М259091

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

ФАДЕЕВ Виктор Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ С НАКЛОННОЙ ПРЕГРАДОЙ

Диссертация написана на русском языке

(Специальность—05.14.05. Теоретические основы теплотехники)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1974

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

Научный руководитель—

доктор технических наук, профессор А. И. Леонтьев.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Брдлик П. М.,
кандидат технических наук, доцент Клюнин Ю. А.

Ведущее предприятие: Институт теплофизики СО АН СССР.

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1974 г. на заседании Совета факультета «Энергомашиностроение» МВТУ им. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5.

Ваши отзы[illegible]атью, просьба высы[illegible]

С диссерта[illegible]Учи-лища.

Ученый се[illegible]

профессор,[illegible]олов.

М259091

Л-93337 от 6/V-[illegible]р. 150.

Современный технический прогресс неразрывно связан с освоением высоких температур и значительных тепловых потоков. Широкое использование в современной технике различных теплоносителей и рабочих тел, необходимость реализации в теплообменных аппаратах больших плотностей теплового потока и температурных градиентов, а также высоких скоростей потоков, требует изучения процессов движения жидкостей и газов при наличии теплообмена в различных условиях.

При строительстве крупных энергетических установок и газодинамических устройств, где удельные тепловые потоки могут достигать значительных величин $\sim 50 + 100$ М вт/м^2, особенно актуальными являются исследования в области тепло-массообмена для создания работоспособных элементов конструкций, подверженных воздействию высокотемпературного газового потока.

Особое место в этих исследованиях принадлежит задачам, связанным с расчетом теплообмена на различного рода преградах при натекании на них струй, особенно высокотемпературных и сверхзвуковых. Процессы теплообмена в этих условиях остаются еще недостаточно изученными.

М259091

Течение, возникающее в области падения сверхзвуковой струи на наклонную преграду, характеризуется рядом особенностей. Наличие перед преградой отошедшего скачка уплотнения, области повышенного и пониженного давления вдоль преграды, зоны взаимодействия скачков уплотнения с растекающейся струей, в которых наблюдается резкое увеличение теплового потока, создают сложную картину взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой. Ввиду сложности явления, теоретическое решение данного вопроса является крайне затруднительным. В то же время опубликованные экспериментальные исследования в этой области малочислены.

Настоящая работа посвящена исследованию теплообмена при взаимодействии осесимметричной высокотемпературной сверхзвуковой струи с наклонной плоской преградой, расположенной под различными углами к оси падающей струи $30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ и на различных расстояниях от среза сопла до преграды $3 \leq \bar{\ell} = \frac{\ell}{d_a} \leq 16$.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

В первой главе проведен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию газодинамики и теплообм-

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1259091
Фадеев В.А. Исследование

мена в области натекания сверхзвуковых струй на преграды и в зоне взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем.

Вторая глава содержит описание экспериментального стенда и моделей, на которых были выполнены исследования качественной картины течения с одновременным измерением параметров струи вдоль ее оси и при растекании по наклонной преграде. Экспериментальный стенд включал в себя газогенератор, служащий источником высокотемпературных продуктов сгорания, систему подачи топлива, системы охлаждения стенда и моделей, систему управления стендом, измерительные приборы и устройства.

Термогазодинамическое воздействие на модели осуществлялось высокоэнтальпийной сверхзвуковой струей. Струя, истекающая из сопла газогенератора диаметром d_a = 60 мм, имела на выходе число Маха - 2,32 и степень нерасчетности n_a = 0,8. Температура продуктов сгорания в камере газогенератора при давлении $11{,}4 \cdot 10^5$ н/м^2 составляла 3000°К, средний показатель изоэнтропы κ = 1,2.

С помощью охлаждаемой трубки Пито и охлаждаемого конуса осуществлялись измерения полного давления и скорости течения вдоль оси струи. Перемещение фиксировалось датчиком пути с точностью 0,03 калибра. В процессе испытания производилась киносъемка конуса скоростной кинокамерой. Давление измерялось датчиками тип. МДД с точностью 2 %. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался шлейфовый осциллограф К-20. Результаты испытаний показали, что изменение полного давления в зоне начального участка происходит неравномерно и имеет скачкообразный характер. В зоне переходного участка наблюдались слабые колебания давления вдоль оси струи с общим спадом на основном участке. Минимальные значения давления были зафиксированы в сечениях струи, где расположены узлы скачков уплотнения, а максимальные - в местах сужения границы струи.

