

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
Институт технической теплофизики

На правах рукописи

ЖЕЛЕЗНАЯ Татьяна Анатольевна

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ  
ТУРБУЛЕНТНОЙ ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ СТРУИ  
ОКОЛО ВОГНУТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Специальность 05.14.05 - Теоретическая теплотехника

АВТОРЕЗЕРВАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

12/9-

Киев - 1996

71534.061  
Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте технической теплофизики НАН Украины

Научный руководитель:

член-корреспондент НАН Украины

А.А. Халатов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник

А.И. Мазур

кандидат технических наук,  
доцент

А.С. Коваленко

Ведущее предприятие: Национальный Технический Университет  
Украины

Защита состоится "23" октября 1996 г. в 13<sup>30</sup> час.  
на заседании специализированного ученого совета К 50.04.03  
в Институте технической теплофизики НАН Украины по адресу:  
252057, г.Киев - 57, ул. Желябова, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН Украины.

Автореферат разослан "13" ноября 1996 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета  
доктор технических наук

Г.Р. Кудрицкий

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

ЛННБ України



00740440 (J)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание экономичных, высокоэффективных и надежных теплоэнергетических машин и установок продолжает оставаться одной из актуальных задач современного энергомашиностроения. Проточная часть многих устройств в теплоэнергетике, авиационной, ракетной и других областях техники представляет собой криволинейные (выпуклые, вогнутые) поверхности. Полуограниченные (пристенные) струи около таких поверхностей используются для их тепловой защиты и термостабилизации, совершенствования и интенсификации тепломассообменных процессов; в струйной технике, гидротехнике и т.д.

Методы расчета криволинейных полуограниченных струй должны обязательно учитывать влияние эффектов продольной кривизны поверхности на турбулентный перенос импульса и тепла, законы трения и теплообмена, локальные и интегральные характеристики потока.

Особый практический интерес представляют процессы теплообмена и гидродинамики около вогнутых поверхностей, где центробежные массовые силы имеют активный характер воздействия в пристеночной области течения и стабилизирующий - в струйной области.

Степень исследованности. Из анализа опубликованной литературы следует, что результаты исследований, посвященных изучению турбулентных полуограниченных струй около вогнутой поверхности, не дают пока целостного представления об особенностях процессов теплообмена и гидродинамики. Практически отсутствуют данные по турбулентной структуре в пристеночной области сдвигового течения, противоречивыми являются сведения о коэффициенте трения на вогнутой поверхности. Имеющиеся в настоящее время методы расчета не в полной мере учитывают все особенности влияния продольной кривизны на физическую структуру и закономерности теплообмена, а существующие экспериментальные данные получены в ограниченном диапазоне изменения определяющих параметров.

Цель работы состоит в исследовании теплообмена и гидродинамики турбулентной полуограниченной струи прямоугольной формы около вогнутой поверхности при несжимаемом течении воздуха с постоянными физическими свойствами, расширении современных пред-

ставлений об осредненной и пульсационной структурах такого течения, разработке метода расчета криволинейной полуограниченной струи и выработке рекомендаций по расчету для практического использования полученных результатов.

Научная новизна:

1. Получены расчетные данные, дополняющие и расширяющие современные представления о физической структуре и закономерностях осредненного течения, турбулентности и локального теплообмена полуограниченной воздушной струи прямоугольной формы около вогнутой поверхности постоянного радиуса кривизны.

2. На основе обобщения расчетных данных получены:

2.1. Уравнение подобия для локального теплообмена, учитывающее влияние кривизны линий тока на локальную теплоотдачу.

2.2. Уравнение для расчета коэффициента трения.

2.3. Уравнения для определения характеристик осредненного течения, закономерностей турбулентного переноса импульса в пристеночной и струйной областях течения полуограниченной струи.

Предмет и метод исследования. Основным предметом исследования в работе являются процессы турбулентного переноса тепла и импульса, имеющие место при течении полуограниченной струи около вогнутой поверхности. Изучение данных процессов проводилось с использованием методов математического моделирования при реализации широкого комплекса вычислительных экспериментов.

Автор защищает:

1. Метод расчета турбулентной полуограниченной струи около вогнутой поверхности.

2. Результаты расчета по локальному теплообмену, осредненной и турбулентной структурах полуограниченной воздушной струи около вогнутой поверхности при изменении параметра кривизны  $\delta_m/|R_w|$  от 0 до  $2 \cdot 10^{-2}$  и числа Рейнольдса  $Re_m$  от  $2 \cdot 10^4$  до  $1,1 \cdot 10^5$ .

3. Обобщающие зависимости для характеристик осредненного течения, закономерностей турбулентного переноса импульса в пристеночной и струйной областях течения струи, локального теплообмена и коэффициента трения, которые аппроксимируют результаты расчета в указанном диапазоне изменения определяющих параметров.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Получены обобщающие зависимости, которые могут быть использованы для теплового и гидромеханического расчета элементов теп-

лоэнергетического оборудования, объектов авиационной и ракетной техники, систем их охлаждения, движения газовых и жидких сред в гидротехнических сооружениях и т.д.

