

УДК 532.526.4+533.6.071

## Измерения поверхностного трения на структурированных поверхностях при использовании метода диаграмм Клаузера и интерферометрии масляной пленки\*

У. Батт<sup>1</sup>, К. Эгберс<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет Лахора, Пакистан

<sup>2</sup>Бранденбургский технический университет, Коттбус, Германия

E-mail: mech.usmanbutt@gmail.com

Выполнены измерения поверхностного трения на плоских и гексагональных вогнутых поверхностях с использованием традиционного метода диаграмм Клаузера и интерферометрии масляной пленки. Установлено, что значения коэффициентов сдвиговых напряжений, измеряемых традиционным методом диаграмм Клаузера на плоской пластине, на 13 % выше значений, определенных интерферометрией масляной пленки. Профили скорости, необходимые для диаграмм Клаузера, получены с помощью термоанемометрии. Анализ результатов измерений позволил предположить, что из-за наличия сильных градиентов давления традиционный метод диаграмм Клаузера не пригоден для использования при прогнозировании сдвиговых напряжений, действующих на шестиугольные вогнутые поверхности. Интерферометрия масляной пленки не только обеспечивает точные и прямые значения коэффициентов сдвиговых напряжений, но и помогает визуализировать поток над поверхностью.

**Ключевые слова:** поверхностное трение, диаграмма Клаузера, интерферометрия масляной пленки.

### Введение

Определение сдвигового напряжения на стенке имеет большое значение при исследовании и анализе турбулентного пограничного слоя вследствие использования динамической скорости  $u_\tau$  в большинстве законов масштабирования для описания профиля скорости пограничного слоя. Кроме того, такие методы управления потоком как использование риблет, LEBUs (устройства разрушения крупных вихрей) и податливых стенок, применяемые на обтекаемых телах, помимо влияния на другие аэродинамические характеристики минимизируют сопротивление трения. Относительно новый метод гексагональных структур также оказался эффективным способом воздействия на поток и минимизации сопротивления круговых цилиндров [1]. Структурированные стальные листы (с шестиугольными ячейками) по сравнению с обычными листами обладают лучшими механическими свойствами, такими как прочность на разрыв и изгиб. Такие аэродинамические характеристики, как сопротивление трения, также нуждаются в исследовании

---

\* Работа проведена в рамках проекта «Destrukt», финансируемого и реализуемого Международной высшей школой Бранденбургского технического университета, Коттбус.

с точки зрения возможного применения в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Для оценки эффективности вышеперечисленных методов управления потоком необходимо не только точно определить локальное поверхностное трение, но и визуализировать поток в окрестности стенки. Кроме того, важно обосновать надежность численного моделирования. Определение динамической скорости проводится путем расчета сдвигового напряжения на стенке.

В последние годы было разработано несколько прямых и косвенных способов точного определения напряжения сдвига на стенке. Рисунок 1 обобщает наиболее часто используемые методы получения сдвиговых напряжений на стенке. Косвенные методы опираются на анализ профиля скорости пограничного слоя и включают экстраполяцию  $U(y)$  в вязком подслое, термоанемометрию с фиксацией на стенке, логарифмический закон стенки и интегральное соотношение импульса. Также для определения сдвигового напряжения на стенке разработаны прямые методы, к которым помимо использования классических трубок Престона и Стэнтона относятся применение плавающего элемента и интерферометрия масляной пленки. Методы, использующие измерения давления, такие как трубка Престона и трубка Стэнтона, основываются на существовании закона стенки и предположениях о поле потока, но их точность остается сомнительной, поскольку предполагается контакт датчика с поверхностью и требуется калибровка и коррекция, например, калибровка Пателя [3]. Общим подходом к оценке напряжения сдвига на стенке в турбулентных пограничных слоях является метод диаграмм Клаузера [4]. В этом методе профиль средней скорости  $U(y)$  используется для оценки динамической скорости  $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$  при представлении измеренных данных в логарифмической области пограничного слоя в виде

$$\frac{U(y)}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{yu_\tau}{\nu} \right) + B. \tag{1}$$

Существует несколько аспектов в реализации этого метода, которые могут привести к неточности в оценке сдвигового напряжения. К таким аспектам относится необходимость выбора начальной и конечной точек в наборе данных, которые, как полагают,

