

М 315927

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ССРС
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

МЕЗЕНЦЕВ
Анатолий Васильевич

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН ПРИ ЗАГРАДИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ
ПОВЕРХНОСТИ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ
ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ СТРУИ С НАКЛОННОЙ ПРЕГРАДОЙ

Диссертация написана на русском языке

(Специальность - 05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМИНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

МЕЗЕНЦЕВ
Анатолий Васильевич

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН ПРИ ЗАГРАДИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ
ПОВЕРХНОСТИ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ
ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ СТРУИ С НАКЛОННОЙ ПРЕГРАДОЙ

Диссертация написана на русском языке

(Специальность - 05.14.05 - Теоретические основы
теплотехники)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1315927

Мезенцев А. В. Тепло- и мас

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор А.И. Леонтьев;
доктор технических наук, профессор Б.Н. Едаев.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.М. Шведов;
кандидат технических наук, доцент А.А. Еербаков.

Ведущее предприятие - Институт теплофизики СО АН СССР.

Автореферат разослан "30" апреля 1977 г.

Защита диссертации состоится "20" июня 1977 г. на заседании специализированного Совета факультета "Энергомашиностроение" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу:

Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5.

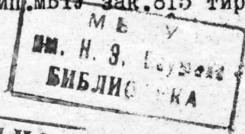
Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент

Э.А. МАНУШИН

Л-79724 подп.к печ.13.4.77.Объем 1п.л.Тип.МВТУ зак.815 тир.100



А н н о т а ц и я : представлены результаты экспериментального исследования заградительного охлаждения, создаваемого тангенциальным вдувом холодного воздуха, в области взаимодействия высокоскоростной сверхзвуковой перерасширенной струи с наклонной плоской преградой.

Получены распределения: давления на стенке ; чисел Маха, максимальных для сечения растекаемой по преграде струи ; тепловых потоков для широкого диапазона изменения массового расхода вдуваемого воздуха. Дано обобщение опытных данных для конвективных тепловых потоков при заградительном охлаждении поверхности.

Приводятся обобщения экспериментальных результатов по эффективности и теплообмену на неадиабатической стенке за участком вдува в условиях совместного действия на пограничный слой неизотермичности, сжимаемости и скачков уплотнения. Определено влияние интенсивности тангенциального вдува на коэффициенты теплоотдачи в области скачков уплотнения. Предложен инженерный метод расчета теплообмена в этих условиях.

А к т у а л ь н о с т ь р а б о т ы объясняется возросшим в последние годы интересом к гидродинамическим методам защиты поверхностей различных устройств от воздействия высокотемпературного и высокоскоростного газового потока. Заградительное охлаждение уже нашло применение в газовых турбинах и ракетных соплах и в будущем может быть использовано для защиты стенок канала МГД - генераторов, передних кромок гиперзвуковых аппаратов и элементов конструкций, подвергающихся воздействию ракетных струй.

Задачи, связанные с обтеканием поверхностей высокоскоростными сверхзвуковыми струями, вызывают большой практический интерес. Однако, в настоящее время их теоретическое решение крайне затруднительно, а в ряде случаев невозможно вообще, поэтому большую ценность представляют экспериментальные исследования различных аспектов этого вопроса.

Ц е л ь р а б о т ы заключается в экспериментальном исследовании заградительного охлаждения, создаваемого тангенциальным вдувом холодного воздуха в спутный поток высокоскоростной сверхзвуковой перерасширенной струи, растекаемой по наклонной плоской преграде, и создании инженерного метода расче-

та теплообмена в этих условиях.

Н а у ч н а я н о в и з н а работы состоит: в полученных экспериментальных результатах по эффективности и теплообмену на неадиабатической стенке при заградительном охлаждении в условиях совместного действия на пограничный слой неизотермичности, сжимаемости и скачков уплотнения; установлении влияния интенсивности тангенциального вдува на коэффициенты теплоотдачи в области скачка уплотнения.

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь работы заключается в создании инженерного метода расчета теплообмена для выбора оптимальных режимов охлаждения поверхностей реальных конструкций, подвергающихся воздействию высокоэнтальпийных сверхзвуковых струй.

Р а б о т а с о с т о и т из введения, четырех глав, списка используемой литературы (97 наименований) и содержит 120 страниц машинописного текста, из которых 30 - рисунки.

В первой главе дается анализ опубликованных работ по вопросам, связанным с темой данного исследования.

Большой вклад в изучение гидродинамических методов защиты вносят исследователи ряда крупных научных организаций: ИТФ СО АН СССР, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Институт механики МГУ им. Ломоносова, ЭНИН им. С.М. Кржижановского, ИВТ АН СССР, МВТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ и др., а также зарубежные исследователи.

