

Академия наук Украины

Институт технической теплофизики

На правах рукописи
УДК 532.525.6:536.24

ГОРШКОВ Геннадий Федорович

ТЕПЛОПЕРЕНОС В ИМПАКТНЫХ СТРУЙНЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ
СИЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ

/01.04.14-теплофизика и молекулярная физика/

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев, 1993

016 26.4.96

Работа выполнена в Санкт-Петербургском МЕХАНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ

Официальные оппоненты:

- академик АН Украины, профессор
Дыбан Е.П.
- член-корреспондент АН РФ, профессор
Сударев А.В.
- доктор технических наук, профессор
Еринов А.Е.

Ведущая организация:

КВ Машиностроение, г. Коломна

Защита состоится "25" февраля 1993 г.
в "14" часов на заседании специализированного совета
Д.016.43.01 при Институте технической теплофизики АН Украины
(252057, Киев-57, ул. Желябова, 2а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТФ АН Украины

Автореферат разослан "21" января 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук



Н.В.Костенко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00825723 (R)

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие авиационной, ракетно-космической техники, совершенствование существующих и создание принципиально новых наукоемких технологий в машиностроении, металлургии, химической промышленности, разработка систем тепловой защиты различных энергетических установок, а также создание тепловых агрегатов и машин в различных отраслях народного хозяйства связаны с решением задач теплофизики до- и сверхзвуковых струйных течений и, в частности, с решением проблемы разработки методов расчета теплообмена и изыскания способов рационального управления уровнем тепловых нагрузок на обтекаемой поверхности в импактных ^X струйных системах газа и плазмы в условиях сильного влияния начальных возмущающих факторов.

Особенностью струйных течений является существенная неравномерность распределения газодинамических и тепловых параметров, связанная как собственно с их природой, например, до- и сверхзвуковое истечение, так и с влиянием начальных возмущений (искусственно созданные неравномерность и турбулентность на срезе сопла; неизотермичность; двухфазность и т.п.), а также возникновение различных по физической сущности типов взаимодействия, таких как стационарный и автоколебательный. Отмеченные обстоятельства затрудняют в теоретическом плане общую точную постановку и решение задачи о расчете теплообмена в импактных струйных системах.

На сегодня наиболее разработаны в теоретическом и экспериментальном плане вопросы влияния неравномерности распределения газодинамических параметров и степени турбулентности на процессы теплопереноса в струях, взаимодействующих с преградами. Однако при этом рассматривались, как правило, изотермические струйные системы. Существующие исследования процессов теплопереноса в неизотермических одно- и двухфазных импактных струйных системах газа и плазмы носят скорее постановочный, чем систематический характер, а имеющаяся в литературе информация в определенной степени противоречива и одностороння. В полной мере сказанное относится и к режимам автоколебаний, возникающих в импактных струйных системах

^X от английского "impact" - удар, столкновение, контактирование под давлением, торможение в критической точке и т.п.

при ряде сочетаний режимных параметров. Наличие достаточного числа "пробелов" в моделировании струйного взаимодействия с преградами затрудняет не только сопоставительный анализ уже существующих результатов, но и переход к усложненным условиям протекания процессов теплопереноса, что отрицательно сказывается при проектировании образцов новой техники и создании перспективных наукоемких технологий.

Таким образом, отмеченное свидетельствует об актуальности проблемы, вынесенной в заглавие диссертации, как для теории струйного конвективного теплообмена, так и для конкретной инженерной практики.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка методов расчета течения и теплообмена в импактных струйных системах в условиях сильного влияния начальных возмущающих факторов на процессы турбулентного переноса. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- экспериментально исследовать влияние режимных параметров на процессы теплопереноса и микроструктуру потока в импактных струйных системах; получить эмпирические и критериальные соотношения для расчета внутренней структуры турбулентности, трения и теплообмена на поверхности преград;
- построить и обосновать модель турбулентности, учитывающую влияние внешних пульсаций на коэффициенты переноса; с ее помощью численно исследовать течение и теплообмен при обтекании преград;
- экспериментально и численно исследовать интенсификацию процессов переноса в свободных и взаимодействующих с преградами струях плазмы; проанализировать роль дисперсной примеси на усиление теплообмена в импактных струях и разработать полуэмпирический метод его расчета;
- сформировать представления о влиянии когерентных структур слоя смешения на возникновение автоколебаний в системе струя-преграда; экспериментально исследовать теплообмен и дать практические рекомендации по его расчету;
- выявить особенности теплообмена в сверхзвуковых импактных струйных системах; изучить влияние сверхзвукового спутного потока, разреженности среды на возникновение автоколебаний и указать эмпирические соотношения для определения амплитудно-частотных характеристик нестационарных процессов;

-сформулировать и практически осуществить методы организации течения и теплообмена в импактных струйных системах для целей управления локальными (интегральными) характеристиками и интенсификации теплообменных процессов в пристеночных областях.

Метод исследования. Сложность и практическая направленность рассматриваемых задач позволяют применить комплексный метод решения сформулированной научной проблемы: использовать возможности как физического, так и вычислительного экспериментов. При этом предпочтение отдано подходу, основанному на теоретическом обобщении результатов измерений и выборе математической модели с последующей разработкой численного метода расчета. Однако там, где метод экспериментальных исследований является превалирующим (из-за сложности математического описания течений, например, для нестационарных режимов обтекания, двухфазного взаимодействия и т.п.), применен подход, связанный с отысканием эмпирических и критериальных зависимостей. В этой части использовались как традиционные методы диагностики струйных течений, так и оригинальные, разработанные автором, например, методы термоанемометрии и электрокалориметрии. Значительное внимание уделялось анализу возможных ошибок измерений, что способствовало достоверности получаемой информации (она так же подтверждалась тестовыми испытаниями).

Научная новизна. Сформированы общие положения о влиянии внешней турбулентности на интенсификацию процессов теплопереноса в пристеночных областях для изотермических и неизотермических импактных струй газа и плазмы; установлен определяющий вклад пульсаций газодинамических величин в механизм теплообмена на обтекаемых поверхностях. Найдены критериальные соотношения для расчета трения и теплообмена на поверхности преград, универсальность которых обоснована в широком диапазоне изменения определяющих параметров: $M_a = 0,02-3$; $\lambda = 2-30$; $T_a = 290-9000$ К; $Re = 10^4-10^7$. Критериальная зависимость для расчета теплообмена в точке торможения в сочетании с иными установленными соотношениями для распределения характеристик теплоотдачи вдоль преграды позволяет также определить поток тепла от газовой фазы при анализе и расчете теплообмена в двухфазной импактной системе плазмы. Получены полуэмпирические зависимости для определения внутренней микроструктуры потока в пристеночных областях и построена новая модель тур-

булентности. Она положена в основу численного моделирования течения и теплообмена в различных импактных струйных системах (продольное и поперечное обтекание преград, кругового цилиндра).

Проанализировано влияние концентрации дисперсной примеси на характер теплообмена в дозвуковой двухфазной струйной системе плазмы. Установлены соотношения потоков тепла от дисперсной и газовой фаз в потоке типа "газ-расплавленные частицы"; разработан инженерный метод расчета теплообмена в пятне нагрева преграды.

Выявлены неизвестные ранее особенности, связанные с влиянием когерентных структур на локальный теплообмен в режиме автоколебаний (дозвуковое обтекание). Указана зависимость для расчета теплообмена с учетом случайной и периодической составляющих пульсирующих величин.

