

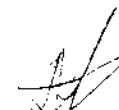
На правах рукописи

ДАВЛЕТШИН Ирек Абдулович

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА И  
ТЕПЛОТЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ**

Специальности: 01.04.14 – теплофизика и техническая теплотехника;  
01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Казань, 2001

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н.Туполева (КАИ).

Научные руководители: доктор технических наук, с.н.с. А.П.Козлов  
доктор технических наук, Н.И.Михеев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
В.В.Олишнев  
кандидат технических наук, доцент  
Н.А.Попов


Ведущая организация: Институт механики и машиностроения КНЦ  
РАН, г.Казань

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2001 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02  
в Казанском государственном техническом университете  
им. А.Н.Туполева по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского  
государственного технического университета им. А.Н.Туполева.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
к.т.н., с.н.с.



А.Г.Каримова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Во многих технических устройствах движение рабочей среды сопровождается отрывом и присоединением потока. В устройствах, где имеет место значительная разность температур среды и стенки (теплообменные аппараты, газовые турбины, энергетические реакторы и т.д.), стоит задача определения теплового потока в различных точках пространства. На сегодняшний день решение этой задачи в основном строится на эмпирических соотношениях, которые не раскрывают физической сути явлений. В отрывных течениях не выполняется аналогия Рейнольдса, связывающая осредненные параметры теплового потока и поверхностного трения на стенке. Таким образом, нахождение взаимосвязи между гидродинамическими и тепловыми параметрами отрывных течений является актуальной задачей.

Диссертация выполнена при поддержке РФФИ (гранты 00-02-16409 и 00-15-96690).

**Цель работы** – получение экспериментальных данных по взаимосвязи между мгновенными величинами поверхностного трения и теплового потока в стенку в изотермических двумерных дозвуковых турбулентных отрывных течениях.

**Научная новизна.** Измерены осредненные и пульсационные характеристики, коэффициенты асимметрии и эксцесса, пространственно-временные и взаимные корреляционные функции гидродинамических и тепловых параметров потока в турбулентном отрывном течении за выступом. Получены новые экспериментальные данные о взаимосвязи пространственного переноса теплоты и гидродинамики исследуемого течения. Установлено, что в области присоединения потока имеется зона, в которой турбулентные пульсации поверхностного трения и теплового потока в стенку переносятся против преимущественного направления пристеночного течения. Выявлена положительная корреляционная связь теплового потока в стенку с абсолютной величиной продольной компоненты вектора поверхностного трения. При этом имеет место отставание фазы пульсаций теплового потока, соизмеримое с величиной интегрального временного масштаба пульсаций. Получены условно-осредненные поля гидродинамических и тепловых параметров потока в отрывной области при всплесках пульсаций теплового потока или трения на стенке. Конкретизированы представления о роли крупномасштабных вихревых структур в переносе теплоты.

**Практическая ценность.** Полученные экспериментальные данные дают новые представления о взаимосвязи процессов переноса импульса и теплоты в турбулентном отрывном течении и могут быть полезны при разработке и верификации теоретических моделей, а также при постановке граничных условий в расчетных моделях сложных турбулентных течений.

На защиту выносятся:

- результаты измерений поверхностного трения и теплообмена в отрывном течении за выступом: перенос возмущений и корреляционная взаимосвязь этих параметров;

- результаты измерений поверхностного трения и теплового потока на стенке совместно со скоростью и температурой в потоке вблизи стенки.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных симпозиумах и конференциях, на семинарах и конференциях в КазНИЦ РАН и КГТУ им. А.Н.Туполева (Казань).

**Публикации.** Автор имеет 5 научных трудов, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации – 105 стр., в том числе 46 рисунков, расположенных по тексту, и список литературы, включающий 103 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования; сформулированы цель и основные положения, вынесенные на защиту; определен личный вклад соискателя в приведенные в диссертации результаты.

В первой главе рассмотрены современные представления о структуре турбулентных отрывных течений, приведены данные о распределениях коэффициентов поверхностного трения и теплового потока в стенку по длине отрывной области. Показано, что прогноз теплоотдачи на сегодняшний день осуществляется на основе эмпирических соотношений, физическая суть явлений при этом остается нераскрытой.

Приведен обзор современных методов исследования турбулентных отрывных течений. Показано применение метода условного осреднения. Метод позволяет выявлять и анализировать роль когерентных структур в турбулентном течении. Рассмотрен корреляционный анализ, который в рамках стохастического подхода к параметрам турбулентных течений позволяет выявлять взаимосвязи между параметрами.

На основе выполненного обзора известных исследований сделан вывод о том, что в настоящее время в экспериментальной гидродинамике и теплофизике существует проблема поиска взаимосвязи между поверхностным трением и тепловым потоком в стенку в отрывных течениях. Между средними параметрами эта взаимосвязь не существует (аналогия Рейнольдса не выполняется). Сделано предположение о существовании взаимосвязи между мгновенными величинами поверхностного трения и теплового потока.

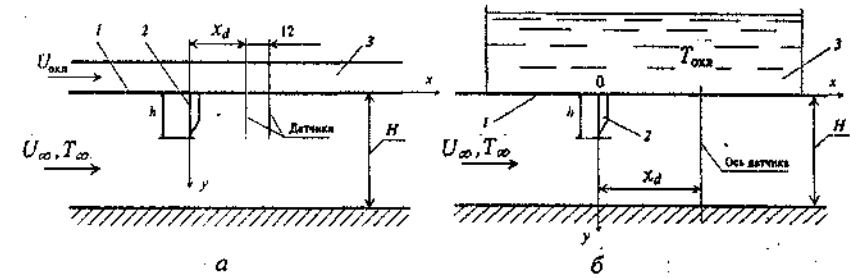


Рис.1. Схемы рабочих участков в трубах АТ-1 (а) и АТ-2 (б):  
1 – охлаждаемая стенка, 2 – выступ, 3 – канал охлаждения (а)  
или емкость с водой (б)

Во второй главе дано описание экспериментального оборудования, на котором проводились исследования, описаны условия и методика проведения эксперимента.

