

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

---


На правах рукописи

КУЗЬМИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В ТУРБУЛЕНТНОМ  
ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ВЫПУКЛОЙ ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

05.14.05 - Теоретическая теплотехника

А в т о р е ф е р а т



диссертации на соискание  
ученой степени кандидата  
технических наук

Киев - 1995



00689680 (.)

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте технической теплофизики  
Национальной Академии наук Украины

Научный руководитель - докт.техн. наук,  
чл.-кор. НАН Украины,  
академик Аэрокосмической  
Академии Украины ХАЛАТОВ А.А.

Официальные оппоненты - докт.техн. наук,  
профессор ЭПИК Э.Я.  
- канд.техн. наук,  
доцент КАПИТАНЧУК К.И.

Ведущее предприятие - Национальный  
Технический Университет (КПИ) (г.Киев)

Защита состоится "9" января 1996 г. в "13" <sup>30</sup> часов на  
заседании специализированного ученого совета К 50.04.03 в  
Институте технической теплофизики НАН Украины по адресу:  
252057, г.Киев-57, ул.Желябова, 2<sup>а</sup>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института технической теплофизики НАН Украины.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета  
канд. техн. наук

Г.Р.Кудрицкий

Актуальность темы.

В настоящее время во многих технических приложениях используются вдув или отсос газа через проницаемые поверхности. Исследования влияния вдува и отсоса на процессы в пограничном слое на плоских проницаемых пластинах при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения проводились в работах Ершэнко и Зайчика с соавторами, Кутателадзе и Леонтьева, Миронова с соавторами, Лапина, Мюфрата и Кэйса и др. Расчетам характеристик пограничных слоев со вдувом посвящены работы Киннея, Леонтьева, Ершэнко и Зайчика, Мотулевича, Мугалева, Плетчера и др.

Течения в трубах с проницаемыми стенками исследовали Фэфурин с соавторами, Эккерт и Роди и др.

Проведенные исследования показали, что вдув представляет собой один из наиболее эффективных и перспективных способов тепло- и массозащиты элементов конструкций энергетических установок и летательных аппаратов, работающих при высоких тепловых нагрузках или в химически активных средах. Однако основная масса элементов в технике имеет криволинейные поверхности. Влияние кривизны на параметры пограничного слоя при самых различных внешних воздействиях изучалось в последнее время достаточно интенсивно и в нашей стране, и за рубежом. Результаты исследований, приведенные в работах Брэдшоу, Соу и Меллора, Гиллиса и Джонстона, Рамаприана и Шивапраасада, Гиббсона с соавторами, Устименко, Шукина, Дворникова, Халатова с соавторами и др., показали что эффекты кривизны в диапазоне  $\frac{c^{**}}{R_w} \geq 0.0005$  оказывают существенное влияние на количественные характеристики турбулентного пограничного слоя, законы трения и теплообмена. Изучено совместное влияние кривизны и градиента давления, неизотермичности; эффективность газовой завесы на криволинейных поверхностях и т.д. Однако, работ, посвященных исследованию совместного влияния пористого вдува и кривизны поверхности на процессы переноса в турбулентном пограничном слое, опубликовано очень мало. Автору известна только одна работа Н. Yamaguchi, выполненная в данном направлении.

Цель работы состоит в изучении теплообмена и гидродинами-

ки на выпуклой проницаемой поверхности в условиях безградиентного обтекания при перпендикулярном вдуве, разработке на этой основе методов расчета таких течений, а также рекомендаций по выполнению инженерных расчетов характеристик турбулентного пограничного слоя применительно к рабочим и технологическим процессам, термогазодинамике теплоэнергетических машин и установок, системам охлаждения элементов конструкций изделий авиационной и космической техники.

### Научная новизна.

1. Развитие полуэмпирической модели турбулентной вязкости Себиси - Смита, разработанной для плоских проницаемых пластин, на случай сильно искривленных выпуклых поверхностей с учетом нелинейности влияния кривизны на характеристики турбулентного пограничного слоя.

2. С помощью разработанной математической модели и программы расчета проведено численное моделирование и получены зависимости для расчета локальных и интегральных характеристик турбулентного пограничного слоя при совместном воздействии кривизны и пористого однородного вдува с поверхности.

