

С.А. Бурцев¹, Ю.А. Виноградов², А.Г. Здитовец², Н.В. Медвецкая³

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия (1)

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия (2)

Объединенный институт высоких температур, Москва, Россия (3)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

АННОТАЦИЯ

В работе показано, что для повышения эффективности устройства температурной стратификации газа необходимо уменьшать значение коэффициента восстановления температуры и повышать значение коэффициента теплоотдачи.

Выполнен краткий обзор влияния регулярного рельефа поверхности на эти величины. На примере обтекания одиночной лунки показано, что для лунки и ее окрестностей (зоны, где наблюдается возмущение потока из-за наличия лунки) среднее значение коэффициента теплоотдачи выше в 1,2...1,5 раза, а среднее значение коэффициента восстановления температуры ниже на 3...5 %, чем для гладкой пластины.

1. ВВЕДЕНИЕ

Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления были предложены в работах [1,2]. Методика расчета устройства температурной стратификации газа и вопросы влияния различных факторов на эффективность его работы рассмотрены в работах [3-7]. В работах [6,7] показано, что наибольшее влияние на эффективность работы устройства температурной стратификации газа оказывает коэффициент восстановления температуры r .

Там же показано, что в наиболее общем случае коэффициент восстановления температуры зависит от физических свойств потока, режима течения, геометрической формы и особенностей обтекаемой поверхности. При обтекании газом тела заданной формы коэффициент восстановления является функцией пяти переменных: $r = f(Pr, Gr, k, Re, M)$

Выполненный анализ влияния различных факторов на значение коэффициента восстановления температуры показывает, что наиболее значительное влияние оказывает значение критерия Прандтля. Однако для большинства практических приложений рабочим телом являются воздух, продукты сгорания, перегретый пар, природный газ и т.д., т.е. вещества и смеси у которых значение критерия Прандтля близко к единице ($Pr=0,65...1,2$). В такой ситуации необходимо использовать влияние рельефа поверхности на коэффициент восстановления температуры, который, как показано в работе [8], одновременно еще и интенсифицирует теплообмен, что также повышает эффективность устройства температурной стратификации газа.

2. ОБЗОР «ЛУНОЧНЫХ» МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

Проблема вихревой интенсификации теплообменных процессов, обусловленная генерированием самоорганизующихся вихревых структур при обтекании потоком регулярных рельефов, образованных полусферическими лунками или выступами, возникла относительно недавно. Одной из первых публикаций по использованию для интенсификации теплообмена полусферических лунок была работа [9]. Дальнейшее развитие это направление получило благодаря экспериментальным исследованиям, выполненным отечественными учеными Кикнадзе Г.И., Нагогой Г.П., Рабиновичем М.И., Готовским М.А., Тереховым В.И. и другими.

При этом было отмечено, что организация крупномасштабных вихревых структур в пристеночной области турбулентного течения вблизи поверхности, покрытой мелкими сферическими лунками или выступами, позволяет не только интенсифицировать теплообменные процессы, но и при определенных соотношениях параметров может привести к уменьшению гидродинамических потерь, связанных с движением жидкости (в частности, за счет снижения сопротивления трения по сравнению с гладкой пластиной).

В последнее время существенно повысился интерес к изучению методов интенсификации теплообмена на поверхностях, покрытых регулярным рельефом. Среди наиболее крупных работ можно отметить [10-14].

Представляет большой практический интерес вопрос, как повлияет регулярный рельеф поверхности на теплообмен и на работу сил трения при сверхзвуковом обтекании, поскольку на больших скоростях резко возрастает интенсивность генерирующихся вихрей. Как показано в работах [15,16], возникающие у поверхности с регулярным рельефом вихри могут пробивать пограничный слой и выходить в ядро потока. Если это справедливо на больших числах Маха, то выигрыш в теплообмене здесь может быть существенно выше, чем при низких скоростях.