Эксперименты проводились в двух аэродинамических трубах (АТ-1 и АТ-2) разомкнутого типа. Рабочие участки АТ-1 и АТ-2 имели прямоугольное поперечное сечение  $100 \times 130 \text{ мм}^2$ . При установившемся режиме работы вентилятора скорость потока в рабочем участке могла изменяться от 2 до 60 м/с. Электрический теплогенератор в трубе АТ-1 позволял нагревать рабочую среду (воздух) на  $\sim 25^\circ\text{C}$  относительно температуры окружающей среды при скорости потока  $U_\infty \approx 20 \text{ м/с}$ . Емкость с водой на рабочем участке трубы АТ-2 (рис.1) позволяла поддерживать температуру стенки  $\sim 0^\circ\text{C}$  (в случае воды со льдом) или наперед заданный температурный уровень (при нагреве воды).

Отрывное течение в аэродинамических трубах создавалось при помощи выступа высотой  $h \approx 20 \text{ мм}$ , который занимал всю ширину канала и перемещался вдоль направления потока относительно датчиков, установленных на стенке. Во всех случаях перед выступом был развитый турбулентный пограничный слой, толщина которого была много меньше высоты выступа.

Одновременные локальные измерения поверхностного трения и теплового потока в стенку осуществлялись комбинированными датчиками КД1 и КД2 (рис.2), которые применялись при измерениях в АТ-1 и АТ-2 соответственно.

Чувствительные элементы датчиков (вольфрамовые нити диаметром  $d = 5 \text{ мкм}$ ) располагались на высоте  $0,1 \text{ мм}$  от основания датчика и находились внутри вязкого подслоя. В этих условиях, когда рабочая среда является ньютоновской жидкостью и профили скорости и температуры в вязком подслое имеют близкий к линейному закон изменения по нормали к стенке, чувствительность датчиков к пристеночным скорости и температуре можно интерпретировать как чувствительность к поверхностному трению и тепловому потоку в стенку. При этом продольная компонента вектора

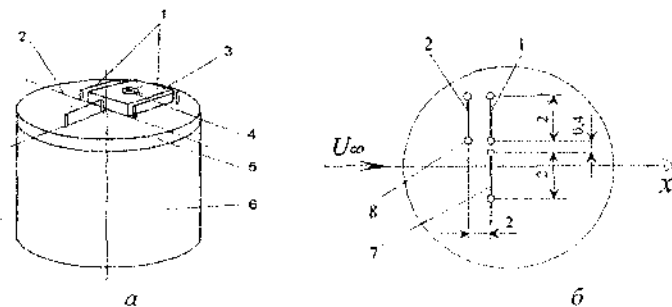


Рис.2. Схемы комбинированных датчиков КД1 (а) и КД2 (б): 1-термоанемометрические нити, 2-термометрическая нить, 3-выступ, 4-отверстие отбора давления, 5-основание зонда датчика, 6-корпус датчика, 7-нить термокомпенсации, 8-ножки-токоподводы

поверхностного трения была определена как  $\tau_x = \mu (du/dy)_{y=0} \approx \mu u_w/h_w$ , а тепловой поток в стенку  $-q_w = \lambda (dT/dy)_{y=0} \approx \lambda \Delta T/h_w$ , где  $h_w$  - расстояние от нитей до стенки.

Измерения скорости и температуры потока проводились двухниточным термоанемометрическим датчиком. В случае измерения скорости вторая нить использовалась в качестве нити термокомпенсации.

Измерения поверхностного трения, скорости, теплового потока и температуры осуществлялись при помощи термоанемометрической и термометрической аппаратуры DISA 55M, которая позволяла проводить измерения пульсаций трения и скорости до частоты 10 кГц. Ограничение по частоте для пульсаций теплового потока и температуры определялось постоянной времени температурной нити и составляло 1 кГц.

Эксперименты проводились при скоростях невозмущенного потока  $U_\infty = 5-36$  м/с (число Рейнольдса  $Re = U_\infty h/\nu = 0,8 \dots 5,4 \times 10^4$ ). Разность температур между потоком и стенкой составляла  $\Delta T = T_\infty - T_w = \pm(17 - 25)^\circ\text{C}$ . Уровень пульсаций скорости  $\sigma_u / \langle U_\infty \rangle$  вне пограничного слоя не превышал 0,025, а уровень пульсаций температуры  $\sigma_T / \langle T_\infty - T_w \rangle$  составлял  $\sim 0,015$ .

Оценки погрешности измерений параметров потока определялись в основном погрешностями градуировок. Относительная погрешность измерений поверхностного трения (при использовании метода Клаузера при градуировке) и скорости потока составила около 5% при доверительной вероятности 0,9. Относительная погрешность измерений теплового потока в стенку (при использовании аналогии Рейнольдса при градуировке) составила около 10% при доверительной вероятности 0,9.

В третьей главе на основании полученных экспериментальных данных анализируются различные характеристики поверхностного трения и теплового потока в стенку в турбулентном отрывном течении за выступом, их взаимосвязь, а также взаимосвязь параметров на стенке с параметрами в пристенной области потока.

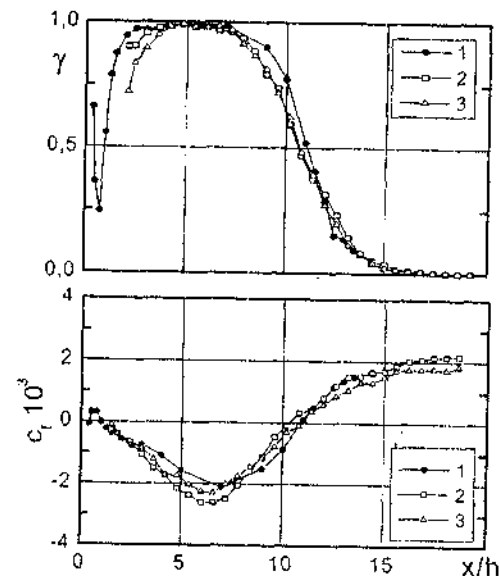


Рис.3. Распределение вероятности обратного течения и продольной компоненты вектора трения в следе за выступом: 1 - Козлов А.П., Михеев Н.И. и др., 2 - изотермические условия, 3 - неизотермические условия

На рис. 3 приведены распределения вероятности обратного течения  $\gamma$  и осредненного коэффициента  $\langle c_x \rangle = 2 \langle \tau_x \rangle / (\rho u_\infty^2)$  продольной компоненты вектора поверхностного трения  $\tau_x$  в отрывной области за выступом. Величина  $\gamma$  определялась как доля времени, в течение которого направление потока у стенки противоположно основному направлению потока. Число Рейнольдса  $Re = U_\infty h/\nu$  в экспериментах составляло  $3,0 \times 10^4$ .