3. Выполнено распространение теории мультипликативности на случай криволинейных турбулентных потоков, предложена методика, позволяющая пользоваться ее основными положениями для расчетов турбулентного пограничного слоя на выпуклых проницаемых поверхностях.

Практическая ценность защищаемой работы заключается в разработке физически обоснованных методов и рекомендаций по расчету турбулентного пограничного слоя на пористой выпуклой поверхности при слабых, умеренных и сильных вдувах и безградиентном обтекании, основанных на применении положений теории мультипликативности, распространенных на случай криволинейных квазиизотермических потоков со вдувом. Полученные результаты могут использоваться для более точных расчетов тепло- газодинамических процессов в установках общего и специального назначения, оптимизации технологических процессов и характеристик новых устройств.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов математического моделирова-

ния и средств вычислительной техники, удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных на этапах тестирования программы.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертационной работы доложены и получили одобрение на XIX конференции молодых ученых и специалистов ИТФ АН Украины (г.Київ, 1990); на IV Всесоюзной школе-семинаре "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (г.Алушта, 1991); научных семинарах кафедр "Воздушно-реактивных двигателей" и "Теоретических основ теплотехники" КГТУ (КАИ) им. А.Н.Туполева (г.Казань, 1992); научно-технических семинарах отдела высокотемпературной термогазодинамики ИТФ НАН Украины (г.Київ).

**Личный вклад автора.** Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано четыре печатные работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков. Список использованной литературы включает 104 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен обзор современного состояния рассматриваемой проблемы и сделана постановка задач исследования. В обзоре рассмотрены физические особенности течения и теплообмена около криволинейных поверхностей, приводятся дифференциальные уравнения пограничных слоев с продольной кривизной, полумпирические модели для расчета турбулентных касательных напряжений и тепловых потоков с помощью гипотезы длины пути перемешивания Л.Прандтля. Представлены результаты экспериментальных исследований Брэдшоу, Саймона, Гиллиса и Джонстона и других зарубежных и отечественных ученых, характеризующие влияние кривизны на локальные и интегральные характеристики пограничного слоя. Показано, что параметры пограничного слоя существенно

изменяются под воздействием кривизны. В конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе дано описание используемой математической модели турбулентного пограничного слоя с учетом пористого вдува, представлен алгоритм расчета. За основу взята система дифференциальных уравнений турбулентного пограничного слоя на криволинейных поверхностях. Для расчета коэффициента турбулентной вязкости использовалась модель, предложенная П.Брэдшоу и модифицированная для случая сильно искривленных потоков:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \mathcal{F}(Rt). \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_0$  - коэффициент турбулентной вязкости при течении около плоской поверхности,  $\mathcal{F}(Rt)$  - поправка на кривизну поверхности,  $Rt = \frac{2u}{R_w \cdot (\partial u / \partial r)}$  - число Ричардсона. Анализ многочисленных экспериментальных данных позволил автору совместно с сотрудниками отдела ВТТД ИТФ НАН Украины Иконниковой и Халатовым получить следующее выражение для расчета поправки на кривизну в модели турбулентной вязкости:

$$\mathcal{F}(Rt) = f \cdot |f|$$

$$f = \frac{1}{1 + \exp(-3.0Rt)} = \exp(-3.0Rt) - 3.5Rt^2 + 1.2Rt + 0.3b \quad (2)$$

$$b = \begin{cases} 0 & \text{при } Rt = 0, \\ 1 & \text{при } Rt > 0 \end{cases}$$

Расчет коэффициента  $\varepsilon_0$  выполнялся с помощью двухслойной модели Себеси - Смита.

При расчете теплообмена на основе анализа результатов различных исследователей было сделано допущение о неизменности значения  $Pr_t$  на выпуклой поверхности по сравнению с плоской пластиной. Исследованиями Себеси и Смита показано, что для газов, у которых молекулярное число  $Pr$  близко к единице, на плоской поверхности можно с достаточно хорошей точностью использовать постоянное по толщине пограничного слоя значение  $Pr_t = 0.9$ .

Учет этих замечаний позволил заложить постоянную величину  $Pr_t = 0.9$  в математическую модель, используемую в данной работе.

Система дифференциальных уравнений пограничного слоя решалась численным методом, основанным на шеститочечной неявной разностной схеме. Характеристики потока во внешней области рассчитывались из условия  $u \cdot r = \text{const}$ .

