платы (1.5 мм) создавали большое термическое сопротивление по направлениям вдоль поверхности теплообмена, что позволяло минимизировать потоки тепла теплопроводностью по этим направлениям (по сравнению с нормальным к поверхности). Таким образом, подведенное тепло не приводило к равномерному распределению температуры при неравномерном отводе тепла, что давало возможность измерять локальные значения температур стенки и, соответственно, определять локальные величины теплоотдачи. Определение локальных значений числа Нуссельта Nu проводилось по результатам оптических измерений температуры поверхности стенки с помощью тепловизора по соотношению

$$Nu = \alpha d / \lambda = (q / (T_w - T_f)) d / \lambda,$$

где $\alpha = q / (T_w - T_f)$ — коэффициент теплоотдачи, $q = Q / F$ — плотность теплового потока, Q — тепловой

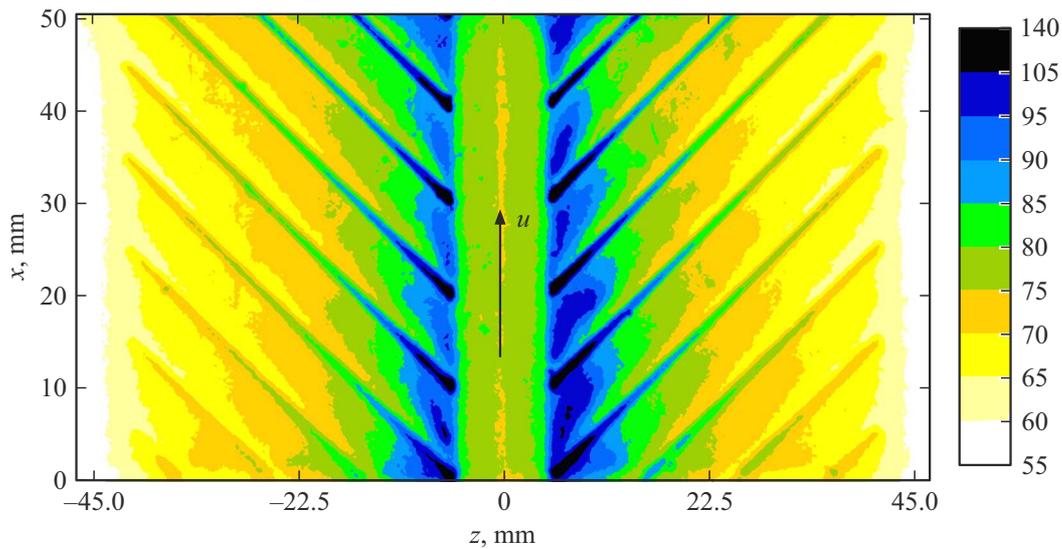


Рис. 1. Распределение коэффициента теплоотдачи на стенке. Направление потока указано стрелкой.

поток, создаваемый электрическим нагревателем, F — площадь поверхности теплообмена, T_w — температура стенки, T_f — температура потока, λ — теплопроводность воздуха.

Использование в измерениях аналого-цифрового преобразователя с классом точности 0.05, прецизионных сопротивлений в электрических цепях измерений и анализ определяющих параметров показали, что погрешность измерения коэффициента теплоотдачи обусловлена в основном неопределенностью измерения температуры стенки (температурного напора). При этом неопределенность измерений температуры стенки составляла 1.5°C (по паспорту прибора). Таким образом, при температурном напоре не менее 25°C достигалась неопределенность измерения коэффициента теплоотдачи не более $1.5/25 = 0.06$ (6%).

Характерное распределение коэффициента теплоотдачи на фрагменте поверхности в центральной части шероховатой стенки представлено на рис. 1. Координата x отсчитывается от начала изображенного фрагмента, координата z — от оси симметрии стенки (геометрии шероховатости).

Результаты измерений показывают, что в области расхождения выступов достигаются максимальные значения коэффициента теплоотдачи, в области схождения — минимальные. Непосредственно на выступах интенсивность теплоотдачи выше, чем между ними. При этом между выступами наблюдается немонотонное вдоль потока распределение коэффициента теплоотдачи с некоторым локальным максимумом. Эти данные согласуются с представлениями о существовании за выступами отрывной зоны и линии присоединения, после которой начинает формироваться новый пограничный слой.

В продольных областях гладкой стенки между рядами выступов коэффициент теплоотдачи существенно ниже,

чем в соседних с ними областях шероховатой стенки. Это можно связать с безотрывным обтеканием плоских участков поверхности.

Для выявления особенностей поперечного распределения теплообмена целесообразно усреднить температуру по продольной координате x . Это позволяет снизить влияние продольных флуктуаций, связанных с отдельными ребрами. Осреднение температуры проводилось по фрагменту рабочего участка длиной 0.04 м. Таким образом, было получено распределение коэффициента теплоотдачи по ширине канала (рис. 2, а). Коэффициент теплоотдачи для i -й точки (по z) профиля рассчитывался по формуле

$$\alpha_i = q / (T_{wi} - T_f),$$

где T_{wi} — осредненная по длине температура стенки для i -й точки профиля.