Существующие методы расчета теплообмена на неадиабатической стенке делятся на две группы, в зависимости от определения коэффициентов теплоотдачи при заградительном охлаждении.

В первом случае коэффициенты теплоотдачи за участком вдува определяются по разности температур основного потока и стенки.

Во втором случае применяется гипотеза Эккерта об определении коэффициентов теплоотдачи по температуре теплоизолированной стенки. Предполагается, что при таком подходе влияние параметров заградительного охлаждения должно учитываться только при ее определении.

Кутателадзе С.С. и Леонтьев А.И. показали, что интегральное соотношение энергии в этих условиях сохраняет свою обычную форму, если перепад температур и толщина потери энергии определяются по температуре теплоизолированной стенки в рассматриваемом сечении пограничного слоя.

Для нахождения решений используются различные полуэмпирические методы расчета турбулентного пограничного слоя, однако для получения надежных результатов и расширения пределов применимости расчетных методов необходимы экспериментальные исследования.

В настоящее время имеется большое количество экспериментальных работ по заградительному охлаждению. Большая часть исследований относится к турбулентному пограничному слою с постоянными физическими свойствами. В реальных условиях при обтекании преград высокоэнтальпийными сверхзвуковыми струями теплообмен происходит в условиях неизотермичности, сжимаемости и скачков уплотнения. По совместному влиянию этих факторов на теплообмен при тангенциальном вдуве нет публикаций ни в экспериментальном, ни в теоретическом плане.

До настоящего времени не разработано достаточно общей теории теплообмена в отрывных зонах. Большая часть экспериментальных работ по влиянию скачка уплотнения проведена при отсутствии вдува и, в основном, исследовалась газодинамика течения. Работы, посвященные исследованию теплообмена при заградительном охлаждении в этих условиях, практически отсутствуют.

Вторая глава содержит описания экспериментального стенда, моделей, измерительной техники и методик измерений.

Эксперименты проводились в МВТУ им. Н.Э. Баумана на специальном стенде. Термогазодинамическое воздействие на модели осуществлялось сверхзвуковой струей, истекающей из профилированного осесимметричного сопла газогенератора, с параметрами на срезе ($d_{\text{ср}} = 60$ мм): число Маха $M_{\text{ср}} = 2,32$; степень перерасширения $\Pi_{\text{ср}} = 0,81$; соответствующее число Рейнольдса $Re_{\text{ср}} = 0,175 \cdot 10^6$. Температура продуктов сгорания в камере при давлении $P_{\text{оо}} = 1,175$ МПа составляла $T_{\text{оо}} \approx 3000^\circ\text{K}$; средний коэффициент изэнтропы $K = 1,2$.

Модель для измерения тепловых потоков состояла из медной охлаждаемой пластины и теплоизолированного основания. Рабочий участок включал тангенциальную щель высотой $S = 0,85$ мм, выполненную под углом 5° к поверхности, с толщиной разделительной кромки $0,12$ мм и дифференциальный калориметр с 10 изолированными ячейками, 2 перед и 8 за щелью, расположенными вдоль её оси. Обращалось внимание на качество, герметичность и со-

вершенствование изоляции ячеек. В данной конструкции утечки тепла $Q_{\text{п}}$ составляли 1,5% от теплового потока в стенку.

Расход воды в каждой ячейке измерялся объёмным способом с точностью 1,5% и регулировался таким образом, чтобы создать практически одинаковую температуру поверхности стенки.

Массовый расход вдуваемого воздуха измерялся по давлению в камере специального сверхзвукового расходомерного сопла с точностью 2,5% и не зависел от изменения давления на выходе из щели.

Модель для исследования газодинамики течения состояла из медной охлаждаемой пластины, дренированной для измерения давления на стенке. Измерения полного давления в растекаемой струе осуществлялось с помощью охлаждаемой гребенки. С целью получения непрерывных распределений давлений, модель с неподвижно закреплёнными заборниками плавно перемещалась вдоль оси растекания.

Все измерения температур в экспериментах осуществлялись хромель-капельными и хромель-алюмелевыми термопарами диаметром проволоки 0,2 мм с холодными спаями, а давлений – мембранными датчиками, с последующей записью на шлейфовый осциллограф К-20-21. Для каждого опыта проводилось фотографирование картины растекания с помощью специальной камеры.

Визуализация картины растекания – нанесением на поверхности пластины плёнки вязкого состава; получением фотографий на приборе Теплера, с одновременным измерением полного и статического давлений, производилась также на холодных струях ($T_{\infty} = 295^{\circ}$; $n_{\text{ср}} = 0,81$).

В третьей главе приводятся методики обработки экспериментальных результатов по газодинамике, теплообмену и эффективности заградительного охлаждения.