В целом экспериментальные подходы решения вопросов интенсификации теплообмена с помощью регулярных рельефных структур обнаружили ряд трудностей при оценке сложной вихревой картины

течения и неоднозначных выводов по эффективности рассматриваемого типа вихревой интенсификации.

В настоящее время практически отсутствуют публикации по исследованию сверхзвукового обтекания поверхностей, покрытых регулярным рельефом. Еще одной особенностью является практически полное отсутствие исследований обтекания одиночной лунки.

Исключением является работа [17], где выполнено экспериментальное исследование течения и теплообмена в глубокой сферической лунке ($h/D = 0,25; 0,5$) при $Re_D = 354\,000$ и скорости набегающего потока $M = 4,0$. Для определения тепловой картины течения были использованы термоиндикаторные покрытия.

Вывод, сделанный авторами работы [17] о том, что в среднем тепловой поток (коэффициент теплоотдачи и температура стенки) приблизительно равны аналогичным параметрам для плоской пластины, кажется достаточно спорным (при проведении исследования сугубо нестационарных процессов они применяли методы, усредняющие параметры по времени).

В работах [8,18] было показано, что среднее значение коэффициента теплоотдачи при обтекании потоком сжимаемого газа поверхности, покрытой регулярным рельефом, в 1,5...2 раза выше, чем гладкой. Для одиночной лунки и зоны вокруг нее это соотношение составляет 1,2...1,5 (если рассматривать лунку и всю зону возмущения вокруг лунки).

3. СВЕРХЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ ОДИНОЧНОЙ ЛУНКИ

Теплофизические и газодинамические исследования обтекания одиночной лунки были проведены на аэродинамической установке AP-1 НИИ механики МГУ. Основной частью установки является сверх-

звуковая аэродинамическая труба непрерывного действия. Она снабжена плоским регулируемым сверхзвуковым соплом пластинчатого типа, что позволяет непосредственно во время эксперимента изменять скорость потока в рабочей части установки в диапазоне чисел $M = 1,7...3,5$.

Измерение температуры на поверхности пластины с помощью контактных средств измерений недостаточно точно, а также может влиять на поверхностный теплообмен и главное не может дать полной мгновенной пространственной структуры температурных полей. Поэтому измерения полей температур на исследуемой пластине были выполнены с помощью тепловизора.

Тепловизионная аппаратура включала в себя инфракрасный сканер и аналоговый монитор из комплекса шведской тепловизионной системы THERMOCAM-2000.

На рис. 1 приведено распределение коэффициентов восстановления температуры для одиночной лунки с гладкими краями без отсоса пограничного слоя при значении числа $M=2,5$ (для гладкой пластины среднее значение $r = 0,89$).

При таком обтекании одиночной лунки образуются две протяженные зоны пониженного значения коэффициента восстановления температуры. При проведении эксперимента местоположение и размер этих зон менялись. На рисунке приведена трехмерная диаграмма мгновенного значения поля распределения коэффициента восстановления температуры. Снижение r в этих зонах до 0,86 против $r = 0,89$ на плоскости приводит к среднему снижению r по представляемой на рис. 1 зоне анализа до $r = 0,875$. В самой лунке r увеличивается, максимум составляет $r = 0,929$, этот максимум смещен к задней по потоку границе лунки (поток газа течет слева направо).