Изменение числа Стантона по длине отрывной зоны приведено на рис.4.

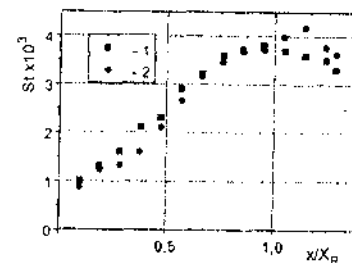


Рис.4. Распределение числа Стантона по длине отрывной зоны: 1 - Фогель, Итон, течение за уступом при  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  и  $Re = 2,8 \times 10^4$ ; 2 - данные автора, число  $Re = 2,4 \times 10^4$  за выступом

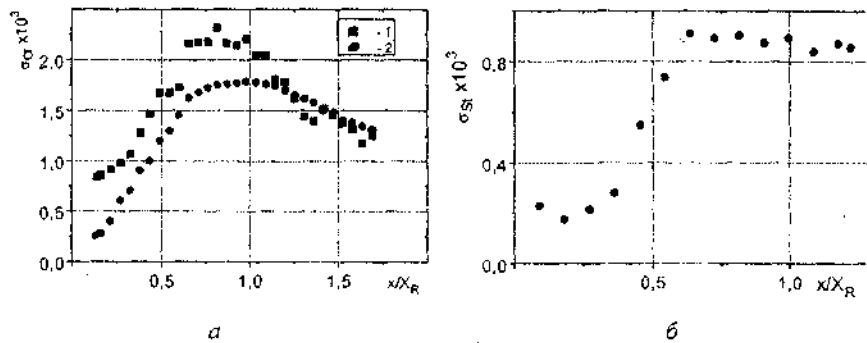


Рис.5. Среднеквадратичные значения пульсаций поверхностного трения (а) и теплового потока в стенку (б) за выступом: 1 -  $Re=3,1 \times 10^4$ , 2 - данные Фогеля, Итона; б -  $Re=2,4 \times 10^4$

Как видно из рис.3, представленные результаты хорошо согласуются и являются общими для исследованных отрывных течений. Точка присоединения потока в среднем ( $\gamma = 0,5$ ) расположена на расстоянии  $X_R / h = 10,5 - 11,5$  от выступа.

Получены данные о распределении пульсаций поверхностного трения и теплового потока по длине отрывной области за выступом (рис.5).

Было установлено, что наряду с одной из характерных точек отрывных течений – точкой (зоной) присоединения, как особенной точкой в смысле гидродинамики и теплообмена – можно выделить зону в средней части рециркуляционной области, где имеют место максимальные пульсации поверхностного трения (в области  $x=(0,6...1,0)X_R$ ) и резкое нарастание пульсаций удельного теплового в стенку (в области  $x=(0,4...0,7)X_R$ ).

Наряду со средним значением и среднеквадратичным отклонением распределение случайных величин, в частности, коэффициента поверхностного трения, количественно характеризуется коэффициентами асимметрии  $K_A = \langle C_f^3 \rangle / \langle C_f^2 \rangle^{3/2}$  и эксцесса  $K_E = \langle C_f^4 \rangle / \langle C_f^2 \rangle^2 - 3$ . Распределение этих коэффициентов по длине отрывной зоны за выступом приведено на рис.6. Как видно, в области присоединения коэффициенты асимметрии и эксцесса близки к нулю.

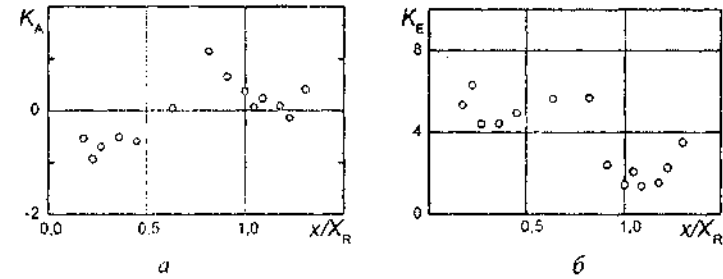


Рис.6. Коэффициенты асимметрии (а) и эксцесса (б) поверхностного трения по длине отрывной зоны за выступом

Коэффициент асимметрии в рециркуляционной зоне изменяется от отрицательных значений непосредственно за выступом до положительных в области присоединения, а коэффициент эксцесса – везде положителен. Такое поведение коэффициента асимметрии означает, что на осциллограмме поверхностного трения за выступом провалы (ближе к выступу) и всплески (ближе к точке присоединения) наблюдаются чаще, чем следовало бы ожидать при нормальном распределении. Причина этому, на наш взгляд, заключается в возмущении поверхностного трения крупномасштабными вихревыми структурами сдвигового слоя. В зоне присоединения основным фактором, влияющим на пульсации поверхностного трения, является взаимодействие вихревых структур со стенкой. И такое положение при отсутствии более мощных источников возмущений не может приводить к большим значениям коэффициента асимметрии.

Коэффициенты асимметрии и эксцесса были получены и для распределений теплового потока (рис.7). Как видно, коэффициенты асимметрии и эксцесса в средней части рециркуляционной зоны ( $x=(0,3...0,5)X_R$ ) имеют явно выраженные максимумы.

