



УДК 551.508.5

М.В. Протасов, Т.Ф. Иванов, А.Ф. Поляков

Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур
РАН, Россия,
125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2, E-mail: protasov_m@mail.ru

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВДУВА НА ОБТЕКАНИЕ ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА С ПРОНИЦАЕМОЙ ВХОДНОЙ КРОМКОЙ

Представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики течения вблизи обтекаемого тела с передней проницаемой входной кромкой. В экспериментах использовались модели с передней затупленной кромкой трех типов: из оболочкового пористого сетчатого материала со сплошной проницаемостью; из оболочкового пористого сетчатого материала с непроницаемой вставкой вдоль критической линии; из листового материала с тангенциальными микроканалами, изготовленной по технологии деформирующего резания. При помощи метода PIV в окрестности обтекаемых моделей получены поля осредненных и пульсационных составляющих скоростей воздуха при варьировании, как скорости набегающего потока воздуха, так и интенсивности вдува.

ОБТЕКАНИЕ, ПРОНИКАЮЩЕЕ ОХЛАЖДЕНИЕ, ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ, ВДУВ, PIV

ВВЕДЕНИЕ

Проникающее пористое охлаждение является эффективным методом тепловой защиты теплонапряженных элементов технических аппаратов, в частности передних кромок затупленных тел, обтекаемых высокотемпературными потоками [1 – 3]. Двойной механизм пористого охлаждения, состоящий из поглощения поступающей от горячего газа тепловой энергии при фильтрации охладителя через пористую матрицу и оттеснения высокотемпературного потока от поверхности охладителем, проникающим в пограничный слой, обеспечивает высокую эффективность этого способа охлаждения. Однако, как и при любом другом способе организации конвективно-заградительного охлаждения, необходимо принимать меры для предотвращения роста газодинамических потерь и местного переохлаждения стенки в местах ввода охладителя через стенку. Необходимая эффективность проникающего охлаждения должна обеспечиваться при минимизации расхода охлаждающего газа. Эти требования делают актуальным поиск новых способов улучшения эффективности охлаждения, одним из которых является использование распределенной проницаемости. Путем распределения проницаемости пористой стенки можно сгладить неоднородность температуры стенки при любом известном распределении теплового потока вдоль обтекаемой поверхности (например, обвода лопатки газовой турбины). Для реальных геометрических размеров (d) элементов пористой структуры в системе проникающего охлаждения около 0,1 мм числа Рейнольдса при движении охлаждающего газа через пористую оболочку находятся в пределах 100. Теплообмен при таких числах Рейнольдса изучен значительно меньше, чем при $Re_d = (\rho u)d / \mu > 100$, которые характерны для систем интенсификации теплообмена.

Как показали исследования [4], газодинамическая устойчивость и тепловая эффективность системы проникающего охлаждения могут быть обеспечены при вдуве, не приводящем как к отрыву пограничного слоя в целом, так и к отрывам в малых масштабах

непосредственно на поверхности стенки при выходе из нее газа-охладителя, приводящим к турбулизации пристенной области течения газа. Эти условия требуют внимательного рассмотрения применительно к каждой определенной структуре пористого материала и соответствующим параметрам. Особенно актуальным это становится для криволинейных поверхностей и, в первую очередь, для наиболее термически напряженных передних кромок обтекаемых тел с малым радиусом кривизны. В связи с этим актуальным является экспериментальное исследование перспективных систем проникающего охлаждения применительно к возможности реализации ламинарного пограничного слоя вблизи критической точки охлаждаемого тела.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рабочие образцы

Сформулированная во введении задача по созданию эффективной системы проникающего пористого охлаждения требует таких материалов и технологий, которые обеспечили бы стабильность и воспроизводимость гидравлических и тепловых характеристик оболочек лопаток в процессе изготовления и эксплуатации, а также их «предсказуемость» при проектировании. Оптимальными технологическими, механическими и гидравлическими свойствами для изготовления оболочек турбинных лопаток, включая переднюю кромку с малым радиусом кривизны, обладают листовые пористые материалы, разрабатываемые в МГТУ им. Н.Э.Баумана, а именно, оболочковый пористый сетчатый материал (ОПСМ) [5] и листовой пористый материал, изготовленный по технологии деформирующего резания (ЛДР ПМ) [6].

Наиболее разработанный и прошедший широкий объем испытаний ОПСМ, получают сваркой давлением тканых металлических сеток с квадратными ячейками, расположенных под углом 45 град. относительно друг друга.