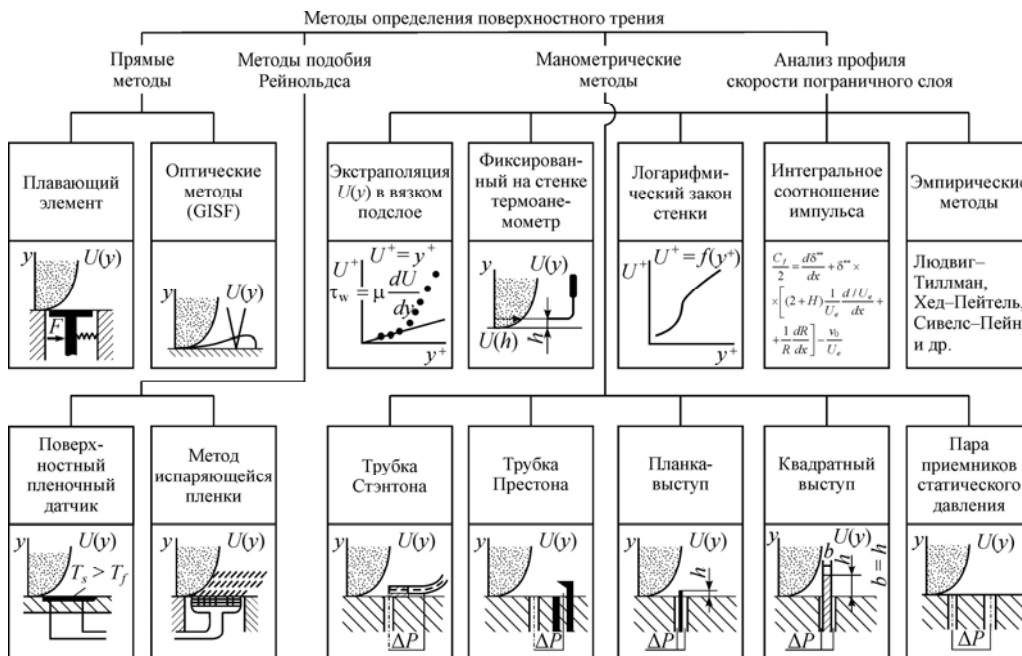


Рис. 1. Классификация методов определения поверхностного трения [2].

попадают в логлинейную область, и это приводит в результате элемент субъективности. Более важным, однако, является тот факт, что оценка динамической скорости непосредственно связана с выбором констант Фон Кармана  $k$  и  $B$ . Некоторые исследования показали, что метод диаграмм Клаузера дает искусственно завышенные значения динамической скорости, особенно в узком диапазоне чисел Рейнольдса [5–9]. Динамическая скорость, оцениваемая методом диаграмм Клаузера, в соответствии с литературными источниками, имеет погрешность от 8 до 20 % при числе Рейнольдса  $Re_\delta = 1000–10000$ . При очень высоких числах Рейнольдса большая протяженность хорошо развитой логлинейной области повышает точность метода диаграмм Клаузера до тех пор, пока используется соответствующее точное значение  $k$ . Авторы работы [10] показали экспериментально и численно, что динамические скорости, полученные методом диаграмм Клаузера, потенциально могут скрыть слабо выраженное поведение, зависящее от числа Рейнольдса.

Прямые методы не требуют калибровки или применения универсального логарифмического закона. Интерферометрия масляной пленки основана на предположении, что существует связь между скоростью уменьшения толщины масляной пленки и силами, действующими на масляную пленку, такими как сила сдвига, градиент давления и гравитация. Так как масляная пленка становится чрезвычайно тонкой, эффектами гравитации и градиента давления можно пренебречь. Таким образом, этот метод может применяться к вогнутым поверхностям с наличием градиента давления. Основными недостатками данного метода являются загрязнение масляной пленки и погрешности, возникающие из-за свойств масла, которые оказывают значительное влияние на точность измерений.

Принцип уменьшения толщины масляной пленки впервые был применен в работе [11] для измерения касательного напряжения при помощи уравнения для тонкой масляной пленки, выведенного в работе [12]. Существует множество вариантов метода интерферометрии масляной пленки, но все они основаны на оригинальной идее, предложенной авторами [11]. Они относятся к категории точечных, линейных и основанных на получаемых изображениях и включают методы лазерной интерферометрии, интерференционной картины, глобальной и поверхностной визуализации поверхностного трения.

Как уже упоминалось, интерферометрия масляной пленки основана на соотношении скорости уменьшения толщины масляной пленки и трех сил, которые могут воздействовать на нее: силы тяжести, давления и сдвига. Когда масляная пленка достаточно тонка, эффект силы тяжести и давления становится незначительным, и, следовательно, присутствует линейная связь между скоростью уменьшения толщины масла и силой сдвига. Толщина масляной пленки наиболее просто измеряется с помощью интерферометрических методов. Определим систему координат так, что  $x$  — направление потока,  $y$  — направление по нормали к стенке и  $z$  — трансверсальное направление, тогда отношение между градиентом толщины масляной пленки и сдвиговой силой выражается (см. [11]) как

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\mu_{oil}}{\tau_w t} (1 + \varepsilon),$$

где  $dy/dx$  — мгновенный градиент толщины масляной пленки,  $\mu_{oil}$  — вязкость масла,  $\tau_w$  — касательное напряжение на стенке,  $t$  — время,  $\varepsilon$  — член, связанный с воздействиями градиентов давления и определяемый как

$$\varepsilon = \frac{1}{3} \cdot \frac{y}{\tau_w} \cdot \frac{dP}{dx} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{oil}}{t} \int_{p_0}^p \frac{1}{\tau_w^2} dP.$$