Новые закономерности и эффекты автоколебаний установлены в сверхзвуковых импактных системах. В первую очередь это относится к обтеканию преград ограниченных размеров недорасширенной струей в условиях спутного сверхзвукового потока и разреженности среды. Впервые доказано возникновение автоколебаний в спутном сверхзвуковом потоке. Этот результат является фундаментальным и имеет принципиальное значение для анализа механизма поддержания нестационарного течения. Для разреженных струй впервые обнаружен второй режим автоколебаний (в отличие от плотных струй, где существует только единственный-первый). Исследовано влияние режимных параметров и разреженности на области существования автоколебаний. Получены обобщающие эмпирические зависимости для расчета частотных характеристик нестационарных процессов.

Разработаны методы организации течения и теплообмена в импактных струйных системах для целей управления локальными (интегральными) характеристиками и интенсификации тепломассообменных процессов в пристеночных областях.

Практическая значимость. Предложенные методы расчета течения и теплообмена могут быть использованы при проектировании образцов новой техники; совершенствовании и создании принципиально новых наукоемких технологий, а также при разработке различного рода стендов для испытания материалов. Точность определения тепловой обстановки, достигаемая за счет предложенных методов расчета, позволяет не только значительно сократить сроки проектирования, но и обеспечить создание более совершенных в тепловом отношении схем.

Полученные данные по теплообмену в двухфазных импактных системах плазмы, а также проведенный численный анализ по вводу частиц примеси в струю позволят улучшить качество тугоплавких покрытий в технологическом процессе напыления. Предложенные методы организации течения и теплообмена для целей управления характеристиками и интенсификации теплообменных процессов в пристеночных областях воплощены в создание горелочных устройств, электродуговых плазмотронов, аэродинамических плазменных стендов и установок для испытания теплозащитных материалов (ТЗМ).

Закономерности и эффекты автоколебаний, установленные в до- и сверхзвуковых импактных струйных системах, позволят определить области изменения параметров, где колебания желательны (например, при разработке газоструйных излучателей звука и ударных волн), а где их следует избегать. Найденные зависимости для определения структуры турбулентности в свободных и взаимодействующих с преградами струях могут быть использованы для построения и обоснования новых моделей турбулентности, что является важным моментом совершенствования математического моделирования турбулентных течений.

Реализация результатов. Отдельные научные результаты диссертации положены в основу отраслевых руководящих материалов (МЛ-51-6-3432-71 и МЛ-51-6-3475 "Определение теплозащитных свойств материалов на электродуговой установке" - предприятие п/я Р-6799). С помощью созданных методов расчета течения и теплообмена осуществлено проектирование тепловых стендов и установок для испытания ТЗМ, внедренных в практику исследований предприятия п/я Р-6799. Часть из них представлена как рекомендации при ведении технологического процесса напыления карбида циркония на сетки генераторных ламп (предприятие А-1568). Получено три авторских свидетельства. Первичный экономический эффект от внедрения результатов работы за 1972-1977гг составил 127 тыс.руб.

Автор защищает:

- Общие положения о определяющем вкладе внешней турбулентности в механизм усиления процессов теплопереноса в пристеночных областях для до- и сверхзвуковых изотермических и неизомермических струй газа и плазмы, взаимодействующих с преградами.

- Полуэмпирические зависимости для определения внутренней микроструктуры потока в пристеночных областях и универсальные критериальные соотношения для расчета теплообмена в импактных струйных системах; количественные оценки влияния концентрации

дисперсной примеси на усиление теплообмена в пятне нагрева преграды.

-Численное моделирование течения и теплообмена в струйных системах с использованием модели турбулентности, построенной на основе анализа измерений структуры турбулентности, а также параметрическое исследование влияния перегрева и спутности на характеристики затухания свободных струй газа и плазмы.

-Новые закономерности и эффекты, связанные с возникновением автоколебаний в системе струя-преграда: классификацию режимов обтекания преграды когерентными структурами и область существования автоколебаний; опытные данные по теплообмену и эмпирические зависимости для его расчета с учетом случайной и периодической составляющих (дозвуковое обтекание); ударно-волновую картину течения перед ограниченной преградой в условиях спутного потока и разреженности среды; фазовые, амплитудно-частотные характеристики автоколебаний и эмпирические соотношения для их определения (сверхзвуковое обтекание).

-Методы расчета теплообмена в импактных струйных системах и способы организации течения в них для целей управления характеристиками и интенсификации теплообменных процессов в пристеночных областях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: IV-УП Всесоюзных конференциях по тепломассообмену в 1972-1984 г. (Минск), Минском международном форуме по тепломассообмену (1988 г.), Всесоюзной конференции по струйным течениям жидкостей и газов (Новополоцк, 1982 г.), УП-ХУ Всесоюзных семинарах по газовым струям в 1970-1990 г. (С.-Петербург), XIV Всесоюзном семинаре ИТПМ СО РАН (Новосибирск, 1987 г.); II Республиканской конференции "Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств" (Житомир, 1990 г.), УШ Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы (Минск, 1991 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 27 статьях; получено 3 авторских свидетельства.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов и приложений. Основная часть работы содержит 201 страницу текста, 121 рисунок, 12 таблиц и список литературы из 224 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность и целесообразность проведения исследований, направленных на создание методов расчета течения и теплообмена в импульсных струйных системах в условиях сильного влияния начальных возмущающих факторов (турбулентность, неизо-термичность, сжимаемость, разреженность среды и т.п.). Отмечается, что наиболее разработаны в теоретическом и экспериментальном плане вопросы влияния неравномерности распределения газодинамических параметров и степени турбулентности на процессы теплопереноса в струях, взаимодействующих с преградами (Дыбан Е.П., Мазур А.И., Савин В.К., Эпик Э.Я., Юдаев Б.Н. — физическое моделирование, анализ процессов турбулентного переноса и некоторые полужемпирические методы расчета; Белов И.А., Гинзбург И.П., Коловандин Б.Н. и др. — методы математического моделирования турбулентных течений, построение моделей турбулентности и вычислительный эксперимент). Показано, что известные методы расчета для изотермических несжимаемых течений неприменимы в сложных условиях, а имеющаяся в литературе информация односторонняя и противоречива. Практически отсутствуют исследования по влиянию фаз на теплообмен в двухфазных струйных системах плазмы (за исключением работы Осипцова А.Н. для потока газозвеси). Отмечен существенный вклад Абрамовича Г.Н., Гиневского А.С., Гиршович Т.А., Гавина Л.Б., Лаатса М.К., Фришмана Ф.А., Шрайбера А.А. в разработку теории турбулентных струйных течений.

Среди многочисленных исследований автоколебаний в сверхзвуковых импульсных струйных системах приоритет принадлежит Дулову В.Г., Глазневу В.Н., Ускову В.Н. (эксперимент, физические и математические модели, приближенные методы расчета). В числе публикаций, посвященных разностному моделированию нестационарного взаимодействия, выделены работы Альбазарова Б.Ш. и Рудакова А.И., Моллесон Г.В. и Стасенко А.Л. Однако, несмотря на многолетнюю историю изучения автоколебаний, исследователи не пришли к единому мнению о механизме их возникновения и поддержания. Не выясненными являются и вопросы, связанные с влиянием спутного сверхзвукового потока и разреженности среды на автоколебания.

