

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт технической теплофизики

На правах рукописи

ГОРИСЛАВЕЦ Татьяна Николаевна

**ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПРИСТЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАВЕСЫ
ЗА РЯДОМ ОТВЕРСТИЙ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА**

Специальность 05.14.05 - Теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1995

ЛНА м. В. Стефанюк
АН Украины



00761484 (U)

022.7
 Диссертация
 Работа выполнена в Институте

Научный руководитель
 докт. техн. наук, проф.

В.М. Репухов

Официальные оппоненты:

докт. техн. наук, проф.

А.Ф. Колесниченко

канд. техн. наук, ст.н.сотр.

О.И. Диденко


Ведущее предприятие: Запорожское моторостроительное конструкторское
 бюро "Прогресс"

Защита диссертации состоится "21" XI 1995 г.
 в 14 час на заседании специализированного ученого совета К50.04.03
 в Институте технической теплофизики НАН Украины (252057, г. Киев - 57,
 ул. Желябова, 2а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН Украины.

Автореферат разослан "9" X 1995 г.

Ученый секретарь
 специализированного ученого совета,
 канд. техн. наук


 Г.Р. Кудрицкий

ЛНБ ім. В. Стефаника
 АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Изучение процессов тепломассообмена в пространственном тепловом пограничном слое (ПС) при вдуве вторичного потока через ряды отдельных однотипных отверстий является актуальной проблемой, тесно связанной с вопросами охлаждения и защиты элементов (лопатки, камеры сгорания, сопла) высокотемпературных энергетических установок от горячего газового потока.

Вопросы тепловой защиты все чаще требуют своего решения в связи с ростом рабочих температур в тракте выходных устройств авиационных и ракетных двигателей и повышением ресурса их работы.

Широкое применение получили системы комбинированного (конвективно-плочного) охлаждения с использованием пристенных тепловых защитных газовых завес. Наиболее часто встречаются системы охлаждения с дискретной подачей завес на защищаемую поверхность. Поэтому выбор оптимальных геометрических и режимных параметров, а также картина тепловых нагрузок на рабочие поверхности требуют изучения пространственных тепловых полей пограничного слоя. В литературе встречаются работы, в которых представлены результаты экспериментальных исследований методом тепломассоаналогии (ТМА). Однако данные по исследованию пространственного ПС со вдувом в него защитных тепловых завес отсутствуют. Не встречается в публикациях и методики расчета локальной эффективности тепловой завесы на адиабатной поверхности за рядом отверстий, апробированной на опытных данных.

Практически не изучался вопрос о построении математической модели нестационарной завесы. В последние годы, в связи с решением задач о нестационарном распространении теплоты (например, выбросы ТЭЦ или ГРЭС), эта проблема также стала актуальной.

Цель работы. Создать математическую модель процесса тепломассопереноса в пристенной тепловой завесе за рядом отверстий, апробировать ее на полученных достоверных экспериментальных данных и разработать методику расчета ее характеристик; построить математическую модель и ее решение для нестационарной завесы; разработать методику расчета граничных условий теплообмена и температуры поверхности вращения при конвективно-плочном охлаждении для высокотемпературных элементов газотурбинных установок (ГТУ).

Научная новизна:

- впервые проведено методом ТМА систематическое экспериментальное исследование пространственного теплового ПС при подаче защитной завесы через одно отверстие, один и два ряда отверстий на пластине;
- разработана экспериментальная методика и соответствующая методика обработки результатов;
- построена и апробирована математическая модель процессов теплопереноса в пространственной завесе за рядом отверстий на пластине;
- разработана методика расчета локальной эффективности и температурных профилей тепловой завесы за рядом отверстий;
- разработана математическая модель и найдено ее решение для нестационарной тепловой завесы в трехмерном тепловом ПС.

Объект и методы исследования. Основным объектом исследования в работе является процесс теплопереноса в трехмерном ПС при вдуве завес различной модификации. Методом экспериментального исследования был выбран метод теплоаналогии. Теоретические решения были получены в виде приближенных аналитических зависимостей, которые апробировались на экспериментальных результатах.

Практическая ценность работы. В материалах диссертации представлена методика расчета локальной эффективности и температурных профилей тепловой завесы за рядом отверстий, апробированная на полученных экспериментальных результатах и ранее опубликованных данных.

Усовершенствована разработанная ранее автором в соавторстве с научным руководителем "Программа расчета граничных условий теплообмена на поверхностях деталей высокотемпературных устройств при конвективно-плочном охлаждении", которая находится в Государственном Фонде алгоритмов и программ (П.с. N 50890000729 в ФАП НАН Украины N АПО234 от 03.09.1989). Программа была передана для использования в Запорожское моторостроительное конструкторское бюро (ЗМКБ) "Прогресс".

Дальнейшее развитие настоящей работы ведется в направлении исследования влияния на тепловую картину многорядности вдува, толщины начального динамического и теплового ПС, многокомпонентности состава завесы и ряда других факторов, встречающихся в реальных условиях.

Личный вклад автора. Проведено экспериментальное исследование методом теплоаналогии температурных пространственных профилей в тепловом ПС за одним отверстием, одним и двумя рядами отверстий, построена ма-

тематическая модель и на базе ее решения разработана методика расчета локальной эффективности и температурных профилей по высоте теплового ПС при дискретном вдуве завесы через один ряд отверстий.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на VII (Канев, 1989) и VIII (Москва, 1991) Всесоюзных школах-семинарах "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок", II Международном Минском форуме (Минск 1992г.), I-й Национальной Российской конференции по теплообмену (Москва, 1994), II-й Республиканской конференции "Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств" (Житомир, 1990), XVIII и XIX научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов ИТФ НАН Украины (Киев, 1988, 1990).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ.

Структура и объем работы. Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 4-х научных статьях. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (49 наименований). Общий объем диссертации 119 страниц, включая таблицы и 47 рисунков.