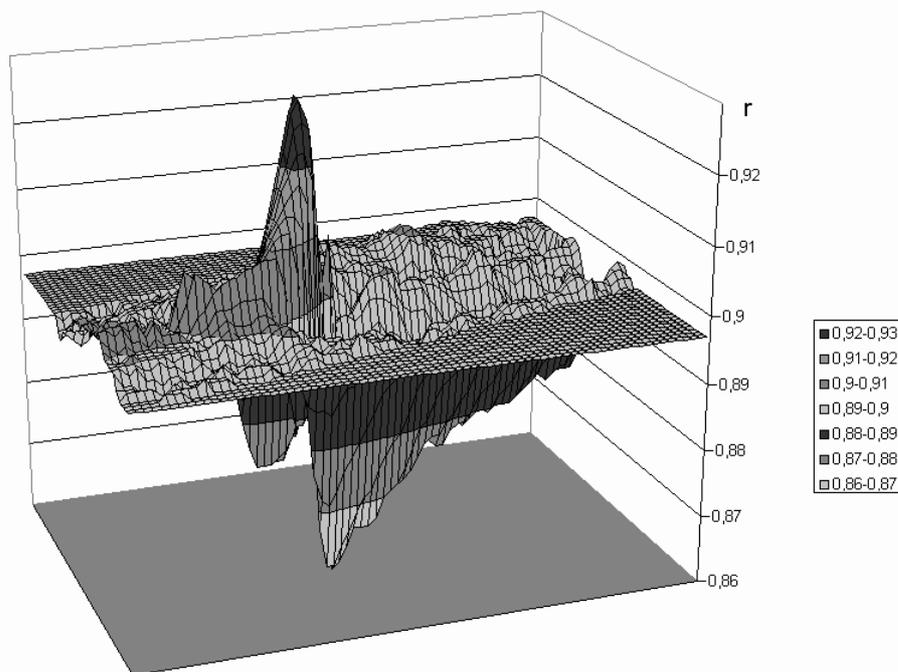


Рис. 1. Трехмерная диаграмма распределения r при обтекании одиночной лунки с гладкими краями, $M=2,5$

Аналогичные зоны охлаждения (рис. 2) наблюдаются за лункой и в случае, если перед ней (вверх по потоку) располагается еще одна лунка (на рис. 2 она не видна). Однако набегающий поток при этом становится менее однородным, а вихревые течения в самой лунке несколько перестраиваются: они теперь занимают большую часть площади лунки. Об этом говорит распределение коэффициентов восстановления температуры в пределах самой лунки — максимумы расположены более равномерно по периферии лунки (в центре лунки значение r меньше). Так

как вихри менее прижаты к задней части лунки, можно предположить, что наличие предшествующей лунки облегчает выход газа из последующей лунки.

В целом необходимо отметить, что распределение r , представленное на рис. 2, более однородное, чем для лунки в невозмущенном потоке. Коэффициент восстановления температуры изменяется от 0,87 в холодных зонах до 0,917 на внутренних краях лунки.

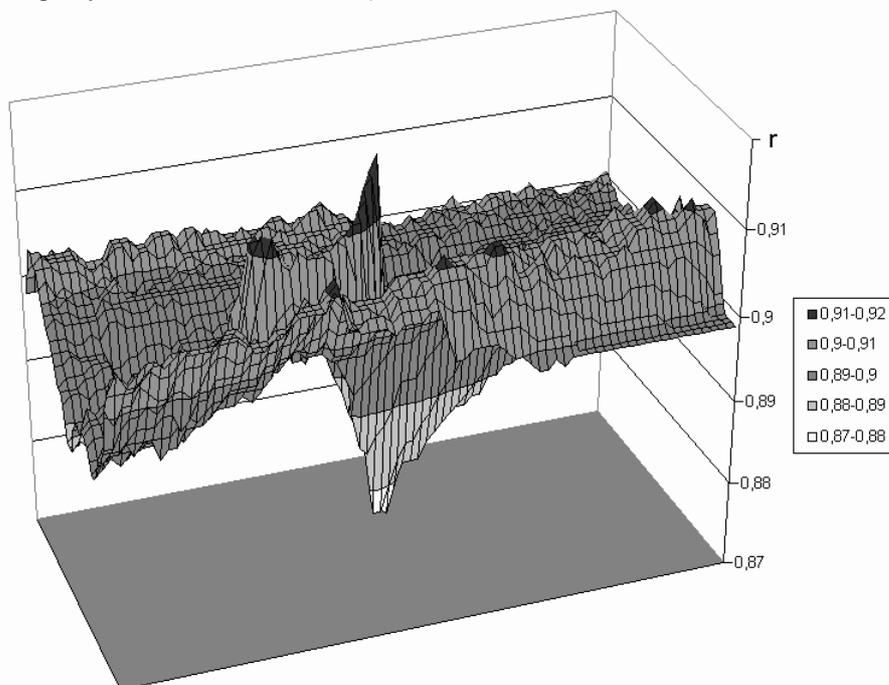


Рис. 2. Трехмерная диаграмма распределения r при обтекании одиночной лунки с острыми краями после лунки с гладкими краями, $M = 2,5$

