

УДК 536.24

## Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале\*

В.И. Терехов<sup>1,2</sup>, Я.И. Смульский<sup>1</sup>, К.А. Шаров<sup>1</sup>, А.В. Золотухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального исследования турбулентной структуры течения при продольном обтекании сотовой поверхности с гексагональной формой ячеек размером 5 мм, глубиной 21 мм и толщиной стенок 0,2 мм. Измерения выполнены с помощью PIV системы для развитого течения в канале сечением 21×150 мм и длиной 1000 мм. Проведена стробоскопическая визуализация течения и измерены компоненты скорости и турбулентности в канале при наличии и отсутствии сот. Показано, что в окрестности сот пограничный слой менее заполнен, но имеет более высокий уровень турбулентных пульсаций. Отмечается, что в отличие от профиля на гладкой стенке на сотовой поверхности практически отсутствует логарифмический участок. При этом эффекты скольжения скорости на сотовой поверхности для условий проведенных экспериментов отсутствуют.

**Ключевые слова:** пограничный слой, сотовая поверхность, турбулентность, метод цифровой трассерной визуализации, трассеры, гексагональные ячейки.

### Введение

Одним из приоритетных направлений развития современной аэрогидродинамики и теории теплообмена является поиск новых методов интенсификации теплопереноса при паритетном или даже пониженном росте гидравлических потерь. Показательными в этом отношении являются поверхности с луночными рельефами, интерес к которым в последние годы значительно вырос [1, 2]. Ряд экспериментальных и численных исследований в этой области говорит о больших потенциальных возможностях подобных методов, которые могут приводить к улучшенным теплогидравлическим характеристикам. Большое разнообразие способов снижения гидравлических потерь (наличие риблет [3], продольных разрушителей крупных вихрей [4], а также вихреакустических генераторов типа резонаторов Гельмгольца [5, 6]) представляет значительный интерес как с точки зрения физических основ данных устройств со сложным механизмом формирования турбулентного поля течения в окрестности стенки, так и с точки зрения практических рекомендаций для их использования. С детальным обзором современного состояния методов снижения поверхностного трения можно ознакомиться в ряде обзоров [7, 8].

---

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-00402).

Рассматриваемые в настоящей работе сотовые поверхности, используемые в частности для целей теплозащиты элементов космических аппаратов, имеют ряд сходных черт с указанными выше вихрегенераторами. Об этом свидетельствуют результаты первых экспериментальных исследований продольного обтекания поверхностей с сотовыми покрытиями [9–12]. Главной особенностью аэродинамической картины взаимодействия течения с сотами является эффект проскальзывания потока на стенке, величина которого может достигать до 30 % от скорости в ядре потока. Это обстоятельство, а также данные по снижению трения с помощью акустического демпфирования [13] дают основание для использования подобных систем вихрегенераторов в качестве эффективных методов управления процессами турбулентного переноса. Отсутствие детальной опытной информации о структуре поля течения не позволяет создать целостную картину данного сложного явления и требует более глубокого его изучения.

Настоящая работа посвящена опытному исследованию развития поля течения и турбулентных характеристик вдоль поверхности с гексагональными сотами. В работе непосредственно сопоставлялись данные по осредненным и турбулентным характеристикам для сотовой поверхности и для канала с гладкими стенками.

### 1. Экспериментальная установка и методика измерений

Рабочий канал экспериментального стенда имел прямоугольное сечение  $21 \times 150$  мм, длину 1 м и был выполнен из прозрачного органического стекла толщиной 8 мм. Поперечные размеры входного канала подбирались из условий обеспечения двумерного течения в центральном продольном сечении канала. На расстоянии 580 мм от входа в рабочий канал заподлицо монтировалась пластина размерами  $40 \times 200$  мм с шестиугольными ячейками (рис. 1). Ячеистая поверхность монтировалась таким образом, чтобы края открытой части ячеек находились на одном уровне с поверхностью стенки рабочего канала. Противоположная сторона ячеистой поверхности была закрыта текстолитовой пластиной. Глубина сот составляла 21 мм, они были изготовлены из текстолита с толщиной стенок 0,2 мм. Характерные размеры сот указаны в правой части рис. 1. Пластина с сотами ориентировалась длинной стороной вдоль потока, и располагалась симметрично относительно оси широкой стороны плоского канала. Расстояние до боковых стенок составляло 55 мм. Световой нож через верхнюю светопрозрачную крышку разрезал поток вдоль по оси широкой стороны канала и падал на сотовую поверхность, при этом координата  $x$  отсчитывалась вдоль потока, а координата  $y$  — от сотовой поверхности к противоположной стенке.