Числа Маха (M_0) определялись с помощью формулы Рейея по измеренным давлению на стенке и полному давлению максимальному для сечения растекаемой струи. Расчёт других параметров растекания проводился по таблицам газодинамических функций.

Параметр вдува определялся как $m_s = \frac{\rho_s w_s}{\rho_w w_{0.5}}$ или $m_{\text{ф}} = \frac{\rho_s w_s}{\rho_w w_{\text{ф}}}$.

Плотность теплового потока $q_{\text{т}}$ определялась по измеренным расходу и перепаду температур воды через калориметрическую ячейку с точностью 7,4%.

Конвективный тепловой поток вычислялся по формуле

$$q = q_x - q_{\lambda}, \quad (3.1)$$

где q_{λ} - тепловой поток в стенку за счет излучения, определяемый в первой расположенной близ щели ячейке при $m_s \rightarrow \infty$, экстраполированием зависимости $q_x = f(m_s)$.

Обобщение результатов измерения конвективных тепловых потоков, отнесенных, с целью исключения возможных систематических изменений в экспериментах, к конвективным тепловым потокам имеющим место без вдува, проводилось по параметру X/δ_i^{**} , где $\delta_i^{**} = m_s \cdot S \cdot i_s / (i_{00} - i_s)$.

Энтальпия теплоизолированной стенки не являлась результатом измерений, а вычислялась по конвективным тепловым потокам из решения интегрального уравнения энергии турбулентного пограничного слоя для рассматриваемых условий. При этом использовалась физическая модель, предполагающая, что при заградительном охлаждении преобладают закономерности пристенного пограничного слоя.

Плоская турбулентная струя холодного воздуха вытекает из щели с параметрами $\rho_s w_s; i_s$ в спутный сверхзвуковой поток с параметрами $\rho_0 w_0; i_{00}$ рис. 1а. На стенке формируется пограничный слой δ , на внешней границе которого имеет место максимальная скорость M_0 . На участке $X_s < X < X_1$ энтальпия на стенке равна энтальпии вдуваемого воздуха $i_{ct} = i_{ct1} = i_s$. С сечения X_1 начинает развиваться тепловой пограничный слой δ_1 на внешней границе которого устанавливается энтальпия теплоизолированной стенки i_{ct}^* .

Интегральное соотношение энергии для поверхности теплообмена $X > X_1$ запишется в виде

$$\frac{d(Re_i^{**} \cdot \Delta i^*)}{dx} = \frac{q_s}{M_{00}}, \quad (3.2)$$

где

$$\Delta i^* = i_{ct}^* - i_{ct}; \quad Re_i^{**} = \frac{\rho_0 w_0 \delta_i^{**}}{M_{00}}; \quad \delta_i^{**} = \int_0^s \frac{\rho w}{\rho_0 w_0} \left(\frac{i - i^*}{i_{ct} - i_{ct}^*} \right) dx.$$

Безразмерный аналог энтальпии теплоизолированной стенки - эффективность заградительного охлаждения определяется как

$$\theta_i = \frac{Re_{i1}^{**}}{Re_i^{**}} = \frac{i_{ct00} - i_{ct}^*}{i_{ct00} - i_{ct1}}. \quad (3.3)$$

Решая уравнение (3.2), с учетом (3.3), получаем уравнение

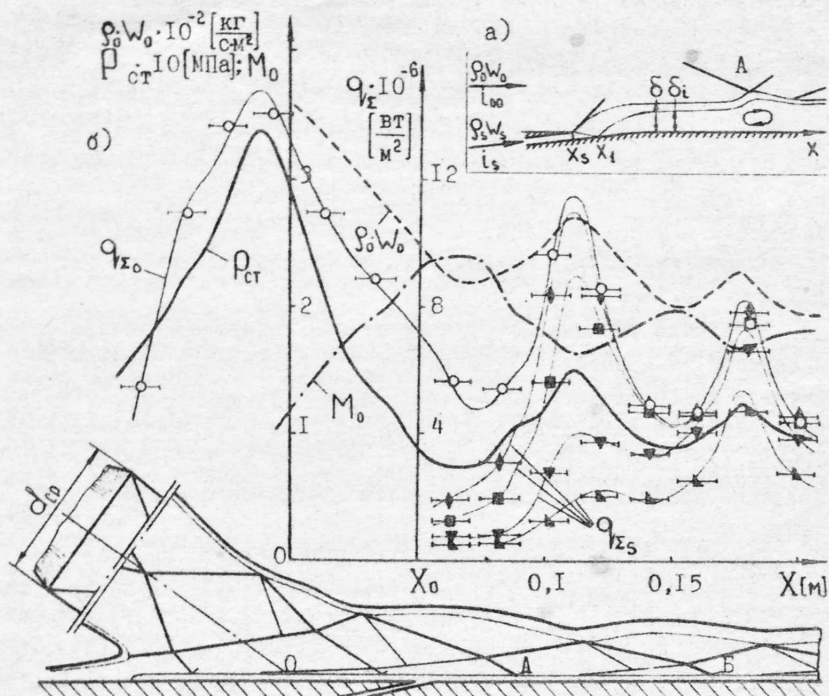


Рис. 1. Качественная картина растекания сверхзвуковой струи по наклонной пластине при заградительном охлаждении.