Обозначения: $\eta_{\text{т}} = (T_1^{\circ} - T_{\text{ст. а.}}) / (T_1^{\circ} - T_2^{\circ})$ - безразмерная температура или эффективность ($T_1^{\circ}, T_2^{\circ}, T_{\text{ст. а.}}$ - полные температуры соответственно основного и вдуваемого потоков и температура адиабатной стенки);

$Re_i = (\rho_i u_{\text{эк}}) / \mu_i$ - число Рейнольдса, рассчитанное по параметрам основного ($i=1$) и вдуваемого ($i=2$) потоков (ρ_i - плотность, u_i - скорость, μ_i - динамическая вязкость) и высоте эквивалентной щели $s_{\text{эк}}$;

$Ma_i = u_i / \sqrt{\kappa_i R_i T_i^{\circ}}$ - число Маха основного потока (κ_i - показатель энтропии, R_i - газовая постоянная);

$\theta = T_2^{\circ} / T_1^{\circ}$ - относительная температура вдуваемого потока в сечении вдува;

$\bar{u} = u_1 / u_2$ - коэффициент вдува, рассчитанный по отношению скоростей основного и вдуваемого потоков;

$\bar{m} = \rho_1 u_1 / \rho_2 u_2$ - коэффициент массового вдува;

$\bar{L} = (x - x_0) / s_{\text{эк}}$ - безразмерное расстояние от сечения вдува x_0 до текущего сечения x ;

γ - угол наклона каналов для вдува завесы;

τ, τ' - обобщенная координата длины;

$\eta_c = (C_1 - C) / (C_1 - C_2)$ - эффективность, определяемая по объемным концентрациям C_1, C_2 и C вдуваемого инородного газа соответственно в основном потоке, вторичном потоке и в текущем сечении;

$\eta_n(x, z) = \eta_{cp} (1 + F(x, z))$ - локальная эффективность за рядом отверстий, определяемая по средней эффективности η_{cp} и асимптотической функции $F(x, z)$ в виде ряда Фурье с прямоугольным начальным профилем;

$\theta^*(x, y, z) = \theta_1^*(x, y) \cdot \theta_2^*(x, z)$ - пространственный температурный безразмерный профиль - решение трехмерного уравнения сохранения энергии;

$S_1(x, y) = \frac{\theta_1^*}{\theta_{1max}^*} \Big|_{\substack{x^* \\ \xi = const}} -$ вертикальный температурный профиль, нормированный по максимальному значению;

$G_2(x, z) = \frac{\theta_2^*}{\theta_{2max}^*} \Big|_{\substack{x^* = const \\ \zeta = 0}} -$ горизонтальный температурный профиль, нормированный по максимальному значению;

$\eta_c(\tau, \tau_1^*) = f_1(a_1) \cdot \eta_{zc}(\tau_1^*)$ - эффективность нестационарной тепловой завесы на оси симметрии в виде произведения функции изменения во времени начального профиля подаваемой завесы f_1 с аргументом $a_1 = (\tau - \tau_0) - \frac{x - x_0}{u_1}$ и "стационарного" решения $\eta_{zc}(\tau_1^*)$ рассматриваемой задачи.

Содержание работы

Во введении показаны важность и актуальность темы диссертации, обоснована цель работы и кратко изложено ее содержание.

В первой главе диссертации дан обзор опубликованных работ по исследованию и построению теоретических моделей процессов теплопереноса в тепловом ПС при наличии в нем завес (вдуваемый вторичный поток); а также описание пространственной модели, на базе которой строятся все последующие.

Более пристальное внимание уделено работам, посвященным исследованию дискретного вдува как экспериментальным, так и теоретическим. Описан применяемый в диссертационной работе подход к решению трехмерных уравнений теплового ПС, который состоит в представлении решения пространственной задачи в виде произведения решений плоских задач, на которые она распадается

$$\theta^*(x, y, z) = \theta_1^*(x, y) \cdot \theta_2^*(x, z) \quad (1)$$

Первая функция $\theta_1^*(x, y)$ является решением точного уравнения в вертикальной плоскости симметрии $z=0$

$$\frac{\partial \theta_1^*}{\partial x^*} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{u^* s^*}{Pr_*} \cdot \frac{\partial \theta_1^*}{\partial \xi} \right], \quad (2)$$

а вторая - решением приближенного уравнения в горизонтальной полуплоскости, совпадающей с адиабатной стенкой и границей - осью x

$$\frac{\partial \theta_2^*}{\partial x^*} = \left[\frac{s_u^* / u^* Pr_*}{s_u^* / u^* Pr_*} \right] \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{u^* s_u^*}{Pr_*} \cdot \frac{\partial \theta_2^*}{\partial \xi} \right], \quad (3)$$

(Pr_* , ϵ_u - соответственно эффективные число Прандтля и безразмерная вязкость)

с соответствующими начальными и граничными условиями. Приведено основное выражение для средней по шагу отверстий эффективности тепловой завесы за одним рядом отверстий, которое записывается через интеграл уравнения (3):

$$\theta_{zcp}^*(x^*) = 1/x \int_0^x \theta_2^*(x^*, \xi) d\xi = \frac{\Delta Q_z}{x},$$

где $x = \alpha_0 \cdot 0,5 t_{от} / \mu$ и ΔQ_z - безразмерное избыточное теплосодержание в ПС. Апробация этого выражения на полученных экспериментальных данных дала положительные результаты. В этой главе также изложены основные допущения, используемые при постановке задачи на исследование.

Анализ опубликованных работ показал, что для описания процессов тепломассопереноса в трехмерном тепловом ПС при дискретном вдуве завесы нет апробированных моделей. Не встречалось в публикациях и работ, посвященных исследованию нестационарных завес. В связи со сказанным выше, в первой главе сформулированы основные задачи исследования:

- 1) разработать и апробировать на полученных в работе экспериментальных данных математическую модель температурного поля в пространственном тепловом ПС при дискретном вдуве завесы;
- 2) разработать на базе математической модели методику расчета локальной эффективности и температурных профилей пространственной завесы за рядом отверстий;
- 3) построить математическую модель для нестационарной завесы;

4) разработать методику расчета граничных условий теплообмена и температуры поверхности вращения в высокотемпературных элементах при наличии системы комбинированного (конвективно-плёночного) охлаждения. Во второй главе приведено описание экспериментальной установки и измерительной аппаратуры, использовавшихся в опытах. Затем изложена суть разработанных методик проведения экспериментального исследования и расчета основных величин, а также приведены погрешности измерений. Далее приведены результаты классификационных опытов (вдув производился через тангенциальную и нормальную щель), проводившихся для экспериментального подтверждения возможности применения метода ТМА путем прямого сравнения с результатами тепловых опытов, полученными ранее при тех же режимных и геометрических параметрах.

