

1149/134

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени Государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ЧУДНОВСКИЙ Ярослав Петрович

УДК 536.24

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ГЕНЕРАЦИЕЙ ВИХРЕЙ

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном техни-
ческом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Афанасьев В.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Брдлик П.М.
кандидат технических наук,
с.н.с. Куракин А.А.

Ведущее предприятие - Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова

Защита диссертации состоится "28 " мая 1990 г. в 14 часов на
заседании специализированного Совета К.053.15.05 "Тепловые машины и
теоретические основы теплотехники" в Московском Государственном техни-
ческом университете им. Н.Э.Баумана по адресу:

107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1,
корпус факультета "Энергомашиностроение".
Справка в библиотеке МТУ им. Н.Э.Баумана.
Экземпляры, заверенные печатью уче-

Москва, 2я Бауманская ул., д. 5,
Н.Э. Баумана, ученому секретарю
специализированного Совета К.053.15.05

" 1990 г.

Ефимов С.И.

50

Заказ № 374

0 экз.

Ротапринт МТУ

М 4-81134

Актуальность работы. В связи с ростом энергетических мощностей все более увеличиваются габариты применяемых теплообменников, что повышает требования к их эффективности и надежности. Со времени изобретения первых теплообменников теплоотдающие поверхности в них изготавливали из труб малого диаметра. Однако квадратный метр поверхности теплообмена, состоящей из труб, в несколько раз дороже поверхности той же площади из тонкого листа.

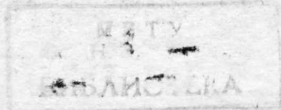
Таким образом, при создании компактных теплообменных аппаратов и повышении их эффективности становятся чрезвычайно важными проблемы интенсификации теплообмена, которые сводятся к уменьшению поверхности теплоотдачи или к снижению температурного напора.

Цель работы. Проверить возможность реализации способа интенсификации теплообмена за счет профилирования поверхности нагрева регулярными системами сферических углублений в условиях внешнего турбулентного обтекания. Выявить тенденции влияния на теплообмен плотности нанесения углублений. Для выявления физической картины течения и механизма переноса тепла и импульса исследовать трение и теплоотдачу при обтекании одиночного сферического углубления и одиночной поперечной потоку цилиндрической траншеи. Создать физическую модель процесса обтекания одиночного углубления и всей поверхности в целом.

Научная новизна. Впервые получены профили средней скорости, температуры и распределения их пульсаций по толщине турбулентного пограничного слоя на поверхностях, профилированных шахматно-упорядоченными системами сферических углублений, а также экспериментальные данные по трению и теплообмену при обтекании одиночных сферических углублений и цилиндрических траншей. Предложена новая физическая модель обтекания одиночного сферического углубления на исходно гладкой поверхности.

Автором выносятся на защиту:

- результаты экспериментального исследования трения и теплообмена на профилированных системах сферических углублений поверхностях;
- результаты обобщения полученных экспериментальных данных по теплообмену;
- результаты экспериментального исследования и основанную на них физическую модель течения в одиночном сферическом углублении на исходно гладкой поверхности.



Практическая ценность работы заключается в получении обобщающей зависимости для расчетной оценки теплообмена на поверхности, профилированной системой оферических углублений разной плотности в исследованном диапазоне геометрий и режимов течения.

Реализация. Полученные в настоящей работе результаты используются при расчете поверхностей нагрева в охлаждаемых элементах конструкций и являются основой для создания экспериментально обоснованной физико-математической модели течения в одиночном углублении на исходно гладкой поверхности.

Аппробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международном форуме по теплообмену (Минск, 1988), на VII Всесоюзной школе-семинаре "Актуальные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Канев, 1989), на III Всесоюзной школе-семинаре молодых ученых "Актуальные проблемы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Алушта, 1989), на совещании-семинаре в ИАЭ им. И.В. Курчатова по смерчевой интенсификации теплообмена (Москва, 1989).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 2 печатных работы. Материалы диссертации использованы в 2 научных отчетах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 170 страницах, из которых 106 страниц текста, 58 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследуемого вопроса, сформулированы задачи исследования, перечислены основные положения работы, выносимые автором на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса об интенсификации конвективного теплообмена путем применения искусственных интенсификаторов.

Возможность практического использования того или иного способа интенсификации теплообмена определяется его технической доступностью и технико-экономической эффективностью.

Большое число экспериментальных работ, посвящено исследованию интенсификации теплообмена в трубах и каналах при наличии искусственной

шероховатости.