Результаты настоящей работы использованы в учебном процессе в Украинском государственном университете пищевых технологий, а также в Институте технической теплофизики НАН Украины при выполнении темы ГНТ "Разработка математических моделей и пакета прикладных программ для расчета теплового состояния элементов энергетических газовых турбин" (шифр 05.51.01/032-92, номер гос. регистрации 5.1.1.25).

Обоснованность и достоверность результатов проведенного исследования обусловлена корректным использованием современных методов математического моделирования и современной вычислительной техники, удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, высокой точностью расчетов.

Личный вклад автора.

- сформулирована уточненная математическая модель процессов теплообмена и гидродинамики при течении турбулентной полуограниченной струи около вогнутой поверхности;
- создана программа, реализующая разработанные методические приемы и алгоритмы расчета;
- проведен вычислительный эксперимент по исследованию закономерностей процессов теплообмена и гидродинамики турбулентной струи, распространяющейся около вогнутой поверхности;
- получены зависимости, обобщающие результаты расчетов.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались и получили одобрение на международной конференции "Интенсификация теплообмена в энергомашиностроении" и 10-й международной школе-семинаре молодых ученых и специалистов МГУ им. Н.Э.Баумана (г.Москва, 1995 г.); обсуждались на научных семинарах в Институте технической теплофизики и в Национальном Техническом Университете.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 4 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, пяти приложений.

Объем диссертации составляет 119 страниц, в том числе I

таблица и 60 рисунков. Список использованной литературы включает 139 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны важность и актуальность темы диссертации, обоснована цель работы.

В первой главе рассмотрены основные области использования криволинейных полуограниченных струй в технике, указаны их основные особенности. Выполнен обзор современного состояния рассматриваемой проблемы и сделана постановка задач исследования.

В обзоре представлены экспериментальные и расчетные данные по влиянию продольной кривизны поверхности на осредненные, пульсационные характеристики, локальный теплообмен и поверхностное трение криволинейных полуограниченных струй. Показано, что вогнутая ( $\delta_m/R_w < 0$ ) и выпуклая ( $\delta_m/R_w > 0$ ) кривизна оказывает существенное влияние на характеристики полуограниченной струи в широком диапазоне изменения параметра кривизны  $\delta_m/R_w$ .

Рассмотрен вопрос гидродинамической устойчивости турбулентной полуограниченной струи около вогнутой поверхности и показано, что для  $\delta_m/|R_w| = 0,02$  критическое значение числа Гертлера  $Gö_{кр}$ , при котором в турбулентной струе около вогнутой поверхности формируются вторичные течения в виде вихрей Тейлора-Гертлера, составляет 39600.

Обзор литературы показал, что в настоящее время относительно подробно изучены полуограниченные струи на выпуклой поверхности. Исследованию турбулентных струй около вогнутой поверхности посвящено ограниченное число работ. Недостаточно полно изучены закономерности тепловых процессов, практически отсутствуют данные по турбулентной структуре в пристеночной области сдвигового течения ( $y < \delta_m$ ), противоречивыми являются сведения о коэффициенте трения на вогнутой поверхности.

Во второй главе представлено описание математической модели теплообмена и гидродинамики турбулентной полуограниченной струи около вогнутой поверхности, приведено обоснование выбора модели турбулентности. Изложена суть метода контрольного объема Патанкара-Сполдинга, особенности его использования в на-

стоящей работе, описано получение дискретных аналогов дифференциальных уравнений, процедура расчета поля течения и алгоритм SIMPLE. Один из разделов второй главы посвящен тестированию разработанной программы расчета криволинейной струи.

Обобщенное дифференциальное уравнение, описывающее гидродинамику и теплообмен нестационарного, статистически осредненного турбулентного потока несжимаемой жидкости в полярной системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (rv \cdot \Phi) + \frac{\partial}{\partial \theta} (ru \cdot \Phi) = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \Gamma_{\Phi} r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right] + S_{\Phi} \quad (1)$$

В качестве зависимой переменной  $\Phi$  выступали такие величины, как  $u$ ,  $v$ ,  $T$ ,  $k$ ,  $\epsilon$ , для каждой из которых использовался конкретный вид  $\Gamma_{\Phi}$ ,  $S_{\Phi}$ . При  $\Phi = I$  ( $\Gamma_{\Phi} = 0$ ,  $S_{\Phi} = 0$ ) обобщенное дифференциальное уравнение трансформировалось в уравнение неразрывности.

Для получения дискретных аналогов дифференциальных уравнений использовался метод контрольного объема Патанкара-Сполдинга (рис.1). Одним из важных свойств метода контрольного объема является то, что в нем заложено точное интегральное сохранение таких величин, как масса, количество движения и энергия на любой группе контрольных объемов и, следовательно, на всей расчетной области. Таким образом, даже решение на относительно грубой сетке удовлетворяет точным интегральным балансам. Использовались шахматные сетки, в которых значения всех скалярных величин относятся к узлу сетки, а векторные величины (компоненты скорости) пространственно смещены относительно скалярных (рис.1, 2).