В разделе 2.8 приведены результаты экспериментального исследования пространственных температурных (концентрационных) профилей за одним отверстием, одним и двумя рядами отверстий на пластине.

На рис.1 представлена схема экспериментального стенда, а также схема измерения и контроля основных физических величин, характеризующих его работу. Рабочий участок представлял собой прямоугольный параллелепипед 120·102·635 мм, у которого нижняя стенка - гладкая медная пластина с дренажными отверстиями для отбора проб. Такие же отверстия имелись и в боковой стенке участка. Верхняя стенка - из прозрачного оргстекла с окнами для установки в них координатника.

Поскольку экспериментальное исследование велось методом тепломас-соаналогии, тепловые поля моделировались концентрационными, и газовая смесь инжектируемого вторичного потока выбиралась такой плотности, чтобы отношение плотностей основного и вдуваемого потоков ρ_1/ρ_2 было равным отношению температур T_2^0/T_1^0 в тепловых опытах.

Методика проведения опытов и доказанное равенство

$$\eta_T = \eta_C.$$

позволяет определять эффективность тепловой завесы через концентрацию вдуваемого потока в текущей точке, т.к. концентрация газа во вдуваемом потоке в сечении вдува равна единице, а в основном потоке - нулю. Для проведения экспериментов был выбран углекислый газ в силу его безопасности и доступности.

Погрешность измерений основных величин не превышала в опытах 5%, а погрешность значений η_C в интервале значений 0,1-1,0 не превышала

10%. Применение метода ТМА позволяет проводить опыты, которые невозможно реализовать с помощью тепловых измерений из-за перетоков теплоты в измерительной аппаратуре и исследуемых моделях.

Полученные экспериментальные данные по профилям концентрации за одним отверстием, одним рядом и двумя рядами отверстий на плоской пластине для различных режимов вдува были обобщены и представлены графически в виде горизонтальных $G_2(x, z)$ (рис.2) и вертикальных $S_1(x, y)$ безразмерных профилей температуры (рис.3-6). Для нанесенных на этих графиках расчетных кривых ниже приведены полученные в работе приближенные аналитические выражения.

В третьей главе описана разработанная математическая модель процесса теплопереноса в трехмерном тепловом ПС при вдуве завесы через ряд отверстий, модель и ее решение для нестационарной тепловой завесы в стационарном двумерном динамическом ПС и методика расчета характеристик тепловой завесы на поверхности вращения.

Следуя методике, изложенной в первой главе, были найдены решения уравнений (2) и (3) для дискретно вдуваемой завесы. Решение в горизонтальной плоскости было уточнено на базе полученных опытных данных и данных работы Эккерта и его окончательное выражение имеет вид

$$\theta_2^*(x^*, z) = b/x^* \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_n \cdot \frac{L}{\pi n b} \cdot \sin \frac{\pi n b}{z} \cdot \cos \frac{\pi n z}{z} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\pi n}{z} \right)^2 \cdot \tau_x^* \right] \right\} \quad (4)$$

где $b=0,5t_1$ - половина ширины прямоугольника (начальный профиль) в сечении x^* ; k_n - корректировочные коэффициенты. На рис.7 графически представлен коэффициент k_1 , определяемый равенством

$$\ln k_1 = (0,84 \cdot \ln \bar{u}) / (1 + \sin \gamma) + \ln [5 \exp(-0,65m)] \quad (5)$$

Выражение для профиля $\theta_1^*(x^*, y)$ в вертикальной плоскости, как решение уравнения (3) зависит от величины коэффициента вдува \bar{u} . А именно, в случае безотрывных режимов ($\bar{u} < 0,5$) вертикальные профили автомодельны и описываются экспоненциальной зависимостью, так же как и профили за тепловым точечным источником, расположенным на поверхности:

$$S_1(x^*, y) = \frac{\theta_1^*(x^*, y)}{\theta_{1, \max}^*(x^*, y)} \Big|_{x^*, z = \text{const}} = \exp \left[- \left(\frac{y}{y_{0,5}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

(где $S_1(x^*, y_{0,5}) = 0,5$; $\theta_{1, \max}^*(x^*, y) = \theta_1^*(x^*, 0)$). Для отрывных режимов ($\bar{u} \geq 0,5$) вертикальные профили не автомодельны и $\theta_{1, \max}^* \neq \theta_1^*(x^*, 0)$, т.е. существует некоторая линия максимумов:

$$y_{\max} = f(\bar{u}, \bar{x}) \neq 0.$$

Выше этой координаты профили можно рассматривать как автомодельные и описывать экспонентой (5), аналогично профилям за точечным тепловым источником, расположенным на высоте $y_{\max} = f(\bar{u}, 0)$. Ниже этой координаты профиль также может быть описан экспонентой вида (5) после следующего преобразования

$$S_1(x^*, y) = \frac{\theta_{1\max}^*(x^*, y) - \theta_1^*(x^*, y)}{\theta_{1\max}^*(x^*, y) - \theta_1^*(x^*, 0)} = \frac{1 - S_1(x^*, y)}{1 - S_1(x^*, 0)}. \quad (7)$$

Причем $S_1(x^*, y_{0,0}) = 0,5$.

Когда $y_{\max} = 0$, то, начиная с этого сечения \bar{x} , вертикальные профили становятся автомодельными. Экспериментально было получено, что для режимов $\bar{u} > 1,5$ ни при каких \bar{x} в пределах рабочего участка $y_{\max} \neq 0$.