Экспериментальный стенд содержит все элементы аэродинамической трубы для создания качественного потока: форкамеру, сопло и рабочий канал. В настоящих опытах изучалось развитие течения по всей длине сотовой пластины при постоянном числе Рейнольдса  $Re = Uh/\nu = 2,1 \cdot 10^4$ ; к началу сотовой пластины течение было развитым.

Измерения выполнялись с помощью системы PIV, состоящей из импульсного Nd:YAG лазера мощностью 90 мДж с длиной волны 532,05 нм и с длительностью вспышки 5 нс и цифровой камеры с матрицей 1 Мпикс. Лазерный нож создавался в миделевом сечении канала с помощью специальной оптической насадки и имел толщину 3 мм. Цифровая камера позволяла делать с частотой 3 Гц парные кадры с минимальным интервалом между кадрами 20 мкс. В качестве трассеров использовались частицы водяного тумана размером около 1 мкм, получаемые с помощью фог-генератора Safex фирмы DANTEC. Туман подавался на вход в компрессор экспериментальной установки. Измерительная область,

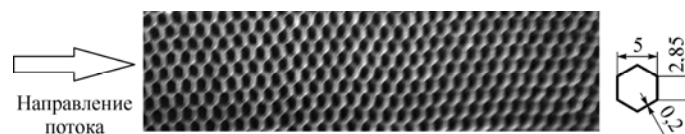


Рис. 1. Сотовый участок и размеры сот (размеры даны в мм).

получаемая камерой с помощью объектива “Индустар” и удлинительных колец, составляла  $17 \times 20$  мм. Глубина резкости была индивидуальна для каждого эксперимента, поскольку оптика подстраивалась в зависимости от того, какую засветку давала стенка, что, в свою очередь, определялось тем, каким образом соты попадали в кадр: боковыми стенками или передними и задними. Отношение высоты канала к его ширине было достаточно велико ( $\sim 1/7$ ), поэтому в средней части канала формировалось довольно протяженное по трансверсальной координате ядро, в котором течение было практически двумерным. Наличие этого ядра и незначительность изменения скорости по ширине канала были зафиксированы в специальных тестовых экспериментах при измерении соответствующих профилей по ширине канала.

При измерениях в кадр попадало до трех сот. Эта область разбивалась на более мелкие расчетные зоны, в которых рассчитывались векторы скорости. В расчетах использовался кросскорреляционный фурье-метод с итерационным алгоритмом. Размер расчетной области составлял  $32 \times 32$  пикс при масштабном коэффициенте 15 мкм/пикс. Минимальное расстояние от стенки, на котором производилось измерение, с учетом 50-процентного перекрытия расчетных областей составляло  $\sim 0,3$  мм. После расчета векторного поля проводилась фильтрация векторов по отношению сигнал/шум медианным фильтром. После отсева векторов проводилась операция интерполяции векторного поля, затем рассчитывались осредненные и статистические характеристики. Длина выборки в экспериментах составляла 4000 векторных полей.

## 2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Профили продольной скорости, продольных и поперечных пульсаций, а также касательных напряжений в гладком и сотовом каналах сопоставляются на рис. 2. Все данные здесь получены для сечения, отстоящего на  $x/h = 6,5$  от начала сотовой секции.