Типичной в этом плане может служить работа В. Нуннера, в которой дано довольно обстоятельное как теоретическое, так и экспериментальное исследование явления интенсификации теплообмена за счет искусственной шероховатости. Основываясь на методе термомгидродинамической аналогии, используя трехлопную модель течения, автор получил следующую зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи в шероховатой трубе:

$$Nu = \xi / 8 * (Re * Pr) / [1 + 1.5 * Re^{-1/8} * Pr^{-1/6} (Pr * \xi / \xi_0 - 1)].$$

Из этого выражения следует, что для обычных теплоносителей с числом Прандтля больше 1 искусственная шероховатость не должна приводить к значительной интенсификации теплообмена и что степень интенсификации должна убывать с ростом числа Прандтля. Что касается жидкометаллических теплоносителей, для которых число Прандтля значительно меньше 1, то их теплоотдача под воздействием искусственной шероховатости должна интенсифицироваться.

Однако в работах В.И. Гомелаури и др. показана ошибочность физической модели, лежащей в основе исследований В. Нуннера и на основании экспериментальных данных указывается на возрастание степени интенсификации теплообмена при увеличении числа Прандтля, как в случае кольцевого так и в случае прямоугольного каналов.

Помимо применения искусственной шероховатости существенная интенсификация теплообмена была достигнута за счет использования труб типа "диффузор-конфузор" (В.К. Мигай) и волнообразных каналов (В.М. Антупьев). Кроме того, увеличение числа Нуссельта на 100...150% было обнаружено в исследованиях П. Макормана, Х. Уилкера и М. Келхера за счет генерации на поверхности нагрева вихрей Тейлора-Гертлера.

Интересный характер носит обтекание поверхностей, формованных регулярной решеткой прилегающих друг к другу чередующихся полусферических углублений и выступов, исследованное в работах сотрудников Брянского института тяжелого машиностроения. При обтекании таких рельефов определяющий вклад в сопротивление вносят отрывные струи и возвратные вторичные течения, возникающие на выступающих в поток полусферах. Эти течения и определяют, в основном, характер обтекания оседающих с выступами углублений и всей поверхности в целом. В этих работах указывается, что при одинаковых затратах мощности на перемещение теплоносителя теплотом с единицы такой поверхности на 60...70% выше, чем с глад-

кой. Исследование теплообмена и гидродинамики при обтекании углублений на исходно гладких поверхностях представляет собой наиболее малоизученную область тепло-массообмена и имеет большое практическое значение, поскольку углубления и полости – конструктивного или случайного происхождения – встречаются на многих конвективных поверхностях, как например, в случаях входящих в атмосферу космических летательных аппаратов, подвергающихся ударам микрометеоритов и аэродинамическому нагреву, каналов в турбинах, поверхностей оперения и т.д.

Большое число исследований по интенсификации теплообмена при обтекании двумерных траншей и кольцевых канавок принадлежит Э.К. Калинину, Г.А. Дрейцеру и С.А. Ярхо. В своих исследованиях авторы использовали в качестве рабочих образцов тонкостенные трубки с накатанными кольцевыми канавками, а также с комбинированными турбулизаторами типа "выступ-канавка". Ими были получены обобщающие эмпирические зависимости как по теплообмену, так и по сопротивлению. Авторы указывают, что комбинированные турбулизаторы в отношении роста теплоотдачи существенно эффективней кольцевых канавок (до 60%) и применяются в настоящее время при серийном изготовлении трубчатых теплообменных аппаратов установок комплексной подготовки газа для Ямбургского газоконденсатного месторождения.

Интересные исследования процессов переноса импульса и тепла при турбулентном отрывном обтекании двумерной прямоугольной впадины глубиной h и шириной b провели Р. Хаген и А. Данак. В их работах предлагается аналитическая модель течения потока внутри впадины, основанная на представлениях о турбулентном обмене в свободных струях и в результате анализа, основанного на понятиях турбулентного переноса в области смешения, Р. Хаген и А. Данак предлагают соотношение, описывающее теплообмен и хорошо согласующееся с экспериментальными данными:

$$St [3(1+b/h)]^{0.5} = 0.365(\delta/b)^{-0.14} Re_b^{-0.25} \pm 15\%.$$

Обтекание трехмерных углублений изучено довольно мало, несмотря на то, что первые работы в этом направлении были опубликованы К.Вигхардтом и Л.Тилманном в 40х годах и процитированы в монографии Г. Шлихтинга.

Привлекают также внимание работы Дж. Дэвиса, Д. Уильямса, П. Бирмана, Дж.Харвея и Р.Михты, исследовавших особенности полета мячей для игры в гольф, поверхность которых формована трехмерными сферическими вогнутостями.