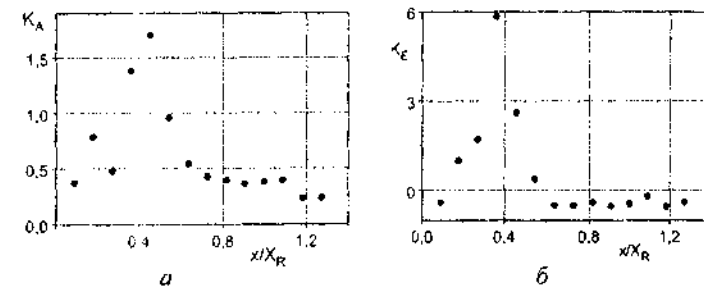


Рис.7. Коэффициенты асимметрии (а) и эксцесса (б) распределения числа Стантона по длине отрывной области при  $Re = 2,4 \times 10^4$

В области ( $x > 0,7X_R$ ) закон распределения теплового потока близок к нормальному.

Таким образом, коэффициенты асимметрии и эксцесса для плотности распределения параметров на стенке являются, своего рода, количественной характеристикой особенности средней части рециркуляционной области. Очевидно, существенное увеличение коэффициента асимметрии в этой области является следствием того, что крупномасштабные вихревые структуры, несущие избыточную по отношению к стенке температуру, начинают достигать поверхности стенки, создавая тем самым всплески теплового потока.

Выявленные закономерности изменения коэффициентов асимметрии и эксцесса позволяют конкретизировать механизмы переноса импульса и теплоты в отрывной области. Факторами, влияющими на поверхностное трение, являются пограничный слой вблизи стенки и вихревые структуры сдвигового слоя. В этом случае в зоне присоединения основным фактором, определяющим интенсивность пульсаций трения, будет воздействие вихревых структур. И в этой ситуации (при отсутствии более сильных источников возмущения) коэффициент асимметрии не может достигать больших значений. Тепловой поток же определяется распределением температуры потока вблизи стенки. В средней части рециркуляционной области к этому фактору добавляются воздействия вихревых структур, несущих как гидродинамические, так и температурные возмущения. Такое «двойное» действие и приводит к значительным величинам коэффициента асимметрии. Далее по потоку температурное поле в ядре выравнивается и весь температурный перепад находится в тонком слое вблизи стенки. И поэтому вихревые структуры здесь уже не несут больших тепловых возмущений и, как следствие, уменьшается коэффициент асимметрии.

С целью изучения процессов переноса турбулентных пульсаций поверхностного трения и теплового потока были выполнены двухточечные измерения этих параметров за выступом в аэродинамической трубе АТ-1. Два комбинированных датчика располагались на оси трубы на расстоянии  $\Delta x = 12$  мм друг от друга по потоку. Такое расположение датчиков давало возможность оценки скорости переноса возмущений (пульсаций) в направлении потока, которая проводилась с использованием пространственно-временных корреляционных функций:

$$R_{\tau}(\tau) = \langle \tau_1(t) \tau_2(t+\tau) \rangle / \sigma_{\tau_1} \sigma_{\tau_2} \text{ - для поверхностного трения;}$$

$$R_q(\tau) = \langle q_1(t) q_2(t+\tau) \rangle / \sigma_{q_1} \sigma_{q_2} \text{ - для теплового потока,}$$

где  $\tau_1'$ ,  $\tau_2'$  и  $q_1'$ ,  $q_2'$  - пульсационные составляющие поверхностного трения и теплового потока;  $t$  - текущее время;  $\tau$  - смещение по времени между  $\tau_1'$  и  $\tau_2'$  (или  $q_1'$  и  $q_2'$ );  $\sigma_{\tau_1}$ ,  $\sigma_{\tau_2}$  и  $\sigma_{q_1}$ ,  $\sigma_{q_2}$  - среднеквадратичные пульсации

трения и теплового потока. Здесь индекс 1 относится к первому датчику, а индекс 2 - ко второму.

Тенденция изменения пространственно-временных корреляционных функций измеряемых параметров по длине отрывной области видна из рис.8. Как видно из положений максимумов, пульсации поверхностного трения  $\tau_x$  и теплового потока в стенку  $q$  в основном переносятся в преимущественном направлении пристенного течения. Однако в области преимущественно обратного течения ( $y > 0,5$ ) имеется обширная зона, где эти направления противоположны. Существует также область, где интенсивность переноса пульсаций  $\tau_x$  (или  $q$ ) в обоих направлениях в среднем приблизительно одинакова. В этой области имеет место тенденция к появлению локальных максимумов корреляционных функций и в положительной, и в отрицательной областях временной оси, что свидетельствует о возможном чередовании направлений переноса пульсаций  $\tau_x$  (или  $q$ ). Как следует из рисунка, преобладание переноса пульсаций  $q$  в направлении внешнего течения начинает проявляться в области стенки, расположенной несколько дальше от выступа. За исключением этого отличия корреляции теплового потока и поверхностного трения имеют приблизительно одинаковую тенденцию изменения по координате  $x$ , что свидетельствует об общем механизме переноса пульсаций этих параметров.

Полученные закономерности переноса пульсаций параметров на стенке в отрывной области можно объяснить влиянием на этот процесс как крупномасштабных вихревых структур сдвигового слоя, так и вихревых структур пограничного слоя, формирующегося по обе стороны от точки присоединения потока. В области преимущественного обратного пристенного течения, где крупные вихри сдвигового слоя еще не достигают стенки, перенос пульсаций поверхностного трения и теплового потока определяется направлением этого течения. Крупномасштабные вихри сдвигового слоя во всей отрывной области движутся в направлении внешнего течения и сохраняют целостность в области присоединения потока. В некоторой области течения, где крупные вихри сдвигового слоя приближаются к стенке, их влияние на перенос пульсаций  $\tau_x$  и  $q$  становится сопоставимым с влиянием вихревых структур пограничного слоя. Из-за низкочастотных пульсаций сдвигового слоя в одной и той же точке стенки в разные моменты времени может преобладать тот или иной механизм переноса пульсаций этих параметров. Ниже по течению, но еще значительно выше средней точки присоединения потока направление переноса пульсаций всех измеряемых параметров начинает определяться направлением движения крупных вихрей сдвигового слоя. Ниже точки присоединения оба фактора действуют уже в одном направлении.