Методика расчета характеристик завесы в осесимметричном тепловом ПС базируется на интегральном методе решения уравнения сохранения для осесимметричного ПС с выделением плоского решения и использованием зависимости между числами Рейнольдса для плоского и осесимметричного тепловых ПС, обобщенной аналогии Рейнольдса и полулогарифмического закона скорости

$$u^* = C_0 (y^*)^m.$$

В результате было получено, что эффективность тепловой завесы на осесимметричной поверхности можно найти как произведение эффективности на плоской поверхности η_f и коэффициента

$$C = \frac{r_0^k \text{Re}_f^{\alpha\alpha}}{r_{00}^k (\text{Re}_f^{\alpha\alpha})_{\text{пл}}},$$

который был получен в интегральной форме в виде

$$C = \frac{1 + (r_0^k \text{Re}_f^{\alpha\alpha} \text{Pr}^{\Omega})^{\frac{2N_0}{1+N_0}} \cdot \int_{\bar{x}}^{\bar{x}_0} u_0^{-2N_0} d(\bar{x})^{\Gamma_0}}{1 + (r_{00}^k \text{Re}_f^{\alpha\alpha} \text{Pr}^{\Omega})^{\frac{2N_0}{1+N_0}} \cdot u^{-2N_0} \cdot [(\bar{x})^{\Gamma_0} + (\bar{x}_0)^{\Gamma_0}]_{\text{пл}}}, \quad (8)$$

где r_0 и r_{00} - радиусы поверхности в текущем сечении и в сечении вдува; $k=0$ для плоской поверхности; $k=1$ для осесимметричной поверхности; N_0 , Γ_0 - формпараметры. Методика была апробирована на данных работы Э.П.Волчкова других авторов.

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ рассчитывается по формуле

$$\bar{\alpha}(x, x_0) \approx (1+2/\Lambda) \cdot \varphi(x, x_0) \cdot \alpha(x, 0) \quad (9)$$

где $\Lambda = \Delta \bar{x} / \bar{u}$;

$\alpha(x, 0) = \rho_0 u_0 c_p St_T(x, 0)$ - коэффициент теплоотдачи на пластине без учета влияния вдува;

$\varphi(x, x_0) = St_T(x, x_0) / St_T(x, 0)$ - ступенчатая функция, имеющая вид в интегральной форме:

$$\varphi(x, x_0) \Big|_{x=x_0} = \left\{ \frac{\int_{x_0}^x (u_0)^{-2N_0} d(\bar{x}_T) \gamma_0^{-\beta_0}}{\int_{x_0}^{x_0} (u_0)^{-2N_0} d(\bar{x}_T) \gamma_0^{-\beta_0}} \right\} \cdot \left(\frac{\bar{x}_T}{\bar{x}_T} \right)^{\gamma_0 - 1} \cdot \left(\frac{\varphi_{c_f T}}{\varphi_{c_f T_0}} \right); \quad (10)$$

$St_T(x, 0)$ и $St_T(x, x_0)$ - числа Стентона, определяемые по толщине теплового ПС соответственно при наличии вдува в сечении x_0 и без вдува.

Математическая модель нестационарной тепловой завесы была построена на базе нестационарного уравнения теплопереноса, которое имеет вид

$$\rho \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \rho u \frac{\partial \theta}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \theta}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_0}{Pr_0} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_0}{Pr_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = 0 \quad (11)$$

и соответствующих случаев вдува через ряд однотипных отверстий граничных условий

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{\partial \theta}{\partial y} = \lim_{y \rightarrow \infty} \theta = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \quad (12)$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \frac{\partial \theta}{\partial y} = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0,$$

с заданным начальным профилем $\theta(\tau, x_0, y, z)$ в сечении x_0 .

Решение уравнения (11) также представимо в виде произведения двух функций

$$\theta(\tau, x, y, z) = \theta_1(\tau, x) \cdot \theta_2(\tau, x, y, z), \quad (13)$$

в котором $\theta_2(\tau, x, y, z)$ - решение стационарного уравнения, т.к. время τ входит в него как параметр, а $\theta_1(\tau, x)$ - функция, определяющая изменение во времени начального профиля на оси симметрии, которая является решением приближенного уравнения

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \ln \theta_1 + u_{cp}(\tau, x) \frac{\partial}{\partial x} \ln \theta_1 + \frac{\partial}{\partial \tau} \ln \theta_2 = 0 \quad (14)$$

при подстановке в него нетривиального решения $\theta_2(\tau, x, y, z)$ уравнения

$$\rho u \frac{\partial \theta_z^2}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \theta_z^2}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \theta_z^2}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_y}{Pr_y} \frac{\partial \theta_z^2}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_z}{Pr_z} \frac{\partial \theta_z^2}{\partial z} \right) = 0 \quad (15)$$

В качестве примера расчета эффективности нестационарной завесы рассматривается эффективность за тепловым источником на адиабатной поверхности с экспоненциальным периодически изменяющимся во времени профилем.

В четвертой главе изложена методика расчета граничных условий теплообмена и температуры стенки в системах комбинированного охлаждения на осесимметричной поверхности, которая была апробирована на результатах натурных испытаний, данных, полученных на стендах Института и опубликованных в открытой печати. Первичный экономический эффект по внедрению программы в ЗМКБ "Прогресс" составил (в ценах на 1990г) 1 млн.руб.

Выводы

Основные выводы по результатам выполненной работы сводятся к следующему:

1. Впервые представлена разработанная математическая модель и предложено ее решение для процесса тепломассопереноса в трехмерном ПС при вдуве завесы через одно отверстие или ряд однотипных отверстий на плоской пластине.
2. Впервые проведено систематическое исследование локальной эффективности и температурных профилей в ПС методом тепломассоаналогии (ТМА) при вдуве завесы через одно отверстие, один ряд однотипных отверстий и два ряда однотипных отверстий для различных режимов вдува и расположения отверстий в ряду.
3. Исследовано влияние режима вдува на локальную эффективность и температурный (концентрационный) профиль в пространственном тепловом ПС.
4. Разработана и представлена методика проведения экспериментального исследования методом ТМА пространственных полей концентрации (хроматографический анализ) при инжектировании инородного газа через отдельные однотипные отверстия на плоской пластине и методика обработки опытных данных, характеризующиеся малыми погрешностями определяемых величин (погрешность η_c не превышает 10%).
5. Построена математическая модель и найдено ее решение для нестационарной тепловой завесы в стационарном двумерном динамическом ПС, и