Метод деформирующего резания основан на лезвийной обработке и одновременном деформировании подрезанных поверхностных слоев заготовки с формированием мелкошаговых глубоких и узких канавок. Ширина канавок может составлять от единиц до сотен микрометров при глубине канавок в десятки раз превышающей их ширину. Важнейшим преимуществом предлагаемого подхода является возможность получения ЛДР ПМ с непроницаемыми прямоугольными участками, которые крайне необходимы, например, для входной кромки оболочек завесного охлаждения. Другим существенным преимуществом является возможность управления размером и частотой расположения отверстий по площади проницаемой пластины. Получаемые параметры поверхности недостижимы ни для одного из существующих методов механической или физико-технической обработки. Использование в экспериментах данного материала преследовало собой цель изучения эффективности системы проникающего охлаждения с распределенным тангенциальным вдувом охлаждающего газа на микрошероховатой поверхности, что недостижимо при использовании оболочкового пористого материала.

В экспериментах использовались модели с передней затупленной кромкой трех типов: из оболочкового пористого сетчатого материала со сплошной проницаемостью (образец 1); из оболочкового пористого сетчатого материала с непроницаемой вставкой вдоль критической линии (образец 2); из листового материала с тангенциальными микроканалами, изготовленная по технологии деформирующего резания (образец 3). Фотография указанных выше образцов используемых пористых оболочек показана рис. 1.

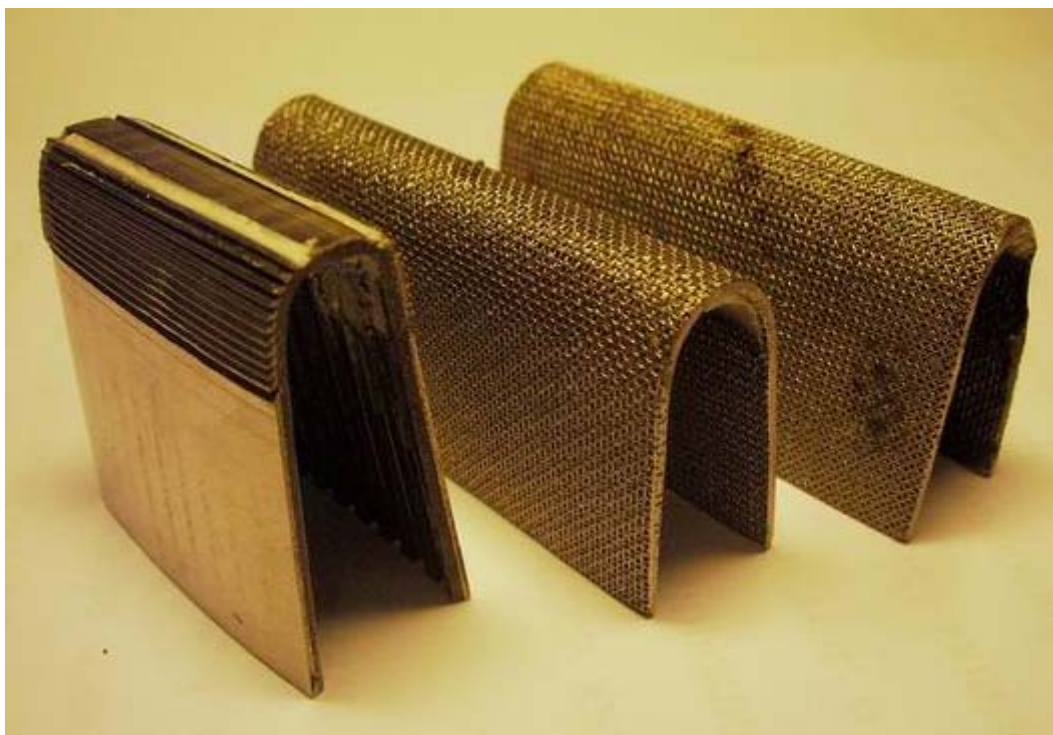


Рис. 1. Фотографии проницаемых оболочек, используемых в экспериментах

На рис. 1 справа налево расположены следующие модели проницаемых передних кромок: образец 1 – полуцилиндр из ОПСМ с пористостью $\Pi = 0,46$ с внутренним радиусом 4 мм с однородной проницаемостью по всей поверхности; образец 2 – полуцилиндр из того же ОПСМ, передняя часть кромки которого закрыта непроницаемой вставкой по обе стороны от критической линии на 4 мм; образец 3 – полуцилиндр с тангенциальными микроканалами, изготовленный из нихрома по технологии ЛДР ПМ.