На рис. I показана зависимость от числа Рейнольдса коэффициентов сопротивления гладкого шара, различных шероховатых шаров и мяча для иг-

ры в гольф, поверхность которого покрыта трехмерными сферическими углублениями. Горизонтальный участок кривой коэффициента сопротивления мяча для гольфа свидетельствует о процессах обтекания, существенно отличающихся от обтекания обычных шероховатых поверхностей.

Небезинтересными являются результаты работ Н.А. Скнаря и К.Н. Прокофера, которые исследовали не только гидродинамику, но и теплоотдачу при обтекании трехмерных полостей различной геометрии. Результаты этих работ указали на возможность значительной интенсификации теплообмена за счет нанесения углублений на поверхность нагрева.

Большой интерес вызывают работы Г.И. Киндлэ, Г.П. Нагоги и др., в которых предлагается способ интенсификации теплообмена за счет формирования на исходно гладкой поверхности шахматно-упорядоченной системы сферических углублений. При обтекании таких поверхностей обнаружены и, в общих чертах, исследованы самоорганизующиеся динамические вихревые структуры, истекающие из углублений в виде струй, эволюционирующих в широком диапазоне скоростей и режимов течения. Авторы этих работ указывают, что существенная интенсификация теплообмена происходит без опережающего роста гидродинамического сопротивления.

Поскольку в настоящее время практически отсутствуют экспериментальные данные по распределению средних и пульсационных характеристик динамического и теплового турбулентного слоя на поверхностях, профилированных системами трехмерных углублений в условиях внешнего обтекания, а также учитывая расхождения опубликованных данных по уровню достигаемой интенсификации теплообмена и во взглядах на механизмы переноса во впадинах необходима проверка возможности реализации и степени достигаемой интенсификации в условиях внешнего турбулентного обтекания при различной плотности профилирования.

Предполагая, что обтекание профилированной углублениями поверхности определяется механизмом течения в одиночном углублении, необходимо исследовать картину течения потока в одиночном углублении для выявления реализующихся в нем механизмов переноса и создания физической модели течения.

Таким образом, задачей настоящего исследования является получение новых экспериментальных данных по трению и теплоотдаче, распределениям средних и пульсационных характеристик динамического и теплового пограничного слоя, развивающегося на поверхностях, профилированных упорядоченными системами сферических углублений разной плотности и геометрии.

а также исследование трения и теплоотдачи при обтекании одиночной сферической лунки для создания физической модели течения в одиночном сферическом углублении.

Вторая глава содержит описание методики экспериментального исследования. В ней дано описание аэродинамического стенда, проводится анализ погрешностей прямых и косвенных измерений.

Основным узлом экспериментального стенда для диагностики пограничного слоя является дозвуковая аэродинамическая труба открытого типа, работающая по принципу всасывания. Рабочая часть аэродинамической трубы представляет собой параллелепипед с размерами 80 x 300 x 110 мм. Рабочий участок является нижней стенкой рабочей части аэродинамической трубы, на которой размещаются исследуемые рабочие элементы. В рабочем участке экспериментального стенда размещена нагревательная панель, позволяющая нагревать рабочий элемент по закону $q = \text{const}$. Схема рабочего участка показана на рис. 2.

В качестве рабочих элементов в данном экспериментальном исследовании использовались десять стальных пластин, одна из которых имела гладкую поверхность, а девять – поверхности, формованные регулярными решетками сферических углублений различной геометрии, обеспечивающими безотрывное течение потока в лунке. Геометрические параметры рабочих поверхностей, представлены на рис. 3 и в табл. I.

Известно, что качество теплообменной поверхности оказывает существенное влияние на процессы переноса в пограничном слое, поэтому интенсивность теплоотдачи, в некоторой степени зависит от технологии изготовления рабочих элементов. В настоящей работе использовались рабочие элементы, изготовленные механической обработкой с последующей полировкой поверхности.

Все измерения проводились с использованием комбинированного микрозонда типа Пито-Прандтля, предназначенного для диагностики пограничного слоя, и термоанемометрического комплекта 55М фирмы "DISA Electronics". Для измерения средних и пульсационных характеристик течения использовались стандартные одноточечные прямые датчики с диаметром чувствительного элемента 2,5 мм.

Подробное описание принципа работы термоанемометра и методика измерений основных характеристик турбулентного пограничного слоя опубликовано во многих работах Е.В. Шишова, Е.У. Репика и др.

Проведенный анализ погрешностей измерений показал хорошее соответ-

ствие величин полученных ошибок с общепринятыми значениями для аналогичных работ по диагностике пограничного слоя.

Третья глава посвящена описанию и анализу результатов, полученных в экспериментах на профилированных сферическими углублениями поверхностях.

Настоящее исследование велось в условиях естественного перехода от ламинарного течения к турбулентному. В табл. 2 представлены полученные результаты по гидродинамике и теплообмену на профилированных поверхностях.