Температура торможения в зоне начального участка вдоль оси струи, измеренная вольфрам-молибден-алюмелевыми термопарами, остается практически постоянной, равной температуре в камере сгорания, и уменьшается в зоне переходного и основного участков в 1,2 раза на расстоянии 12 калибров.

Проведенное фотографирование картины натекания струи газогенератора на наклонную преграду с одновременным измерением параметров течения позволило выявить наиболее напряженные в сило-

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

ловом, а в дальнейшем и тепловом отношении участки пластины. В основном, это зоны, где наблюдается взаимодействие скачков уплотнения с пограничным слоем растекающейся струи.

Визуализация картины растекания по плоской преграде проводилась ранее на воздушном стенде (T_{oo} = 293°К). Перед испытанием на поверхность пластины наносился вязкий состав, который под действием газового потока растекался, формируя картину течения. Одновременно с помощью прибора Теплера производилась съемка картины натекания. Анализ полученных фотографий с данными измерений распределения давления по преграде позволил установить, что

- на поверхности пластины существует сложная система скачков уплотнения;
- началу зоны растекания соответствует минимальное приближение центрального скачка уплотнения к поверхности пластины;
- в местах скопления состава ("вихревые жгуты"), имеющих форму, близкую к форме эллипса, наблюдается местное повышение давления;
- интенсивность "вихревых жгутов" при увеличении угла наклона и удалении преграды от среза сопла ослабевает.

Модель для исследования газодинамики течения струи газогенератора вдоль преграды состояла из плоской охлаждаемой пластины, на которой проводились замеры полного и статического давления газа вдоль оси растекания струи по преграде. Измерение полного давления осуществлялось с помощью охлаждаемого зонда малогабаритными трубками Пито, приемное отверстие которых имело диаметр 0,5 мм. Расстояние от оси отверстий до поверхности пластины составляло 0,5 мм; 2,2 мм; 4,3 мм; 9,5 мм; 14 мм.

Плавное перемещение модели относительно газовой струи позволяло получить непрерывное распределение полного и статического давления вдоль пластины. Давление измерялось датчиками типа МДД. Запись полного давления проводилась как вдоль, так и навстречу растекающейся струи.

По мере распространения струи по преграде картина изменения статического давления (Р) отчасти повторяется. Было отмечено, что давление на пластине при расположении ее в пределах одной "бочки" в зоне начального участка может изменяться в 2 ÷ 2,5 раза. Максимум давления соответствует нахождению преграды в местах сужения, а минимум - в местах расширения " бочкообразной" грани-

цы струи. В районе падения скачков уплотнения наблюдается местное повышение давления, а характер непрерывной записи давления позволяет судить о наличии возможных зон отрыва пограничного слоя на пластине.

Распределения местных чисел Маха определялись с помощью формулы Релея по экспериментальным данным полного и статического давления. В районе критической точки изменение скорости вдоль внешней границы близко к линейному, а при $\bar{X} = X/r_a = 2 \div 3$ заметно отличается от линейного. Распределение скорости вдоль пластины по сравнению с распределением статического давления носит также периодический характер, но диаметрально противоположный (рис.Iа.).

Третья глава содержит методику измерения и результаты экспериментального исследования локальных тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи.

Эксперименты проводились на охлаждаемой модели, термогазодинамическое воздействие на которую осуществлялось струей газогенератора.

Модель состояла из медной пластины размером 320х300, соединенной через резиновую прокладку с теплоизолированным основанием. На наружной поверхности пластины располагался опытный участок, а на внутренней - имелось по всей длине 4 прямоугольных паза для охлаждения модели в процессе испытания. Опытный участок представлял собой дифференциальный калориметр с I0 изолированными друг от друга и от основания ячейками размером I8хI8 мм^2. Толщина стенки в каждой ячейке $\approx$ I,2 мм. Подача и вывод охлаждающей жидкости из ячейки осуществлялись через щелевые прорези в основании модели. Обращалось внимание на совершенствование теплоизоляции и учет возможных тепловых утечек; на качество стыков между различными частями модели и герметичность соединений.