Рабочий участок и экспериментальные режимы

В качестве набегающего основного потока газа использовался воздух при комнатной температуре. Основной поток воздуха подавался через трубу длиной 1380 мм и внутренним диаметром 46 мм в зависимости от режима либо от вентилятора либо от баллонов сжатого воздуха, соединенных с входным участком трубы через ресивер. Воздух для организации вдува через проницаемые поверхности модели подавался к последним от баллонов сжатого газа. Расходы воздуха в обеих системах контролировались при помощи показаний ротаметров. Исследуемые образцы помещались на расстоянии от 20 до 50 мм от среза трубы на ее оси.

Скорость основного набегающего потока воздуха, измеренная на оси трубы на расстоянии 2 мм от ее среза, варьировалась от 0,4 до 36 м/с. Интенсивность вдува или массовая скорость вдува, определяемая по отношению расхода охладителя к площади пористой поверхности изменялась в диапазоне значений $0,3 - 60 \text{ кг/м}^2\text{с}$.

Метод измерений

Измерения кинематических характеристик воздуха в окрестности обтекания моделей проводились с помощью метода PIV. В работе использовался измерительный комплекс «ПОЛИС» (Институт теплофизики СО РАН).

Результаты и обсуждение

Примеры измеренных гидродинамических характеристик течения при $Re_D = 3600$ (скорость воздуха на оси трубы $U_{c0} = 1,8$ м/с) вблизи обтекаемых моделей без вдува представлены на рис. 2 – 4.

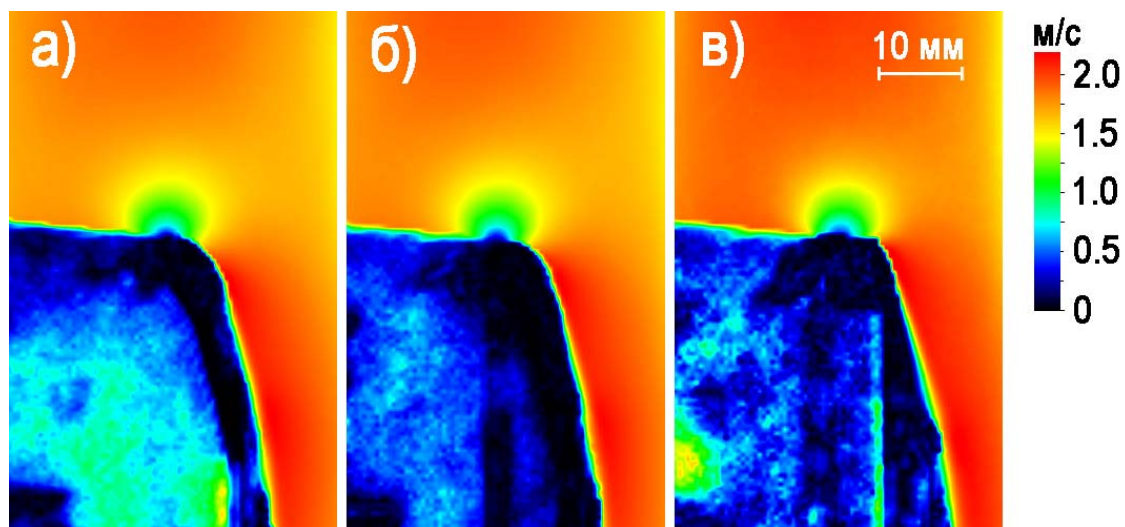


Рис. 2. Пространственное распределение осредненной скорости воздуха при $Re_D=3600$:
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3

На рис. 2 а – в, представлены результаты измерения осредненной скорости воздуха (U , м/с) для образцов 1 – 3 соответственно. Полученные данные позволяют определить геометрические размеры области торможения набегающего потока в окрестности критической точки обтекаемого тела, а также среднюю толщину пограничного слоя, метод нахождения которой требует проведения дополнительных исследований в связи с имеющимися ограничениями по пространственному разрешению используемого PIV-метода для каждого режима измерений. Рисунки содержат в нижней левой части, не связанные с измеряемыми данными области шумов, получаемые в результате теневого эффекта лазерного ножа.