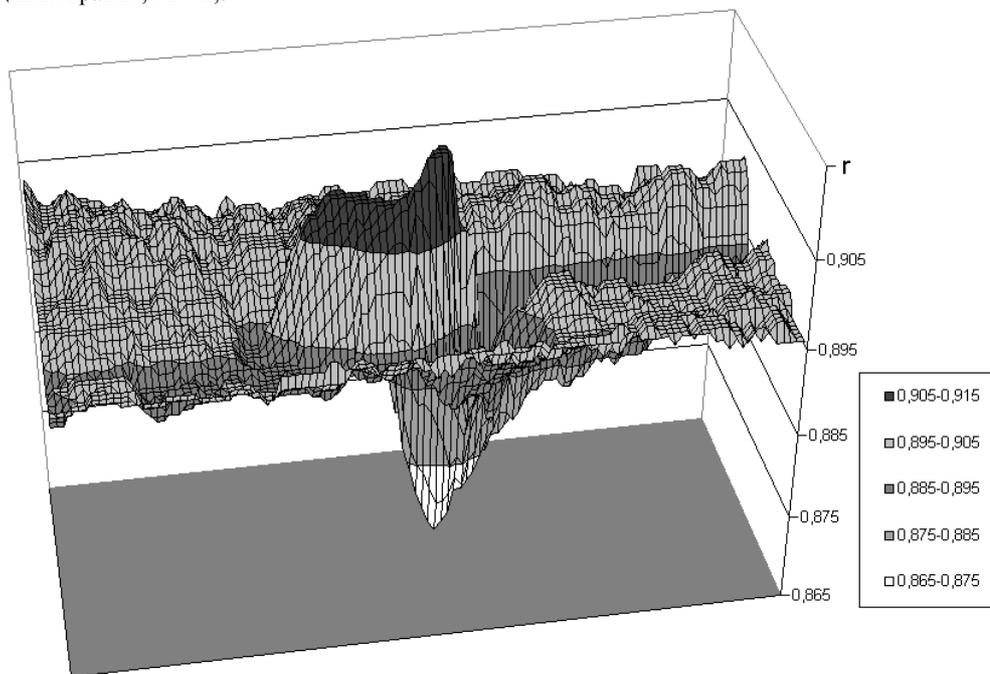


Рис. 3. Трехмерная диаграмма распределения r при обтекании одиночной лунки с гладкими краями при отсесе пограничного слоя, $M = 2,5$

На рис. 3 представлена трехмерная диаграмма распределения коэффициента восстановления температуры в случае, когда перед одиночной лункой производился отсос пограничного слоя. В этом случае вихревое течение также занимает практически всю площадь лунки, однако более существенной становится несимметрия вихрей. Об этом говорит наличие за лункой одной холодной зоны большой протяженности вместо двух зон, которые видны на рис. 1. Поскольку наличие двух вихрей в лунке часто приводит к неустойчивости течения, то можно сделать вывод, что уменьшение толщины пограничного слоя делает вихревые течения в одиночных лунках более стабильными.

Что касается абсолютных значений коэффициента восстановления температуры, то они изменяются от 0,865 в холодной зоне за лункой, до 0,915 в самой лунке.

4. ВЫВОДЫ

Проведен анализ влияния одиночной лунки на значение коэффициента теплоотдачи и показано, что его среднее значение для лунки и ее окрестностей (зоны, где наблюдается возмущение потока из-за наличия лунки) выше в 1,2...1,5 раза, чем для гладкой пластины.