Началу эксперимента предшествовала тарировка расхода и термопар в каждой ячейке. Поверхность пластины полировалась для уменьшения величины лучистого теплового потока. Перед испытанием производилось включение системы охлаждения модели и всей регистрирующей аппаратуры. Показания хромель-копелевых термопар и расход охлаждающей жидкости фиксировались на осциллографе К-20. Для уменьшения методических погрешностей температурные измере-

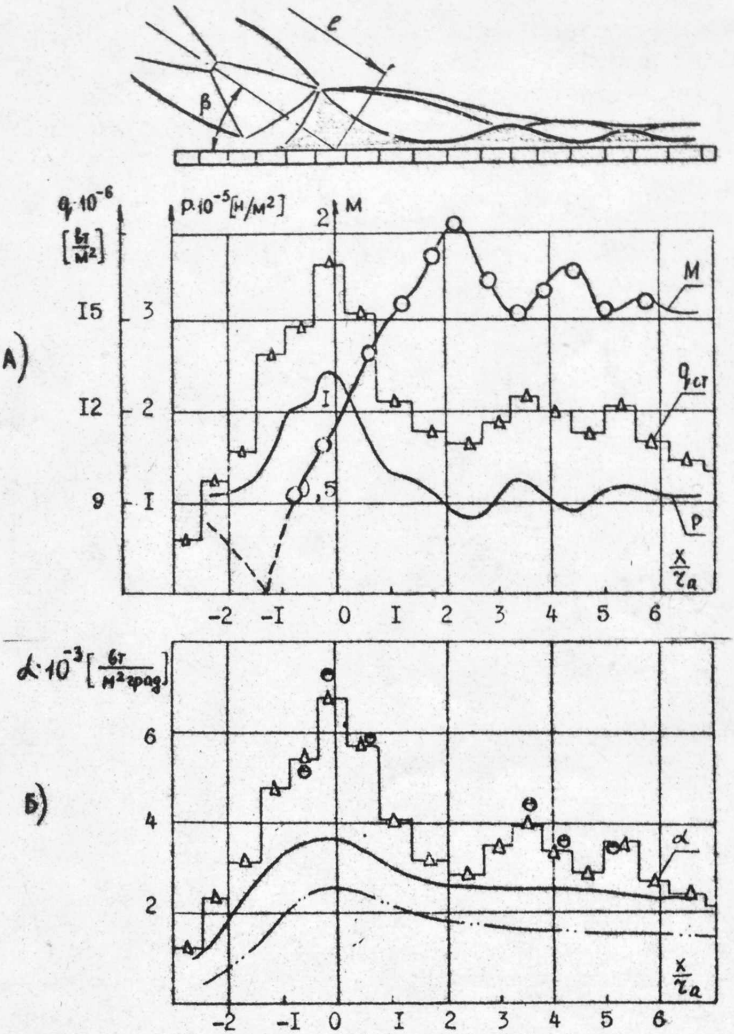

Рис. I. Картина взаимодействия и распределение параметров на пластине вдоль линии растекания для угла наклона $\beta = 35^0$ на расстоянии $\bar{\ell} = 8$ от среза сопла: $q_{ст}$ – тепловой поток; p – статическое давление; M – число Маха; α – коэффициент теплоотдачи. Б) Δ – эксперимент; ——— "стандартные условия"; — расчёт; ⊖ – значения "α" с учётом $\varphi_{ск}$.

ния производились после выхода всех частей модели на стационарный тепловой режим.

В процессе эксперимента измерялись следующие основные величины: температура охлаждающей жидкости на входе и выходе из ячейки, температура стенки, расход охлаждающей жидкости через каждую ячейку.

Исследования велись в условиях существенной неизотермичности ($T_{ст}/T^{*}_{ст}$= 0,II ÷ 0,I6) при практически постоянной температуре стенки. По данным расхода, температур стенки и охлаждающей жидкости определялась величина среднего удельного теплового потока ($q_{ст}$), воспринимаемая каждой ячейкой. Максимальная относительная погрешность измерения которого не превышала 7,8 %.