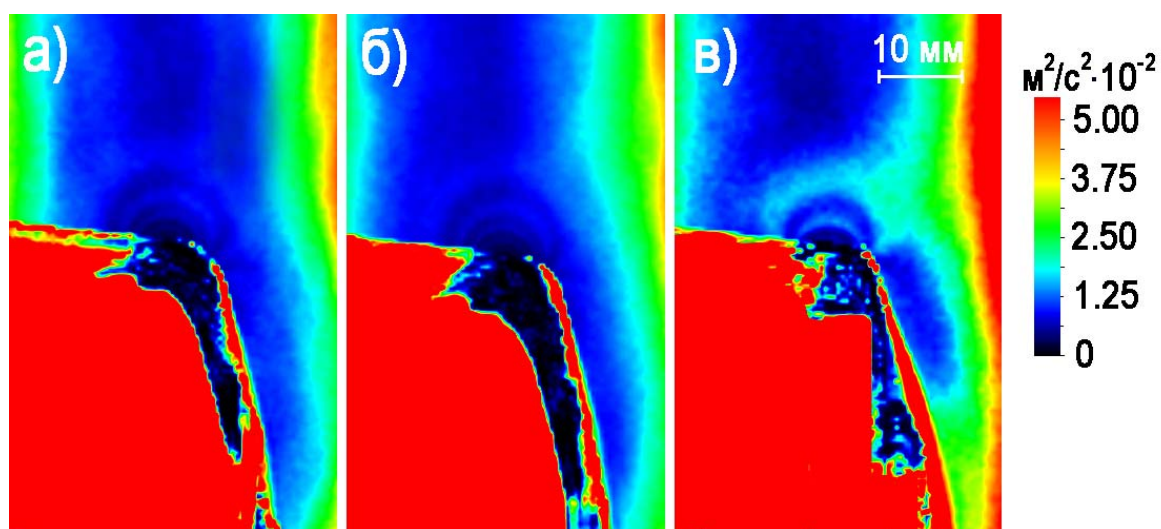


Рис. 3. Пространственное распределение осевой компоненты среднего квадратичного отклонения осредненной скорости воздуха при $Re_D=3600$: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3

На рис. 3 а – в, показаны результаты измерения осевой пульсационной составляющей осредненной скорости воздуха ($\langle u_x'^2 \rangle$, $\text{м}^2/\text{с}^2$) для образцов 1 – 3 соответственно. Из полученных данных видно, что в области погранслоя поток имеет существенно более высокие значения данного параметра по сравнению с его значениями в набегающем потоке для всех исследуемых образцов.

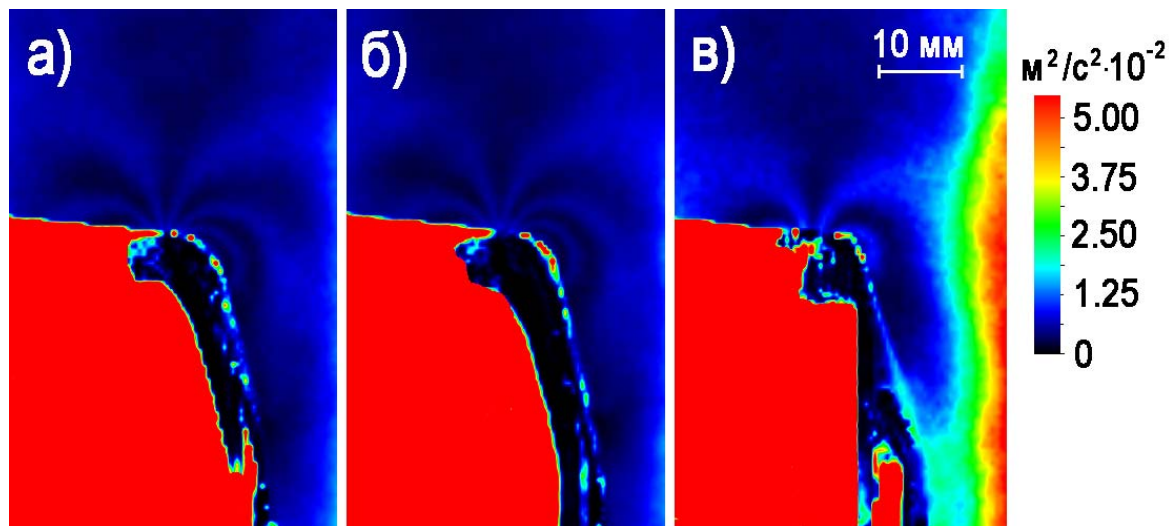


Рис. 4. Пространственное распределение поперечной компоненты среднего квадратичного отклонения осредненной скорости воздуха при $Re_D=3600$: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3

На рис. 4 а – в, приведены данные измерения поперечной пульсационной составляющей осредненной скорости воздуха ($\langle u_y'^2 \rangle$, $\text{м}^2/\text{с}^2$) для образцов 1 – 3 соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для каждой модели значения данной характеристики ниже по сравнению с пульсациями скорости в осевом направлении в аналогичных областях потока.