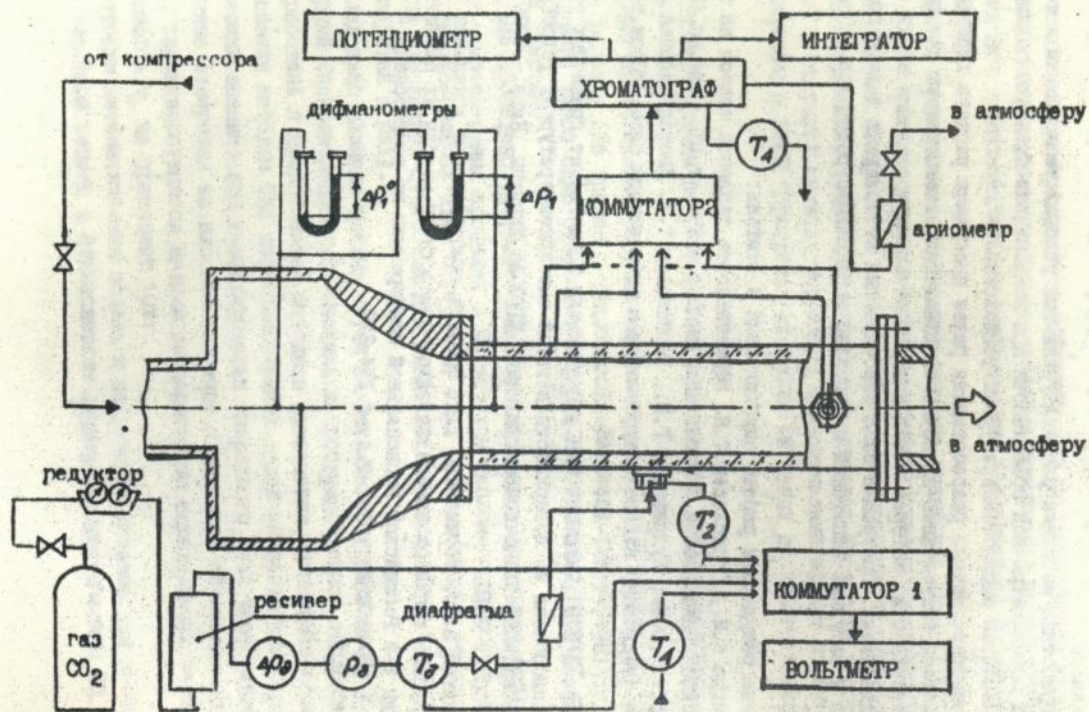
представлена методика расчета безразмерной температуры адиабатной поверхности при периодической форме изменения по времени начального профиля завесы.

6. Разработана методика расчета граничных условий теплообмена и температуры осесимметричной поверхности при конвективно-плёночном охлаждении элементов высокотемпературных устройств.

7. Усовершенствована разработанная ранее программа расчета характеристик системы конвективно-плёночного охлаждения и температуры охлаждаемой поверхности, которая может использоваться при создании новых систем охлаждения. Программа была апробирована на обширных данных лабораторных и натурных испытаний и передана в ЗМКБ "Прогресс" для эксплуатации.

Основные результаты работы опубликованы в статьях:

- 1 Репухов В.М., Гориславец Т.Н. Эффективность тепловой завесы на криволинейной поверхности //Пром.теплотехника.-1991.-т.13. - №4.-с.48-51
2. Репухов В.М., Кудрявцева Г.В., Гориславец Т.Н. Нестационарная защитная (тепловая) завеса в турбулентном пограничном слое.//Пром.теплотехника.-1991.-т.13.-№3.-с.45-55.
3. Репухов В.М., Башкатов В.Н., Гориславец Т.Н. Расчет граничных условий теплообмена на поверхности деталей высокотемпературных устройств при конвективно-плёночном охлаждении. ИТТФ АН Украины, Киев.- 1989. № 50890000729 ГФАП.
4. Репухов В.М., Гориславец Т.Н. Профили температуры и локальная эффективность тепловой завесы за рядом отверстий и методы их расчета //Труды 1-й Российской национальной конференции по теплообмену.- М.: Из-во МЭИ, 1994.-Т.1.-с.234-239.



1. Функциональная схема измерения физических величин в процессе проведения эксперимента