Сформулированы методы организации течения и теплообмена на поверхности преград для целей управления локальными (интегральными) характеристиками и интенсификации теплообменных процессов.

Определены цель и задачи диссертационного исследования и кратко изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе сформулированы основные представления о течении и теплообмене в турбулентных импактных струйных системах. В отличие от перечисленных выше, исследования направлены на углубленное изучение микроструктуры турбулентности в областях торможения струи на преграде и ее влияния на процессы теплопереноса. Полученные данные использовались при численном моделировании обтекания преград.

В результате обширных измерений осредненных и пульсационных скоростей построена геометрическая модель растекания турбулентной струи по преграде (рис. I - для $2,2 \leq \bar{H} \leq \bar{x}_H$), согласно которой основная перестройка течения от затопленной струи к пристеночной происходит в области взаимодействия, ограниченной полусферой радиуса $\bar{r} \leq 2,2$ (все линейные размеры отнесены к радиусу среза сопла) с центром в точке торможения. В ней можно выделить три характерные зоны: зону деформации ядра постоянных скоростей; зону разворота вязкого смещения, где осредненная скорость \bar{U} и среднеквадратическая величина продольной компоненты пульсации скорости ($u' = \sqrt{\langle u^2 \rangle}$) определяются аппроксимационными зависимостями

$$U/U_{mo} = \left[1 - (\bar{r}/\delta)^{1,5} \right]^2; \quad (1)$$

$$u'/u'_{max} = U'_{mo}/u'_{max} \exp(-15\bar{r}/\delta) + (\partial U/\partial \bar{z}) / (\partial U/\partial \bar{z})_{max}, \quad (2)$$

и пристеночный пограничный слой. Из анализа результатов настоящего исследования по микроструктуре в характерных областях течения следует, что:

- для свободной затопленной струи и области, расположенной выше сечения $\bar{y} = 2,2$, распределения продольного R_{rx} и поперечного R_{rr} коэффициентов корреляций носят автомодельный характер (рис. 3, в-кривая I4) и обобщаются зависимостями

$$R_{rx,r} = \left[1 + \left(\frac{\bar{r}}{2} \frac{\Delta x, r}{L_{1,x,r}} \right)^2 \right]^{-1}; \quad (3)$$

изменение спектральной плотности $F_i(f)$ (нормированного энергетического спектра для пульсации u) для всего исследованного диапазона частот f автомодельно (рис. 2, в-кривая I) и может быть найдено по соотношению

$$F_i(f)/F_i(0) = \left\{ 1 + \left[\frac{\bar{r}}{2} f F_i(0) \right]^2 \right\}^{-1}; \quad (4)$$

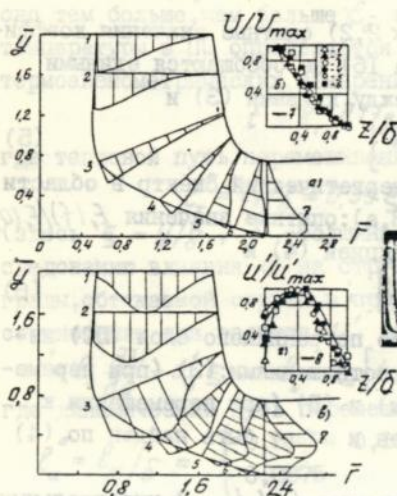


Рис.1. Геометрическая модель растекания струи по прикладу ($H=6$). Эксперимент: 1-6; 9-Попел. Трас. Расчет: 7-по (I); 8-(2)

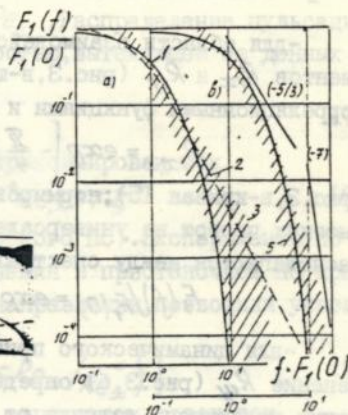


Рис.2. Нормированный спектр пульсаций скорости. а-область взаимодействия (3: $U_0=8; 16$ м/с; $H=8; 16$; $\bar{y}=0, 2-2$; $\bar{r}=0-2, 8$); в-свободная струя (5: $\bar{x}=0-14$; $\bar{r}=0-1, 66$) и пограничный слой (9: $H=1-16$; $y=0, 1-1, 4$ мм; $r=0, 8-6$); Расчет: 1-по (4); 2-(6)

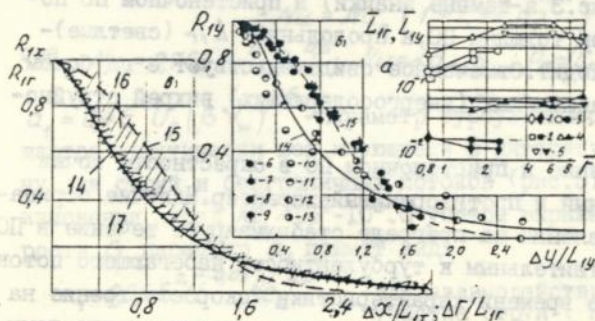
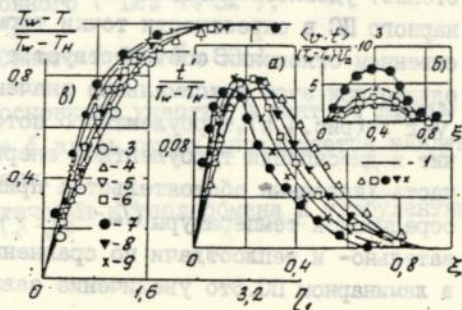


Рис.3. Распределение коэффициентов корреляций (б, в) и интегральных масштабов (а) в импактной струйной системе. а, б-пограничный слой (1-13: $H=1-30$; $\bar{r}=1, 6-10$); в-область взаимодействия (16: $y=0, 5-2$) и свободная струя (17: $\bar{x}=0-14$; $\bar{r}=0-1, 66$); Расчет 14-по (3); 15-(5)

Рис.4. Характеристики теплопереноса в пристеночном пограничном слое. Эксперимент: $Re_a=4, 4 \cdot 10^3$; $H=1$; $\epsilon_s=0, 016$; 4-2; 0, 02; 5-6; 0, 038; 6-10; 0, 065; 7-16; 0, 2; 8-32; 0, 06; $Re_a=1, 2 \cdot 10^3$; 9-10; 0, 065; Расчет: 1-по (7)



-для области взаимодействия ($\bar{y} < 2,2$) опытные значения коэффициентов R_{ix} и R_{ir} (рис.3, в-штриховка I6) не обобщаются едиными корреляционными функциями и лежат между кривыми (3) и

$$R_{ix,r} = \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\Delta x, r}{L_{ix,r}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

(рис.3, в-кривая I5); нормированный энергетический спектр в области высоких частот не универсален (рис.3, а): опытные значения $F_f(f)/F_f(0)$ располагаются между спектральной функцией (4) и

$$F_f(f)/F_f(0) = \exp \left[-f \cdot F_f(0) \right]; \quad (6)$$

-для динамического пристеночного пограничного слоя (ПС) изменение R_{iy} (рис.3, б) определяется соотношениями: (3) (при перемещении подвижного датчика от преграды) и (5) (при перемещении к ней); нормированный спектр автомоделен и может быть найден по (4) (рис.2, в).