С целью выявления механизмов формирования теплоотдачи на шероховатой стенке были проведены измерения локальной продольной скорости потока u на высоте $5h = 2.5 \text{ mm}$ от теплообменной поверхности. Измерения выполнялись с помощью оптического метода SIV, описанного в работе [4]. Неопределенность измерений скорости составляла не более 0.03 м/с [4]. Измерение скорости потока проводилось в той же области рабочего участка, где измерялась температура.

Из рис. 2, б видно, что наличие наклонных выступов приводит к формированию неоднородной кинематической структуры потока, по крайней мере в пристеночной области. В областях расхождения выступов поток ускоряется, а в областях схождения тормозится. Данный факт указывает на то, что в потоке происходит перераспределение рабочей среды в поперечном направлении из-за отклонения пристеночного потока выступами. При одинаковом перепаде давления по сечению такое поло-

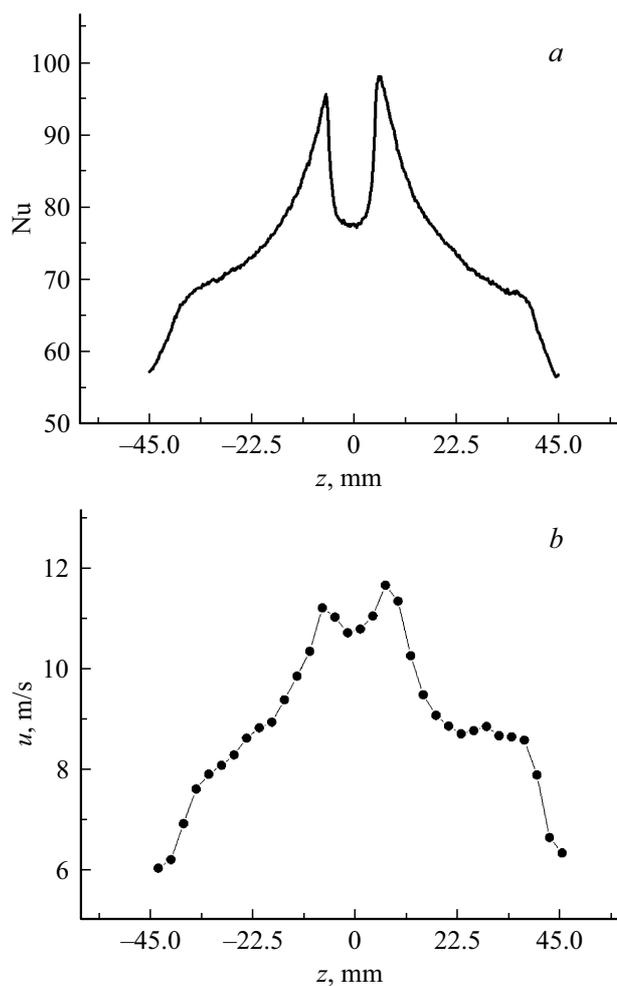


Рис. 2. Распределение коэффициента теплоотдачи (а) и распределение скорости на расстоянии $5h$ от стенки (б). Координата z отсчитывается от оси симметрии стенки.

жение приводит к появлению локальных зон (продольных полос) с повышенной и пониженной скоростями.

Сопоставление полученных данных по распределениям коэффициента теплоотдачи и скорости в пристеночном слое показывает хорошее качественное их согласование. Данный факт указывает на возможность выявления зависимости теплоотдачи от гидравлических параметров в виде критериального соотношения. В целом же выявление подобной зависимости представляет фундаментальный научный интерес в плане понимания механизмов формирования процесса теплообмена в сложных течениях. В практическом плане результаты работы могут способствовать повышению достоверности прогноза локальных значений тепловых потоков, что является необходимым условием обеспечения тепловой защиты различных теплонапряженных устройств.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Xie, Y. Rao, P. Zhang, *Int. J. Therm. Sci.*, **179**, 107672 (2022). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107672
- [2] В.И. Терехов, Т.В. Богатко, А.Ю. Дьяченко, Я.И. Смутьский, Н.И. Ярыгина, *Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках*, под ред. В.И. Терехова (Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2016).
- [3] I. Davletshin, N. Dushin, N. Mikheev, R. Shakirov, *Int. J. Therm. Sci.*, **204**, 109202 (2024). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109202
- [4] Н.И. Михеев, Н.С. Душин, ПТЭ, № 6, 114 (2016). DOI: 10.7868/S0032816216060070 [N.I. Mikheev, N.S. Dushin, *Instrum. Exp. Tech.*, **59** (6), 882 (2016). DOI: 10.1134/S0020441216060063].