На рис. 4 представлены безразмерные профили скорости и температуры в исследуемом течении в сравнении с гладкой стенкой. Очевидно, что наличие решетки сферических углублений не оказывает заметного влияния на профили скорости, в то время как профили температуры оказываются более заполненными. Такой же вывод можно сделать и из анализа рис. 5, на котором показано распределение средней скорости и температуры в координатах стенки. Очевидно, что распределение температур в координатах стенки указывает на наличие существенной интенсификации теплоотдачи в зависимости от плотности профилирования поверхности теплообмена.

Анализ распределения продольных пульсаций скорости и пульсаций температуры, представленных на рис. 6, показывает, что на профилированных поверхностях максимум пульсаций, характеризующий положение границы вязкого подслоя, смещается в сторону стенки, что свидетельствует об уменьшении толщины вязкого подслоя и, как следствие, об интенсификации теплоотдачи.

На рис. 7 представлены полученные значения локальных коэффициентов трения и чисел Стантона в зависимости от числа Рейнольдса в сравнении с известными законами трения и теплообмена. Из анализа рис. 7 видно, что по сравнению с гладкой стенкой на профилированных поверхностях имеет место существенная интенсификация теплоотдачи (до 35-40%) при неизменности гидродинамического сопротивления. В результате обобщения данных по теплообмену была получена следующая зависимость для инженерной оценки коэффициента теплоотдачи на исследованных поверхностях со сферическими углублениями:

$$St_p = 0.0144(1+f/2)(P_p/P_o)(Re_p^{**})^{-0.25}.$$

Из сравнительного анализа полученных результатов с известными данными по другим способам интенсификации, можно заключить, что исследуемый способ интенсификации теплообмена является наиболее предпочтительным по

сравнению с известными способами как в условиях внутренней задачи, так и при внешнем обтекании.

Четвертая глава содержит результаты экспериментального исследования течения в одиночном углублении при безотрывном и отрывном обтекании его потоком воздуха. Проводится анализ полученных данных и предлагается физическая модель течения.

В табл. 3 представлены основные полученные результаты по безотрывному обтеканию одиночного оферического углубления, диаметром 37,5 мм и глубиной 2,5 мм. Схема точек замера показана на рис. 8.

Анализируя изменение профиля средней скорости и ее продольной пульсации в точках центрального продольного сечения (точки 1-9), можно сделать вывод о том, что при входе потока в углубление (точки 3, 4, 5) наблюдается типичное диффузорное течение, т. е. торможение потока, которое приводит к меньшей заполненности профиля скорости, что отражается на резком увеличении формпараметра N . На диффузорность течения указывает и появление второго максимума в распределении продольных пульсаций скорости в этой области. При выходе из лунки (точки 6, 7) поток ускоряется, профиль скорости становится более заполненным и, как следствие, уменьшается значение формпараметра N , приближаясь к значению на плоской стенке. Наибольшая заполненность профиля скорости наблюдается на выходе из лунки в точке 8, где происходит столкновение потока, движущегося над лункой, с потоком, выходящим из углубления. Это вытекает из анализа распределения продольных пульсаций скорости, которые еще имеют в пристенной области два максимума. В точке 9 поток вновь приходит к состоянию точки 1 при некотором незначительном влиянии лунки.

При анализе изменения распределения температуры и ее пульсаций в центральном продольном сечении можно отметить также как и в случае скорости меньшую заполненность профиля температуры на входе в лунку, причем эта деформация несколько меньше, чем у соответствующего профиля скорости, т. е. профили температуры, деформируясь, все же остаются более заполненными на всем протяжении углубления по сравнению с соответствующими профилями скорости. Необходимо отметить, что практически во всех исследуемых точках максимум продольных пульсаций скорости у стенки всегда выше соответствующего максимума пульсаций температуры, кроме точек на выходе из углубления.

На рис. 9 представлены распределения локального коэффициента трения и числа Стантона вдоль центрального продольного сечения лунки. Оче-

видно, что изменение данных характеристик указывает на существенную интенсификацию теплообмена над лункой, о чем ясно свидетельствует распределение параметра, характеризующего аналогию Рейнольдса ($2St/Gr$), также показанное на рис. 9.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что при обтекании сферического углубления в условиях безотрывного течения потока в лунке, вихрь не обнаружен и, следовательно интенсификация теплоотдачи в этом случае может достигаться лишь за счет влияния градиента давления, создаваемого деформацией поверхности обтекания (эффект диффузно-конфузорного течения в таких углублениях), влияния трехмерности этой деформации и частично за счет уменьшения толщины ламинарного подслоя.