Поскольку толщина масляной пленки уменьшается со временем и, следовательно, для достаточно тонких пленок  $\varepsilon$  стремится к нулю, то эффектом градиента давления можно

пренебречь. Предположим, что напряжение сдвига остается постоянным, тогда уравнение (2) можно переписать в виде

$$\Delta y = \frac{\mu_{oil} \Delta x}{\tau_w \Delta t},$$

где  $\Delta y$  — разница в толщине масляной пленки между следующими друг за другом полосами. По данным работы [13]

$$\Delta y = \frac{\lambda}{\sqrt[2]{n_{oil}^2 - n_{air}^2 \sin^2 \theta}},$$

где  $\lambda$  — длина волны источника света (590 нм для натриевой лампы),  $n$  — коэффициенты преломления масла и воздуха соответственно,  $\theta$  — угол падения света. Зная расстояние между полосами, можно вычислить напряжение сдвига на стенке следующим образом:

$$\tau_w = \mu_{oil} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \cdot \frac{\sqrt[2]{n_{oil}^2 - n_{air}^2 \sin^2 \theta}}{\lambda}.$$

В работе [14] описывался метод определения погрешностей при оценке скорости перемещения интерференционной полосы, скорости изменения расстояния между полосами и коэффициента преломления для масла.

В настоящей работе метод диаграмм Клаузера и метод визуализации полос поверхностного трения применяются для определения сдвиговых напряжений на стенке как на плоской, так и на вогнутой поверхностях. Гексагональная пластина с углублениями используется для исследований на вогнутой поверхности (рис. 2). Оптический метод не только обеспечивает точные значения сдвигового напряжения на стенке, но и указывает направление и относительную величину силы сдвига, действующую на поверхность.

### 1. Экспериментальная установка

Исследования проводились в дозвуковой аэродинамической трубе в Институте горения и авиационных двигателей БТУ Коттбус. Аэродинамическая труба имеет открытую рабочую часть с максимальной скоростью потока 30 м/с. Скорость набегающего потока варьировалась в пределах от 19,5 до 27,5 м/с. Размеры рабочего участка трубы составляли 585×585×1300 мм, а уровень турбулентности потока по измерениям составил менее 0,3 %. Базовая (опорная) пластина (рис. 2) с широким углублением служила платформой для исследуемых структурированных пластин. Тестовые пластины такой же ширины, как и опорная пластина, но меньшей длины помещались в широкое углубление опорной пластины и закреплялись с помощью крепежных элементов с обеих сторон. Исследуемая пластина помещалась горизонтально в рабочую часть аэродинамической трубы, а закрылок на задней кромке пластины регулировался так, чтобы датчики давления (каждый 1 мм в диаметре), которые располагались через каждые 50 мм, давали одинаковые значения давления (рис. 3). Давления для каждого местоположения и скорости регистрировались

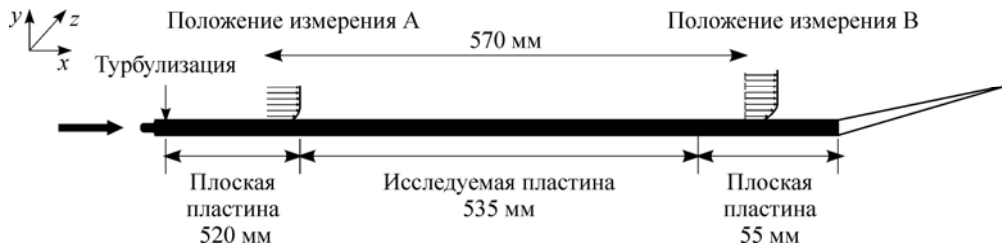


Рис. 2. Экспериментальная модель для исследования структурированных пластин.

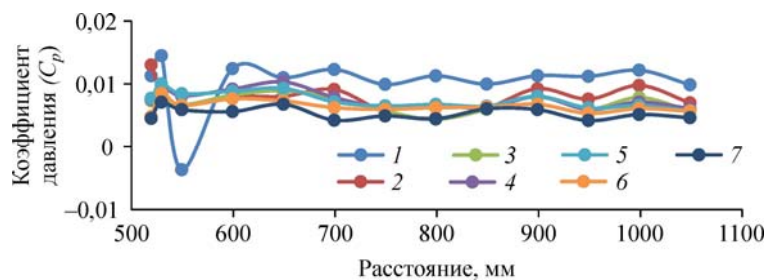


Рис. 3. Изменение давления в направлении потока.

Скорость потока: 9 (1), 13 (2), 18 (3), 22 (4), 25 (5), 28 (6), 30 (7) м/с.

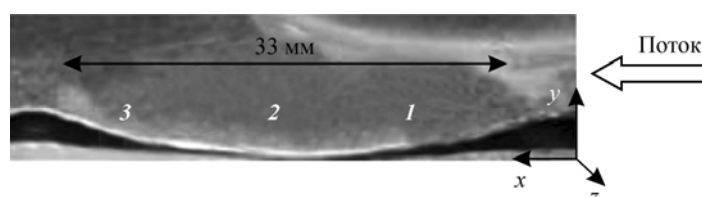


Рис. 4. Гексагональная вогнутая поверхность с измерительными точками (1–3).