Полученные экспериментальные данные по газодинамике и теплообмену позволили оценить наиболее напряженные в тепловом отношении участки пластины. В районе воздействия скачков уплотнения наблюдается резкое увеличение теплового потока. Ниже по течению в зоне разряжения тепловой поток падает в 2 ÷ 3 раза, а далее в зоне повышенного давления он вновь возрастает. По мере удаления преграды от среза сопла и перемещения в зону основного участка величина максимального теплового потока падает в I,5 ÷ 2 раза по сравнению с тепловым потоком в зоне начального участка.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить, что максимальное значение теплового потока в пределах одной "бочки" имеет место, когда преграда установлена в местах сужения "бочки" струи, и в I,5 ÷ I,8 раза превышало значение теплового потока при расположении пластины в местах расширения "бочки" струи.

Для выяснения распределения местных тепловых потоков по ширине пластины производился сдвиг калориметрического участка относительно оси растекающейся струи (рис.2). Проведенные исследования показали, что

- зона максимального теплового воздействия расположена вдоль оси растекания струи по пластине;
- закономерности распределения тепловых потоков для центральной области распространяются и на периферийные;
- отмечаются всплески теплового потока (~ 40%) на пластине по сравнению с соответствующими на оси в местах пересечения

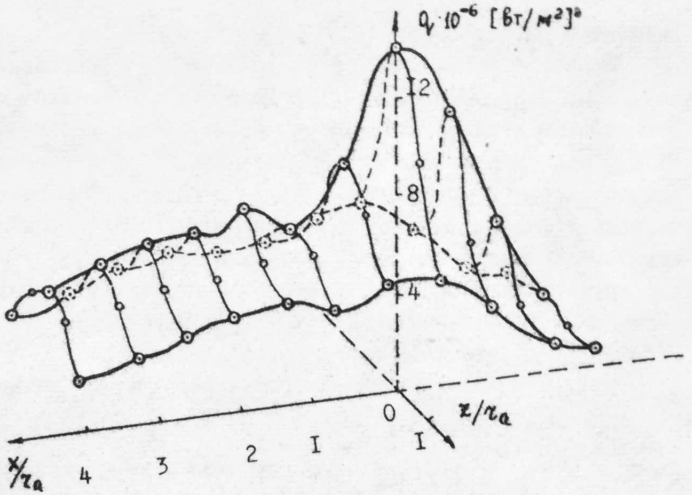

Рис. 2. Распределение локальных тепловых потоков по поверхности пластины: $\beta = 35^0$; $\bar{\ell} = 8$.

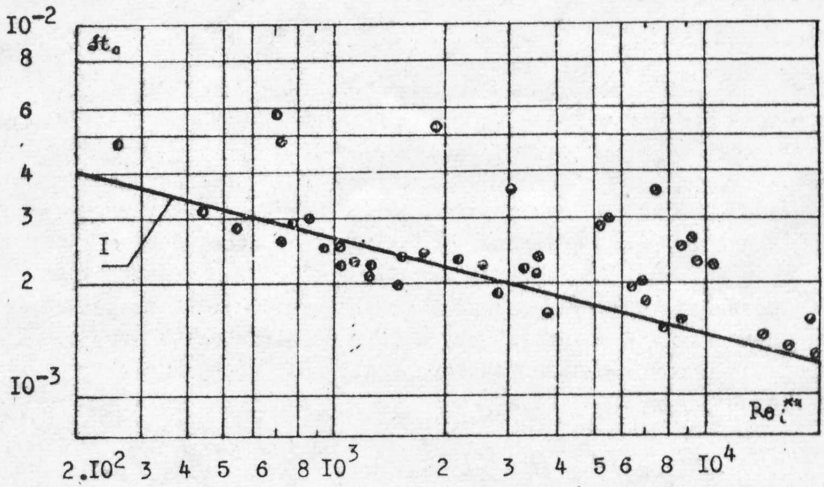

Рис. 3. Зависимость числа St_0 от числа Re^{**}_ℓ для различных нерасчётностей и чисел Маха в выходном сечении сопла

($\beta = 35^0$; $\bar{\ell} = 6$). I- $St_0 = 0{,}0095\ Re^{**}_\ell{}^{-0{,}2}\ P_\ell^{-0{,}72}$

◐ -M=2,32 n=0,8; ⊘ -M=3,26 n=0,45;

◒ -M=3,4 n=0,3; ⊗ -M=3,26 n=0,22.