Анализ известных работ, в которых исследовался данный способ интенсификации теплообмена, указывает на существенную зависимость уровня достигаемой эффективности поверхности в зависимости от геометрического параметра углубления D/h .

В связи с этим была исследована одиночная сферическая лунка диаметром $d=36$ мм, глубиной $h=8$ мм. Такая геометрия лунки была выбрана из соображений удобства сравнения результатов эксперимента с данными работы Г.И. Кикнадзе с сотрудниками, в которой исследовалось течение около лунки диаметром $d=36$ мм и глубиной $h=10$ мм и был получен максимальный из известных эффектов. Полученные результаты приведены в табл. 4, а схема точек замера показана на рис. 8.

Анализ результатов измерений показал наличие в исследуемом углублении отрывной картины течения.

На рис. 10 представлены распределения локальных коэффициентов трения и чисел Стантона в центральном продольном сечении лунки. Из анализа рис. 10 видно, что распределение чисел Стантона аналогично соответствующему распределению для случая "мелкой" лунки, а трение в такой лунке значительно ниже. Следовательно, эффективность "глубокой" лунки должна быть значительно выше. Однако, однозначно судить о влиянии глубины лунки на ее эффективность довольно сложно ввиду существенной многопараметровости данной задачи.

Приведенные в настоящей работе экспериментальные данные позволяют представить картину отрывного течения в сферической лунке следующим образом (рис. 11).

Набегающий поток теплоносителя при входе в лунку срывается с ее передней кромки, дополнительно турбулизируется, перемешивается с находящейся

ся в углублении жидкостью и увлекает частицы жидкости из зоны смешения в основное течение. Поток теплоносителя, двигаясь в направлении основного течения, стабилизируется в окрестности точек 6 и 7 с противоположной стенок лунки и тормозится, вызывая при этом повышение давления в зоне присоединения и формируя возвратное течение.

Уровень повышения давления зависит от угла натекания потока на поверхность лунки, что, в значительной степени, определяется геометрическим параметром лунки D/h и режимом течения. Однако, при $D/h > 15$ в лунке реализуется безотрывной режим течения и механизм переноса полностью определяется градиентом давления, возникающего за счет деформации поверхности обтекания (эффект диффузорно-конфузорного течения). Этот факт подтверждается результатами исследований "мелкой" лунки. Следовательно, существует некоторое критическое значение параметра D/h , при достижении которого начинается образование обратного тока внутри лунки.

Возвратный поток, испытывая влияние геометрии лунки и структуры периферийных слоев сужается и движется из зоны повышенного давления (точки 6 и 7) в область пониженного давления, т.е. к началу углубления (точки 3 и 4). Это приводит к образованию вихревой структуры, поперечно уложенной в лунку и замыкающейся на боковых поверхностях углубления. Перетекание жидкости от центра к периферии усиливает импульс боковых течений в лунке. Кроме того, на краю периферийной области существуют участки безотрывного обтекания, которые граничат с вихревой зоной. На этой границе усиливается процесс смешения вихревой зоны и внешнего течения, что приводит к усилению циркуляции вихря.

Усилению циркуляции такой вихревой структуры способствуют, в значительной мере, вихри Тейлора-Гертлера, формирующиеся на вогнутой поверхности и выполняющие роль своего рода газовых подшипников, на которых вращается "подковообразный" вихрь. По мере усиления циркуляции этого вихря на него со стороны порождающего его потока начинает действовать подъемная сила, выталкивающая его из лунки и выравнивающая его пространственную структуру, что, в свою очередь, приводит к увеличению всасывания в вихрь сплошной среды и вынос последней через торцы вихря. При этом надо отметить, что в силу симметрии оферической лунки, предистория порождающего "подковообразный" вихрь потока может влиять на вынос массы теплоносителя через тот или иной торец вихря. Как указывают авторы [68] течение с правой или левой асимметрией является устойчивым, а переключения, вероятно, связаны с наличием редких флуктуаций потока большой интенсивности. Сред-

нее время между асимметричными переключениями в опытах [68] изменялось от нескольких минут (при 4 м/с) до долей секунды (при 15 м/с).

Таким образом, вынос потока массы через тот или иной торец вихря будет ослаблять сопряжение этого торца с поверхностью и под действием подъемной силы выносить его в область внешнего течения под углом, примерно, 45° к продольной оси лунки. Это подтверждается характером изменения пульсаций скорости и температуры в этой области.