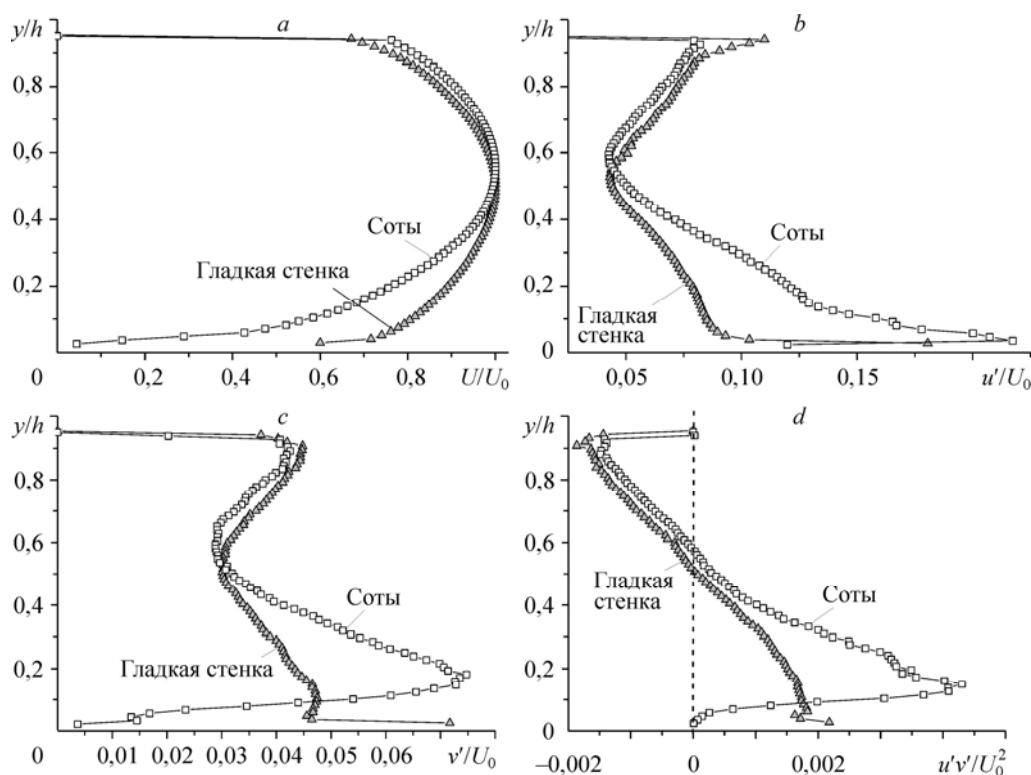
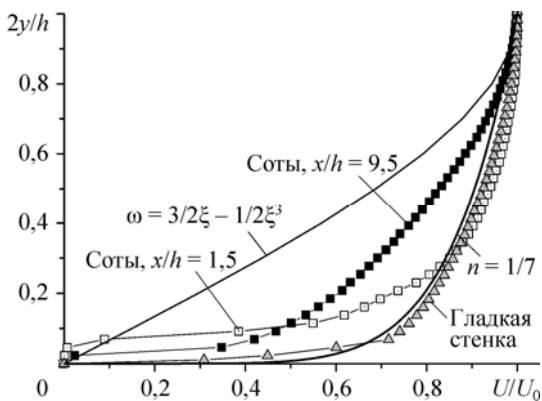


Рис. 2. Распределение по высоте канала продольной скорости (a), продольных (b), поперечных (c) флуктуаций и касательных напряжений (d);  $x/h = 6,5$ .

Как видно из представленных данных, течение в окрестности сотовой поверхности принципиально отличается от обтекания гладкой стенки. В пристенной области сотовой поверхности профиль скорости является менее заполненным по сравнению с классическим распределением на гладкой стенке (рис. 2а). Надо заметить, что продольные и поперечные пульсации скорости (рис. 2b и 2c соответственно) в окрестности сотовой поверхности значительно выше, чем на гладкой поверхности. Подобная тенденция имеет место и для распределения касательных напряжений поперек канала (рис. 2d). Если для канала с гладкими стенками, как и следовало ожидать, имеет место линейное распределение касательных напряжений по высоте, то в канале с сотами на расстоянии  $y/h \sim 0,2$  напряжения возрастают более чем в три раза. В то же время непосредственно в пристеночной области наблюдается устойчивая тенденция к снижению поперечных пульсаций скорости и турбулентных касательных напряжений.

Столь сложный сценарий развития течения обусловлен взаимодействием пограничного слоя с сотовыми ячейками. Действительно, обтекание углублений различной формы (цилиндрической каверны [14], лунки [15], поперечной траншеи-канавки [16] и др.) на поверхности приводит к образованию за ними периодического вихревого слоя. Однако обнаружить наличие подобных структур в настоящей работе не удалось, возможно, из-за относительно малых размеров ячеек.