Величины продольных L_{ix} и поперечных L_{ir} (L_{iy}) интегральных масштабов турбулентности, входящие в (3) и (5), определялись интегрированием соответствующих корреляционных функций. Для них (масштабов) указаны аппроксимирующие зависимости. Установлено, что поперечный масштаб L_{iy} (рис.3, а-темные значки) в пристеночном ПС постоянен и имеет порядок толщины ПС, а продольный - L_{ir} (светлые) - значительно ее превосходит. Отмеченное свидетельствует о глубоком проникновении крупномасштабных (энергосодержащих) вихрей струйного потока в ПС.

Показано, что течение в пристеночном ПС в окрестности точки торможения имеет сложный и противоречивый характер. Наличие отрицательного градиента давления на преграде стабилизирует течение в ПС и делает его малочувствительным к турбулентности набегающего потока так, что осредненные во времени характеристики (скорость, трение на стенке) удовлетворительно описываются известным решением для ламинарного ПС в окрестности точки торможения. Температурный ПС в качественном отношении соответствует турбулентному ПС на пластине, однако при этом максимальные значения пульсации температуры $t' = \sqrt{\langle t'^2 \rangle}$ (рис.4, а), турбулентного потока тепла $\langle \psi t' \rangle$ (рис.4, б), а значит и диссипации турбулентной энергии, смещаются в центральную его часть. Указанные обстоятельства приводят к увеличению градиента осредненной температуры $(T_w - T) / (T_w - T_\infty)$ (рис.4, в) вблизи стенки, а следовательно - и теплоотдачи по сравнению с соответствующими величинами в ламинарном ПС. Это увеличение зависит от интенсивности турбулент-

ности $\epsilon_s = u'/U_s$ на внешней границе ПС и числа Рейнольдса Re_a : оно тем больше, чем больше ϵ_s или (и) Re_a . Распределение пульсаций температуры в ПС определяется зависимостью, вытекающей из данных термоанемометрических измерений:

$$t' = l_T \partial T / \partial y, \quad (7)$$

где тепловой путь перемешивания l_T аппроксимирован как

$$l_T^0 = l_T / \delta = 0,39 \xi - 0,55 \xi^2 + 0,257 \xi^3 \quad (8)$$

(здесь $\xi = y/\delta$, δ - толщина динамического ПС). Эксперименты по исследованию влияния ϵ на структуру течения в пристеночном ПС преграды, обтекаемой струей в продольном направлении, позволили указать соотношение для расчета u' внутри ПС:

$$u' = l_* \frac{\partial U}{\partial y} + u'_s \xi; \quad l_* = l_u \left[1 - \exp(-2,5 Re_x / Re_x^*) \right], \quad (9)$$

где динамический путь перемешивания l_u аппроксимирован как

$$l_u^0 = l_u / \delta = \begin{cases} 0,39 \xi - 0,36 \xi^2 + 0,11 \xi^3 & \text{для } \xi \in [0; 0,3]; \\ 0,0875 & \text{для } \xi \in [0,3; 1]. \end{cases} \quad (10)$$

Анализом экспериментальных и теоретических исследований по влиянию турбулентности струи на процессы теплопереноса получено универсальное критериальное соотношение для расчета теплообмена в окрестности точки торможения преграды

$$Nu = Nu_0 (1 + 1,38 a_1^{0,55}), \quad (11)$$

где $Nu_0 = 0,763 Pr^{0,4} Re^{0,5}$; $Nu = \alpha d_a / \lambda_w$; $Pr = (C_p \mu / \lambda)_w$; $Re = \beta d_a / \nu$;

$a_1 = 0,4 \epsilon^2 U_s (\beta \nu_w)^{-0,5}$ - параметр турбулентности. С помощью (11) обобщаются практически все имеющиеся в литературе данные по теплообмену для струй и безграничных потоков (рис. 5) в широком диапазоне изменения чисел $Re_a = 10^4 - 10^6$. С учетом выражений для градиента скорости β параметр a_1 примет вид:

$a_1 = 0,36 \epsilon^2 \bar{H}^{0,08} Re_a^{0,5}$ - для взаимодействия в пределах начального участка струи ($\bar{H} \leq 10^2$);

$a_1 = 0,058 \epsilon^2 \bar{H}^{0,77} Re_a^{0,5}$ - основного ($12 \leq \bar{H} \leq 32$);

$a_1 = 0,0114 \epsilon^2 \bar{H}^{1,15} Re_a^{0,5}$ - основного ($32 \leq \bar{H} \leq 80$),

где $Re_a = U_a d_a / \nu_w$; $\epsilon = u' / U_a$; для основного участка β взят по данным Дыбан Е.П., Мазур А.И. Изменение ϵ вдоль струи определяется найденными эмпирическими соотношениями.

Численное моделирование течения и теплообмена в турбулентных

импактных струйных системах проведено на основе решения системы уравнений ПС в форме Рейнольдса, замыкаемой моделью турбулентности (МТ): соотношений для коэффициентов турбулентной вязкости и температуропроводности

$$\gamma_{\tau} = -\langle u'v' \rangle / (\partial U / \partial y) = \ell_{*}^2 \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| + 2\ell_{*} \xi u'_{\delta} ; \quad (12)$$

$$\alpha_{\tau} = -\langle v't \rangle / (\partial T / \partial y) = \ell_{*} \ell_{\tau} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| + \ell_{\tau} \xi u'_{\delta} ; \quad (13)$$

построенной в работе с помощью зависимостей (7), (9). В рамках метода локального подобия система уравнений несжимаемого ПС преобразована к виду

$$[(1 + \gamma_{\tau}/\nu) F''']' + K(1 - F'^2) + \beta F F'' = 0 ; \quad (14)$$

$$[(1/\rho_{\tau} + \alpha_{\tau}/\nu) S''']' + \beta F S' = 0, \quad (15)$$

где $F'(\eta) = U/U_{\delta}$; $S(\eta) = (T - T_w)/(T_{\delta} - T_w)$; $\eta = y \sqrt{U_{\delta}/(x\nu)}$; $U_{\delta} = \beta x^k$; $(K=0; I)$; $\beta = (k+1+2\gamma)/2$; "'''" определяет производную по η ; $\gamma = I$ (0) - осесимметричное (плоское) течение;

$$\gamma_{\tau}/\nu = 2\ell_{*}^{\circ} a_2 \eta ; \quad \alpha_{\tau}/\nu = \ell_{\tau}^{\circ} a_2 \eta ; \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \epsilon_{\delta} Re_x^{0.5} ; \quad \ell_{*}^{\circ} = \ell_u^{\circ} [1 - \exp(-2.5 Re_x / Re_x^{*})] ; \quad (17)$$

с граничными условиями: $F = F' = S = 0$ при $\eta = 0$; $F' = S = I$ при $\eta \rightarrow \infty$

Решение краевой задачи (14)-(15) осуществлено методом пристрелки. При выборе недостающих начальных условий (решение задач Коши) применен метод Ньютона. Приводятся некоторые результаты численного исследования течения и теплообмена в импактных системах: 1) продольное обтекание преграды струей для условий экспериментов автора - $Re_a = 4,9 \cdot 10^4$; $\epsilon_a = 0,015$ и $0,046$ (рис.6 и 8); 2) поперечное обтекание кругового цилиндра турбулизированным потоком - эксперимент Хенерпа (рис.7). При этом для I-го случая МТ(2)А ($K=0$; $\gamma=0$):

$$\gamma_{\tau}/\nu = 2\ell_{*}^{\circ} a_2 \eta ; \quad \alpha_{\tau}/\nu = 2\ell_{*}^{\circ} a_2 \eta / \rho_{\tau} ; \quad \rho_{\tau} = 0,9 ;$$

для 2-го случая МТ(1)С ($K=I$; $\gamma=0$); γ_{τ}/ν и α_{τ}/ν определены по (16); ℓ_{τ}° - по (8).