несколько раз и принималось их среднее значение. Отклонения в показаниях давления лежали в пределах точности измерительного устройства. Таким образом гарантировалось, что по длине пластины достигается нулевой градиент давления.

Исследования проводились в турбулентном пограничном слое. Чтобы обеспечить переход от ламинарного к турбулентному течению на исследуемой пластине, полоски наждачной бумаги наклеивались около передней кромки опорной пластины (рис. 2). Самая низкая скорость, выбранная для исследования, составила 19,5 м/с, что соответствует числу Рейнольдса  $Re_x = 6,71 \cdot 10^5$  в зависимости от расположения, это гарантирует, что пограничный слой над исследуемой пластиной будет являться полностью турбулентным. Исследуемые пластины (плоские и структурированные) устанавливались заподлицо с поверхностью опорной пластины, чтобы избежать появления ступенек, и, следовательно, локального отрыва потока. Вогнутая поверхность, используемая в экспериментах, представляла собой структурированную стальную пластину с гексагональными ячейками (рис. 4). Глубина и ширина этих шестиугольных структур (ячеек) составляла 2,7 и 33 мм соответственно. Температура поверхности измерялась с помощью термопары с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

### 1.1. Сдвиговые напряжения, измеренные с помощью метода интерферометрии масляной пленки

В этом разделе приведено краткое описание процедуры измерений. Капля или штрих силиконового масла наносится на поверхность, после чего запускается аэродинамическая труба. Через некоторое время начинают возникать полосы под монохромным светом, например, под натриевой лампой. Основным недостатком этого метода является ограничение его применения на полупреломляющих поверхностях, зачерненных с противоположной стороны, таких как стекло или полированная стальная поверхность. Поскольку ни одно из них не было предметом настоящего исследования, использовалась монокотная лента с клеем, имеющая черную поверхность с тонким слоем пластика.

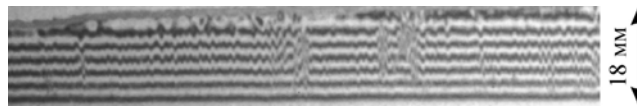


Рис. 5. Распределение полос на плоской пластине.

На поверхность наклеивалась лента монокота и наносился масляный штрих. Это обеспечило качество полос, достаточное для точной оценки изображений и определения коэффициента напряжения сдвига (образец представлен на рис. 5). Порядок определения величины касательного напряжения подробно описан в работе [15].

Этот подход авторы реализовали в среде MATLAB, разработав модуль для выполнения анализа Фурье (рис. 6). Интерферометрический рисунок можно представить как цифровое изображение, состоящее из рядов и столбцов пикселей, где каждый столбец перпендикулярен интерферометрическим полосам. Видно, что интенсивности пикселей в каждом столбце напоминают периодическую функцию, так как полосы состоят из повторяющихся светлых и темных линий. Преобразование Фурье применяется для сигнала, а расстояние между полосами в пикселях определяется по длине волны, соответствующей доминирующему пику спектра мощности. Эта процедура выполняется для каждого столбца, затем берется среднее количество рядов в изображении, так что последовательно изображается каждая длина волны. Масштабированием пикселей по длине и времени можно рассчитать скорость изменения расстояния между полосами. Основными источниками погрешности являются неточности измерений вязкости масла, зависящей от температуры, и скорости перемещения полос.

Точное определение вязкости масла необходимо для получения точных значений напряжений сдвига. Принимая во внимание опыт работы [14], для настоящего исследования было выбрано силиконовое масло с вязкостью  $19 \text{ мм}^2/\text{с}$  при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выбор вязкости масла зависит от многих факторов, включая время работы трубы, температуру и величину измеряемого напряжения сдвига. Для точной калибровки вязкость масла измерялась при температурах от  $15$  до  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Емкость с маслом помещалась в водяной термостат, температура которого регулировалась размещенной под ним электрической плитой. Водяной термостат обеспечивал равномерный нагрев. Температура масла измерялась с помощью термопары, а вязкость — с помощью вискозиметра с погрешностью  $\pm 1 \%$ . Кинематическая вязкость масла в зависимости от температуры показана на рис. 7.

Скорость изменения расстояния между полосами ( $\Delta x/\Delta t$ ) определялась сначала калибровкой изображений полос (ошибка калибровки составляла  $0,5 \%$ ), а затем зависимостью расстояний между полосами от времени из последующих изображений. Градиент