Развитие профилей продольной скорости в пограничном слое на сотовой поверхности демонстрируется на рис. 3. В качестве предельных зависимостей здесь показаны распределения в развитом турбулентном и ламинарном пограничных слоях. Опытные данные для гладкой стенки хорошо совпадают со степенным законом скорости:  $n = 1/7$ . На ячеистой поверхности пограничный слой отесняется от стенки и затем по мере его дальнейшего продвижения деформированная область распространяется на все большую часть пограничного слоя. В итоге профиль становится менее заполненным и приближается к характерному для ламинарного течения. При этом, как показали измерения, в окрестности сотовой поверхности практически отсутствует участок с логарифмическим законом распределения скорости. Такой вывод можно сделать из анализа рис. 4, где видно, что наибольшие изменения пограничный слой, набегающий на сотовую поверхность, начинает претерпевать с буферной области, а внешняя его часть при этом остается консервативной к смене граничных условий на поверхности. Динамическая скорость для всех сечений на сотовой поверхности рассчитывалась по соотношениям для плоской стенки. Отметим также, что найденный методом Клаузера коэффициент трения для гладкого канала соответствует расчетной величине для классического турбулентного пограничного слоя [17]. Определить подобным образом сопротивление трения на сотовой поверхности, судя по данным рис. 4, не представляется возможным.



Одним из принципиальных отличий полученных результатов от опытных данных работ [9–11] является отсутствие скольжения потока вдоль сотовой поверхности, которая, согласно этим данным, могла достигать порядка 20–30 % от скорости в ядре потока. Этот результат также нуждается в проверке на сотовых ячейках других размеров и при вариации числа Рейнольдса в канале.

Рис. 3. Сопоставление профилей скорости на гладкой и сотовой поверхностях.

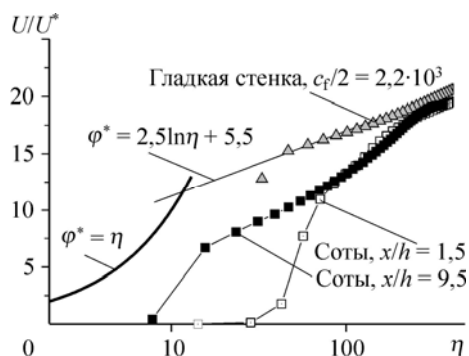


Рис. 4. Профили продольной скорости на гладкой и сотовой поверхностях в универсальных координатах.

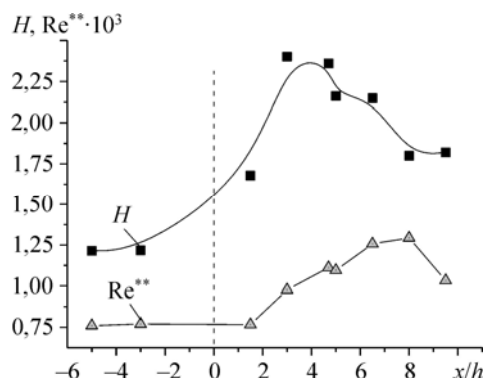


Рис. 5. Изменение формпараметра  $H$  и интегрального числа Рейнольдса вдоль сотовой поверхности.

Распределения формпараметра пограничного слоя  $H = \delta^*/\delta^{**}$  и интегрального числа Рейнольдса  $Re^{**}$  вдоль сотовой поверхности демонстрируется на рис. 5. Координата  $x/h = 0$  соответствует началу сотового участка. Перед ним значение  $H$  соответствует развитому турбулентному слою, после чего наблюдается его рост до величины, характерной для ламинарного режима течения ( $H \rightarrow 2,7$ ), и последующее снижение. Такое поведение величины формпараметра обусловлено «выполаживанием» профиля скорости при одновременном росте турбулентности и касательных напряжений. Примерно таким же образом изменяется по мере развития течения над сотовой поверхностью и число Рейнольдса по толщине потери импульса: вначале оно возрастает, а затем снижается. Сформулировать четко причины такого поведения локальных и интегральных характеристик турбулентного обтекания поверхности при наличии сот в настоящее время не представляется возможным, прежде всего, из-за многофакторности и сложности аэродинамической структуры. Этот вопрос требует дальнейших детальных исследований.

### Выводы

Представлены результаты экспериментального исследования осредненного течения, нормальных и касательных напряжений при обтекании сотовой поверхности с характерным размером ячеек  $\sim 5$  мм. Измерения выполнялись с помощью двухкомпонентной PIV системы. Течение было реализовано в плоском канале размерами  $21 \times 150 \times 1000$  мм<sup>3</sup>.