Результаты экспериментов показали существование на всех режимах локальных областей повышенных и пониженных значений продольной поперечной пульсационной составляющих осредненной скорости потока, имеющих вид интерференционных волн (рис. 3 и 4.). Подобный характер имеют также пульсации первых производных скоростей воздуха. Деформация профилей параметров газа вблизи обтекаемого дозвуковым потоком газа тела обнаружена при обтекании пластины с углублением в работе [7]. Для устранения возможной причины обнаруженного эффекта, а именно, колебаний основного потока в окрестности критической точки, специально были проведены следующие изменения условий эксперимента: усиление жесткости закрепления модели с целью исключения ее вибраций; установка хонейкомба в систему подачи основного потока воздуха; замена источника основного потока воздуха с вентилятора на источник сжатого воздуха; замена участка гибкой подводки воздушной магистрали с гофрированным профилем на гладкий участок; уменьшение расстояния между моделью и срезом трубы. Однако, проведенные эксперименты показали несущественность этих мер, что позволяет предположить либо наличие высокой чувствительности параметров потока к условиям эксперимента, либо наоборот, наличие независящего от экспериментальных условий соответствующего эффекта взаимодействия тела с набегающим потоком.

Варьирование в экспериментах скорости основного потока и интенсивности вдува показало, что при одинаковых условиях, наиболее чувствительным к вдуву является образец из ЛДР ПМ. Лучшие результаты с точки зрения удовлетворения условию организации вдува, обеспечивающего условие безотрывного обтекания моделей, были получены для второго образца – на модели с входной кромкой из оболочкового пористого сетчатого материала с непроницаемой вставкой вдоль критической линии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты продемонстрировали возможность использования проницаемой системы охлаждения с передней затупленной кромкой трех типов: из ОПСМ со сплошной проницаемостью; из ОПСМ с непроницаемой вставкой вдоль критической линии и из ЛДР ПМ с тангенциальными микроканалами. Результаты PIV-измерений в окрестности обтекаемых моделей показали, что из исследуемых моделей наилучшими гидродинамическими характеристиками обладает оболочковый пористый сетчатый материал с непроницаемой вставкой вдоль критической линии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации (МК-785.2011.8) и РФФИ (09-08-00151-а, 11-08-90455-Укр_ф_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тепловая защита** / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич; Под ред. А.В. Лыкова. М., Энергия, 1976. 392 с.
2. **Волчков Э.П.** Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
3. **Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.** Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
4. **Поляков А.Ф., Сухорученко С.Ю., Шехтер Ю.Л.** Структура ламинарного выхода газа из пористой сетчатой вставки // ТВТ. 2000. Т. 38. №2. С. 284–292.
5. **Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л.** Испытания пористого сетчатого материала в качестве оболочки лопаток высокотемпературных газовых турбин / Препринт ОИВТ РАН. №2-502. М.: ОИВТ РАН. 2010. 64с.
6. **Зубков Н.Н., Поляков А.Ф., Шехтер Ю.Л.** Гидравлические характеристики пористых материалов для системы проникающего охлаждения // ТВТ. 2010. т.48. №2. С. 250-256.
7. **Бабенко В.В., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Турик В.Н.** Профили скорости в пограничном слое над пластиной с углублением // Акустичний вісник. 2004. Т. 7. № 3. С. 14–27.

M.V. Protasov, T.F. Ivanov, A.F. Polyakov

*Institution of the Russian Academy of Sciences Joint Institute for High Temperatures, Russia,
125412, Moscow, Izhorskaya st., 13, str. 2, E-mail: protasov_m@mail.ru*

EFFECT OF DISTRIBUTED BLOW OF THE FLOW AROUND THE BLUNTED BODY WITH A PERMEABLE INLET SURFACE

In this work the results of experimental research of air flow near to the blunted body are presented. Experiments are carried out for models of a blunted body with the forward blunted surface of three types: with a porous mesh material with continuous permeability; with a porous mesh material with an impenetrable insert along a critical line; from a sheet material with the tangential microchannels, made on technology of deforming cutting. For the given models by means of PIV the air flow characteristics are measured at variation speed of air flow, and blow intensity.

EXPERIMENT, BLUNTED BODY, TRANSPIRATION, PIV