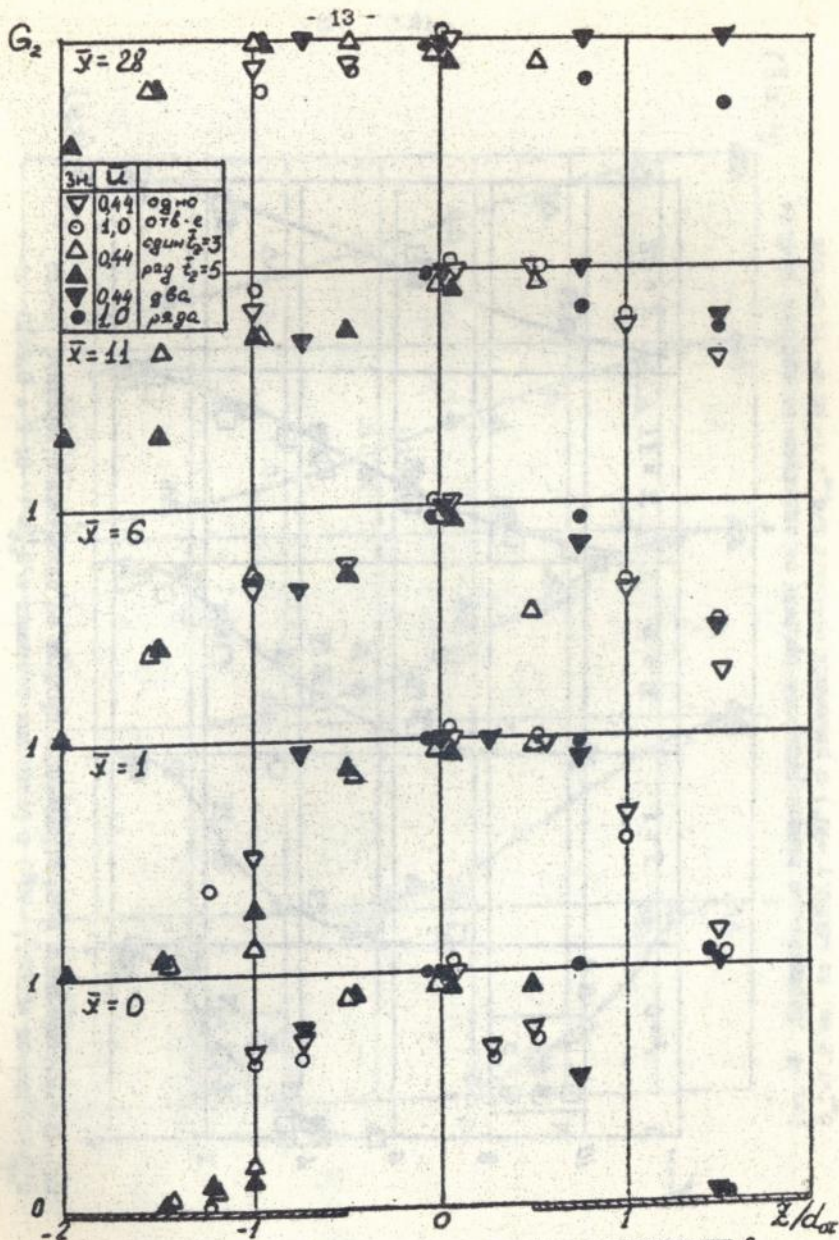


Рис. 2. Горизонтальные безразмерные профили концентрации G_2 за одним отверстием, одним и двумя рядами отверстий на оси симметрии

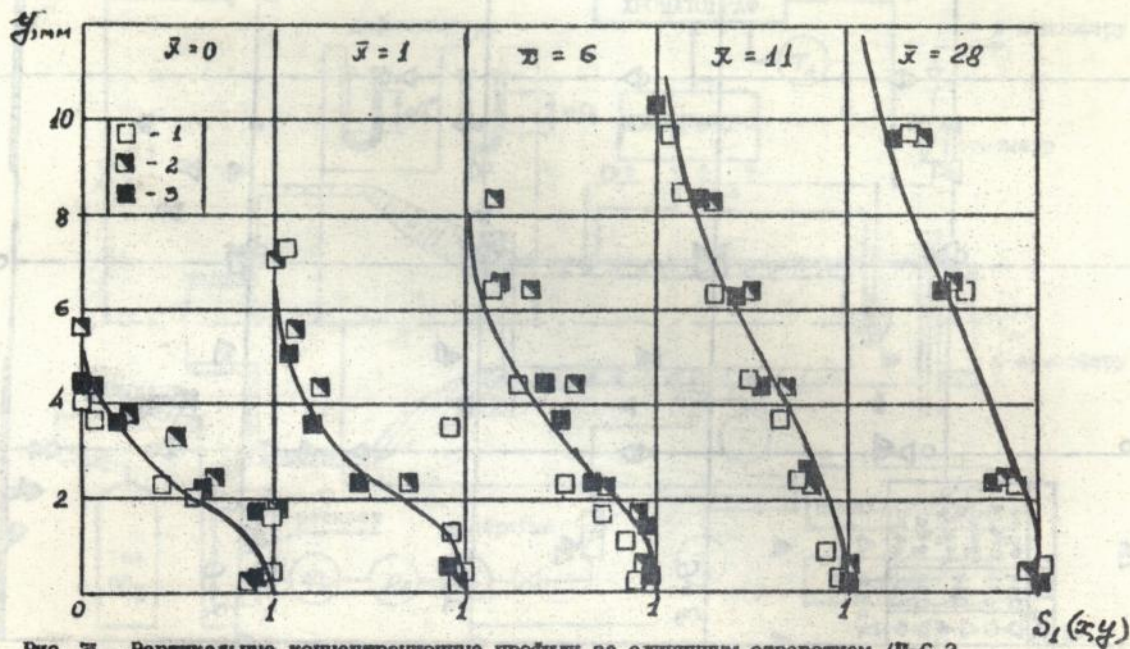


Рис. 3. Вертикальные концентрационные профили за единичным отверстием ($U=C.3$, $d_{от} = 7.2$ мм, $Re = 8080$, $\gamma = 90^\circ$) в различных сечениях $\bar{x}/d_{от}$: 1- 0; 2- ± 0.25 ; 3- ± 1