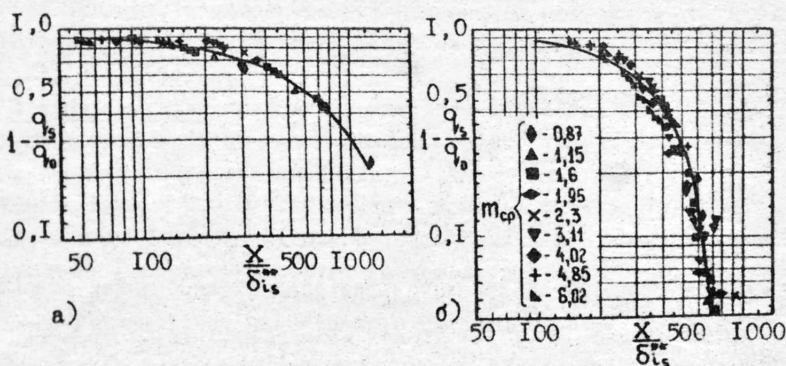


Рис. 2. Обобщение опытных данных по конвективным тепловым потокам при заградительном охлаждении поверхности.

для определения энтальпии теплоизолированной стенки

$$\frac{i_{ct00} - i_{ct}^*}{i_{ct00} - i_{ct1}} = \left[1 + \frac{\int_{x_1}^x q_s \cdot dx}{\rho_0 w_0 \cdot (i_{ct}^* - i_{ct}) \delta i_1^*} \right]^{-1}, \quad (3.4)$$

где $\delta i_1^* = \rho_s w_s \cdot S \cdot i_s / \rho_0 w_0 \cdot (i_{00} - i_s)$.

Для обобщения полученных данных по эффективности заградительного охлаждения использовалась зависимость, предложенная Кутателадзе С.С. и Леонтьевым А.И. для общего случая обтекания криволинейной поверхности

$$\Theta_i = \left[1 + \frac{B}{2} (m+1) \cdot B_{\max}^{m+1} \cdot \frac{Re_{00}}{Re_s^{1.2}} \cdot \int_{x_1}^x \Psi_i \cdot \Psi_m \cdot \left(\frac{M_{ct}}{M_{00}} \right)^m \cdot U \cdot (1 - U^2)^{\frac{1}{K-1}} d\bar{x} \right]^{-\frac{1}{m+1}}, \quad (3.5)$$

где $\Psi_i = \left(\frac{2}{\sqrt{i_{ct}/i_{ct}^*} + 1} \right)^2$; $\Psi_m = \left(\frac{\arctg(M_0 \cdot \sqrt{\frac{K-1}{2}})}{M_0 \cdot \sqrt{\frac{K-1}{2}}} \right)^2$; (3.6)

$$Re_{00} = \frac{\rho_{00} w_{\max} \cdot l}{M_{00}}; \quad \rho_{00} = \frac{\rho_{00}}{R \cdot T_{00}}; \quad w_{\max} = \sqrt{2 i_{00}};$$

$$U = \frac{w_0}{w_{\max}}; \quad \bar{x} = \frac{x}{l}; \quad Re_s = \frac{\rho_s w_s \cdot S}{M_{00}}.$$

Здесь $B = 0,019$; $m = 0,2$; $B_{\max} = 10$.

Обработка данных проводилась по комплексу

$$A = \frac{Re_{00}}{Re_s^{1.2}} \cdot \int_{x_1}^x \Psi_i \cdot \Psi_m \cdot \left(\frac{M_{ct}}{M_{00}} \right)^{0,2} \cdot U \cdot (1 - U^2)^{\frac{1}{K-1}} d\bar{x} \quad (3.7)$$

методом последовательных приближений, так как Ψ_i зависит от Θ_i .

Экспериментальные результаты по теплообмену были обработаны с применением метода локального подобия Иевлева В.П. и относительных предельных законов теплообмена Кутателадзе С.С. и Леонтьева А.И. в виде

$$St = f(Re_i^*), \quad (3.8)$$

где $St = \frac{q_s}{\rho_0 w_0 \cdot (i_{ct}^* - i_{ct})}$; $Re_i^* = (Re_i^*)_{x=x_1} + \frac{\int_{x_1}^x q_s \cdot dx}{M_{00} (i_{ct}^* - i_{ct})}$. (3.9)

При отсутствии вдува $m_s = 0$; $i_{ct}^* = i_{ct00}$; $q_s = q_0$.