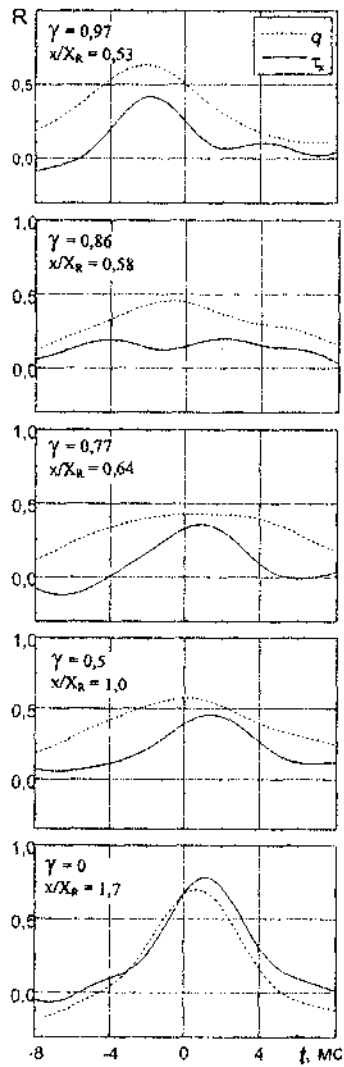


Рис.8. Пространственно – временные корреляции поверхностного трения и теплового потока за выступом

На основе комбинированных измерений была выполнена оценка взаимосвязи между мгновенными величинами поверхностного трения и теплового потока в стенку при помощи взаимно – корреляционных функций.

Тенденция изменения взаимных корреляционных функций пульсаций теплового потока в стенку  $q$  и продольной компоненты вектора поверхностного трения  $\tau_x$  видна из рис.9. На рисунке показаны также

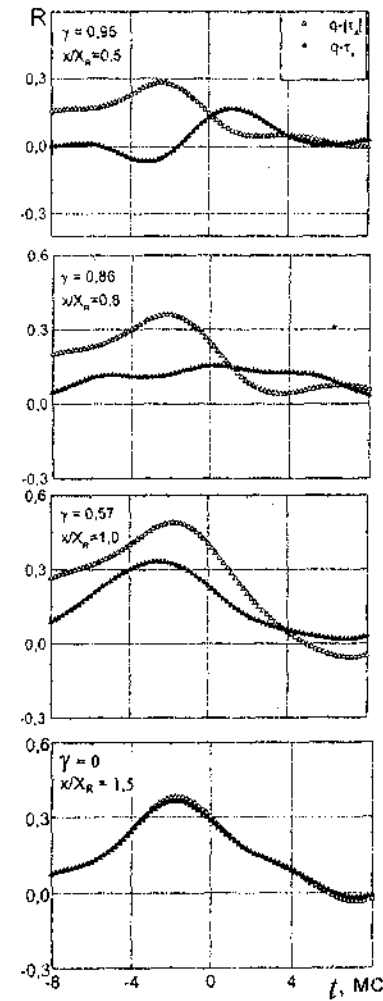


Рис.9. Взаимно – корреляционные функции пульсаций поверхностного трения и теплового потока за выступом

корреляционные функции теплового потока с абсолютной величиной продольной компоненты вектора поверхностного трения  $|\tau_x|$ . Как видно из рисунка, наиболее устойчивая корреляционная связь во всей отрывной области имеет место между  $q$  и  $|\tau_x|$ . Более тесной взаимосвязи  $q$  именно с  $|\tau_x|$  следовало и ожидать, т.к. интенсивность теплообмена определяется прежде всего величиной, а не направлением пристенной скорости.

Между пульсациями параметров имеет место фазовый сдвиг. Наиболее стабильный фазовый сдвиг во всей отрывной области был между пульсациями теплового потока в стенку  $q$  и  $|\tau_x|$ , а именно, пульсации теплового потока запаздывают по времени. Величина этого сдвига принимает значения от 0,4 до 1 интегрального временного масштаба пульсаций теплового потока.

С целью выявления взаимосвязей параметров на стенке с параметрами потока в пристенной области были проведены эксперименты в аэродинамической трубе АТ-2, в которых одновременно с параметрами на стенке  $q$  и  $\tau_x$  измерялись скорости или температуры в потоке (рис.10 и 11).

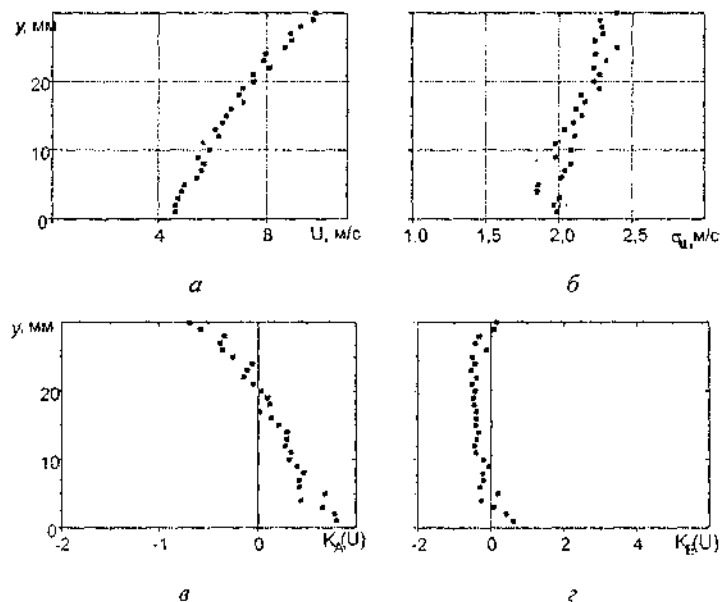


Рис.10. Профили средней скорости в потоке (а), пульсаций скорости (б), коэффициентов асимметрии (в) и эксцесса (г) распределений скорости в области релаксации ( $x=1,23x_R$  или  $x=270$  мм) при  $Re=1,6 \times 10^4$  ( $U_0=11,3$  м/с)