В качестве модели турбулентности в настоящей работе применялась модифицированная  $(k-\epsilon)$ -модель турбулентности Лэма и Бремхорста для течений в пристеночной области с малыми числами Рейнольдса. Кривизна линий тока учитывалась поправкой, предложенной в работе Новомлинского, Стронгина, которая вносится в член, описывающий генерацию в дифференциальном уравнении для  $\epsilon$ :

$$C_1 = 1.44 + R1 \quad (2)$$

В зависимости от знака числа Ричардсона коэффициент  $C_1$  увеличивается в области течения полугограниченной струи с подавлением турбулентности ( $y > \delta_m$ ,  $Ri > 0$ ) и уменьшается в области течения с интенсификацией турбулентности ( $y < \delta_m$ ,  $Ri < 0$ ).

Для проверки работоспособности созданной программы выполнялся расчет теплообмена и гидродинамики турбулентной полугограниченной струи несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами на плоской поверхности. Полученные результаты сформировали базу данных для сравнения с результатами последующего исследования обтекания вогнутой поверхности полугограниченной струей и определения влияния кривизны на основные характеристики течения и теплообмена. Основанием для выбора данной задачи в качестве тестовой является наличие в литературе большого количества экспериментальных данных.

Тестируемыми параметрами являлись профили скорости и температуры в пристеночной области сдвигового течения (рис.3 а) и в струйной области струи (рис.3 б), величины  $u_m$ ,  $\delta_m$ ,  $b$ , распределение нормальных ( $u'^2$ ,  $v'^2$ ) и касательных турбулентных напряжений ( $\overline{u'v'}$ ) по сечению струи, число Нуссельта и коэффициент трения, то есть как локальные, так и интегральные характеристики полугограниченной струи.

В среднем погрешности тестовых расчетов составляют: по профилям скорости -  $\pm 3\%$  (экспериментальные данные Fortmann E., Sigalla S., Kobayashi R., Fujisawa N.), по профилю температуры -  $\pm 4\%$  (Myers G., Dakos T., Сакипов З.Б.), по турбулентным напряжениям -  $\pm 4\%$  (Wilson D.J., Goldstein R.J., Kobayashi R., Fujisawa N.), по теплоотдаче -  $\pm 5\%$  (Jakob M., Клиентов Н.В.), по трению -  $\pm 2\%$  (Sigalla S., Tailland A.).

Третья глава посвящена исследованию гидродинамики, турбулентной структуры, локального теплообмена и поверхностного трения полугограниченной воздушной струи около вогнутой поверхности. Основные параметры в расчетах изменялись в следующих пределах: скорость потока на входе криволинейной поверхности  $u_s$  - от 13 до 100 м/с; входное число Рейнольдса  $Re_s$  - от  $2 \cdot 10^4$  до  $1,1 \cdot 10^5$ ; параметр относительной кривизны потока  $\delta_m/|R_w|$  - от 0 до 0,02; безразмерное расстояние от входной щели  $\bar{x} = x/s$  - от 10 до 170; число Гертлера  $G\delta$  от 668 до 6284 (гидродинамически устойчивое течение). Температурный фактор  $T_w/T_s$  не превышал 1,1.

Анализ результатов расчета показал, что в исследованном диапазоне кривизна оказывает существенное влияние на такие параметры, как толщина пристеночной области, максимальная скорость, полуширина струи. С увеличением  $\bar{x}$  величина  $\delta_m$  нарастает медленнее (при  $\bar{x} > 40$ ), а  $u_m$  — убывает медленнее (при  $\bar{x} > 20$ ), чем для полуограниченной струи на плоской поверхности (рис.4). Это объясняется возникновением поперечного градиента давления в криволинейной струе, который как бы прижимает струю к поверхности и "сплющивает" ее. Расчетные данные с погрешностью  $\pm 2\%$  аппроксимируются выражениями:

$$\delta_m/s = 0,246 \operatorname{Re}_s^{-0,2} (x/s)^{0,75} \quad (3)$$

$$u_m/u_s = 2,38 (x/s)^{-0,37} \quad (4)$$

$$\delta_m/b = 0,15 \quad (5)$$

В пристеночной области сдвигового течения струи вследствие активного действия вогнутой кривизны ( $R_1 < 0$ ), заполненность профиля скорости увеличивается по сравнению с плоской поверхностью ( $\operatorname{Re}_x = 1 \operatorname{dem}$ ). Такое поведение профиля скорости приводит к снижению показателя степени  $1/n$  в степенной зависимости профиля скорости  $u/u_m = (y/\delta_m)^{1/n}$ . При изменении параметра кривизны  $\delta_m/|R_w|$  от 0 до 0,02 отношение  $n/n_0$  увеличивается от 1 до 1,215. Расчетные данные с погрешностью  $\pm 2\%$  аппроксимируются зависимостью

$$n/n_0 = 1 + 2,69 \left( \delta_m/|R_w| \right)^{0,85} \quad (6)$$

где  $n_0 = 12$  для полуограниченной струи на плоской поверхности.

Аналогичное влияние вогнутая кривизна оказывает на профиль температуры в тепловом пограничном слое. Увеличение заполненности профиля приводит к снижению показателя степени  $1/m$  в степенной зависимости безразмерной температуры  $\theta = (y/\delta_T)^{1/m}$ . При изменении параметра кривизны от 0 до 0,02 отношение  $m/m_0$  увеличивается от 1 до 1,5. Расчетные данные с погрешностью  $\pm (2+2,5)\%$  аппроксимируются зависимостью

$$m/m_0 = 1 + 4,40 \left( \delta_m/|R_w| \right)^{0,85} \quad (7)$$

где  $m_0 = 12$  для полугограниченной струи на плоской поверхности.