Опытные данные приведены к "стандартным" условиям обтекания непроницаемой преграды дозвуковым потоком газа по формуле

$$St = \Psi_i \cdot \Psi_m \cdot St_0, \quad (3.10)$$

где Ψ_i ; Ψ_m - относительные законы теплообмена, учитывающие влияние неизотермичности и сжимаемости, определяемые по формуле (3.6).

По аналогии, в области скачков уплотнения вводится пара-

метр, учитывающий интенсифицирующее влияние скачка на теплообмен при заградительном охлаждении

$$\Psi_{\text{ск}_5} = \frac{St_2 \Psi_1 \Psi_{M_1}}{St_1 \Psi_2 \Psi_{M_2}}, \quad (3.11)$$

где $\frac{St_1}{\Psi_1 \Psi_{M_1}}; \frac{St_2}{\Psi_2 \Psi_{M_2}}$ - приведенные коэффициенты теплоотдачи перед скачком и в области воздействия скачка.

Обобщение опытных данных по параметру $\Psi_{\text{ск}_5}$ в области скачков при заградительном охлаждении проводилось в виде

$$\Psi_{\text{ск}_5} = \Psi_{\text{ск}_0} / \Psi_{\text{ск}_0} = f(\theta), \quad (3.12)$$

где $\theta_{\text{ск}}$ - эффективность заградительного охлаждения перед скачком, определяемая по формуле (3.4).

Здесь параметр $\Psi_{\text{ск}_0}$, полученный Ермолаевым И.К. обобщением имеющихся в литературе опытных данных, учитывает интенсифицирующее влияние скачка уплотнения на теплообмен при отсутствии вдува и определяется как

$$\Psi_{\text{ск}_0} = \frac{St_2 \Psi_1 \Psi_{M_1}}{St_1 \Psi_2 \Psi_{M_2}} = f\left(\frac{P_{00_2}}{P_{00_1}}\right), \quad (3.13)$$

где $P_{00_1}; P_{00_2}$ - полные давления перед и за скачком уплотнения.

В четвертой главе дается анализ результатов экспериментального исследования газодинамики течения, теплообмена и эффективности заградительного охлаждения в области растекания сверхзвуковой струи по наклонной плоской преграде и приводится инженерный метод расчета теплообмена в этих условиях.

Эксперименты были проведены для широкого диапазона изменения параметра вдува $0 \leq M_{\text{ср}} \leq 6$. Холодный воздух вдувался через тангенциальную щель со скоростью $M_s \leq 1$, а также $M_s = 1$ на режиме недорасширения, в направлении растекания. Отношение температур на стенке $T_{\text{ст}}/T_{\text{ст}_0}$ изменялось в пределах $0,1 \div 0,125$. Измерения тепловых потоков при заградительном охлаждении проводилось вдоль оси растекания для трех положений среза щели относительно скачков $\bar{X}_0 = X_0/d_{\text{ср}} = 0,667; 0,834; 0,951$. Длина рабочего участка $5,5 \leq \frac{X}{S} \leq 183$.

На рис. I приведена качественная картина взаимодействия, характерная для данного исследования.

Сравнение фотографий растекания струи с результатами распределений давления и теплового потока на стенке при $M_s = 0$ позволило установить, что

- качественные картины растекания "холодной" и "горячей"

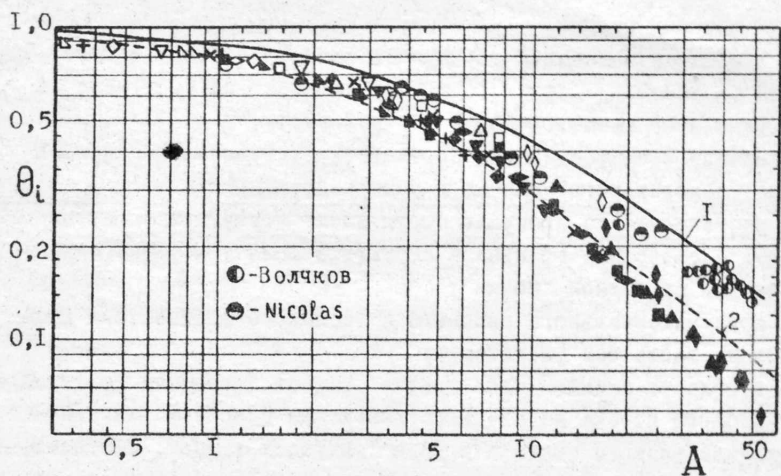


Рис. 3. Обобщение результатов по эффективности заградительного охлаждения.