В третьей главе представлены результаты тестирования созданной программы. В процессе выполнения тестовых расчетов проводилось сравнение расчетных и экспериментальных данных, представленных в работах Федяевского с соавторами, Дыбана и Эпик с соавторами, Кутателадзе и Леонтьева, Ерошенко и Зайчика с соавторами, Миронова, Луговского, Соу и Меллора, Гиллиса и Джонстона, Рамаприана и Шивапраасада и др. по степенным и универсальным профилям скоростей и температур, распределению касательных напряжений по толщине турбулентного пограничного слоя, коэффициенту трения  $C_f$  и числу Стантона  $St$ , интегральным характеристикам пограничного слоя и формпараметру  $H$ . Широкий спектр параметров тестирования обеспечивал достаточные условия для определения достоверности расчетов.

Сравнительный анализ выполнялся на основе большого количества надежных экспериментальных, расчетных и аналитических данных по безградиентному течению и теплообмену на плоской непроницаемой и выпуклой непроницаемой поверхностях, плоской проницаемой поверхности. Кроме того, для проверки адекватности используемой модели турбулентной вязкости были проведены расчеты параметров пограничного слоя на выпуклой проницаемой поверхности по условиям эксперимента Н. Yamaguchi.

Полученные результаты позволили сформировать банк данных, использовавшийся в дальнейшем для сравнения с результатами последующего численного исследования развития турбулентного пограничного слоя на проницаемой выпуклой поверхности.

В четвертой главе изложены результаты численного исследования турбулентного пограничного слоя на выпуклых проницаемых поверхностях. С целью получения наиболее полной информации о совместном воздействии выпуклой кривизны и пористого вдува на характеристики пограничного слоя были

проведены вариантыные расчеты. Диапазоны изменения основных расчетных параметров выбирались максимально приближенными к реальным физическим условиям и составляли следующие значения:

параметр кривизны	$\frac{\delta^{***}}{R_w}$ .....	0 ... 0.008
относительная скорость вдува	$m = \frac{v_w}{U_e}$ .....	0 ... 0.03
параметр вдува	$b = \frac{2 \cdot m}{C_f}$ .....	0 ... 10
числа Рейнольдса	$Re^{***}, Re_{\tau}^{***}$ .....	1000 ... 15000

В процессе проведения расчетов было получено, что совместное влияние кривизны и вдува на профили средней скорости в пограничном слое вызывает более интенсивную деформацию профилей по сравнению с деформацией профилей под воздействием каждого из факторов в отдельности. Объясняется это тем, что вдув и кривизна действуют на профили скорости в одном направлении: под влиянием каждого из этих факторов происходит уменьшение заполненности профилей. Сравнительный анализ деформаций профилей скорости, вызванных воздействием кривизны поверхности на непроницаемой пластине и при вдуве с поверхности, позволил сделать вывод о том, что кривизна и вдув могут считаться взаимонезависимыми параметрами. С математической точки зрения этот вывод характеризует линейность влияния факторов кривизны и вдува на деформацию профилей скорости в турбулентном пограничном слое.

Таким образом, физические области влияния вдува и кривизны поверхности на течение в пограничном слое не пересекаются между собой. Т.е., деформация профиля средней скорости на выпуклой поверхности при наличии однородного вдува в пограничный слой может быть получена в результате суперпозиции соответствующих изменений, происходящих под воздействием отдельно взятых факторов кривизны и вдува.

Представленные на рис.1 профили скорости в координатах закона стенки подтверждают вывод о том, что влияние кривизны поверхности и вдува проявляется в различных областях динамического пограничного слоя. Хорошо заметно, что в то

время как кривизна поверхности вносит основной вклад в искривление внешней области профиля скорости в пограничном слое - области следа, влияние вдува наиболее существенно сказывается в области вязкого подслоя: увеличение скорости вдува вызывает уменьшение толщины вязкого подслоя, что приводит к эквидистантному смещению профиля вниз от непроницаемой поверхности.

Поведение профилей температуры в пограничном слое при совместном влиянии выпуклой кривизны и вдува с поверхности качественно совпадает с реакцией профилей средней скорости на воздействие этих факторов. На основе анализа распределений относительной избыточной температуры по толщине теплового пограничного слоя на выпуклой проницаемой поверхности сделан вывод о подобии полей скоростей и температур и выполнении аналогии Рейнольдса. Это характеризует слабую степень влияния поперечного градиента давления  $\frac{\partial p}{\partial y}$ , присутствующего в криволинейном пограничном слое.