В струйной области течения независимо от кривизны профиль скорости удовлетворительно описывается зависимостью, справедливой также для полугограниченной струи на плоской поверхности

$$u/u_m = \text{ch}^{-2} \left( 0,882 \frac{y - \delta_m}{b - \delta_m} \right) \quad (8)$$

Расчеты турбулентных характеристик полугограниченной струи показали, что кривизна линий тока оказывает существенное влияние на продольную  $u'^2$ , поперечную  $v'^2$  квадратичные пульсации скорости и одноточечную корреляцию  $\overline{u'v'}$ . Снижение пульсаций в струйной области ( $y > \delta_m$ ) объясняется консервативным воздействием кривизны ( $Ri > 0$ ) на структуру потока.

В пристеночной области вогнутая кривизна оказывает активное воздействие на структуру потока, что должно приводить к усилению турбулентности по всей толщине пристеночной области. Однако проведенные расчеты показали, что усиление турбулентных пульсаций скорости происходит в более узкой области. Координата точки, в которой нормальные турбулентные напряжения на плоской и вогнутой поверхностях принимают одинаковые значения, смещена к стенке. Для продольной и поперечной пульсаций скорости криволинейной струи это значение практически одинаково и колеблется около  $y/\delta_m = 0,7$  независимо от значения параметра кривизны. Это объясняется турбулентной диффузией кинетической энергии из струйной области течения струи в пристеночную зону сдвигового течения.

Аналогичное воздействие кривизна оказывает на одноточечную корреляцию между продольными и поперечными пульсациями скорости. С увеличением параметра кривизны происходит смещение к струйной области координаты  $\xi_{0R}$  нулевого значения корреляции (рис.5).

Получены данные по распределению коэффициента корреляции по всей ширине струи. Кривизна оказывает существенное влияние на это распределение. В диапазоне  $0,7 \leq y/b \leq 1,3$  коэффициент корреляции имеет приблизительно одинаковое значение, которое уменьшается с ростом параметра кривизны и составляет около 0,47 при  $\delta_m/|R_w| = 0,00375$  и около 0,24 - при  $\delta_m/|R_w| = 0,01875$ .

При расчете турбулентных криволинейных течений используются различные полуэмпирические модели. Наиболее распространенной из

них является модель, основанная на полумпирической теории длины пути перемешивания. В настоящей работе на основе обобщения расчетных данных получены поправки для этой модели, учитывающие влияние кривизны на турбулентное трение.

Для пристеночной области ( $y < \delta_m$ ) турбулентные касательные напряжения определяются по известному уравнению Прандтля

$$\tau_{xy}^T = \rho L^2 (\partial u / \partial y + u / r)^2 \quad (9)$$

Активное воздействие кривизны приводит к возрастанию длины пути перемешивания во внутреннем участке пристеночной области течения струи ( $0 < y < \xi_{OR}$ ). Для этого участка отношение  $L/L_0$  является функцией числа Ричардсона. Результаты расчетов с погрешностью  $\pm 3\%$  аппроксимированы с помощью зависимости

$$L/L_0 = [1 - 3,85 Ri]^{0,76} \quad (10)$$

В струйной области течения турбулентное трение определяется на основе гипотезы о постоянстве длины пути перемешивания:

$$\tau_{xy}^T = \rho \alpha [b - \delta_m] (u_m - 0,5u_m) \partial u / \partial y \quad (11)$$

На основе результатов настоящей работы была получена зависимость отношения  $\alpha/\alpha_0$  от параметра кривизны  $\delta_m/R_w$ , которая во всем исследованном диапазоне изменения параметра кривизны с погрешностью  $\pm(2+3)\%$  аппроксимируется выражением

$$\alpha/\alpha_0 = 1 - 9,75 \left[ \delta_m / |R_w| \right]^{0,76}, \quad (12)$$

где  $\alpha_0 = 0,047$  - коэффициент пропорциональности для струйной области полуограниченной струи на плоской поверхности, полученный по результатам настоящей работы.

В настоящей работе получены данные по изменению коэффициента теплоотдачи по длине вогнутой поверхности, изучено влияние различных факторов на интенсивность теплообмена ( $Re_x, s$ ).