Расчетные данные и сравнение их с экспериментом свидетельствуют о том, что предложенная МТ адекватно отражает основные закономерности воздействия струйной турбулентности на харак-

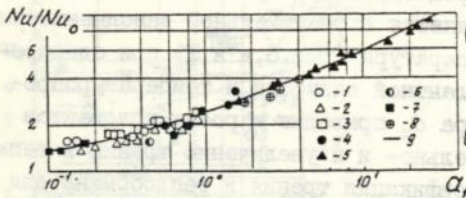


Рис.5.Обобщение опытных данных по теплообмену для импульсных струйных систем:2,8-автор;1-Гардон;3-Брдлик,Савин;4-Комфорт;5-Белов,Терпигорьев;6-Аралов,Юдаев;7-Дыбан,Мазур;Расчет:9-по (II)

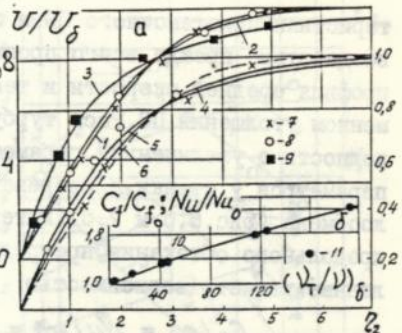


Рис.6.Влияние турбулентности на профиль скорости в пограничном слое (а) и интенсификация трения и теплообмена (б).Расчет- $C_{\alpha}=0,015$:1- $Re=0,14$;2- $2,44$;3- $0,35$;4- $2,26$;5- $1,38$;6- $14,85$;7- $\epsilon_{\alpha}=0,046$;8- $4,0,37$;9- $6,65$;10- $0,91$;11-Блазиус;10-числ.реш-е;11-по (IВ); эксперимент:7,8,9

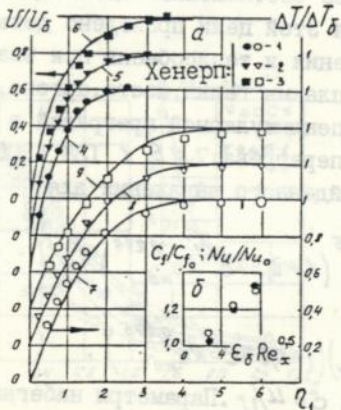


Рис.7.Поперечное обтекание кругового цилиндра турбулизированным потоком.1,2,3-эксперимент Хеннерпа $Re_d = 10000$; $\epsilon_5 = 0,025$;4-9 числ.расч.:4;7- $\Phi=20^\circ$; $Re_x = 12000$;5;8- 40° ;44300;6;9- 60° ;85300

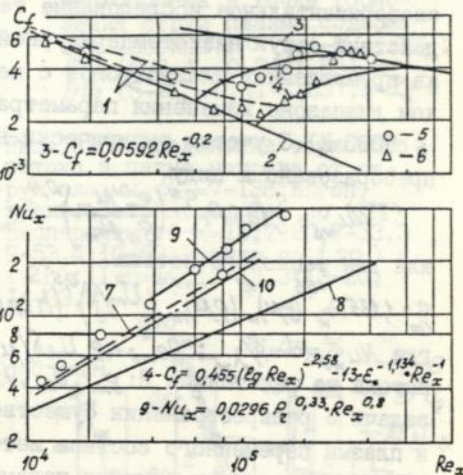


Рис.8.Трение и теплообмен в пограничном слое преграды, обтекаемой струей в продольном направлении.Расчет:1,7,10-числ.реше-е;4-эмпирика-автор;эксперимент:5- $\epsilon_{\alpha}=0,046$;6- $0,015$

теристики пристеночного ПС и процессы теплопереноса в нем. Это воздействие прежде всего проявляется в значительной заполненности профиля средней скорости и температуры (рис. 6, а и 7) при одновременном утолщении ПС. Рост турбулентной вязкости и температуропроводности с увеличением параметра Q_2 приводит к росту градиентов параметров у стенки, а следовательно - к увеличению трения и теплообмена (рис. 6, б и 7, б). Интенсификация трения и теплообмена для продольного обтекания преграды определяется аппроксимирующей численные расчеты зависимость

$$C_f / C_{f_0} = Nu / Nu_0 = 1 + 0,0124 (V_T / V) \delta^{0,83}, \quad (18)$$

где $C_{f_0} = 0,664 Re_x^{-0,5}$; $Nu_0 = 0,332 Pr^{0,33} Re_x^{0,5}$. Полученные результаты находятся в качественном соответствии с представлениями о процессах теплопереноса в турбулизированных ПС, описанных Э.Я. Эпик.

Во втором разделе критериальное соотношение (II) обосновывается для импактных струй плазмы. Для этой цели проведено детальное экспериментальное исследование течения и теплообмена при взаимодействии струй низкотемпературной плазмы гелия, азота, аргона, воздуха промышленных плазмотронов с перпендикулярной преградой в широком диапазоне изменения параметра перегрева: $7 \leq Q_2 \leq 138$ ($3000 \leq T_a \leq 9000$ K). С учетом эмпирически найденного выражения для β (II) преобразовано к виду

$$Nu_{w\delta} = 1,135 Pr_w^{0,4} \left(\frac{\rho_m \mu_m}{\rho_w \mu_w} \right)^{0,4} Re_{w\delta}^{0,5} (1 + 0,67 \epsilon^{1,1} Re_{w\delta}^{0,275}) \quad (19)$$

или для теплового потока

$$q_m = 1,135 Pr_w^{-0,5} (\rho \mu)_w^{0,1} (\rho \mu)_m^{0,4} (U_m / \delta)^{0,5} (h_m - h_w) (1 + 0,67 \epsilon^{1,1} Re_{w\delta}^{0,275}), \quad (20)$$

где $Nu_{w\delta} = \alpha_m \delta / \lambda_w$; $Re_{w\delta} = \rho_w U_m \delta / \mu_w$; $\epsilon = \mu' / U_m$. Параметры набегающего потока на расстоянии Н: ρ_m , U_m , h_m , δ , δ_T определяются из решения задачи о распространении существенно неизотермических струй газа и плазмы переменного состава методом интегральных соотношений. Численным анализом влияния параметров перегрева Q_2 и спутности m на характеристики затухания затопленных и спутных струй указаны соотношения для их определения (длины начального участка, коэффициентов нарастания зон смещения и т.п.).

Сопоставление рассчитанных по (19), (20) и экспериментальных величин чисел Nu и q_m (рис. 9 - кривая I и знаки 3-6) свидетельствует о удовлетворительном их соответствии (с погрешностью $\sim 10\%$).