Относительная функция формпараметра  $H = \frac{\delta^{**}}{\delta^*}$  на плоской проницаемой поверхности описывается соотношением:

$$\Psi_b^{**} = \frac{H_b}{H_0} = 1 + 0.05b_0 \quad (3)$$

Полученные расчетом распределения формпараметра на выпуклых проницаемых поверхностях, представленные на рис.2, описываются аналогичными зависимостями:

$$\Psi_{br}^{**} = \frac{H_{br}}{H_0} = 1 + k \cdot b_0 \quad (4)$$

В соотношении (4) вместо константы 0.05 присутствует переменный коэффициент  $k$ . Анализ расчетных распределений  $\Psi_{br}^{**}$  позволил сделать вывод о том, что коэффициент  $k$  с ростом параметра кривизны  $\frac{\delta^{**}}{R_w}$  возрастает. Обработка расчетных данных позволила получить следующую зависимость коэффициента  $k$  в законе изменения формпараметра  $H$  от параметра кривизны:

$$\frac{k}{k_0} = \left[ 1 + 1000 \cdot \frac{\delta^{**}}{R_w} \right]^{0.19} \quad (5)$$

где  $k_0$  - значение коэффициента  $k$  на плоской проницаемой пластине. Внешний вид этой зависимости показан на рис.3.

Полученное соотношение (5) может быть использовано

совместно с зависимостью (4) как для решения интегральных уравнений пограничного слоя, так и для инженерных методов оценки параметров пограничного слоя.

В диссертационной работе получено, что под воздействием выпуклой кривизны на проницаемых поверхностях происходит деформация распределений касательных напряжений, построенных по профилям скорости. На рис.4 представлены рассчитанные распределения касательных напряжений на проницаемых поверхностях различной кривизны. Из анализа полученных зависимостей следует, что относительная величина касательного напряжения на стенке  $\bar{\tau}_w = \frac{\tau_w}{\tau_{\max}}$  не зависит от параметра кривизны  $\frac{\delta^{**}}{R_w}$  и остается величиной постоянной, равной значению этой величины на плоской проницаемой пластине.

Однако, внутри пограничного слоя распределение касательных напряжений по профилю скорости меняется: с ростом кривизны точка максимума касательных напряжений смещается в сторону меньших значений  $\frac{u}{U_p}$ . В то же время качественная картина распределения касательных напряжений остается прежней и может быть описана зависимостями, аналогичными используемым на плоских поверхностях. Анализ этих результатов подтвердил сделанный ранее вывод о линейности влияния факторов кривизны и вдува.

Воздействие выпуклой кривизны на течение около проницаемых поверхностей приводит к изменению законов трения и теплообмена, для которых получены расчетные зависимости, представленные на рис.5. Из анализа расчетных результатов сделан следующий вывод. Интенсивная деформация профилей скорости в пограничном слое на выпуклой проницаемой поверхности под воздействием факторов кривизны и вдува приводит к значительному снижению коэффициентов трения  $C_f$ , по сравнению с величинами на плоской непроницаемой поверхности и ускоряет отрыв пограничного слоя от поверхности. Увеличение параметра кривизны  $\frac{\delta^{**}}{R_w}$  вызывает более быстрое падение коэффициента поверхностного трения. При достижении параметром вдува критического значения коэффициенты поверхностного трения и теплоотдачи становятся настолько малыми, что с практической точки зрения могут быть приняты равными нулю. На рис.5

абсциссы точек пересечения экстраполированных расчетных зависимостей с линией  $\Psi_{br} = 0$  соответствуют величинам критических параметров вдува, характеризующих начало отрыва пограничного слоя. Из рисунка хорошо видно, что с увеличением параметра кривизны происходит уменьшение значений критических параметров вдува. То есть под воздействием кривизны пограничный слой раньше теряет устойчивость на проницаемой поверхности и отесняется от нее. На основе обработки результатов численного эксперимента были получены зависимости критических параметров вдува от кривизны в следующем виде:

$$\frac{b_{кр}}{b_{кpo}} = \left[ 1 + 1000 \cdot \frac{\delta^{**}}{R_w} \right]^{-0.52} \quad (6)$$

$$\frac{b_{ткр}}{b_{ткpo}} = \left[ 1 + 1000 \cdot \frac{\delta^{**}}{R_w} \right]^{-0.53} \quad (7)$$

Внешний вид этих зависимостей показан на рис. 6.