Расчеты показали, что в области  $Re_x < 6 \cdot 10^4$  коэффициенты теплоотдачи для вогнутой и плоской поверхностей практически совпадают. В этой области относительная кривизна  $\delta_m / |R_w|$  не превы-

шает 0,002. Однако, при  $Re_x > 6 \cdot 10^4$  происходит увеличение коэффициента теплоотдачи на вогнутой поверхности по сравнению с плоской (рис.6), что связано с дальнейшим ростом  $\delta_m/|R_w|$ . Обобщение расчетных данных позволило получить уравнение подобия для локального теплообмена, учитывающее влияние кривизны в области  $\delta_m/|R_w| > 0,002$  (рис.7):

$$Nu_x/Nu_{x0} = 1 + 4,149 \left[ \delta_m/|R_w| - 0,002 \right]^{0,85}, \quad (13)$$

где

$$Nu_{x0} = 0,1165 \cdot Re_x^{0,8} (x/s)^{-0,4} Pr^{1/3} \quad (14)$$

Результаты расчетов показали влияние вогнутой кривизны на коэффициент трения в области  $Re_m > 6,5 \cdot 10^3$  (рис.8), которая соответствует значениям параметра кривизны  $\delta_m/|R_w| > 0,002$ . Получено уравнение, описывающее относительный рост коэффициента трения на вогнутой поверхности по сравнению с плоской (рис.9):

$$c_f/c_{f0} = 1 + 0,792 \left[ \delta_m/|R_w| - 0,002 \right]^{0,83}, \quad (15)$$

где

$$c_{f0} = 0,0565 \cdot Re_m^{-0,25} \quad (16)$$

По результатам выполненного исследования получено выражение для соотношения между числом Стантона и коэффициентом трения

$$St Pr_\tau Pr^{2/3} = \frac{c_f}{2} \left[ \frac{\delta_\tau}{\delta_m} \right]^{-1/m}, \quad (17)$$

где

$$\delta_\tau/\delta_m = 2,1 Re_s^{0,02} (x/s)^{0,052} \left[ |R_w|/s \right]^{-0,05}, \quad (18)$$

$Pr_\tau = 0,9$ ,  $Pr = 0,7$ , величина показателя степени  $1/m$  определяется по зависимости (7). Уравнение (18) с погрешностью  $\pm 3\%$  аппроксимирует результаты расчета в диапазоне изменения параметра кривизны  $0,002 < \delta_m/|R_w| < 0,02$ .

В отечественной литературе по турбулентным полуограниченным

струям для выражений, подобных (18), используется термин "видоизмененная аналогия Рейнольдса". В настоящей работе принята такая же терминология.

## ВЫВОДЫ

Основные выводы диссертационной работы состоят в следующем:

1. В диапазоне изменений числа Рейнольдса  $Re_s$  от  $2 \cdot 10^4$  до  $1,1 \cdot 10^5$ , параметра относительной кривизны  $\delta_m / |R_w|$  от 0 до 0,02 изучена физическая структура и закономерности теплообмена полуограниченной воздушной струи прямоугольной формы около вогнутой поверхности постоянного радиуса кривизны. Получены новые данные, характеризующие влияние вогнутой кривизны на осредненную и турбулентную структуру течения в пристеночной и струйной областях струи, локальный теплообмен.

2. Вогнутая кривизна поверхности увеличивает степень заполнения профиля скорости в пристеночной области сдвигового течения и профиля температуры в тепловом пограничном слое полуограниченной струи и слабо влияет на гидродинамические характеристики в струйной области струи.

3. Получены новые данные по влиянию вогнутой кривизны на турбулентную структуру полуограниченной струи (продольные и поперечные пульсации, одноточечная корреляция) и определены поправки, характеризующие влияние кривизны на турбулентное трение в пристеночной и струйной областях течения.

4. Найдены уравнения для расчета локального теплообмена и коэффициента трения и показано, что при  $\delta_m / |R_w| < 2 \cdot 10^{-3}$  закономерности теплообмена и поверхностного трения соответствуют закономерностям полуограниченной струи на плоской поверхности.

5. Показано, что для полуограниченной струи на вогнутой поверхности выполняется видоизмененная аналогия Рейнольдса между процессами переноса теплоты и количества движения.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ:

1. Железная Т.А., Халатов А.А. Применение метода контрольного объема к расчету полуограниченной струи на вогнутой поверх-

ности // Промышленная теплотехника.- 1995.- 17, N 5.- с.88-95.

2. Khalatov A.A., Zheleznaia T.A. Numerical Investigation of Fluid Mechanics and Heat Transfer of Turbulent Semirestricted Jet on the Concave Surface. In: Abstracts of Papers of Intern. Symposium on Heat Transfer Enhancement in Power Machinery. Part 2.- Moscow: MSTU, 1995.- p.146-148.

3. Железная Т.А., Халатов А.А. Численное исследование теплообмена и гидродинамики турбулентной полуограниченной струи на вогнутой поверхности.- Киев, 1995.- 13 с. Деп. в ГНТБ Украины 03.10.95 г., N 2193, Ук-95.

4. Железная Т.А., Халатов А.А. Теплообмен и трение турбулентной полуограниченной струи на вогнутой поверхности. - Киев, 1996.- 14 с. Деп. в ГНТБ Украины 09.01.96, N 211, Ук-96.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$x, y$  - продольная и поперечная координаты;  $u, v$  - компоненты скорости потока;  $r$  - радиус,  $\theta$  - угловая координата,  $t$  - время,  $b$  - полуширина струи, соответствует значению  $y$ , где  $u=0,5u_m$ ;  $\delta_m$  - толщина пристеночной области, соответствует значению  $y$ , где  $u=u_m$ ;  $\delta_T$  - толщина теплового пограничного слоя;  $T$  - температура;  $\rho$  - плотность;  $\nu$  - кинематическая вязкость;  $R_w$  - радиус кривизны поверхности;  $s$  - высота входной щели;  $\tau$  - касательное напряжение;  $k$  - кинетическая энергия турбулентности (КЭТ);  $\epsilon$  - степень диссипации КЭТ;  $C_1$  - коэффициент (k- $\epsilon$ )- модели турбулентности;  $\Phi, \Gamma_\phi, S_\phi$  - зависимая переменная, коэффициент диффузии и источник-ый член в обобщенном дифференциальном уравнении, соответственно.