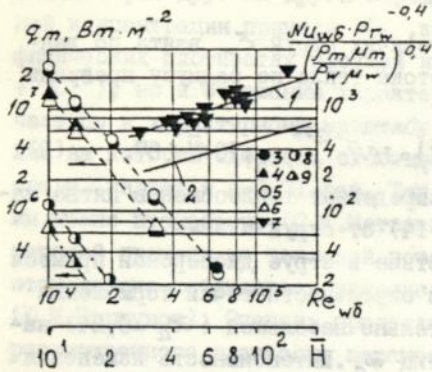


Рис.9.Обобщение данных по теплообмену для импульсной струйной системы плазмы для точки торможения. Эксперимент: 5-азот, $\alpha_a=84$; 6-азот, 61; 7-аргон, гелий, 7-138; 8-азот, 84; 9-азот, 61; Расчет: 1-по (19); 2-Фей, Ридделл; 3, 4-по (20)

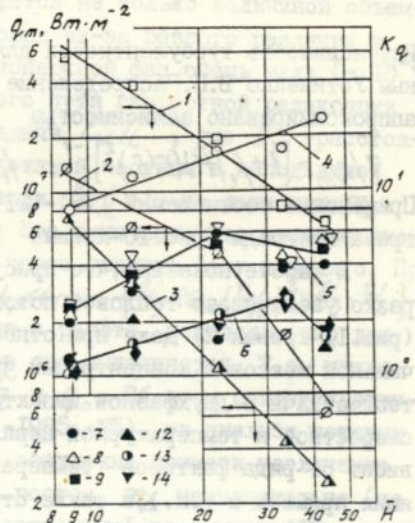


Рис.11.Влияние дисперсной примеси на характеристики теплообмена в точке торможения струи плазмы, содержащих частицы: ZrC (1,4- $\alpha_a=1,23$); Al_2O_3 (2,6- $\alpha_a=0,24$ -1,86) и ZrO_2 (5- $\alpha_a=0,41$ -1,85); 3- $\alpha_a=0$

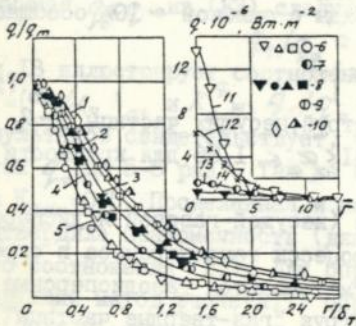
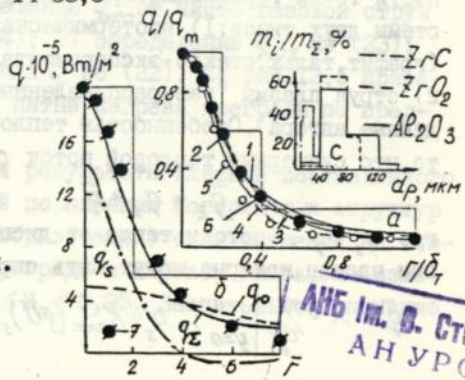


Рис.10.Распределение теплового потока в пятне нагрева от струи плазмы. $\theta_a=7$ -138; аргон, гелий, азот. Расчет: 1-5 по (21) Эксперимент: 6-Н=10; 7-20; 8-33, 3 9-53, 4; 10-67; Расчет по (20) и (21): 11-Н=10; 12-13, 3; 13-20; 14-33, 3

Рис.12.Поток тепла в пятне нагрева преграды от двухфазной струи плазмы. а: 1, 2- $\alpha_a=0,78$ -1,86; Al_2O_3 ; 3, 4-0,41-1,85; ZrO_2 ; 5-Н=22, 2; $\alpha_a=0,41$ -1,85; ZrO_2 ; 6-расч. по (22); 6- ZrO_2 ; $\alpha_a=0,41$; Н=33, 3; $K_{ак}=0,5$; 7-расч. по (20), (24); (22); с-гранулометрический состав порошков



АНБ им. В. Стефанов
АН УРСР

Интенсивность турбулентности для горячих струй ϵ_m взята по данным Устименко В.П. Распределение потока тепла по радиусу преграды аппроксимировано зависимостью

$$q/q_m = [1 + f_1(\bar{H})(r/\delta_T)^2]^{-1}; \quad f_1(\bar{H}) = 38\bar{H}^{-0.77}; \quad 10 \leq \bar{H} \leq 67. \quad (21)$$

Применение соотношений (19)-(21) определяет теплообмен в пятне нагрева преграды (рис. 10-кривые II-14) от струй плазмы.

В работе показано, что присутствие в струе дисперсной примеси резко увеличивает тепловой поток в окрестности точки торможения (рис. 11-кривая 2) даже при относительно небольшой ($\alpha_a = 0,24$) начальной массовой концентрации частиц α_a . Интенсивность изменения теплоотдачи в двухфазной импактной системе является следствием скоростной и температурной неравновесности течения в струях и зависит от ряда факторов (температуры, концентрации, фазового состояния примеси и т.п.), а также от характера взаимодействия частиц с поверхностью преграды. Указанное увеличение q (оно достигает десятков раз) можно характеризовать коэффициентом усиления теплообмена $K_q = q_m/q_{mo}$, (кривые 4-6), где q_{mo} соответствует $\alpha_a = 0$. Распределение потоков тепла вдоль преграды с ошибкой $\sim 10\%$ обобщается эмпирической зависимостью

$$q/q_m = [1 + 18(r/\delta_T)^2]^{-1} \quad (22)$$

(рис. 12-кривые 6), справедливой для струй, несущих частицы ZrO_2 и Al_2O_3 , в диапазоне концентраций $0,41 \leq \alpha_a \leq 1,86$ для крупности частиц $\alpha_p = 40-125$ мкм.

Далее анализируется влияние фаз (несущей-газовой и дисперсной-твердой или расплавленной) на процессы теплопереноса в окрестности точки торможения. При этом рассматриваются газодисперсные системы двух типов: 1) изотермическая струя "газ-твердые частицы" (графит, тальк, стекло-экспериментальные данные Шимизу и др.); 2) струя плазмы "газ-расплавленные частицы" (Al_2O_3 , ZrO_2 , ZrC - данные автора). Особенностью теплообмена в такой системе является то, что суммарный тепловой поток q_Σ можно выразить как

$$q_\Sigma = q_s + \tilde{q}, \quad (23)$$

где q_s , \tilde{q} - потоки тепла от дисперсной и газовой фазы в присутствии частиц, которые могут быть определены следующим образом:

$$\tilde{q} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}; \quad q_s = K_{акк.} (pU)_s \left[C_p s (T_s - T_w) + U_s^2/2 \right]. \quad (24)$$