Для получения количественных зависимостей коэффициентов поверхностного трения и теплоотдачи от параметров вдува и кривизны была предпринята попытка обобщения полученных расчетных результатов. Однако, несмотря на качественное сходство всех кривых, приведенных на рисунках, обобщить их одной зависимостью не удалось. Это было объяснено следующим образом. На рисунках приведены зависимости относительной функции вдува  $\Psi_{br}$  от параметра вдува  $b_0$ , вычисляемого по коэффициенту поверхностного трения  $C_{f_0}$  на плоской непроницаемой пластине при условии  $Re^{**} = idem$ . В величине параметра вдува  $b_0$  не присутствуют характеристики кривизны поверхности. Поэтому при обработке расчетных результатов с помощью такого параметра вдува на выпуклых проницаемых поверхностях различной кривизны получаются сильно отличающиеся кривые для относительной функции вдува  $\Psi_{br}$ . В связи с этим в данной работе было предложено ввести в рассмотрение параметр вдува  $b_r$ , который определяется через коэффициент поверхностного трения на выпуклой непроницаемой поверхности:  $b_r = \frac{2 \cdot m}{C_{fr}}$  при  $Re^{**} = idem$ . Этот параметр вдува был условно назван "криволинейным" параметром вдува. Использование для обобщения криволинейного параметра вдува позволило свести все

семейство кривых, приведенных на рис.5, в одну линию, удовлетворительно совпадающую с распределением на плоской проницаемой поверхности, которая хорошо описывается известными соотношениями "пленочной теории":

$$\Psi = \frac{b \cdot \exp(b)}{\exp(b) - 1}, \quad (8)$$

и теории мультипликативности, предложенным С.С.Кутателадзе и А.И.Леонтьевым:

$$\Psi = \left(1 - \frac{b}{b_{кр}}\right)^2 \quad (9)$$

Можно показать, что в данном случае проявляется линейность влияния факторов кривизны и вдува на коэффициент поверхностного трения, так же как и на другие выше рассмотренные характеристики пограничного слоя. Переход от параметра вдува  $b_0$  к криволинейному параметру вдува на самом деле означает исключение влияния кривизны на коэффициент поверхностного трения  $C_{f_r}$ . Действительно, если представить параметр вдува  $b_0$  в виде:

$$b_0 = \frac{2m}{C_{f_0}},$$

а затем числитель и знаменатель этого выражения умножить на коэффициент поверхностного трения  $C_{f_r}$ , соответствующий заданному числу  $Re^{**}$  на выпуклой непроницаемой поверхности, получим следующее соотношение:

$$b_0 = \frac{2m}{C_{f_0}} \cdot \frac{C_{f_r}}{C_{f_r}} = \frac{2m}{C_{f_r}} \cdot \frac{C_{f_r}}{C_{f_0}} = b_r \cdot \Psi_r,$$

где  $\Psi_r$  - функция кривизны в законе трения, а  $b_r$  - криволинейный параметр вдува. Из этого выражения следует, что, для того чтобы перейти от параметра вдува  $b_0$  к  $b_r$ , нужно разделить  $b_0$  на функцию кривизны, а это является процедурой исключения влияния кривизны.

Приведенные рассуждения, а также тот факт, что введение криволинейного параметра вдува  $b_r$  в обобщение результатов численного эксперимента позволяет использовать известные соотношения между функцией вдува  $\Psi_b = \frac{C_{f_b}}{C_{f_{b=0}}}$  и параметром вдува на плоской проницаемой пластине для расчета коэффициента

поверхностного трения на выпуклой проницаемой поверхности, служит доказательством линейности влияния факторов кривизны и вдува на законы трения в турбулентном пограничном слое.

Обобщение расчетных результатов по формпараметру  $H$  с помощью введенного криволинейного параметра вдува приводит, как и в случае с коэффициентом трения  $C_f$ , к объединению всех зависимостей на рис.2 в одну кривую, которая удовлетворительно согласуется с соотношением (3) для плоской проницаемой пластины.