"вихревых жгутов".

Комплекс проведенных исследований дает основание предположить, что наиболее характерной областью для анализа теплообмена является зона вдоль оси растекания струи по пластине.

Вследствие сложности газодинамических и физико-химических процессов при взаимодействии струи с преградой, которые в настоящее время еще недостаточно изучены, теоретическое решение теплового воздействия в данном случае наталкивается на значительные трудности. В основу расчета был положен интегральный метод, основанный на ассимптотической теории турбулентного пограничного слоя С.С. Кутателадзе и А.И. Леонтьева.

Из уравнения энергии для осесимметричного случая

$$\frac{d\,Re_i^{**}}{d\bar{x}} + Re_i^{**}\left[\frac{1}{i_{cr}^{*}-i_{cr}}\cdot\frac{d(i_{cr}^{*}-i_{cr})}{d\bar{x}}+\frac{1}{R}\cdot\frac{dR}{d\bar{x}}\right]=Re_L\,St \qquad (1)$$

следует, что при расположении пластины перпендикулярно набегающей струе значение числа Рейнольдса, построенного по толщине потери энергии,

$$Re_i^{**}=\frac{1}{x(i_{cr}^{*}-i_{cr})}\int_0^x\frac{q_{cr}\cdot x\,dx}{\mu_\infty} \qquad (2)$$

вдвое меньше, чем в случае параллельного обтекания

$$Re_i^{**}=\frac{1}{i_{cr}^{*}-i_{cr}}\int_0^x\frac{q_{cr}\cdot dx}{\mu_\infty}\,, \qquad (3)$$

где i_{cr}^{*} – энтальпия газа на теплоизолированной стенке;

i_{cr} – энтальпия газа на стенке.

Учитывая трехмерный характер взаимодействия, была осуществлена оценка влияния угла наклона пластины на течение при растекании струи по преграде. Для этого была использована ортогональная система координат α_1, γ_1, β_1, где координата "β_1" совпадала с линиями тока, а координата "γ_1", направленная перпендикулярно плоскости, с "y" в системе $X;Y;Z$.

В ортогональной системе координат уравнение энергии имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial\alpha_1}\left[h_2'\rho_1 V_1(i_{cr}^{*}-i_{cr})\delta_i^{**}\right]=h_1'h_2'q_{cr} \qquad (4)$$

где h_1' и h_2' – коэффициенты Ламе.

Проинтегрировав уравнение (4), получаем

$$Re_i^{**}=\frac{\rho\int_0^{\alpha_1}h_1'\cdot h_2'\cdot q_{cr}\cdot d\alpha_1}{\mu_\infty\cdot h_2'(i_{cr}^{*}-i_{cr})} \qquad (5)$$

Тогда для плоского течения $h_1' = h_2' = I$, а для осесимметричного $h_1' = I$; $h_2' = R$.

Если координату "x" направить вдоль оси растекания струи по наклонной поверхности, то в этом случае $h_1' = I$, а $h_2' = x^m$, где "m" связан с углом наклона пластины "β" и равен $m = 2\beta/\pi$. Проведя ряд преобразований, получим для числа Рейнольдса (Re_i^{**}) значение коэффициента, учитывающее влияние угла наклона пластины (рис.4.)

$$\varphi = \frac{1}{2\beta/\pi + 1} \quad (6). \text{ Тогда } Re_{i\beta}^{**} = \varphi \cdot Re_{i\beta=0}^{**} \quad (7)$$

Экспериментальные данные по теплообмену и газодинамике были обработаны с использованием метода локального подобия, предложенного Иевлевым В.М. Согласно этому методу, полученные результаты были приведены к условиям безградиентного изотермического течения на непроницаемой пластине ("стандартные условия"), для которой закон теплообмена имеет вид:

$$St_0 = \frac{B}{2} \cdot Re_i^{**-m} \cdot Pr^{-n} = \frac{St}{\psi_s} \quad (8)$$