Пятая глава посвящена численному расчету трения и теплообмена при поперечном обтекании одиночной цилиндрической траншеи и системы цилиндрических траншей. Расчет производился с использованием программного комплекса ДСИТ, созданного на базе известного метода С. Патанкара и адаптированного для пользователей В.П. Юзовым. Полученные в результате расчета значения коэффициентов трения и теплоотдачи по поверхности одиночной цилиндрической траншеи показали хорошее соответствие с экспериментальными данными. Результаты расчета трения при поперечном обтекании системы цилиндрических траншей показали невосрастание, а в ряде случаев и снижение гидродинамического сопротивления.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ:

1. Впервые получены профили средней скорости, температуры и распределения их пульсаций по толщине турбулентного пограничного слоя на поверхностях, профилированных шахматно-упорядоченными системами сферических углублений в условиях внешнего обтекания. Как показывают экспериментальные данные регулярная решетка сферических углублений, нанесенная на исходно гладкую поверхность не оказывает какого-либо заметного влияния на гидродинамику течения. Кроме того, максимумы продольных пульсаций скорости и пульсаций температуры смещаются в направлении стенки, что указывает на уменьшение толщины вязкого подслоя и, как следствие, на интенсификацию теплоотдачи.
2. Выявлено влияние плотности профилирования поверхности нагрева на степень достигаемой интенсификации, причем при увеличении плотности профилирования до 70% коэффициент теплоотдачи возрастает на 36-40% по сравнению с гладкой поверхностью.
3. Проведено обобщение полученных экспериментальных данных по теплоотдаче на профилированных сферическими углублениями поверхностях и получена обобщающая зависимость для инженерной оценки теплоотдачи на указанных

поверхностях, а также проведен сравнительный анализ известных методов интенсификации теплообмена, который показал существенное преимущество исследуемого способа интенсификации как в условиях внутренней задачи, так и при внешнем турбулентном обтекании.

4. На основании анализа полученных результатов показано, что основная доля интенсификации теплообмена достигается сферической формой углубления, причем уровень интенсификации теплоотдачи существенно зависит от геометрического параметра лунки D/h : при $D/h = 15$ максимальное значение параметра аналогии Рейнольдса равно 3,6, а при $D/h = 4,5$ значение параметра увеличивается.

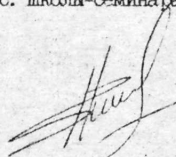
5. На основании экспериментальных данных предложена физическая модель течения в одиночном сферическом углублении. В зависимости от геометрического параметра лунки D/h обнаружена возможность реализации двух механизмов течения в сферической впадине: безотрывного при определяющем влиянии градиента давления за счет деформации обтекаемой поверхности ($D/h = 15$) и отрывного с образованием пространственной динамической вихревой структуры ($D/h = 4,5$).

6. Проведен численный расчет трения и теплоотдачи на поверхности "мелкой" поперечной потоку цилиндрической траншеи. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Кроме того, проведен численный расчет трения при поперечном обтекании системы цилиндрических траншей с различным шагом между ними. Полученные результаты указывают на невосрастание (а в ряде случаев и снижение до 5%) трения по сравнению с гладкой поверхностью.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Самогенерация вихрей как метод интенсификации теплообмена // Теплообмен-ММФ. Конвективный теплообмен: Тезисы докладов. - Минск, 1988. - Ч.1. - С. 8-9

2. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Трение и теплообмен на поверхностях с системой сферических углублений // Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тез. докл. 7 Всес. школы-семинара. - М., 1989. - С. 26



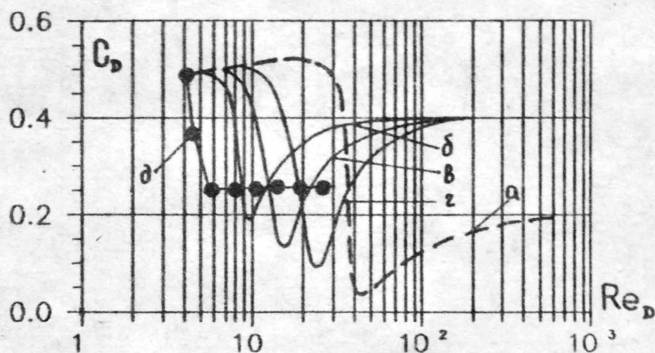


Рис. 1. Зависимость от числа Рейнольдса коэффициента сопротивления:
а - гладкого шара, б, в, г - шероховатых шаров, д - мяча для
игры в гольф