Влияние фаз друг на друга определяется не только величиной объемной концентрации примеси α_p , которая из-за резкого различия в физических плотностях несущей и дисперсной фаз очень мала ($\sim 10^{-3} + 10^{-6}$), но и отношением характерного пути скоростной релаксации частицы к характерному масштабу задачи ℓ_v/L , где ℓ_v - расстояние на котором скорость свободно летящей частицы в неподвижной среде падает в $e=2,71$ раз. Так, если $\ell_v/L \gg 1$, то даже при $\alpha_2 \sim 1$ им можно пренебречь (С.К.Матвеев). Это означает, что влияние дисперсной примеси на тепловой поток через газовую фазу невелико. При этом должно соблюдаться условие: $\alpha_p \ll \min \left\{ \frac{2}{9} Re_\infty (\Gamma_p/L)^2; \frac{8}{3} \cdot \Gamma_p/L \right\}$ (Д.М.Диркунов). Оценки, сделанные в работе, показали, что для рассмотренного диапазона параметров оно выполняется. Т.е. можно полагать равенство потоков тепла \tilde{q} и q_0 . Об этом свидетельствуют и результаты (А.Н.Осипцов, МЛГ.-1985.-№5), из анализа которых следует, что в режиме инерционного осаждения примеси увеличение теплового потока от газовой фазы с ростом α_2 незначительно (по сравнению с q_0). Оно может составлять: для I-го случая 46%, а для 2-го - (15-84)%. Таким образом, основной вклад в суммарный тепловой поток в критической точке будет вносить дисперсная фаза. Тогда, принимая $q_0 \approx \tilde{q}$, из (23) следует

$$q_s/q_0 \approx q_\Sigma/q_0^{-1}. \quad (25)$$

Рис.13 иллюстрирует соотношение коэффициентов теплообмена от фаз $K_s^\alpha = (\alpha_s/\alpha_0)_m$ и $K_s^q = (q_s/q_0)_m$, определенных из (25). Анализ результатов свидетельствует, что поток q_s значительно превосходит поток q_0 (до 5-6 раз). Так же были рассчитаны величины q_s по (24) при $K_{акк} = 0,5$. Проведенная и подобным образом оценка потоков q_s подтвердила правомочность (для практических расчетов) приближенного соотношения (25). Для определения теплообмена рекомендуется следующий метод расчета: 1) определение q_{ms} от чисто газовой струи по (20); 2) вычисление q_{ms} по (24); 3) определение $q_{m\Sigma}$ из (23); 4) расчет радиального распределения q по (22). На рис.12,6 приведена иллюстрация определения q в пятне нагрева преграды по предложенной методике.

В третьем разделе приводятся результаты впервые поставленного и проведенного цикла исследований по влиянию когерентных структур (крупномасштабных периодических образований) слоя смешения на теплообмен при струйном обтекании преграды в широком диапазоне изменения дозвуковых чисел Маха: $0,02 \leq M_a \leq 0,95$. Значительное внимание

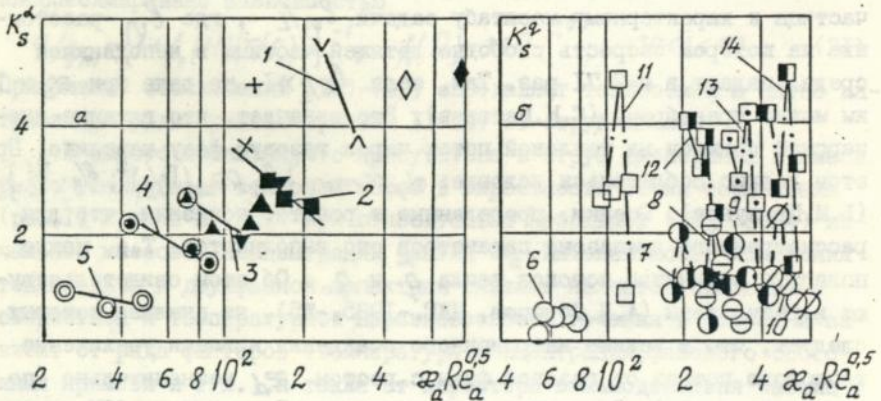


Рис.13. Поток тепла (коэффициент теплоотдачи) от дисперсной примеси для струй, содержащих твердые (а) или расплавленные (б) частицы а-Шимизу: азот-графит, $d_p = 10$ мкм; $\alpha_a = 0,11-1,05$; 6-автор: азот- Al_2O_3 или ZrO_2 , $40+120$ мкм, $\alpha_a = 0,24-1,86$; (6-10: Al_2O_3 ; 11-14: ZrO_2)

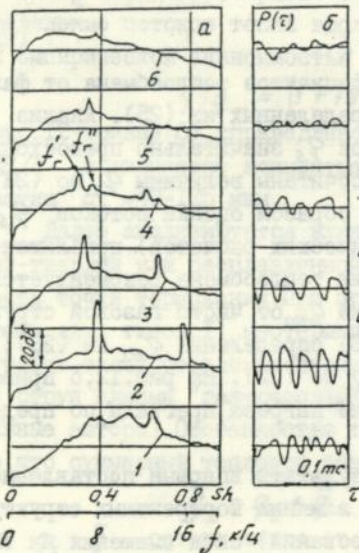


Рис.14. Спектры пульсаций давления (а) и форма колебаний давления на преграде (б) ($Re_a = 325000$; $Ma = 0,9$; $\Gamma = 2,72$)
1-Н=4,8; 2-5,6; 3-7,4; 4-8,8; 5-9,4; 6-12

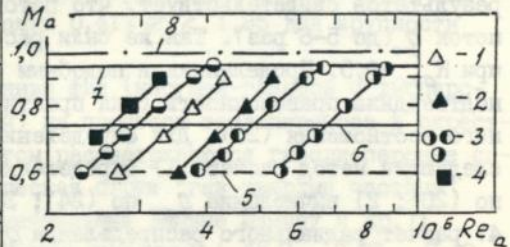


Рис.15. Область существования автоколебаний. 1, 2-Хо, Носьер; 3-Власов, Гиневский; 4-автор; 5-начало автоколебаний; 7-границы интенсивных автоколебаний; 8-критический режим

уделено режиму автоколебаний ($0,6 \leq M_a \leq 0,95$), возникновение которого фиксировалось в эксперименте по появлению мощных дискретных составляющих в спектре пульсаций давления на преграде и периодичности формы колебаний давления $\rho(\tau)$ (рис. I4). Исследования по аэродинамике течения подтвердили известные особенности режима автоколебаний (Хо, Носьер; Власов Е. В., Гиневский А. С.): наличие петли обратной связи; периодичность пульсаций давления на преграде с безразмерной частотой $Sh_r = f_r d_a / U_a = 0,3-0,4$, где f_r - частота первой дискретной составляющей спектра (рис. I4, а), близкой к частоте следования когерентных структур слоя смещения свободной струи и т. п. Вместе с тем, получены и новые результаты: построена область существования автоколебаний в плоскости $\{M_a; Re_a\}$ (рис. I5); разработана классификация режимов взаимодействия при непрерывном удалении преграды от среза сопла.