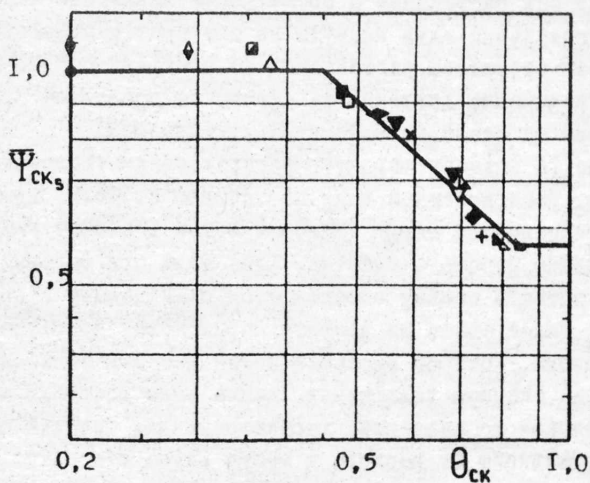


Рис. 4. Обобщение результатов по параметру $\Psi_{ск5}$.

струй в целом сходны;

- в области натекания образуется сложная система волн сжатия и разрежения, структура которых зависит от угла наклона преграды и её расположения в "бочке" струи;

- началу зоны растекания соответствует минимальное приближение "центрального" скачка к поверхности преграды;

- растекаемая по преграде струя имеет форму приплюснутых "бочек", свободная граница и структура волн у которых характерны для свободной "бочки";

- зона максимального силового и теплового воздействия расположена вдоль оси растекания;

- в области скачков наблюдается: разное повышение давления и теплового потока на стенке; уменьшение скорости течения; скопление вязкого состава в виде "вихревых колец", интенсивность которых ослабевает в продольном и поперечном направлении от точки пересечения оси струи с преградой;

- вид кривой давления на стенке и наличие "вихревых колец" позволяют говорить о возможных зонах отрыва, которые расположены вдоль оси растекания и носят узкий локальный характер.

Тангенциальный вдув воздуха не приводит к существенной перестройки структуры растекаемой по преграде струи. Наблюдавшееся изменение давления на стенке не превышало 8,5%, и его влияние на тепловые потоки не учитывалось.

На рис.1б показан характер распределения тепловых потоков. В области, расположенной вниз по течению от щели, при возрастании интенсивности вдува тепловой поток в стенку снижается на всей длине рабочего участка. Близ щели при больших вдувах тепловой поток в стенку определяется охлаждающим газом и излучением. Далее, вниз по течению, происходит возрастание теплового потока, которое выражено более резко в области, расположенной за скачком уплотнения. Длина зоны восстановления тепловых потоков до значений, характерных для течений без охлаждения, зависит от расхода и места вдува относительно скачков.

Обобщения опытных данных конвективных тепловых потоков показано на рис.2 и удовлетворительно описываются зависимостями:

а) в области от среза щели до скачка А

$$1 - q_3/q_0 = \left[1 - 0,005 \left(\frac{X}{\delta_{12}} \right)^{0,115} \right] \quad (4.1)$$

где

$$\delta i_s^{**} = m_s \cdot s \cdot i_s / (i_{s0} - i_s);$$

б) в области за скачком А

$$1 - q_s/q_0 = \left[1 - 0,001 \left(\frac{X}{\delta i_s^{**}} \right)^{1,06} \right], \quad (4.2)$$

где

$$\delta i_s^{**} = [m_s \cdot i_s / (i_{s0} - i_s)]^{0,8} \cdot s.$$

Результаты по эффективности заградительного охлаждения в области растекания высокоэнтальпийной сверхзвуковой струи по наклонной плоской преграде, а также данные работ Волчкова З.П. и Nicolaus в сверхзвуковых соплах приведены на рис.3. Экспериментальные результаты в области, расположенной от среза щели до скачка уплотнения А (белые точки), удовлетворительно описываются зависимостью (3.5), хотя кривая 1 завышает значения эффективности до 12%, и находятся в удовлетворительном соответствии с другими опытными данными (черно-белые точки). Это сравнение позволяет сделать вывод о возможности обобщения опытов зависимостью (3.5).