Проведен анализ влияния одиночной лунки на значение коэффициента восстановления температуры и показано, что его среднее значение для лунки и ее окрестностей ниже на 3...5%, чем для гладкой пластины.

Показано, что в целом тепловой поток для лунки и ее окрестностей выше в 1,2...1,6 раза, чем для гладкой пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 05-08-01385а и Президента РФ НШ-3218.2006.8 под научным руководством академика РАН Леонтьева А.И., которому авторы благодарны за обсуждение и ценные замечания.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Pr = \mu C_p / \lambda$ - число Прандтля;

$Pr_T = \mu_T C_p / \lambda$ - число Прандтля турбулентное;

r - коэффициент восстановления температуры;

h/D - отношение глубины лунки к ее диаметру;

Re_D - число Рейнольдса рассчитанное по диаметру лунки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А. И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ. 1997. Т. 35 № 1. С. 157-159.
2. Пат. № 2106581 (РФ). Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева) / А.И. Леонтьев // РЖ. Энергетика. 1998. № 3.
3. Бурцев С.А. Оптимизация геометрии сверхзвукового канала в устройстве для энергоразделения // Вестник МГТУ. Серия Машиностроение. 1999. № 2. С. 48-54.
4. Виноградов Ю.А., Ермолаев И.К., Леонтьев А.И. Течение газа в сверхзвуковом осесимметричном сопле с проницаемой вставкой // Известия РАН. Серия Механика жидкости и газа. 1999. № 5. С. 205-208.
5. Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа и коэффициента восстановления при образовании конденсата газа. // Труды 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издательство МЭИ. 1998. Т. 8. С. 58-59.
6. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия АН. Энергетика. 2000. № 5. С. 101-113.
7. Научные основы технологий XXI века / Под ред. А.И. Леонтьева, Н.Н. Пилогина, Ю.В. Полежаева, В.М. Поляева. М.: УНПЦ Энергомаш. 2000. 135 с.
8. Интенсификация теплообмена на регулярных вихреобразующих поверхностях / А.И. Леонтьев, С.А. Бурцев, Ю.А. Виноградов и др. // II Росс. конф. Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Секц. 1. Теплообмен и гидродинамика для поверхностей с луночным рельефом. Докл. №3. CD-ROM № 0320500321. Москва. 12-15 марта 2005 г.
9. Федоров И.Г., Щукин В.К., Мухачев Г.А., Идиатуллин Н.С. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление щелевых каналов со сферическими выштамповками // Изв.вузов. Авиацион. техника. 1961. № 4. С. 120 - 127.
10. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. 176 с.
11. Кузма-Кичта Ю.А. Методы интенсификации теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 112 с.
12. Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П. Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов / Под. ред. В.Е. Алемасова. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 143 с.
13. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). Киев: Институт технической теплофизики, 2005. 59 с.
14. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб/ Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с.
15. Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П. Теплообмен и трение на поверхности с регулярным рельефом сферических вогнутостей// ИТФ. 1991. Т. 63. №1. С. 23-27.
16. Effect of vortex flows at surface with hollowtype relief on heat transfer coefficient and equilibrium temperature in supersonic flow/ A.I. Leontiev, Yu.A. Vinogradov, S.M. Bednov et al // Experimental Thermal and Fluid Science. USA. 2002. №26. P. 487-497.
17. Боровой В.Я., Яковлев Л.В. Теплообмен при сверхзвуковом обтекании одиночной лунки // Механика жидкости и газа. 1991. № 5. С.48-52.
18. Леонтьев А.И., Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г. Интенсификация теплообмена на регулярных вихреобразующих поверхностях // Тезисы докладов 2-й Межд. научн.-техн. конференции Авиадвигатели XXI века. Т. 3. Изд-во ЦИАМ. 2005. С. 149-150.