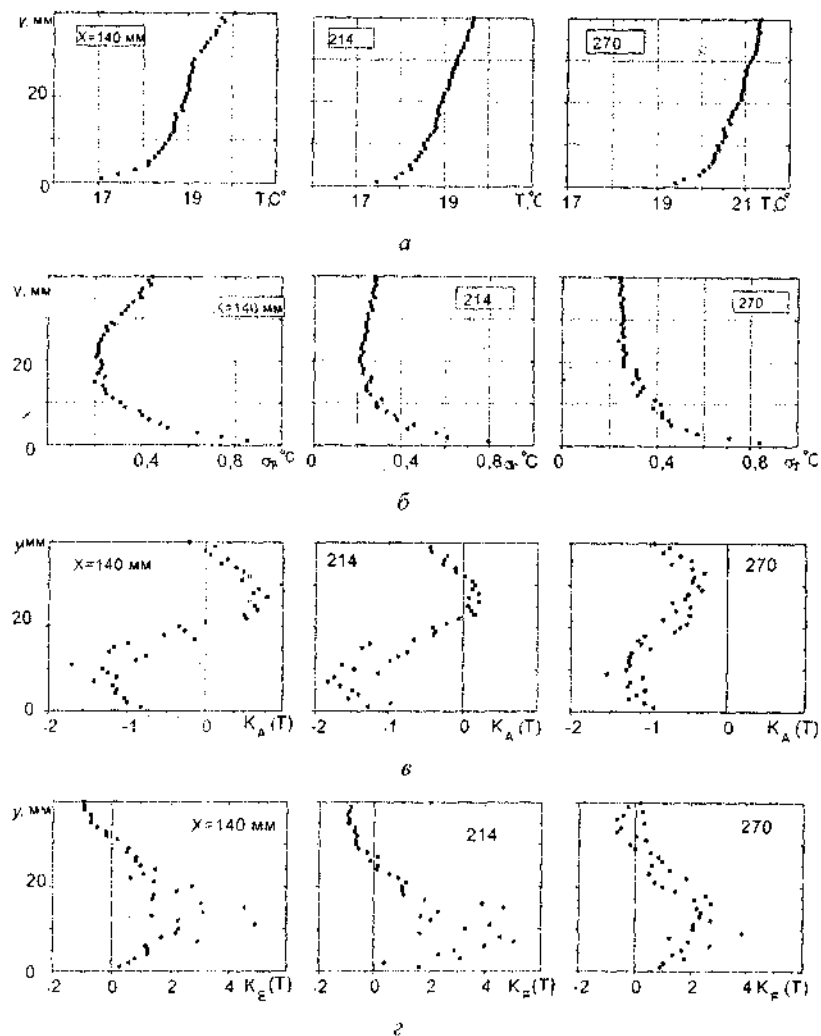


Рис.11. Профили средней температуры (а), среднеквадратичных пульсаций температуры (б), коэффициентов асимметрии (в) и эксцесса (г) распределения температуры в различных сечениях потока при  $Re=1,6 \times 10^4$  ( $U_0=11,3$  м/с)



Профиль средней скорости (рис.10, а) согласуется с известными экспериментальными данными. Профиль пульсаций (рис.10, б) несколько отличается от данных для пульсаций продольной компоненты скорости, очевидно, ввиду того, что в нашем случае одноточечный термоанемометр не позволял измерять направление вектора скорости. Коэффициент асимметрии (рис.10, в) монотонно увеличивается от нуля при  $y=h$  до  $K_A=0,8$  у стенки, а при  $y>h$  принимает отрицательные значения. Однако надо заметить, что и коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса (рис.10, з) для скорости в потоке имеют близкие к нулю значения в отличии от соответствующих коэффициентов для температуры. То есть закон распределения скорости довольно быстро становится близким к нормальному в отличии от закона распределения температуры.

Из рис.11, а следует, что профиль средней температуры имеет наибольший градиент в тонкой пристеночной области  $y \leq 1$  мм. Здесь реализуется основная часть (свыше  $0,8\Delta T$ ) перепада температуры между ядром потока и стенкой. Соответственно вблизи стенки пульсации температуры принимают максимальные значения, плавно снижаясь с удалением от стенки вплоть до  $y=h$  (рис.11, б). Однако в зоне рециркуляции пульсации нарастают и при достаточном удалении от стенки. Причина этого, очевидно, в неравномерности профиля средней температуры в ядре потока обусловленной рециркуляцией холодных масс воздуха от стенки. Соотношение различных факторов, влияющих на температуру потока в конкретной точке, количественно характеризуется коэффициентом асимметрии (рис.11, в). Вблизи стенки коэффициент асимметрии во всех случаях отрицателен. Однако, в рециркуляционной области в диапазоне  $y = 1...2h$  коэффициент асимметрии принимает положительные значения. Далее по потоку все значения смещаются в отрицательную сторону. Объяснение этому представляется следующим. В областях присоединения и релаксации массы холодного газа от стенки периодически возмущают температуру в данной конкретной точке на фоне преобладающей изначальной температуры потока, что и приводит к отрицательному коэффициенту асимметрии. В области же рециркуляции температура в точке потока формируется под действием двух факторов: изначальной ее температурой и температурой стенки, принимая тем самым некоторое среднее значение. Поэтому вблизи стенки ( $y<h$ ) температура больше возмущается холодными порциями газа, а дальше ( $h<y<2h$ ) - теплыми, что и определяет сначала отрицательные коэффициенты асимметрии, потом положительные. На высоте  $y=h$  оба фактора, очевидно, влияют примерно одинаково, приводя к нулевому значению коэффициента асимметрии.

Коэффициенты эксцесса (рис.11, з) имеют положительные максимумы в области  $0,5h<y<h$ . Как правило, максимумы  $K_E$  имеют место между областями генерации температурных пульсаций. Полученные данные не

противоречат этой мысли, имея в виду, что пульсации температуры максимальны в пристеночной области и в свободном сдвиговом слое.

С целью получения количественных характеристик взаимосвязи параметров на стенке и параметров в потоке были построены взаимно-корреляционные функции между этими параметрами. На рис.12 приведены эти функции для различных сечений потока.