Рис. 2. Конструкция рабочего участка

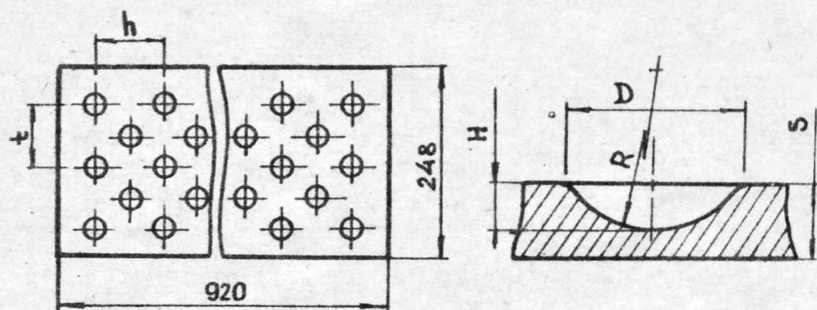


Рис. 3. Геометрические параметры рабочих элементов

Таблица 1

n	B, мм	H, мм	R, мм	t, мм	h, мм	f, %	N
1	7.5	0.5	13.32	13.3	11.5	25	1491
2	6.0	0.4	10.20	10.6	9.1	25	2365
3	4.5	0.3	7.65	8.0	7.5	25	3802
4	7.5	0.5	13.32	9.4	8.1	50	2996
5	6.0	0.4	10.20	7.5	6.5	50	4680
6	4.5	0.3	7.65	5.6	4.9	50	8314
7	7.5	0.5	13.32	8.4	7.3	70	3720
8	6.0	0.4	10.20	6.4	5.5	70	6481
9	4.5	0.3	7.65	4.8	4.2	70	11317

Таблица 2

n	$\delta^* \cdot 10^{-3}$, м	$\delta^{**} \cdot 10^{-3}$, м	$\delta^{**} \cdot 10^{-3}$, м	H	Re	$Cf \cdot 10^3$	Re_{τ}	$St \cdot 10^3$
1	1.99	1.10	1.05	1.44	1362	3.92	1303	2.73
2	1.29	0.91	1.08	1.42	1173	4.39	1395	2.27
3	1.23	0.84	1.04	1.46	937	4.41	1157	3.17
4	1.25	0.86	0.98	1.45	920	4.47	618	3.35
5	1.64	1.15	1.24	1.42	1283	3.98	1375	3.03
6	1.59	1.07	0.97	1.46	1070	4.07	973	3.52
7	1.48	1.02	1.02	1.45	1159	4.29	1151	3.67
8	2.03	1.24	1.09	1.64	1405	4.17	1235	3.42
9	1.42	0.99	0.75	1.43	1093	4.27	824	3.39

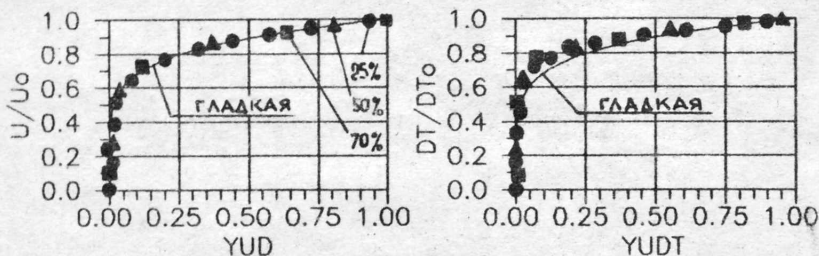


Рис. 4. Безразмерные профили скорости и температуры на профилированных поверхностях

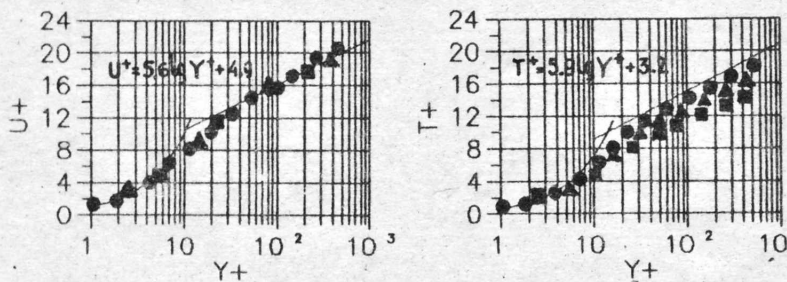


Рис. 5. Логарифмические профили скорости и температуры

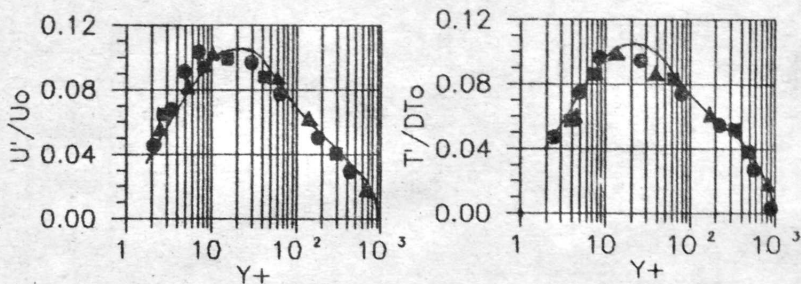


Рис. 6. Распределения пульсаций скорости и температуры в исследуемом пограничном слое