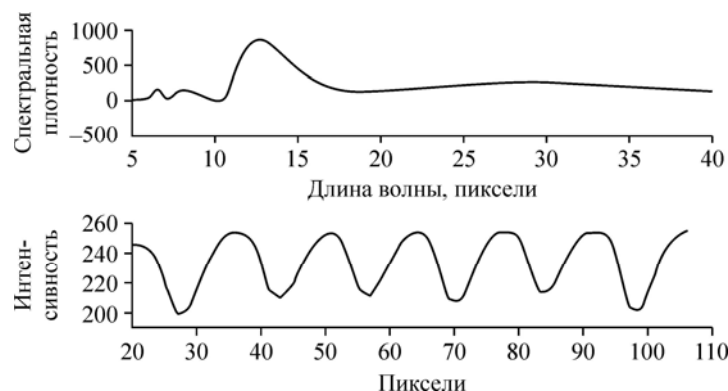
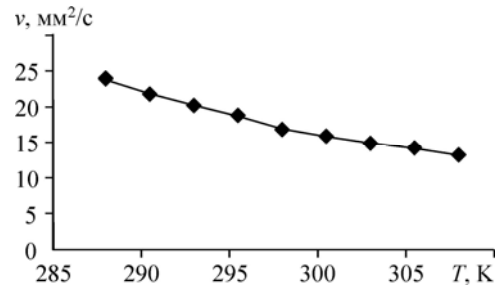


Рис. 6. Кривые спектральной плотности и интенсивности.

Рис. 7. Температурная зависимость вязкости силиконового масла.

измерялся с помощью метода наименьших квадратов с погрешностью  $\pm 0,4\%$ . Погрешность показателя преломления масла оказалась на уровне  $0,16\%$ . Показатель преломления масла существенно не меняется при изменении температуры и давления. С учетом погрешности плотности масла, указанной изготовителем, и скорости полос, погрешность напряжения сдвига, определяемая данным методом, составила  $\pm 5,8\%$ , что хорошо согласуется с данными работы [14].



## 1.2. Профили скорости

Профили скорости в турбулентных пограничных слоях измерялись с помощью термоанемометра постоянной температуры. Для этой цели использовался датчик 55P15, чувствительный элемент которого (нить), изготовленный из вольфрама, имел длину 1,25 мм и диаметр 5 мкм. Положение датчика контролировалось полностью автоматическим координатным механизмом, способным перемещаться в трех измерениях с минимальным шагом 15 мкм. Для контроля положения датчика вблизи поверхности использовался микроскоп с максимальным увеличением 200 и оптическим разрешением 9 мегапикселей. Датчик направлялся к поверхности с наименьшим шагом до тех пор, пока токоподводы и их отражение на поверхности пластины почти касались друг друга. Перемещение датчика и сбор данных контролировались программой Streamware фирмы Дантек. Измерения скорости проводились с частотой дискретизации 10000 значений в секунду в течение 15 секунд.

## 2. Результаты и обсуждения

В табл. 1 приводятся экспериментальные результаты, полученные при измерениях на гладкой поверхности выше (А) и ниже (В) по течению тестовых пластин. Они включают коэффициенты сдвигового напряжения  $C_f$ , измеренные интерферометрией масляной пленки (OFI) и методом диаграмм Клаузера (CL), скорости сдвиговых напряжений  $u_\tau$ , толщины вытеснения  $\delta_1$  и толщины потери импульса  $\delta_2$  пограничного слоя. Необходимо сделать ряд замечаний относительно методов измерения. Значения коэффициентов напряжения сдвига, полученные методом диаграмм Клаузера, как представляется, в целом примерно на 13 % больше значений, полученных методом интерферометрии масляной пленки.

Таблица 1

Параметры пограничного слоя для гладких пластин, полученные с помощью метода интерферометрии масляной пленки (OFI) и метода диаграмм Клаузера (CL)

Параметры	Скорость набегающего потока, м/с					
	19,5		24,5		27,5	
	А	В	А	В	А	В
$Re_x$	$6,71 \cdot 10^5$	$13,8 \cdot 10^5$	$8,43 \cdot 10^5$	$17,34 \cdot 10^5$	$9,47 \cdot 10^5$	$19,46 \cdot 10^5$
$C_f$ (OFI)	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$3,08 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$
$u_\tau$ , м/с, (CL)	0,81	0,78	0,99	0,935	1,09	1,04
$C_f$ (CL)	$3,35 \cdot 10^{-3}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$3,23 \cdot 10^{-3}$	$2,91 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$
$\delta_2$ , мм	1,103	2,415	1,101	2,376	1,104	2,29
$\delta_1$ , мм	1,587	3,321	1,55	3,299	1,512	3,131