В конце главы предложена методика и даны следующие рекомендации по использованию полученных результатов:

- программа расчета турбулентного пограничного слоя на выпуклых проницаемых поверхностях может быть использована для определения локальных и интегральных характеристик течения в различных технических устройствах и технологических процессах;

- поправка на "сильную кривизну" в модели турбулентной вязкости Себиси-Смита получена в виде, удобном для применения в любых расчетных методиках, использующих модель пути перемешивания Прандтля;

- распространение области действия теории мультипликативности на случай квазиизотермических потоков с искривленными линиями тока в условиях вдува позволяет пользоваться ее основными положениями при расчетах параметров турбулентного пограничного слоя на выпуклой проницаемой поверхности с помощью интегральных уравнений, основываясь на предложенной методике;

- зависимости критических параметров вдува от параметра кривизны поверхности могут быть использованы при анализе предотрывных состояний турбулентного пограничного слоя.

## ВЫВОДЫ

Выполнено численное исследование турбулентного пограничного слоя на выпуклой проницаемой поверхности в условиях однородного пористого вдува. Для диапазона изменения параметра кривизны  $\frac{\delta^{**}}{R_w} = 0 \dots 0.008$ ; чисел Рейнольдса

$Re^{**} = 1000 \dots 15000$  и  $Re_{\tau}^{**} = 1000 \dots 15000$ ; параметров вдува  $b = 0 \dots 10$  и  $b_{\tau} = 0 \dots 10$  сформулированы следующие основные выводы:

1. Развита полуэмпирическая модель турбулентного переноса в пограничном слое на выпуклых проницаемых поверхностях. На основе обобщения экспериментальных данных получена поправка для расчета коэффициента турбулентной вязкости, учитывающая "эффекты сильной кривизны".

2. На основе математической модели изучено совместное влияние выпуклой кривизны и пористого вдува на локальные и интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя, получены новые данные о физической структуре потока, разработаны рекомендации для практических расчетов. Полученные результаты позволили заключить:

2.1. Области внутри турбулентного пограничного слоя, испытывающие на себе влияние выпуклой кривизны и пористого вдува не пересекаются между собой: основное влияние вдув оказывает на пристеночную зону пограничного слоя - вязкий и теплопроводный подслой; действие кривизны сосредоточено, в основном, во внешней части профиля - области следа. Это приводит к выводу о том, что выпуклая кривизна и пористый вдув не оказывают взаимного влияния друг на друга и являются независимыми факторами.

2.2. Подтверждена аналогия Рейнольдса между процессами теплообмена и гидродинамики, что указывает на слабое влияние поперечного градиента давления на поля скоростей и температур около выпуклых проницаемых поверхностей.

2.3. Воздействие выпуклой кривизны приводит к уменьшению величин критических параметров вдува. Получены зависимости для учета влияния кривизны на критические параметры, формпараметр  $H$ , законы трения и теплообмена в пограничном слое на выпуклой проницаемой поверхности.

2.4. Обобщение результатов исследований характеристик турбулентного пограничного слоя, расчет коэффициентов трения и теплоотдачи на выпуклой пористой поверхности при решении интегральных уравнений можно проводить по известным

зависимостям для плоской пластины с использованием криволинейных аналогов параметров вдува.

3. Полученные в диссертации научные результаты могут быть использованы:

3.1. В системах автоматизированного проектирования при многовариантных расчетах тепл.обменных и гидродинамических процессов в проектируемых устройствах с помощью интегральных методов.

3.2. При исследовании внутренних процессов переноса в турбулентных пограничных слоях на проницаемых поверхностях.

3.3. В методиках расчета тепловых и гидродинамических процессов в системах охлаждения и технологических циклах современных энергетических установок.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Иконникова Е.Э., Кузьмин А.В., Халатов А.А. Учет влияния сильной кривизны на характеристики турбулентного пограничного слоя.//Пром.теплотехника. -1992.- 14.- № 4-6.- С.14-18.

2. Кузьмин А.В., Халатов А.А. Гидродинамика изотермических потоков около выпуклой проницаемой поверхности.//Деп. в ГНТБ Украины 6.12.1993, № 2422-УК93.

3. Кузьмин А.В., Халатов А.А. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое на выпуклой пористой поверхности.//Пром. теплотехника.-1994.- 16.- № 4-6, С.9-14.