$Ri = (2u/R_w) / (\partial u / \partial y)$  - число Ричардсона;  $c_x = 2\tau_w / (\rho u_m^2)$  - коэффициент трения;  $Nu_x = \alpha x / \lambda$  - число Нуссельта;  $Re_s = u_s s / \nu$  - число Рейнольдса, построенное по  $s$ ;  $Re_x = u_s x / \nu$  - число Рейнольдса, построенное по  $x$ ;  $Re_m = u_m \delta_m / \nu$  - число Рейнольдса, построенное по  $\delta_m$ ;  $G\delta = Re_m \cdot (\delta_m / |R_w|)^{0,5}$  - число Гертлера;  $\theta = (T - T_w) / (T_\infty - T_w)$  - безразмерная температура.

Индексы: 0 - течение на плоской поверхности;  $w$  - параметры на стенке;  $s$  - параметры на входе;  $m$  - параметры на границе пристеночной области;  $\infty$  - параметры на внешней границе струи.

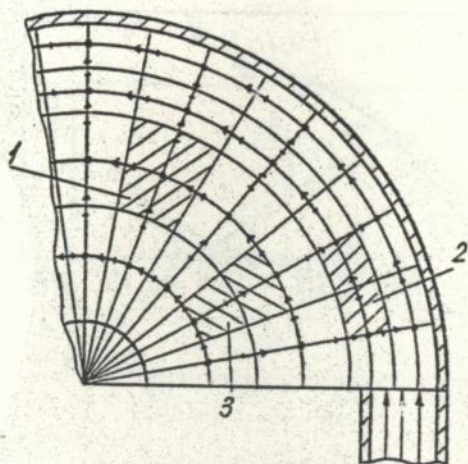


Рис.1 Расчетная область, разделенная на контрольные объемы  
 Контрольный объем: 1 - для скалярных величин; 2,3 -  
 для продольной и поперечной составляющих скорости  
 потока, соответственно

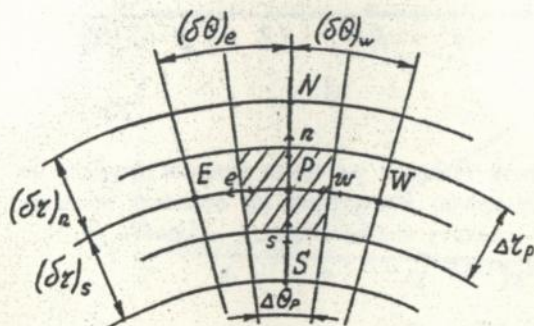


Рис.2 Типичный контрольный объем для скалярных величин

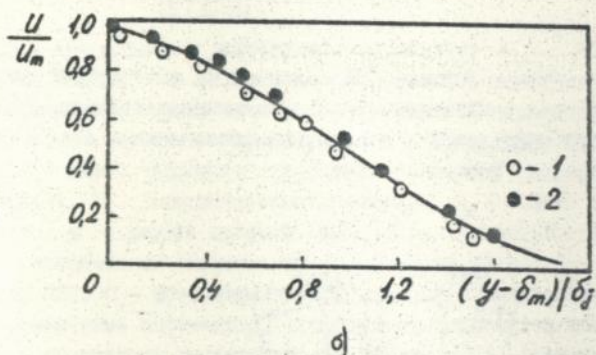
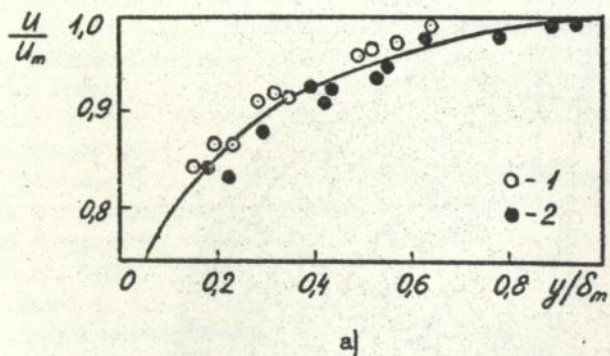


Рис.3 Результаты тестовых расчетов профиля скорости в пристеночной (а) и струйной (б) областях течения  
 Линия - расчет; Эксперимент: 1 - Sigalla S.,  
 2 - Föttmann E.