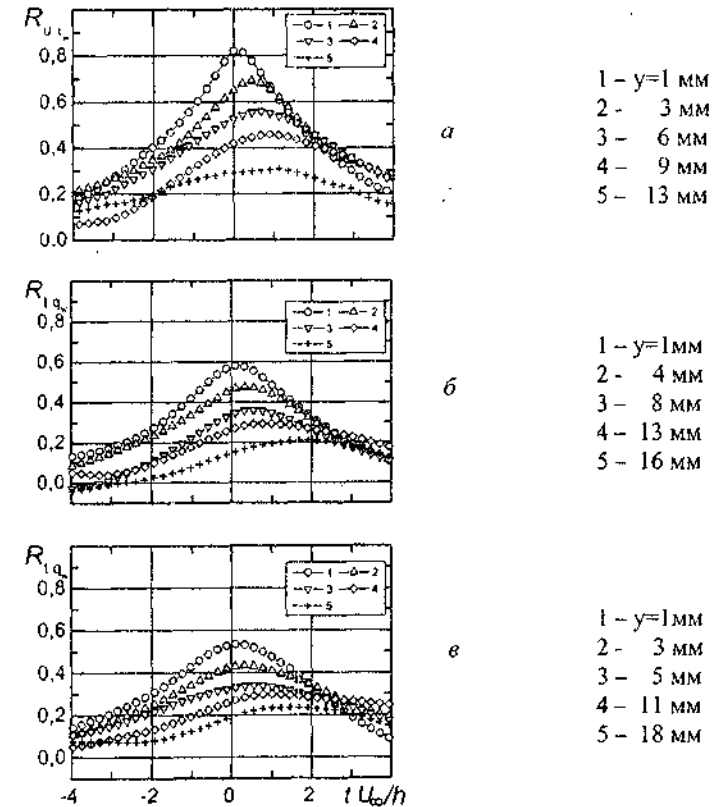


Рис. 12. Взаимно-корреляционные функции между параметрами в потоке и параметрами на стенке: а - скорость в потоке и поверхностное трение на стенке в сечении  $x=1,23X_R$ , б и в - температура в потоке и теплоотдача на стенке в сечениях  $x=1,23X_R$  и  $x=0,97X_R$  соответственно

Как видно из рисунка, характер изменения корреляционных функций скорости и поверхностного трения (рис.12, а), а также температуры и теплового потока (рис.12, б, в) в области присоединения и в области релаксации одинаков: вблизи стенки уровни корреляции высоки и сдвиги по времени незначительны, с удалением от стенки корреляция снижается, а сдвиг по времени возрастает. Такой характер свидетельствует о переносе пульсаций скорости и температуры от потока к стенке, что может объясняться движением крупномасштабной структуры в направлении стенки или движением наклонной структуры вдоль стенки.

Для получения картины происходящего в потоке вблизи стенки в моменты, когда на стенке происходят те или иные события, был применен метод условного осреднения. В результате были построены условно - осредненные пространственные поля пульсаций скорости и температуры, соответствующие максимальным значениям (всплескам) поверхностного трения и теплового потока. В качестве условия осреднения (детекции) было выбрано превышение пульсаций параметра на стенке над его среднеквадратичным отклонением, то есть  $\tau' > \sigma_\tau$  и  $q'_w > \sigma_{q_w}$ . В моменты, когда выполнялось условие детекции, производилось осреднение пульсаций скорости (или температуры) в потоке.

Полученные результаты были аппроксимированы между точками сетки и для случая скорости в потоке ( $u^* = \langle u' \rangle |_{\tau' > \sigma_\tau} / U_0$ ) представлены в тоновом виде на рис.13. Там же приведены условные распределения поверхностного трения ( $c_{fx}^* = \langle c'_{fx} \rangle |_{\tau' > \sigma_\tau} / \sigma_{c_{fx}}$ ) и теплового потока ( $q_w^* = \langle q'_w \rangle |_{\tau' > \sigma_\tau} / \sigma_{q_w}$ ) в локальной области стенки, которые соответствуют приведенной картине течения. Распределения параметров на стенке строилось путем сдвигки по времени от момента максимальных значений параметра. Перевод в геометрические координаты осуществлялся по известной (из двухточечных измерений) скорости переноса пульсаций. Как видно из рис.13, в моменты всплесков поверхностного трения на стенке в зоне расположения датчика, фиксирующего этот параметр, в потоке наблюдается область максимальных значений условно осредненной скорости, имеющая некоторую наклонную по потоку структуру. Условные распределения поверхностного трения и теплового потока на стенке показывают, что пульсации теплового потока распространяются по стенке с некоторым отставанием от пульсаций поверхностного трения.

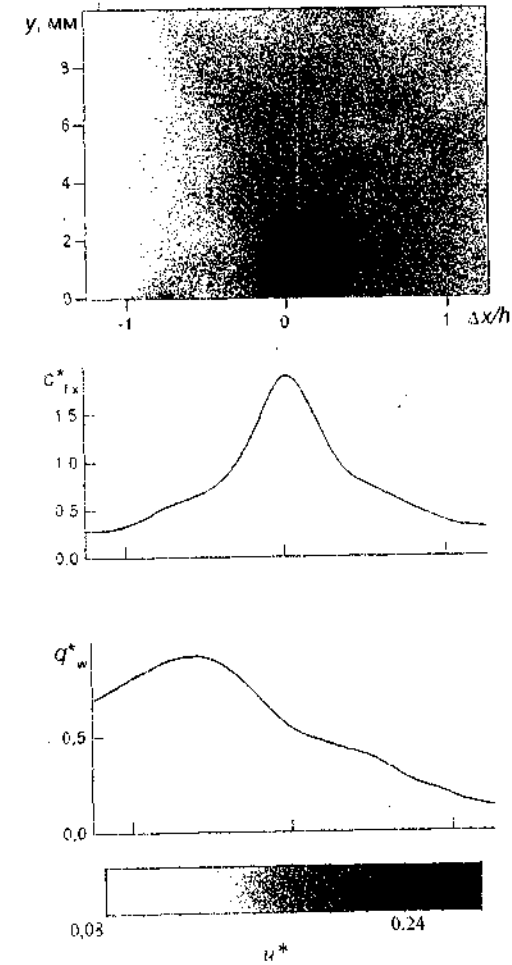


Рис.13. Условно-осредненное поле пульсационной составляющей скорости в потоке и соответствующие ему условные распределения пульсационных составляющих коэффициентов поверхностного трения и теплоотдачи на стенке в области релаксации (нулевая точка -  $x = 1,23X_R$ )

Анализ совокупности полученных экспериментальных данных о пространственно – временной взаимосвязи гидродинамических и тепловых параметров в турбулентном отрывном течении позволяет предположить, что в основе механизма этой взаимосвязи лежит гидродинамическое и тепловое взаимодействие крупномасштабных вихрей со стенкой. Физическую модель взаимодействия вихря со стенкой можно представить следующим образом. При актах этого взаимодействия мгновенные градиенты скорости и температуры вблизи стенки в значительной степени зависят от распределения скорости и температуры внутри вихря. Скорость в вихре (без учета его поступательного движения) максимальна на периферии, а максимальная избыточная температура имеет место в центре вихря (рис.14).