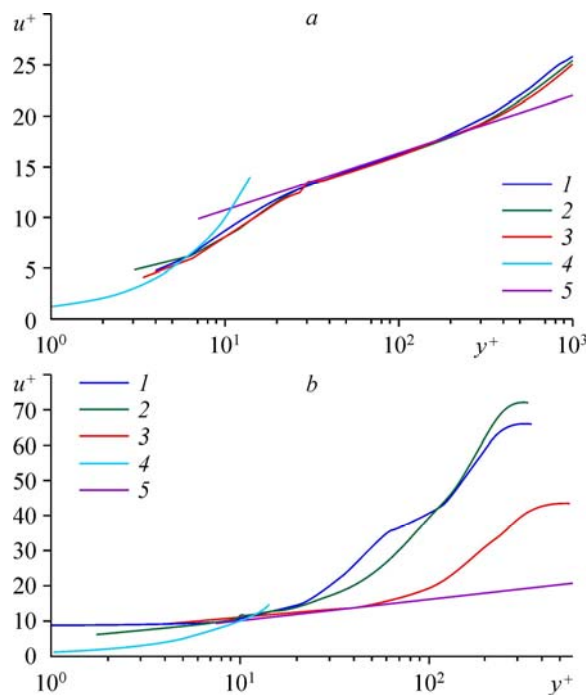


Рис. 8. Измеренные профили скорости, описанные логарифмическим законом, для определения  $u_\tau$  для плоской поверхности при  $U = 19,5$  (1),  $24,5$  (2),  $27,5$  (3) м/с (а) и для вогнутой поверхности при  $U = 19,5$  м/с (b).  
 а — вязкий подслой (4), логарифмический закон (5),  
 б — сечения (1), 2 (2), 3 (3), закон стенки (4), логарифмический закон (5).

Это различие можно наблюдать почти для всех рассмотренных чисел Рейнольдса, что подтверждает результаты исследований [5–8]. Значения  $C_f$ , определяемые интерферометрией масляной пленки, считаются более точными в связи с независимостью от логарифмического закона и постоянной Кармана. Оптический метод оценки полос для получения напряжений сдвига является бесконтактным методом в отличие от измерения скорости с помощью термоанемометрического датчика. Кроме того, значения, полученные этим методом, полностью согласуются с литературными данными.

На рис. 8 показаны безразмерные профили скорости  $u^+(y^+)$ , измеренные на плоской и на вогнутой поверхностях при идентичных положениях на исследуемой пластине. Величины  $u^+$  и  $y^+$  определяются следующим образом:  $u^+ = u(y)/u_\tau$ ,  $y^+ = yu_\tau/\nu$ . Постоянная Кармана и величина  $B$  в уравнении (1) приняты равными 0,41 и 5,2 соответственно. Выбор этих величин осуществлялся на основе измерений, выполненных в исследовании [16], и результатов работы [5]. Динамическая скорость определялась путем построения измеренного значения  $u^+$  относительно  $y^+$  и поиска значения  $u_\tau$  через итерационные процедуры, для которых кривая хорошо описывается логарифмическим законом. Само построение кривых является потенциальным источником неточности, поскольку оно может быть выполнено несколькими способами, в том числе визуально или методом наименьших квадратов. Диапазон измеряемых скоростей в логарифмической области колеблется от  $y^+ = 30$  до  $y^+ = 200$  (рис. 8а). Верхние (менее  $0,15u_{\max}/\delta$ ) и нижние пределы выбирались с учетом результатов исследования [5] так, чтобы погрешность выбранной константы Кармана была минимальной для настоящих чисел Рейнольдса. Заметим, что термоанемометрический датчик, используемый для измерения скорости, был установлен с помощью микроскопа на расстоянии 50 мкм от поверхности модели.



Измеренные скорости в области подслоя оказались выше фактических скоростей. Это положение имеет место до  $y^+ = 5$ . Наблюдаемый эффект возле стенки вызван тепловым воздействием термоанемометрического датчика. Ограничимся, однако, обсуждением логарифмической области. Динамическая скорость, полученная из рис. 8а, составляет 0,78, 0,94 и 1,04 для соответствующих скоростей свободного потока (по диаграммам Клаузера). С другой стороны, сдвиговые напряжения на стенках, рассчитанные для тех же чисел Рейнольдса и расположения, определенного с помощью интерферометрии масляной пленки, имели значения 0,73, 0,86 и 0,92, и оказались значительно ниже, чем полученные методом диаграмм Клаузера, что подтвердило результаты упомянутых во введении исследований, где были сделаны выводы, что метод диаграмм Клаузера искусственно завышает значения касательных напряжений на стенке.

На рис. 8б представлены профили скорости, измеренные в трех различных сечениях (рис. 4) на гексагональной ячейке для средней скорости потока 19,5 м/с. Из-за неблагоприятного градиента давления (который реализуется при увеличении статического давления в направлении потока) в сечениях 1 и 2 кривая существенно отклоняется от логарифмического закона, и лишь очень небольшой набор данных описывается этим законом. Это отклонение настолько сильно, что оно не может быть скорректировано даже изменением значений констант  $k$  и  $B$ , что часто используется различными исследованиями. Размер линейной области в логарифмических координатах в диаграмме Клаузера сильно зависит от степени нарастания пограничного слоя. Грубая оценка величины  $u_\tau$  методом диаграмм Клаузера в этих сечениях дает значения 0,32 и 0,29. Поток имеет положительный градиент давления в сечении 3 и по-прежнему лучше описывается логарифмическим законом. Такое поведение, вероятно, обусловлено внезапным изменением наклона поверхности, т.е. положительный наклон поверхности в сечении 3 слегка противодействует влиянию градиента давления в сечениях 1 и 2 на поток. В сечении 3  $u_\tau$  оценивалась в 0,48. Из полученных результатов видно, что описание профилей скоростей над вогнутой поверхностью (шестиугольной ячейкой) логарифмическим не дает достоверных значений сдвигового напряжения на стенке. По данным работы [15] логарифмическая область профиля средней скорости показывает заметную и симметричную зависимость от градиента давления. Логарифмический закон, зависящий от градиента давления, был описан подобно универсальному логарифмическому закону:

$$\Delta p = \frac{\nu}{\rho U_\tau^3} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{-K}{(C_f/2)^{3/2}},$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости,  $\rho$  — плотность жидкости,  $K = (\nu/U_\infty^2)(dU_\infty/dx)$  — параметр ускорения,  $C_f$  — коэффициент трения. Поскольку  $K$  является параметром только свободного течения, более актуальным является использование величины  $\Delta p$ , содержащий информацию о пограничном слое в коэффициенте  $C_f$ . Значения констант  $K$  и  $B$  определяются известными значениями  $\Delta p$ , полученными с помощью экспериментальных данных. После этого локальный коэффициент поверхностного трения можно рассчитать на основе измеренного профиля средней скорости точно так же, как и по традиционному методу диаграмм Клаузера.

Установлено, что обычный метод диаграмм Клаузера не подходит для применения на гексагональных структурах. Рассмотрим результаты исследований на этих структурах с использованием интерферометрии масляной пленки. В табл. 2 приводятся значения коэффициентов сдвиговых напряжений, полученных интерферометрией масляной пленки во всех сечениях на гексагональной ячейке.

Динамические скорости ( $u_z$ ), определяемые методом интерферометрии масляной пленки на плоской и вогнутой поверхностях

Скорость набегающего потока, м/с	Динамическая скорость, м/с			
	Плоская поверхность	Вогнутая поверхность		
		Сечение 1 (справа)	Сечение 2 (середина)	Сечение 3 (слева)
19,5	0,79	0,71	~0	0,91
24,5	0,92	0,89	~0	1,01
27,5	1,01	1,1	~0	1,24

Для точной оценки сдвигового напряжения на стенке необходимо, чтобы оно оставалось постоянным в рассматриваемой области, что не совсем соответствует случаю вогнутой поверхности. Поэтому размер исследуемой зоны на изображении выбирался в целях получения качественной оценки минимальным (10–12 полос), что исключало возможные ошибки вследствие кривизны поверхности. На рис. 9 рост сдвигового напряжения на стенке вдоль поверхности структуры хорошо виден по разному расстоянию между следующими друг за другом полосами, особенно на нисходящей (передней) полосе. Полосы, по-видимому, сжимаются, в то время как масло движется вправо; предполагается, что напряжение сдвига на стенке становится слабее и примерно равно нулю вблизи нисходящей полосы структуры. В середине структуры не наблюдается достаточно четких полос, пригодных для анализа и оценки. Незначительные полосы в середине предсказывают либо очень низкое сдвиговое напряжение, либо его отсутствие на стенке. С другой стороны, расстояние между полосами незначительно увеличивается в направлении восходящей (вниз по течению) кромки структуры в сечении 3, что подразумевает увеличение напряжения сдвига на стенке. Скорость изменения расстояния между полосами намного меньше на восходящей кромке, чем скорость изменения на нисходящей полосе. Наиболее интересным фактом является то, что картина полос на нисходящей кромке структуры движется в направлении, противоположном направлению потока (полосы растут вправо), что свидетельствует о наличии небольшой области вихревого течения, толкающей масляную пленку в противоположном направлении. Для оценки каждого фрагмента полос выбиралась очень небольшая область наблюдения с целью свести до минимума погрешность, возникающую из-за неравномерных интервалов между полосами.

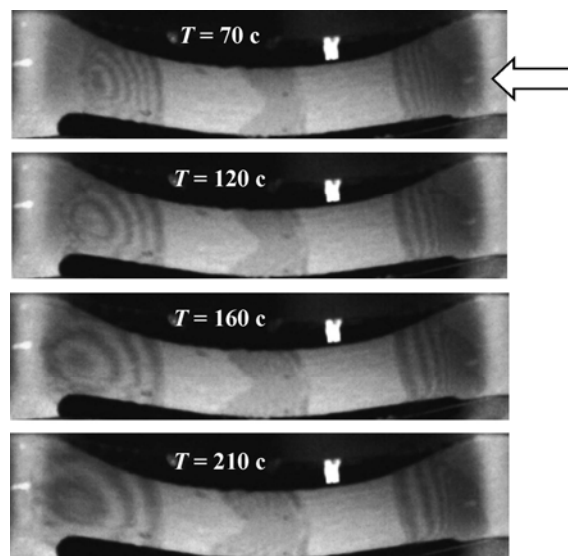


Рис. 9. Развитие полос во времени.