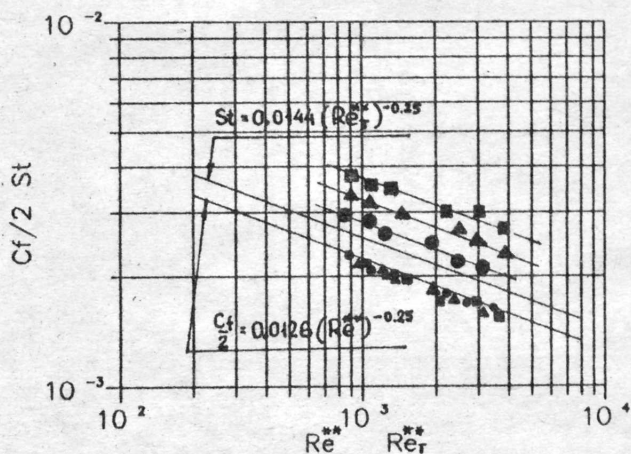


Рис. 7. Трение и теплообмен на профилированных сферическими углублениями поверхностях

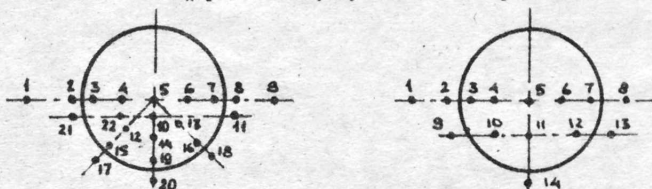


Рис. 8. Схема точек замера в одиночном углублении

Таблица 3

n	$\delta \cdot 10^3$	$\delta^{**} \cdot 10^3$	$\delta^{**'} \cdot 10^3$	n	Re	$C_f \cdot 10^3$	Re_{τ}^{**}	$St \cdot 10^3$
1	1.67	1.14	0.87	1.46	1343	4.28	1026	3.12
2	1.53	1.08	1.06	1.41	1272	4.21	1251	2.79
3	1.58	1.09	1.01	1.45	1286	3.27	1192	2.86
4	2.46	1.41	1.07	1.74	1638	1.45	1242	2.56
5	3.13	1.86	1.30	1.68	2046	2.08	1428	3.12
6	2.70	1.68	1.29	1.60	1755	2.82	1344	3.39
7	2.03	1.36	1.02	1.49	1432	3.56	1071	3.09
8	1.67	1.20	1.03	1.39	1263	4.10	1089	3.30

Таблица 4

n	$\delta \cdot 10^3$	$\delta^{**} \cdot 10^3$	$\delta^{**'} \cdot 10^3$	n	Re	$C_f \cdot 10^3$	Re_{τ}^{**}	$St \cdot 10^3$
1	1.79	1.26	1.24	1.43	1449	4.46	1431	3.12
2	1.85	1.30	1.16	1.42	1493	4.02	1251	3.09
3	3.26	1.51	1.36	2.16	1729	1.67	1585	2.79
4	5.74	1.86	1.77	2.93	2206	0.75	1990	2.93
5	6.95	2.50	2.66	2.78	2833	1.73	3011	3.34
6	5.60	2.30	1.54	2.43	2604	1.51	1743	3.18
7	3.66	1.87	1.39	1.98	2098	1.43	1558	3.28
8	1.68	1.20	1.19	1.41	1356	4.10	1350	2.97

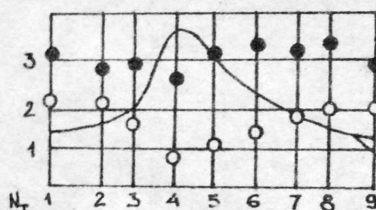


Рис. 9. Распределения локальных коэффициентов трения и чисел Стантона в центральном продольном сечении "мелкой" лунки

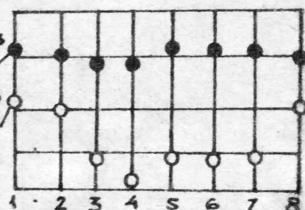


Рис. 10. Распределения локальных коэффициентов трения и чисел Стантона в центральном продольном сечении "глубокой" лунки

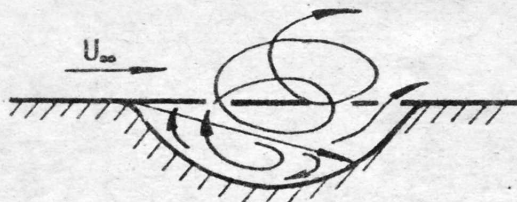


Рис. 11. Физическая модель течения в одиночном сферическом углублении