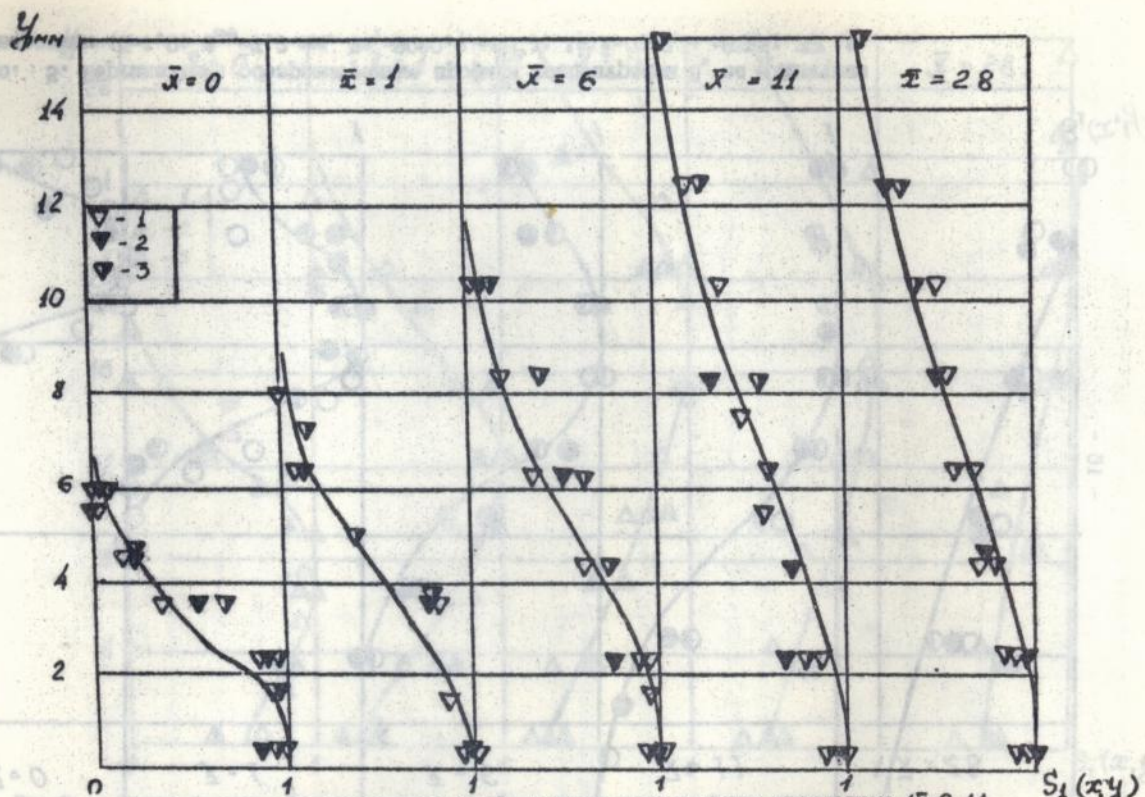


Рис. 4 .Вертикальные концентрационные профили за единичным отверстием ($\bar{\mu}=0.44$
 $d_{or}=7.2$ мм. $Re=8080, \gamma=90^\circ$) в различных сечениях x/d_{or} : 1- 0; 2- 1; 3- 0,5

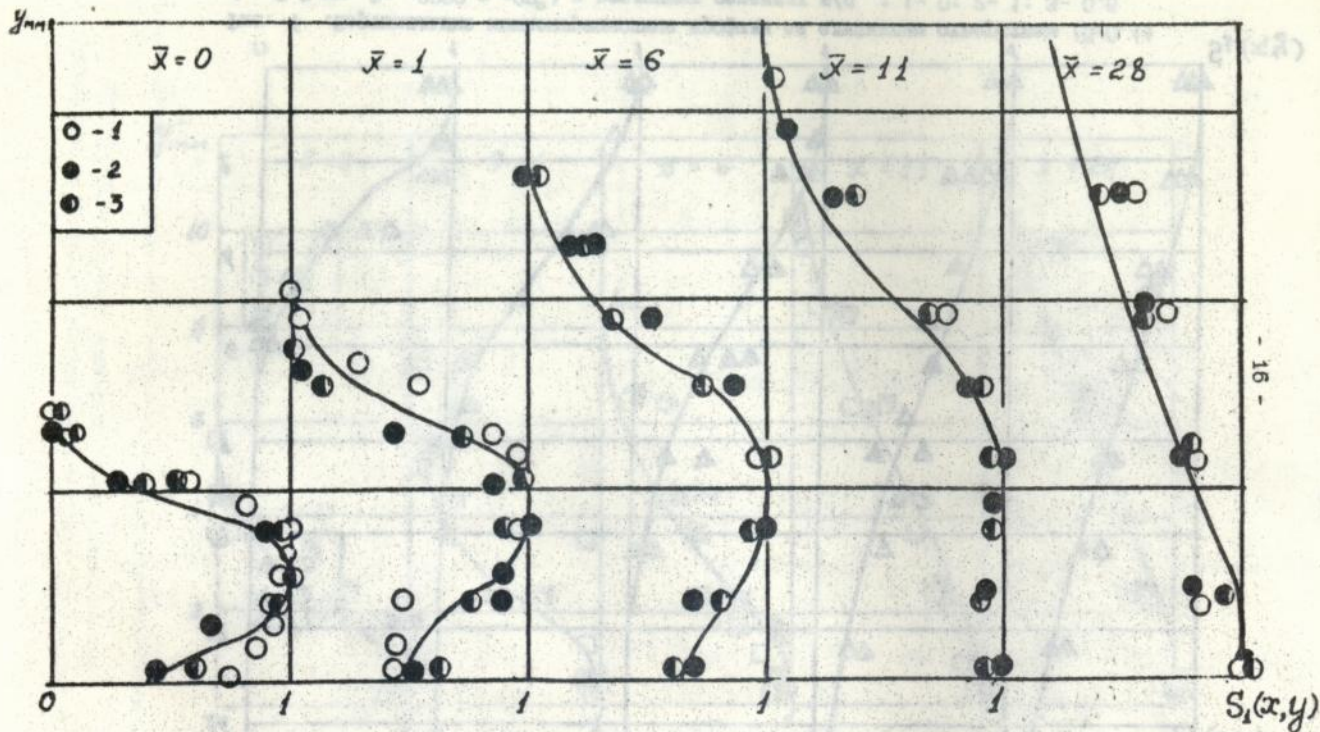


Рис. 5. Вертикальные обезразмеренные профили концентрации S_1 за единичным отверстием ($\bar{U}=1,0$; $d_{отр}=7,2$ мм, $Re_1=8080,7$ $\approx 90^\circ$); 1 - $\bar{x}=0$; 2 - $\pm 0,25$; 3 - ± 1