### 3. Погрешности измерений

Большинство ошибок при оценке изображения полос можно легко свести к минимуму. Вязкость является функцией температуры и изменяется примерно на 1 % на градус Цельсия. Расстояние между полосами измеряется с точностью до 3 %, что в основном определяется цифровым разрешением [16]. Самым значительным источником ошибок являются непостоянные условия работы при переходных режимах запуска и выключения трубы, создающие для течения условия, отличающиеся от идеальных. При разработке уравнений течения масла обычно предполагается, что коэффициент трения остается постоянным. Очень важно минимизировать продолжительность периодов пуска и выключения аэродинамической трубы по отношению ко времени работы или продлить последнюю, так как уменьшение толщины слоя масла зависит от общего времени работы установки. Другим источником ошибки предположительно может быть то, что масло в начале работы является чрезмерно густым.

С другой стороны, при измерении сдвигового напряжения на стенках методом диаграмм Клаузера имеется несколько источников ошибок, которые нелегко устранить. Измерение скорости проводилось с помощью термоанемометрии, которая является контактным методом измерения. Калибровка и температура являются основными потенциальными источниками ошибок при измерении локальных скоростей. Предположения универсального логарифмического закона с выбранными константами Кармана и методов, используемых для описания измеренных профилей скорости логарифмическим законом, также вносят свой вклад в величину погрешности и дают гораздо более высокие значения сдвигового напряжения на стенке (в данном случае на 13 % выше для плоской поверхности). Кроме того, традиционный метод диаграмм Клаузера (при отсутствии его соответствующей модификации) не предназначен для измерений в пограничных слоях при наличии градиентов давления, например, в потоках над неровными поверхностями или гексагональными ячейками, как в данном случае.

### Заключение

Наиболее важным фактом при использовании метода интерферометрии масляной пленки является то, что определяются не только точные значения коэффициентов напряжения сдвига, но и данные о его направлении и относительной величине. Коэффициент поверхностного трения может быть легко определен по изменению расстояния между полосами в двух или более различных сечениях. Большой интервал между полосами свидетельствует о большом коэффициенте сдвигового напряжения, а меньший интервал между ними получается за счет уменьшения касательных напряжений.

### Список литературы

1. Butt U., Jehring L., Egbers C. Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface // Intern. J. Heat and Fluid Flow. 2014. Vol. 45. P. 128–134.
2. Корнилов В.И., Литвиненко Ю.А. Измерения поверхностного трения в несжимаемом турбулентном пограничном слое. Ч. 1. Неблагоприятный градиент давления // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 4. С. 507–524.
3. Patel V.C. Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradients // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 23, Iss. 1. P. 185–208.
4. Clauser F.H. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients // J. Aeronautical Sci. 1956. Vol. 21. P. 91–108.
5. Sigalini A., Örlü R., Alfredsson P.H. Uncertainty Analysis of von Karman constant // Experiments Fluids. 2013. Vol. 54, No. 2. P. 1460-1–1460-9.
6. Kline S.J., Reynolds W.C., Schraub F.A., Runstadler P.W. The structure of turbulent boundary layers // J. Fluid Mech. 1967. Vol. 30, Iss. 4. P. 741–773.
7. Blackwelder R., Haritonidis J. Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers // J. Fluid Mech. 1983. Vol. 132. P. 87–103.

8. **Spalart P.** Direct simulation of a turbulent boundary layer up to  $Re_\tau = 1410$  // J. Fluid Mech. 1988. Vol. 187. P. 61–98.
9. **Ong L., Wallace J.M.** Joint probability density analysis of the structure and dynamics of the vorticity field of a turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. 1998. Vol. 367. P. 291–328.
10. **Wei T., Schmidt R., McMurtry P.** Comment on the Clauser-chart method for determining the friction velocity // Exp. in Fluids. 2005. Vol. 38. P. 695–699.
11. **Tanner L.H., Blows L.G.** A study of the motion of oil films on the surfaces in air flow, with application to the measurement of skin friction // J. Physics E: Scientific Instruments. 1976. Vol. 9. P. 194–202.
12. **Squire L.C.** The motion of a thin oil sheet under the steady boundary layer on a body // J. Fluid Mechanics. 1961. Vol. 11, Iss. 2. P. 161–179.
13. **Fernholz H.H., Janke G.S.** New developments and applications of skin-friction measuring techniques // Meas. Sci. Technol. 1996. Vol. 7. P. 1396–1409.
14. **Pailhas G., Barricau P., Touvet Y., Perret L.** Friction measurement in zero and adverse pressure gradient boundary layer using oil droplet interferometric method // Experiments in Fluids. 2009. Vol. 47, No. 2. P. 195–207.
15. **Ng H.C.H., Marusic I., Monty J.P., Hutchins N., Chong M.S.** Oil film interferometry in high Reynolds numbers turbulent boundary layers // 16th Australian Fluid Mechanics Conf. 2007. P. 807–814.
16. **Shivsai A.D., Ramesh O.N.** Determination of skin friction in strong pressure-gradient equilibrium and near-equilibrium turbulent boundary layers // Experiments in Fluids. 2009. Vol. 47, No. 6. P. 1045–1058.

*Статья поступила в редакцию 8 февраля 2017 г.,  
после переработки — 3 июля 2017 г.*