В области, расположенной за скачком уплотнения А, наблюдается резкое снижение эффективности (черные точки) до 100% по сравнению с расчетом по формуле (3.5). Результаты по эффективности заградительного охлаждения в этой области удовлетворительно обобщаются зависимостью (кривая 2).

$$\theta_i = \left[1 + 0,352 \cdot \frac{Re_{s0}}{Re_{s1}^{1,2}} \int_{x_1}^x \Psi_i \cdot \Psi_m \cdot \left(\frac{M_{t1}}{M_{s0}} \right)^{0,2} \cdot U (1 - U^2)^{\frac{1}{2(k-1)}} dx \right]^{-0,835} \quad (4.3)$$

На рис.5 приведены сопоставления экспериментальных значений St с законом теплообмена для "стандартных" условий

$$St_0 = 0,0095 \cdot Re_i^{** - 0,2} P_z^{-0,12}. \quad (4.4)$$

Как видно из рис.5а наблюдается значительное завышение экспериментальных точек до 250%.

На рис.5б коэффициенты теплоотдачи приведены к "стандартным" условиям делением на $\Psi_i \cdot \Psi_m$, учитывающих неизотермичность и сжимаемость. Наблюдается удовлетворительное совпадение. Исключение составляют две области опытных данных.

В непосредственной близости от щели ($\frac{X}{S} < 40$) занижение экспериментальных точек достигает 50% и их отклонение увеличивается с ростом интенсивности вдува. Это объясняется тем, что здесь превалируют струйные закономерности и пристенный пограничный слой развивается в ядре струи.

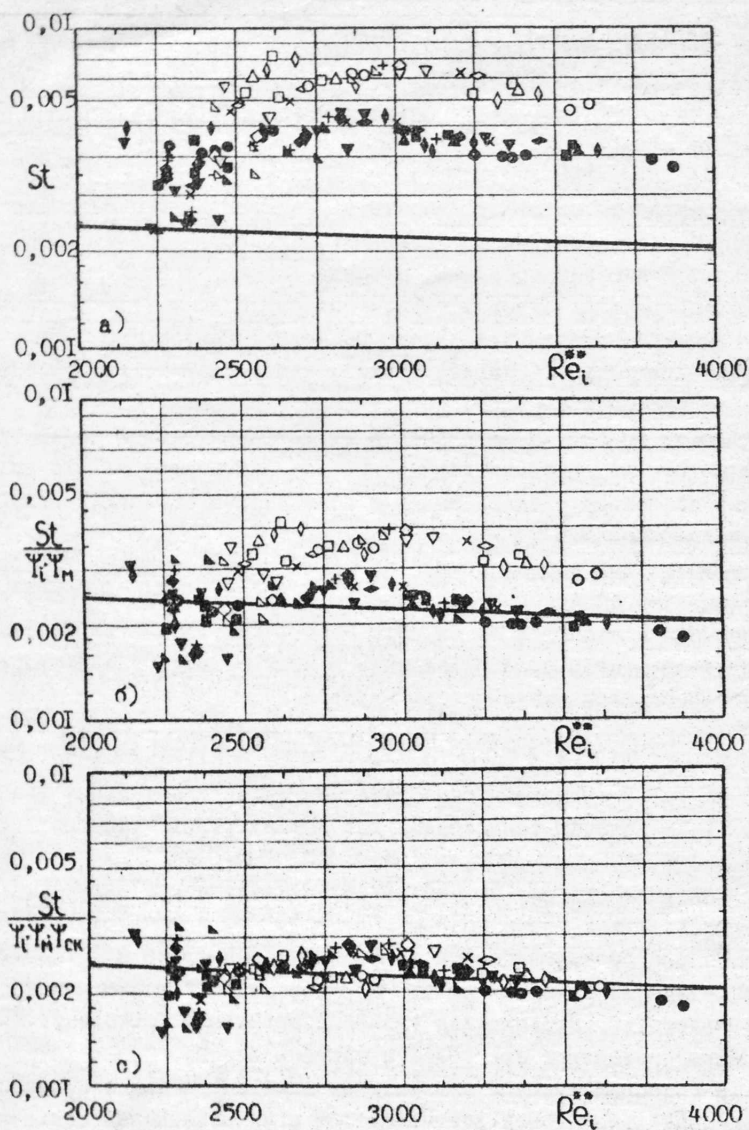


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных значений чисел Стэнтона со "стандартным" законом теплообмена.

В области скачков уплотнения завышение данных (белые точки) достигает 80%. Отклонение опытных точек снижается с увеличением интенсивности вдува и уменьшением расстояния от среза щели до скачка уплотнения Λ .

Результаты по параметру $\Psi_{\text{ск}_2}$, обработанные по зависимости (3.12), приведены на рис. 4 и удовлетворительно описываются уравнением

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{ск}_2} &= 1,51 - 1,13\theta_{\text{ск}}, & 0,45 < \theta_{\text{ск}} < 0,83; \\ \Psi_{\text{ск}_2} &= 1, & \theta_{\text{ск}} < 0,45; \quad \Psi_{\text{ск}_2} &= 0,57 & \theta_{\text{ск}} > 0,83. \end{aligned} \quad (4.5)$$

На рис. 5с коэффициенты теплоотдачи в области скачков приведены к "стандартным" условиям делением на $\Psi_{\text{ск}_2} \cdot \Psi_{\text{ск}_0}$. Наблюдается удовлетворительное совпадение. Максимальное отклонение опытных точек в области $\frac{X}{S} > 40$ составляет $\pm 12,5\%$.