4. Кузьмин А.В., Халатов А.А. Теплообмен потоков около выпуклой проницаемой поверхности.//Деп. в ГНТБ Украины 03.06.1994, № 1082-УК94.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$u, v$  - продольная и поперечная составляющие скорости;  $R_w$  - радиус кривизны поверхности;  $r = R_w + y$ ;  $y$  - поперечная координата;  $\delta, \delta^*, \delta^{**}$  - толщины пограничного слоя, вытеснения и потери импульса;  $\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_{\max}}$ ;  $\tau$  - касательное напряжение трения;  $\Psi, \Psi^*, \Psi^{**}$  - относительные функции трения, формпараметра и теплоотдачи;  $F^* = \frac{2}{V^*} \cdot [(1 + V^* \cdot u^*)^{1/2} - 1]$  - модифицированная величина универсальной скорости для вдува с поверхности.

## ИНДЕКСЫ

$w, p$  - параметры на стенке, на внешней границе пограничного слоя соответственно;  $\circ$  - стандартные условия (плоская непроницаемая пластина);  $r, b$  - влияние кривизны, влияние вдува соответственно,  $cr$  - критические параметры,  $\tau$  - тепловые характеристики.

## SUMMARY

Kuzmin A.V. Heat transfer and hydrodynamics in the turbulent boundary layer on a convex porous surface.

Thesis for the Degree "Candidate of Technical Sciences". Speciality "Theoretical Thermal Engineering", speciality code 05.14.05. Institute of Engineering Thermophysics, Ukrainian National Academy of Sciences, Kiev, 1995.

Semi-empirical model of turbulent transfer in the boundary layer on convex porous surfaces has been developed. A correction with allowance for the "strong curvature effects" has been obtained on the base of experimental data generalization. The schedule of numerical experiments in the area of turbulent boundary layer on the convex porous surfaces has been carried out. Combined effects of convex curvature and porous blowing on local and integral parameters of the turbulent boundary layer have been studied, new data on the flow's physical structure have been obtained, and

recommendations for practical calculations have been developed.

#### АННОТАЦІЯ

Кузьмін А.В. Теплообмін і гідродинаміка в турбулентному пограничному шарі на випуклій проницаємій поверхності.

Дисертація на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 "Теоретическая теплотехника". Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев, 1995.

Развита полуэмпирическая модель турбулентного переноса в пограничном слое на выпуклых проницаемых поверхностях. На основе обобщения экспериментальных данных получена поправка для расчета коэффициента турбулентной вязкости, учитывающая "эффекты сильной кривизны". Выполнена программа вычислительного эксперимента в области турбулентного пограничного слоя на выпуклых проницаемых поверхностях. Изучено совместное влияние выпуклой кривизны и пористого вдува на локальные и интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя, получены новые данные о физической структуре потока, разработаны рекомендации для практических расчетов.

Ключові слова: пограничний шар, опукла поверхня, вдув, математичне моделювання, теплообмін, тертя.

ЛНБ ім. В. Стефана  
АН України

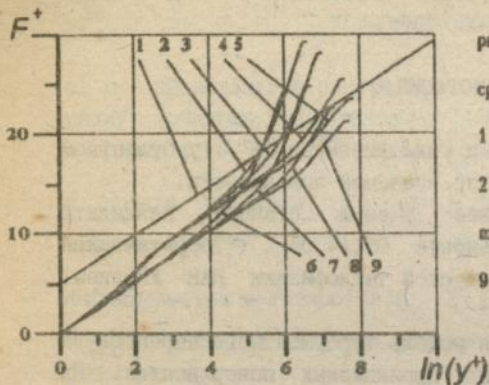


рис.1. Влияние кривизны и адува на профили средней скорости в координатах закона стенки.

1 - ф-ла  $u^+ = 2.44 \ln(y^+) + 5.0$  ;  $m = 0.003$ ;  
 2 -  $\delta^{**}/R_w = 0.0062$ , 3 - 0.0028, 4 - 0.0005, 5 - 0;  
 $m = 0.005$ ; 6 -  $\delta^{**}/R_w = 0.0062$ , 7 - 0.0028, 8 - 0.0005  
 9 - 0.