Установлено, что пограничный слой на сотовой поверхности менее заполнен по сравнению с гладкой стенкой при одновременном росте турбулентных пульсаций и касательных напряжений. При этом в распределении скорости практически отсутствует логарифмический участок и не наблюдается эффекта скольжения потока относительно сотовой поверхности.

### Условные обозначения

$f$  — частота, Гц,  
 $h$  — высота канала, м,  
 $H = \delta^*/\delta^{**}$  — формпараметр пограничного слоя,  
 $x, y$  — продольная и поперечная координаты, м,  
 $U_0$  — максимальная продольная скорость, м/с,  
 $U, V$  — продольная и поперечная компоненты скорости, м/с,

$Re = Uh/\nu, Re^{**} = U\delta^{**}/\nu$  — числа Рейнольдса,  
 $v^*$  — динамическая скорость, м/с,  
 $\delta^*, \delta^{**}$  — толщины вытеснения и потери импульса, м,  
 $\nu$  — динамическая вязкость, м<sup>2</sup>/с,  
 $u', v', u'v'$  — аксиальные, поперечные пульсации (м/с) и реинольдсовы напряжения (м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>).

### Список литературы

1. **Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E.** Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. P. 178–197.
2. **Коваленко Г.В., Терехов В.И., Халатов А.А.** Режимы течения в одиночной лунке, расположенной на поверхности канала // *ПМТФ*. 2010. № 6. С. 78–88.
3. **Grek G.R., Kozlov V., Titarenko S.** An experimental study of the influence of riblets on transition // *J. Fluid Mech*. 1996. Vol. 315. P. 31–49.
4. **Shah R.K., Jacobi A.M.** Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: a review of recent progress // *Exp. Thermal and Fluid Sci*. 1995. Vol. 11, No. 3. P. 295–309.
5. **Panton R.L., Kevin P., Flynn K.P., Bogard D.G.** Control of turbulence through a row on Helmholtz resonators // *AIAA Paper*. № 87-0436. 7 p.
6. **Ковальногов Н.Н., Хахалева Л.В.** Течение и сопротивление трения турбулентного потока в перфорированной трубе с демпфирующими полостями // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2002. № 3. С. 19–21.
7. **Chung Y.M., Talha T.** Effectiveness of active flow control for turbulent skin friction drag reduction // *Physics of Fluids*. 2011. Vol. 23, No. 2. P. 1070–6631. 025102.
8. **Корнилов В.И.** Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. Т. 12, № 2. С. 183–208.
9. **Климов А.А., Третьяк С.А.** Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем // *Теплофизика высоких температур*. 2003. Т. 41, № 6. С. 901–906.
10. **Trdatyan S.A., Klimov A.A.** Friction and heat transfer on a honeycomb surface in laminar and turbulent flows // *Proc. 12-th Int. Heat Transfer Conf. Grenoble*. 2002. P. 221.
11. **Третьяк С.А., Климов А.А.** Пограничный слой на сотовой поверхности при натекании на нее ламинарного потока Т. 2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости // *Тр. 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену*. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 281–284.
12. **Butt U.** Experimental investigation of the flow over macroscopic hexagonal structured surfaces // *Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation*, Brandenburg, April 2014.
13. **Ковальногов Н.Н.** Модель турбулентного переноса в пограничном слое на перфорированной поверхности с глухими демпфирующими полостями // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. 2003. № 5–6. С. 41–47.
14. **Hiwada M., Kawamura T., Mabuchi J., Kumada M.** Some characteristics of flow pattern and heat transfer past a circular cylindrical cavity // *Bull. JSME*. 1983. Vol. 26, No. 220. P. 1744–1752.
15. **Терехов В.И., Калинин С.В., Мшвидобадзе Ю.М.** Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // *Сиб. физ.-тех. журн*. 1992. № 1. С. 77–85.
16. **Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Шапорин А.В.** Теплоотдача в трехмерном отрывном течении прямоугольной каверны // *Промышленная теплотехника*. 1999. Т. 21, № 2–3. С. 22–25.
17. **Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.** Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 344 с.

*Статья поступила в редакцию 2 сентября 2014 г.,  
после доработки — 9 сентября 2014 г.*