Функция ψ_s, позволяющая аналитически учесть влияние неизотермичности, сжимаемости, диссоциации на закон теплообмена определялась по предельной формуле Кутателадзе С.С. и Леонтьева А.И.:

$$\psi_s = \frac{1}{z_T} \int_{\bar{\xi}_{T_1}}^{1} \left(\frac{\tilde{\rho}\tilde{q}}{\tilde{q}_0} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \bar{\xi}_T} \cdot \frac{\partial v}{\partial \bar{\xi}_T} \right)^{1/2} d\bar{\xi}_T \quad (9)$$

где $z_T = \left(\frac{St_0}{\rho_{2T}} \right)^{1/2} \int_{\bar{\xi}_{T_1}}^{1} \left(\frac{\tilde{q}_0}{1-\beta_T} \right)^{1/2} \frac{d\bar{\xi}_T}{\tilde{c}_T}$

Значения ψ_s были вычислены на ЭВМ "Минск-22".

Экспериментальные значения чисел Стентона для различных углов наклона ($\beta = 35^0 \div 90^0$), различных расстояний преграды от среза сопла ($\bar{c} = 3 \div 14{,}8$), различных нерасчетностей ($n_a = 0{,}8 \div 0{,}22$) и чисел Маха на срезе сопла ($M_a = 2{,}32 \div 3{,}4$), приведенные к "стандартным условиям" с учетом влияния угла наклона пластины (рис.3,6,7), показали, что в области взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем наблюдается существенное отклонение опытных данных (В 2 ÷ 3 раза) от универсального закона теплообмена.

По аналогии с относительными законами теплообмена вводится параметр, учитывающий интенсифицирующее влияние скачка уплотне-

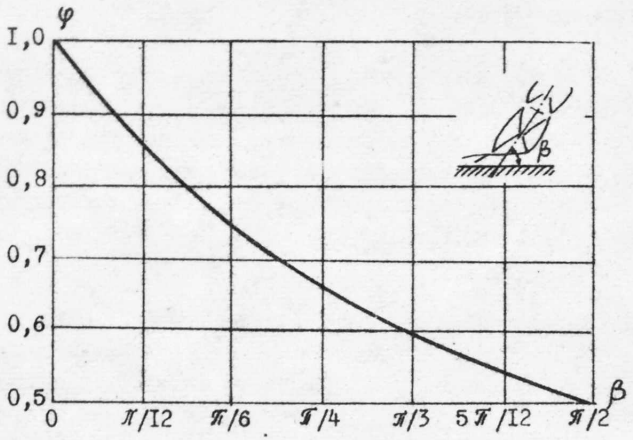

Рис. 4. Значения коэффициента "Ψ" в зависимости от угла наклона пластины (β).

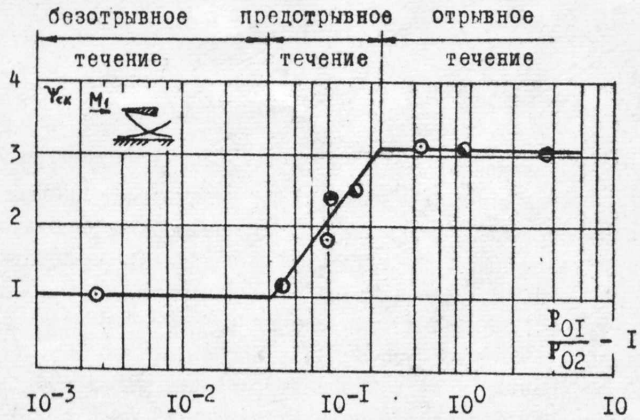

Рис.5. Значение коэффициента $\Psi_{ск}$ по данным работ различных авторов: -⊙- Барышев Ю.В.(M_I=2,2), -●- Бэк (M_I=3,57) -●- Дульбран(M_I=2 +I0), -◔- Мэгнан (M_I=I0,2)

ния на теплоотдачу: $\Psi_{ск} = \frac{St_2 \cdot \Psi_{s1}}{St_1 \cdot \Psi_{s2}} = f\left(\frac{p_{01}}{p_{02}}\right)$ (IO)

где Ψ_{s1}, Ψ_{s2}; и p_{01}, p_{02} - соответственно относительные законы теплообмена и полное давление до и в зоне взаимодействия скачка уплотнения с пограничным слоем.