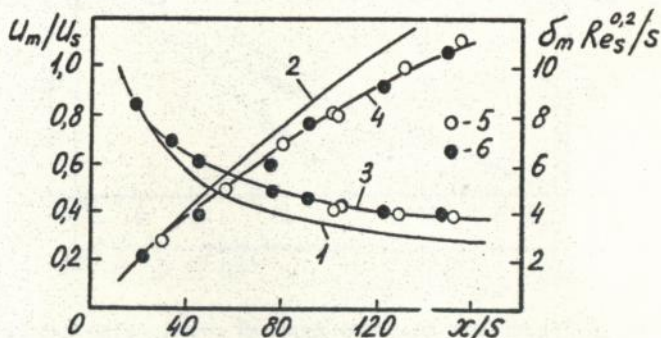


Рис.4 Изменение скорости и координаты по длине вогнутой поверхности  
 Плоская поверхность: 1,2 - расчет; вогнутая поверхность: 3,4 - расчет; 5 - Kobayashi R., Fujisawa N.;  
 6 - Сабуров Э.Н., Леухин Ю.Л.

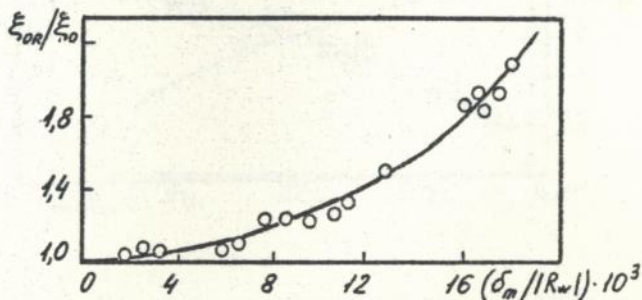


Рис.5 Координата точки нулевого значения корреляции между продольной и поперечной пульсациями скорости полугограниченной струи  
 Линия - расчет, точки - Kobayashi R., Fujisawa N.

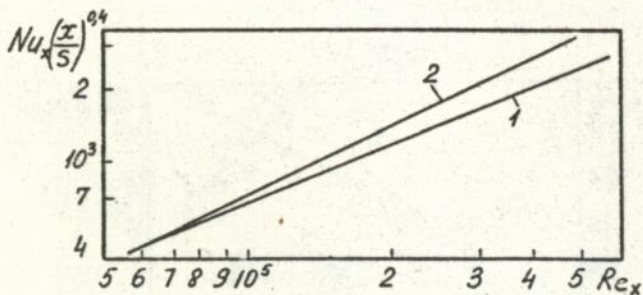


Рис.6 Теплообмен полуограниченной струи около плоской и вогнутой поверхностей  
1 - плоская поверхность (14) , 2 - вогнутая, расчет

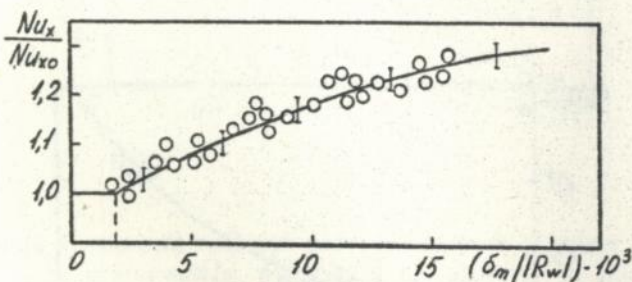


Рис.7 Результаты обобщения расчетных данных по теплообмену полуограниченной струи около вогнутой поверхности  
Линия - уравнение (13) , точки - Сабуров Э.Н.,  
Леухин Ю.Л.

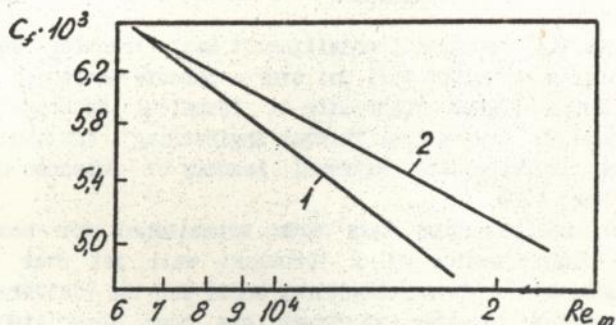


Рис.8 Зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса для полуограниченной струи  
1 - плоская поверхность (16), 2 - вогнутая, расчет

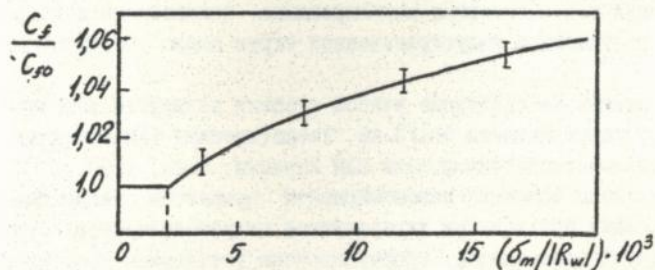


Рис.9 Результаты обобщения расчетных данных по коэффициенту трения полуограниченной струи около вогнутой поверхности  
Линия - уравнение (15)

## SUMMARY

Zheleznaya T.A. Numerical modelling of heat transfer and hydrodynamics of a turbulent wall jet over a concave surface.

Thesis for a Degree "Candidate of Technical Sciences". Speciality 05.14.05 "Theoretical Thermal Engineering". Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1996.

The main relationships have been established for heat transfer and hydrodynamics of a turbulent wall jet over a concave surface. More exact mathematical model for the considered heat and momentum transfer processes has been formulated. Applied PC software has been developed that allows to carry out numerical simulations within the wide range of the determinative parameters' variation. Effects of longitudinal surface curvature on the processes under investigation have been studied. Equations have been obtained which generalize the calculation results.