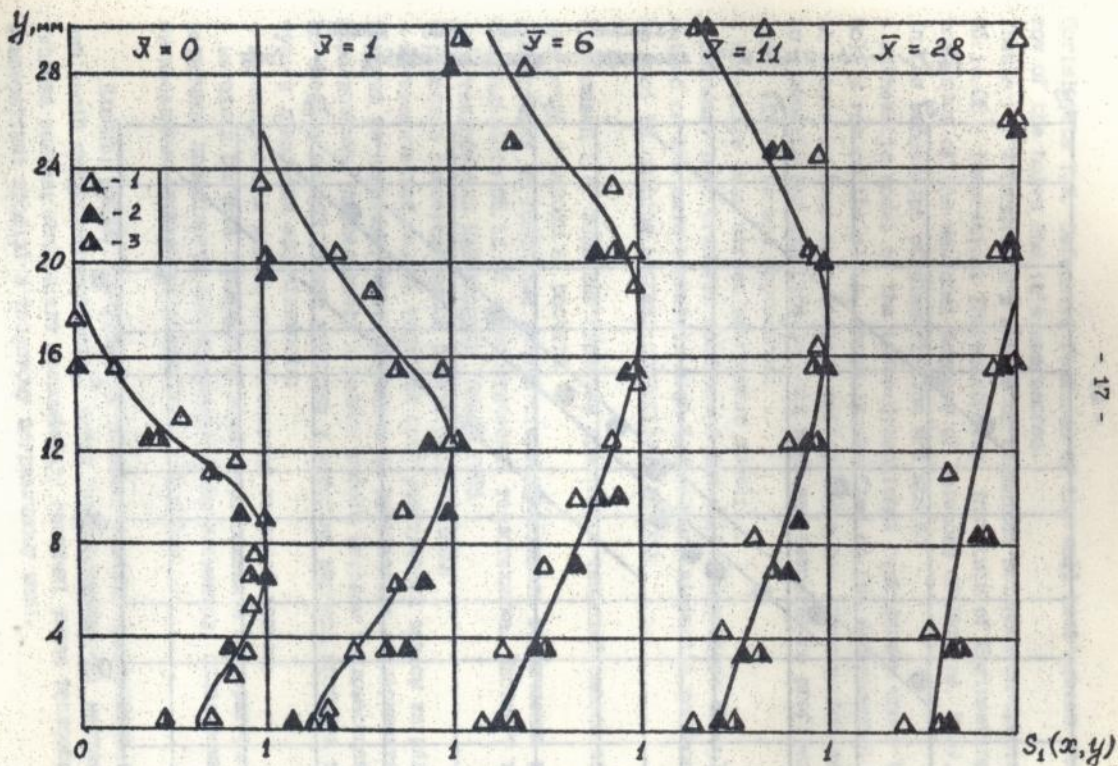


Рис.6. . Вертикальные безразмерные профили концентрации S_i за рядом .
отверстий ($\bar{u}=1.5$; $d_{от}=7.2$ мм, $Re_1=8080, \gamma=90^\circ$); 1- $\bar{x}=0$; 2- ± 1.0 ; 3- ± 0.5

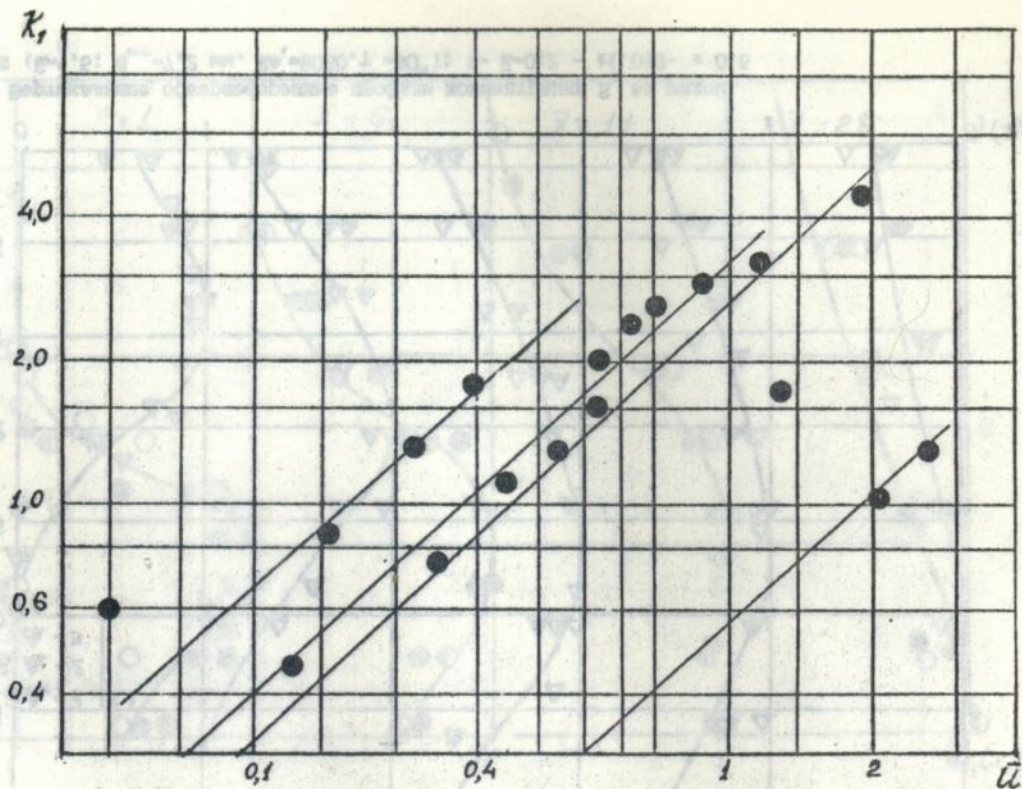


Рис. 7. Корректирующий коэффициент k_1 в уравнении (5)
(точки - опыт, линии - расчет)

Gorislavets T.N. Defensive features of the wall heat screen under the row of the holes and it's approaches.

Thesis for a candidate's degree of technical sciences on speciality 05.14.05 - Theoretical Thermotechnics. Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev, 1995.

In the manuscript of dissertation are stated

- mathematic model of the three-dimentional heat screen under the hole's row on the plate, which is verified on the experimental results to obtain by heat mass analogy method under new experimental method to elaborate and discribe in this work and temperature profiles and local effectiveness approaches;
- non-state heat screen mathematic model;
- boundary heat transfer conditions and wall-temperature calculate method on the axic-simmetric high-temperature element's surface to cool by combine (screen-convective) method.

Гориславец Т. Н. Защитные свойства пристенной тепловой завесы за рядом отверстий и методы их расчета.

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

В рукописи диссертационной работы представлены:

- математическая модель тепловой пространственной завесы за рядом отверстий на пластине, апробированная на результатах экспериментального исследования, проведенного в рамках работы методом тепломассоаналогии по впервые разработанной методике и методика расчета профилей температуры и локальной эффективности;
- математическая модель нестационарной тепловой завесы;
- методика расчета граничных условий теплообмена и температуры осесимметричной поверхности высокотемпературных элементов, охлаждаемых комбинированным (конвективно-пленочным) способом.

Ключові слова: ефективність теплової завіси; конвективно-плівковий засіб охолодження поверхні; метод тепломасоаналогії; нестационарна теплова завіса; коефіцієнт теплообміну; граничні умови теплообміну; температурні профілі в тепловому пограничному шарі.

Подписано к печати 20. 09. 1995г. формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист, 10 Уч.-изд.лист 1.0.
Тираж 100 Заказ 387.

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

AB 33.242

Издательство и печать 20. 03. 1932 г. Москва
Тираж 100 экз. 127
Лит. № 1-2 в Министерстве просвещения РСФСР
Москва, Мещ-27, Звенигородская ул., 26