На основании анализа работ по теплообмену (Барышева, Бэка, Кульбрана, Магнана) при воздействии скачков уплотнения на турбулентный пограничный слой на плоской пластине были выявлены три типа взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем.

I. Скачки уплотнения слабой интенсивности, которые не вызывают интенсификации теплообмена в зоне взаимодействия $\Psi_{ск} = I$.

2. Скачки уплотнения, действующие на пограничный слой, но не приводящие к отрыву (предотрывная зона):

$$1{,}04 \leq \frac{p_{01}}{p_{02}} < 1{,}21 \; ; \quad St_2 = \left[0{,}5 + 12{,}5\left(\frac{p_{01}}{p_{02}} - 1\right)\right] St_{02} \cdot \Psi_{s2}$$

3. Скачки уплотнения, приводящие к отрыву. В этой области наблюдается консервативность $\Psi_{ск}$ к изменению интенсивности скачка уплотнения

$$\frac{p_{01}}{p_{02}} \geq 1{,}21 \; ; \quad St_2 = 3{,}12\, St_{02} \cdot \Psi_{s2}$$

В случае натекания сверхзвуковой струи на наклонную преграду взаимодействие скачков уплотнения носит сложный характер. Однако причины, вызывающие интенсификацию теплообмена остаются теми же. Следовательно, полученные значения " $\Psi_{ск}$ " можно распространить и на данный случай. Используя результаты измерений полного давления и зависимость $\Psi_{ск}$ (рис.5.) , экспериментальные данные по теплообмену были обработаны в виде

$$St_0 = \frac{St_{эксп.}}{\Psi_s \cdot \Psi_{ск}} = f\left(Re_{i\,\beta}^{**}\right)$$

где

$$St_{эксп.} = \frac{q_{ст}\sqrt{RT_{00}}}{q(M) \cdot \varepsilon(1) \cdot p_{00}\sqrt{2\kappa/(\kappa+1)}\,(i_{ст}^{*} - i_{ст})}$$

Результаты обработки показали незначительное отклонение опытных точек от универсального закона теплообмена.

На основании предложенного метода расчета, локальные значения коэффициентов теплоотдачи при натекании высокоэнтальпийной сверхзвуковой струи на наклонную преграду определялись по формуле $\alpha = \rho W St$.

Критерий Стентона определялся из уравнения:

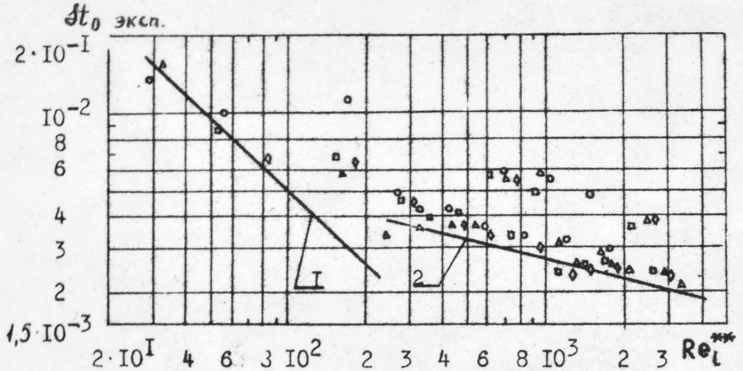

Рис. 6 .Зависимость числа St_0 от числа Re_i^{**} для различных углов на одном калибре $\bar{\ell}=8$. I- $St_0=0{,}22 Re_i^{**-1} \cdot Pr^{-4/3}$
2- $St_0=0{,}0095\ Re_i^{**-0{,}2} \cdot Pr^{-0{,}72}$;
○ - $\beta=90^0$; Δ - $\beta=60^0$; □ - $\beta=45^0$; ◇ - $\beta=35^0$.