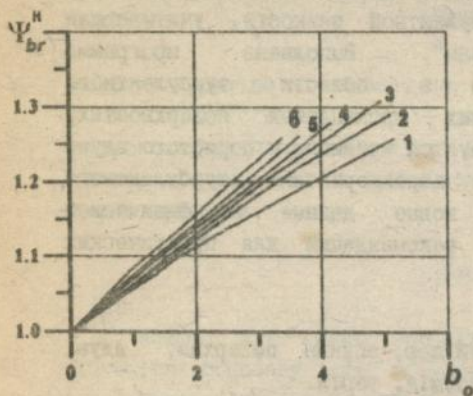


рис.2. Относительная функция формпараметра на проницаемых поверхностях. 1 - плоская,

2 -  $\delta^{**}/R_w = 0.0005$ , 3 - 0.0028, 4 - 0.0041; 5 - 0.0062,  
 6 - 0.0079.

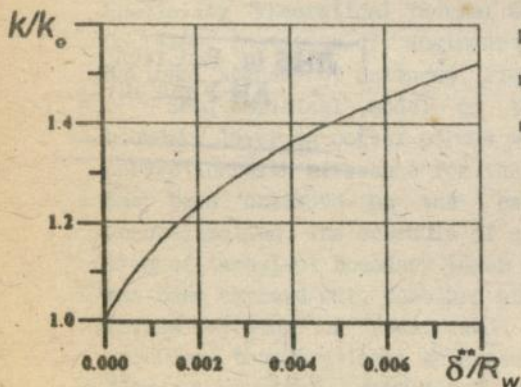


рис.3. Зависимость коэффициента  $k$  в законе изменения формпараметра на проницаемых поверхностях от параметра кривизны.

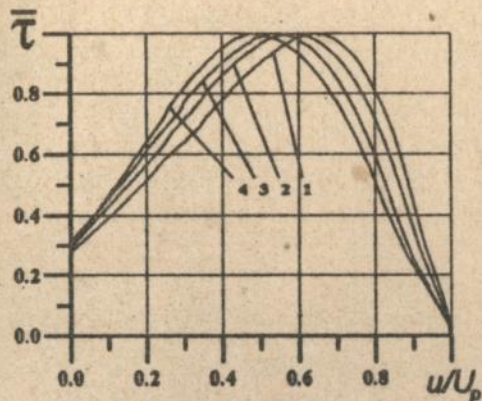


рис.4. Распределение касательных напряжений в турбулентном пограничном слое на пронизываемых поверхностях.  
 $m = 0.005$ : 1 - плоская, 2 -  $\delta^*/R_w = 0.0005$ ; 3 - 0.0028; 4 - 0.0062.

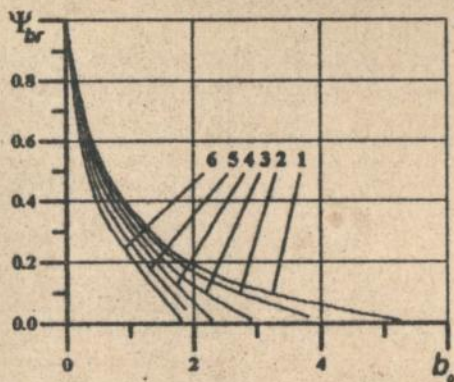


рис.5. Относительный коэффициент трения на пронизываемых поверхностях. 1 - плоская пластина; 2 -  $\delta^*/R_w = 0.0005$ ; 3 - 0.0028; 4 - 0.0041; 5 - 0.0062; 6 - 0.0079.

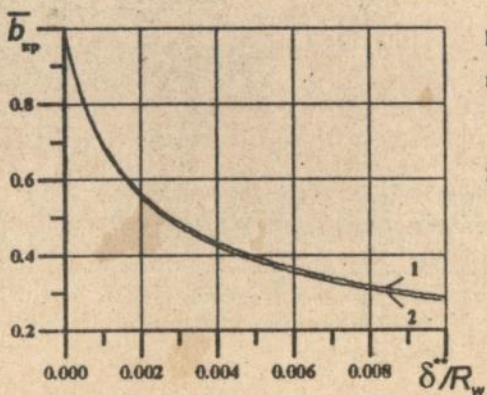


рис.6. Зависимости относительных критических параметров адува от параметра кривизны.  
 1 - гидродинамический параметр адува;  
 2 - тепловой параметр адува.

АВ 33.964

Підп. до друку 23.11.93. Формат 60x86/16. Папір 80г/м<sup>2</sup>. Друк офс.  
Друк офс. Умовн. друк. арк. 2,93. Обл.-вид. арк. 0,6. Тир. 100  
Зам. 5-3024

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Б. Хмельницького, 19.