На основании проведенных исследований был разработан инженерный метод расчета теплообмена в этих условиях при известной газодинамике течения.

Тепловой поток в стенку определяется по формуле

$$q_{\text{ст}}^{**} = 0,0095 \cdot g_{\text{ст}} \cdot (i_{\text{ст}}^* - i_{\text{ст}}) \cdot \text{Re}_i^{** \cdot 0,2} \cdot \text{Pr}_i^{0,12} \cdot \Psi_i \cdot \Psi_{\text{ск}_2} \cdot \Psi_{\text{ск}_0} + q_{\text{л}} \quad (4.6)$$

Связь Re_i с продольной координатой находится из решения интегрального соотношения энергии для конкретных условий обтекания преграды. В общем виде

$$\begin{aligned} \text{Re}_i^{**} &= \frac{1}{\Delta t^*} \left\{ 0,181 \cdot \text{Pr}_i^{0,12} \cdot \text{Re}_{00} \cdot \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}} \Psi_i \cdot \Psi_{\text{ск}_2} \cdot \Psi_{\text{ск}_0} \left(\frac{M_{\text{ст}}}{M_{00}} \right)^{0,2} \cdot U (1 - U^2)^{\frac{1}{K-1}} \times \right. \\ &\quad \left. \times \Delta t^{1,2} d\bar{X} + \left(\text{Re}_i^* \cdot \Delta t^* \right)_{\bar{x}=\bar{x}_1}^{1,2} \right\}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

В формулах (4.6) и (4.7) функция $\Psi_{\text{ск}_2} \cdot \Psi_{\text{ск}_0}$ вводится только в местах воздействия скачков уплотнения.

Энтальпия теплоизолированной стенки определяется по формуле (3.5), а за скачком уплотнения по формуле (4.3).

Максимальная погрешность расчетов по предложенной методике в сравнении с опытными данными настоящей работы составила $\pm 30\%$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

I. Проведено экспериментальное исследование заградительно-го охлаждения, создаваемого тангенциальным вдувом холодного воздуха со скоростью $M_s \leq 1$, в области растекания осесимметричной высокочантальной сверхзвуковой перерасширенной струи с параметрами $T_{00} \approx 3000^\circ\text{K}$; $M_{\text{ср}} = 2,32$; $n_{\text{ср}} = 0,81$ по наклонной пло-

ской преграде, при отношении температур на стенке $T_{ст}/T_{ст00} = 0,1-0,125$ и параметре вдува $0 \leq m_{ср} \leq 6$.

2. Заградительное охлаждение может быть использовано для защиты поверхностей конструкций, подвергающихся воздействию высокотемпературных сверхзвуковых струй.

3. Предложен метод обработки экспериментальных данных по конвективным тепловым потокам для получения результатов по эффективности заградительного охлаждения.

4. Скачки уплотнения резко ухудшают эффективность и восстанавливают тепловые потоки до значений, характерных для течения без вдува.

5. Проведено обобщение данных по эффективности и конвективным тепловым потокам при наличии скачков уплотнения в области тангенциального вдува.

6. Экспериментально исследован теплообмен на неадиабатической стенке при заградительном охлаждении в условиях совместного влияния неизотермичности, сжимаемости и скачков уплотнения. Определено влияние интенсивности тангенциального вдува на коэффициенты теплоотдачи в области взаимодействия скачка уплотнения с пограничным слоем.

7. Показана правомерность использования интегрального метода, предложенного Кутателадзе С.С. и Леонтьевым А.И., для определения коэффициентов теплоотдачи по энтальпии теплоизолированной стенки в области взаимодействия высокоэнтальпийной сверхзвуковой струи с наклонной преградой и разработан, на его основе, инженерный метод расчета теплообмена в этих условиях.

Основные результаты диссертации опубликованы в статьях:

1. А.И.Леонтьев, А.В.Мезенцев, В.Г.Пузач, Теплообмен при тангенциальном вдуве в области взаимодействия сверхзвуковой высокотемпературной струи с наклонной преградой. Изв. ВУЗов СССР "Машиностроение", № 10, 1976;

2. И.К.Ермолаев, А.В.Мезенцев, В.А.Фадеев, Е.Н.Бдаев, Исследование газодинамики течения в области взаимодействия струи с наклонной преградой. Изв. ВУЗов СССР "Машиностроение", № 1, 1977.