## АННОТАЦІЯ

Железная Т.А. Численное моделирование теплообмена и гидродинамики турбулентной полуограниченной струи около вогнутой поверхности.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 "Теоретическая теплотехника". Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 1996.

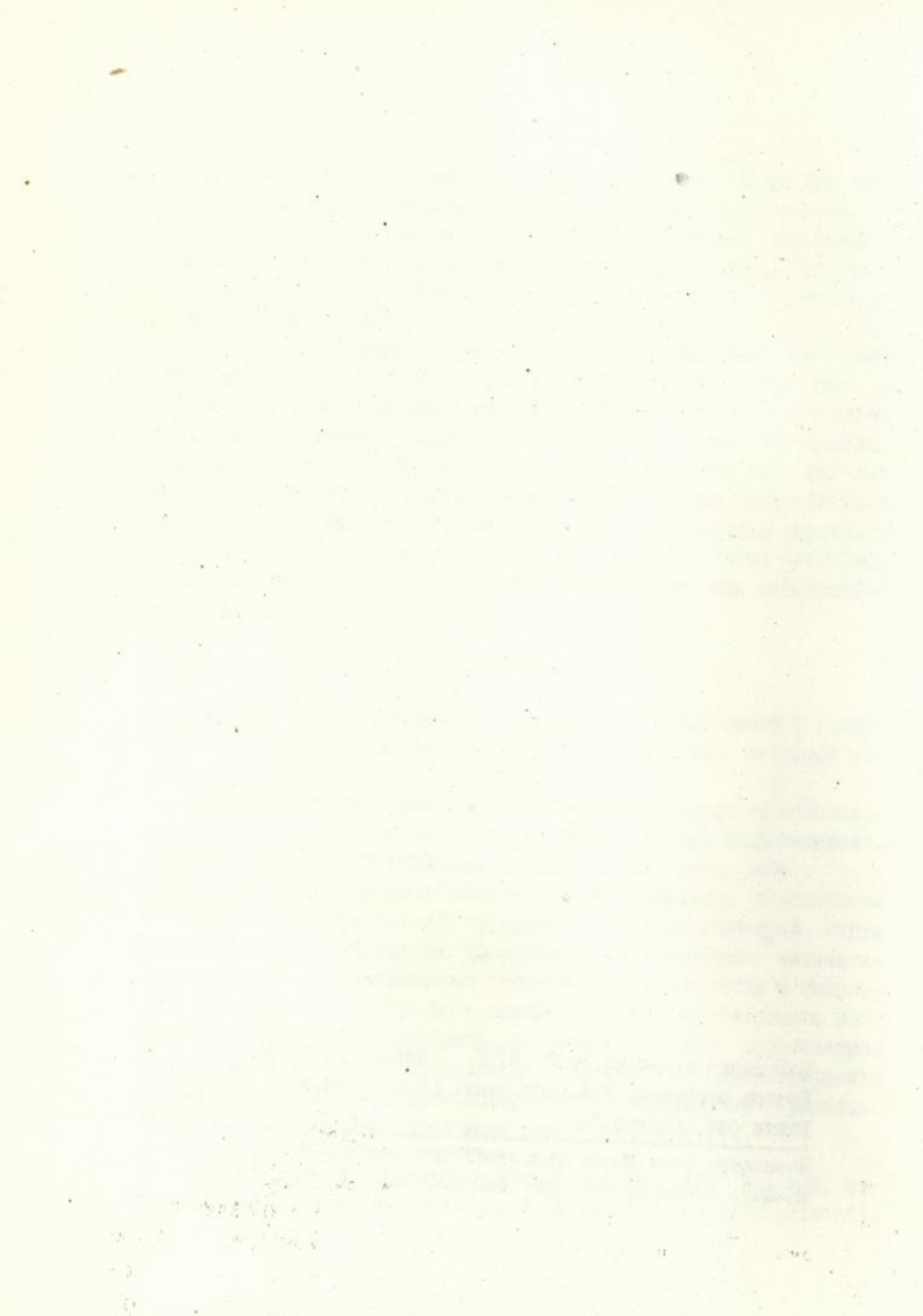
Установлены основные закономерности процессов теплообмена и гидродинамики при течении турбулентной полуограниченной струи около вогнутой поверхности. Сформулирована уточненная математическая модель рассматриваемых процессов переноса тепла и импульса. Разработано программное обеспечение для персонального компьютера, позволяющее проводить расчеты в широком практическом диапазоне изменения определяющих параметров. Изучены эффекты влияния продольной кривизны поверхности на исследуемые процессы. Получены зависимости, обобщающие результаты расчетов.

Ключові слова: чисельне моделювання, увігнута поверхня, напівобмежений струмень, контрольний об'єм, модель турбулентності.

Подписано к печати 19.02.96г. Формат 60х84/16  
Бумага офсетная. Усл.-печ.лист. 10. Уч.-изд.лист 10.  
Тираж 100. Заказ 71.

---

Полиграф. уч-к Института электродинамики НАН Украины  
252057, Киев-57, проспект Победы,56.





AB 34.361