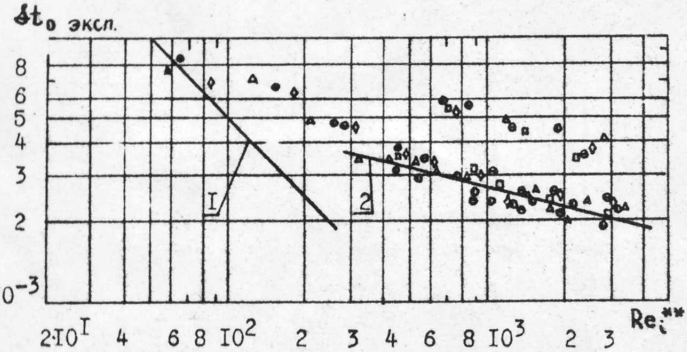

Рис. 7 .Зависимость числа St_0 от числа Re_i^{**} для различных калибров при угле наклона $\beta=35^0$. I- $St_0=0{,}22\cdot Re_i^{**-1} Pr^{-4/3}$;
2- $St_0=0{,}0095\ Re_i^{**-0{,}2} Pr^{-0{,}72}$; Δ - $\bar{\ell}=3$; ● - $\bar{\ell}=8$;
⊖ - $\bar{\ell}=10$; □ - $\bar{\ell}=12$; ⊖ - $\bar{\ell}=14{,}8$.

$$St = \frac{B}{2}\, Re_{i\beta=0}^{**\,-m} \cdot \varphi^{-m} \cdot Pr^{-n} \cdot \psi_s \cdot \psi_{cx}$$

где $$Re_{i\beta=0}^{**} = \frac{1}{\Delta i}\left\{\frac{1+m}{2Pr^n} B\left[\int_{x_0}^{x_1} Re_L \cdot \psi_s \left(\frac{\mu_{cr}}{\mu_\infty}\right)^m \cdot \Delta i^{1+m}\, dx + \right.\right.$$

$$+ \int_{x_1}^{x_2} Re_L \cdot \psi_s \cdot \psi_{cx} \cdot \left(\frac{\mu_{cr}}{\mu_\infty}\right)^m \cdot \Delta i^{1+m}\, dx + \int_{x_2}^{x} Re_L \cdot \psi_s \left(\frac{\mu_{cr}}{\mu_\infty}\right)^m \Delta i \cdot dx\Big] +$$

$$\left. + \left(Re_i^{**} \Delta i\right)_{x\, x_0}^{1+m}\right\}^{\frac{1}{1+m}}$$

Сравнение локальных коэффициентов теплоотдачи, рассчитанных на ЭВМ "БЭСМ-6", с результатами испытаний (рис.1 б) показало удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

На основании проведенных исследований в четвертой главе предложена методика расчета теплообмена на наклонной преграде при натекании на нее высокотемпературной сверхзвуковой струи.

В Ы В О Д Ы

1. Экспериментально исследован теплообмен на наклонной плоской преграде в условиях существенной неизотермичности ($T_{cr}/T_{ci}^{*} = 0{,}11$), при воздействии на нее высокоэнтальпийной перерасширенной сверхзвуковой струи.

2. Осуществлена непрерывная запись распределения газодинамических параметров (статического и полного давления, температуры торможения) высокоэнтальпийной сверхзвковой струи, растекающейся по наклонной плоской преграде.

3. Показана правомерность использования интегральных методов, основанных на ассимптотической теории турбулентного пограничного слоя, для расчета теплообмена в области растекания сверхзвуковой струи по наклонной плоской преграде.

4. Предложен метод учета интенсифицирующего влияния на теплообмен скачка уплотнения, взаимодействующего с пограничным слоем.

5. Предложен метод, учитывающий влияние угла наклона при расчете теплообмена вдоль линии растекания в случае взаимодействия осесимметричной струи с наклонной плоской преградой.

6. Разработана инженерная методика расчета теплообмена на пластине при взаимодействии высокоэнтальпийной сверхзвуковой струи с наклонной преградой.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в статьях:

1. Андреев А.А., Дахно В.Н., Федотов Е.И., Фадеев В.А., Юдаев Б.Н. Экспериментальное исследование теплообмена при натекании турбулентных струй на преграды. Изв. ВУЗов, Машиностроение, № II, 1971.

2. Ермолаев И.К., Леонтьев А.И., Фадеев В.А., Юдаев Б.Н. Конвективный теплообмен в области взаимодействия сверхзвуковой струи с наклонной преградой. ТВТ, № I, 1973.

3. Ермолаев И.К., Фадеев В.А., Юдаев Б.Н. Исследование теплообмена при взаимодействии осесимметричной сверхзвуковой струи с наклонной проницаемой преградой. ТВТ, № I, 1974.