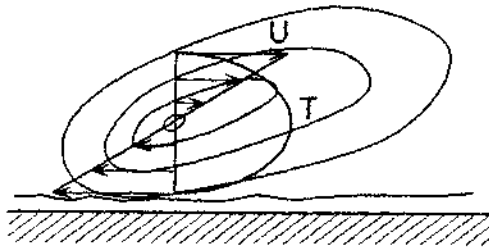


Рис.14. Схема распределения избыточных скорости и температуры в одиночном вихре

Поэтому столкновение вихря как носителя избыточной скорости и температуры со стенкой приводит к быстрому изменению мгновенной величины поверхностного трения и, с некоторым запаздыванием, к изменению теплового потока в стенку. Наиболее выраженное проявление описанного механизма взаимодействия вихря со стенкой имеет место в области присоединения потока, т.е. там, где крупномасштабные вихри слоя смещения достигают стенки. Взаимные корреляции  $q$  и  $[\tau_x]$  в этой области максимальны. На величину фазового сдвига между пульсациями этих параметров определенное влияние оказывает вертикальная скорость перемещения крупномасштабных вихрей. В частности, в окрестности точки присоединения, где крупные вихри быстро приближаются к стенке, величина этого сдвига наименьшая.

## ВЫВОДЫ

1. Получены экспериментальные данные об интенсивности пульсаций теплового потока в стенку, распределении коэффициентов асимметрии и эксцесса теплового потока по длине отрывной области за выступом. Выявлено, что окрестность точки  $x=0,4X_R$  характеризуется резким нарастанием пульсаций теплового потока и максимальными значениями коэффициентов асимметрии и эксцесса, которые происходят вследствие начала заметного влияния вихревых структур сдвигового слоя на теплоотдачу на стенке.

2. На основе двухточечных измерений параметров получены данные о переносе пульсаций поверхностного трения и теплового потока в стенку в отрывной области за выступом. Установлено, что пульсации параметров в основном переносятся в направлении пристеночного течения, однако вблизи точки присоединения имеется зона, в которой эти направления противоположны.

3. Получены экспериментальные данные о взаимосвязи мгновенных локальных значений поверхностного трения и теплового потока в стенку в турбулентном отрывном течении за выступом. Выявлено, что наиболее тесная взаимосвязь наблюдается между абсолютной величиной продольной компоненты вектора поверхностного трения и величиной теплового потока в стенку. При этом пульсации теплового потока отстают по времени от пульсаций абсолютной величины продольной компоненты вектора поверхностного трения. Выявленный сдвиг по фазе между этими параметрами достигает величины интегрального временного масштаба пульсаций теплового потока.

4. На основе комбинированных одновременных измерений параметров на стенке (поверхностное трение и тепловой поток) и в потоке (скорость и температура) получено представление о проходящих процессах в потоке вблизи стенки, а именно, о профилях скорости, температуры, их пульсаций и коэффициентов асимметрии и эксцесса, конфигурациях фронтов пульсаций скорости и температуры. Получены условно-средненные поля пульсаций скорости и температуры в моменты максимальных значений (всплесков) поверхностного трения и теплового потока в стенку и соответствующие им условные распределения поверхностного трения и теплового потока по длине отрывной области. Полученные в локальной области стенки поля свидетельствуют о наличии в пристенной области наклонных крупномасштабных структур, которые условно можно интерпретировать как когерентные структуры. Пульсации теплового потока распространяются по стенке с некоторым отставанием от пульсаций поверхностного трения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Алемасов В.Е., Давлетишин И.А., Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Нилов Г.А., Сайкин А.К. Перенос тепла в следе за поперечным цилиндром в градиентном потоке // Пром. теплотехника. – 1999. – т. 21, № 4-5. – с.128 – 133.
2. Давлетишин И.А. Пульсации трения и теплоотдачи в отрывном течении // Тезисы докладов Первой Международной научной конференции студентов и аспирантов «Современные аспекты гидроаэродинамики – 98» (25 – 29 мая 1998 г.). – Санкт-Петербург, 1998.
3. Давлетишин И.А., Занько Ф.С., Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М. Взаимосвязь пульсаций поверхностного трения и теплового потока в стенку с вихревой структурой течения в следе за поперечным цилиндром // Материалы докладов Всероссийской школы-семинара молодых ученых и специалистов «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (24-27 октября 2000 г.). – Казань, 2000. – с. 47 – 49.
4. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М., Давлетишин И.А. Взаимосвязь мгновенных гидродинамических и тепловых параметров в турбулентном отрывном течении // Тепло- и массоперенос - 2000. Минск: АНК "ИТМО им.А.В.Лыкова" НАНБ, 2000.
5. Михеев Н.И., Давлетишин И.А. Перенос турбулентных пульсаций трения и теплоотдачи в отрывном течении // Материалы докладов 2-го международного симпозиума по энергетике, окружающей среде и экономике. – Т.1. – Казань, 1998. – с. 11-14.

---

Формат 60×84 1/16. Бумага газетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 1,25. Усл. печ. л. 1,16. Усл. кр.-отт. 1,21. Уч.-изд. л.1,0.  
Тираж 100. Заказ 69.

---

Типография Издательства Казанского государственного  
технического университета  
420111, Казань, К.Маркса, 10