Установлено, что в режимах устойчивого обтекания для больших дозвуковых скоростей когерентные образования не приводят к изменениям характеристик теплоотдачи (рис. I6, а): распределения осредненных во времени коэффициентов теплоотдачи α вдоль преграды соответствуют распределениям α , установленным автором ранее в разделе I для низкоскоростных несжимаемых струй. Рост турбулентности вдоль струи приводит к высоким значениям α_m с максимумом при $\bar{N} \approx 16-18$ (рис. I6, д). В режимах автоколебаний не отмечено аномального поведения коэффициентов α_m в точке торможения при вариации \bar{N} (рис. I6, д). Тем не менее, присутствие интенсивных крупномасштабных торoidalных вихрей в области разворота внешней зоны смещения струи на преграде ($\bar{r} = 2, 2-3$, см. рис. I) проявляется в изменении периферийного максимума α ($\bar{r} = 4$), величина и положение которого зависит от M_a (рис. I6, б-г). В режиме развитых автоколебаний для чисел Маха $0,8 < M_a < 1$ коэффициент α в периферийной области практически постояен. Сохранение высоких значений α на периферии связано с существенным уровнем пульсаций газодинамических величин, генерируемых когерентными структурами в области $2 \leq \bar{r} \leq 3$ (рис. I7, а). Анализ полученных результатов показал, что и для режима автоколебаний теплоотдачу от струи к преграде в окрестности точки торможения можно определить по критериальному соотношению (II) раздела I, если использовать связь между пульсациями скорости и давления на преграде (рис. I6, е). Разделяя эффекты от случайной $-\mathcal{E}_m$ и периодической $-Sh_r$ составляющих пульсирующих величин, данные по

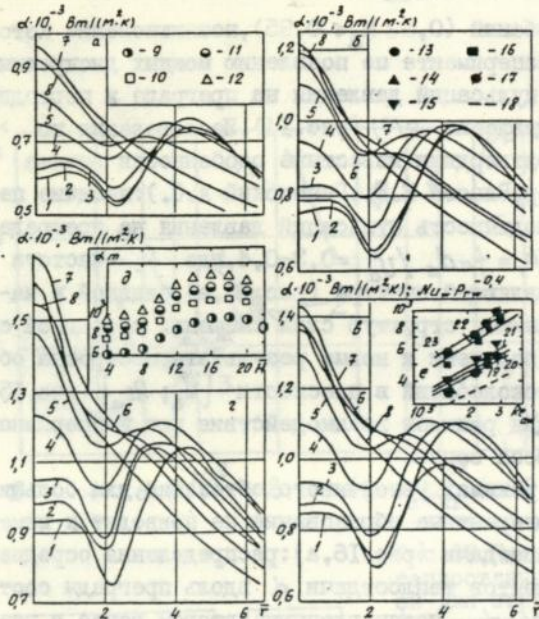


Рис. 16. Тепловые характеристики взаимодействия струи с преградой в стационарном (а) и автоколебательном (б-г) режимах обтекания. а- $M_a = 0,5$; $Re_{aw} = 156000$; б-0,7; 224000; в-0,8; 256000; г-0,9; 290000 а-г -распределение α по преграде: 1- $H=4$; 2-6; 3-8; 4-10; 5-12; 6-14; 7-16; 8-20 д-изменение α_m в точке торможения от H : 9- $M_a = 0,5$; 10-0,7; 11-0,8; 12-0,9; е-сопоставление чисел Нуссельта: эксперим-х (13- $H=4$; 14-6; 15-8; 16-12; 17-16) и расчетных по (II) (18- $\epsilon_m = 0$; 19-0,016; 20-0,021; 21-0,028; 22-0,058; 23-0,072)

Рис. 17. Интенсивность пульсаций давления на преграде в режиме автоколебаний ($M_a = 0,9$; $Re_{aw} = 325000$). 1- $H=4$; 2-6; 3-8; 4-10; 5-14; 6-20; 7- $\Gamma = 0$; 8-2,72; 9-5; 10-7,72

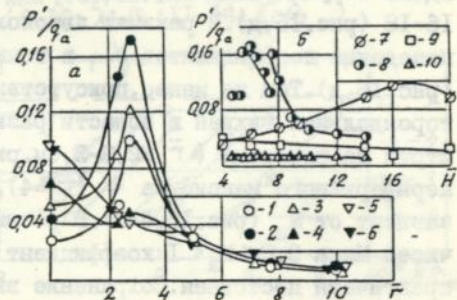
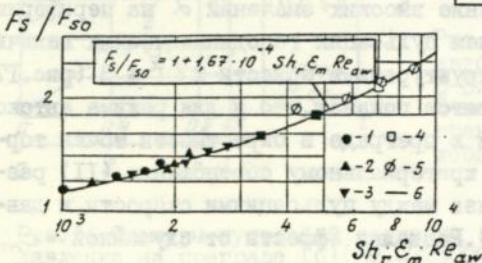


Рис. 18. Обобщение опытных данных по теплообмену для струйной импактной системы в режиме автоколебаний ($M_a = 0,9$; $Re_{aw} = 290000$): 1- $H=4$; 2-6; 3-8; 4-12; 5-16



теплообмену (для чисел Фрелинга) обобщены зависимостью (рис. 18) вида

$$F_3/F_2 = 1 + 1,67 \cdot 10^{-4} sh_r \varepsilon_m Re_{aw} \quad (26)$$

В четвертом разделе исследованы особенности теплообмена в сверхзвуковых импактных струйных системах. Обобщение основывается на фундаментальных представлениях В.Н.Ускова о типах ударно-волновой картины (УЭК), реализуемой при торможении струи перед преградой. Установлено, что изменение характеристик теплообмена на преграде однозначно связано с режимом обтекания (его сменой) в условиях непрерывного удаления поверхности от среза сопла при фиксированных числах M_a и нерасчетности λ (рис. 19). Так в режиме радиального растекания (стационарное обтекание) при удалении \bar{H} наблюдается падение коэффициента теплоотдачи (осредненного во времени) в центре преграды α_m (см., например, кривую 3) вплоть до наступления первого режима автоколебаний ($\bar{H} = \bar{H}_{1n}$). Падение α_m связано с уменьшением градиента скорости из-за увеличения отхода центрального скачка уплотнения (ЦСУ) от преграды. В режиме развитых автоколебаний ($\bar{H}_{1n} \leq \bar{H} \leq \bar{H}_{1k}$) α_m возрастает и достигает максимума (он расположен в середине рассматриваемой области и соответствует максимальным значениям амплитуды колебания ЦСУ и давления на преграде). Для течения с центральной циркуляционной зоной α_m падает из-за резкого затухания пульсаций газодинамических величин. Дальнейшее увеличение расстояния \bar{H} приводит к плавному росту α_m при переходе от второго автоколебательного режима к течению с невозмущенной первой бочкой. Для последнего ($\bar{H} \geq \bar{H}_\delta$) α_m постоянен. При расчете теплообмена в окрестности точки торможения в режиме стационарного обтекания использовано критериальное представление (II) раздела I (правомочность его применения подтверждается рис. 5), которое трансформируется как

$$Nu_\Delta = 0,54 \rho_w^{0,4} \left(\frac{\rho_{02} \mu_{02}}{\rho_w \mu_w} \right)^{0,4} (\lambda_2 \delta Re_\Delta)^{0,5} \left[1 + \varepsilon^{1,1} (\delta \lambda_2 Re_\Delta)^{0,275} \right], \quad (27)$$

где $Nu_\Delta = \alpha \Delta / \lambda_w$; $Re_\Delta = \rho_{01} a_* \Delta / \mu_w$; $\delta(M_1) = \rho_{02} / \rho_{01}$; $\varepsilon = u' / U_2$;

$$\lambda_1 = \frac{\gamma+1}{2} M_1 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{-1}; \quad \lambda_1 \lambda_2 = 1; \quad U_2 = a_* / \lambda_1.$$

Зависимость (27) справедлива в диапазоне изменения параметров: $M_a = 1-3$; $\lambda = 1-20$; $Re_\Delta = 10^5-10^7$. Выполнен большой цикл измерений характеристик турбулентности в сверхзвуковых нерасчетных струях. Показано, что величина ε для окрестности точки торможения меняется

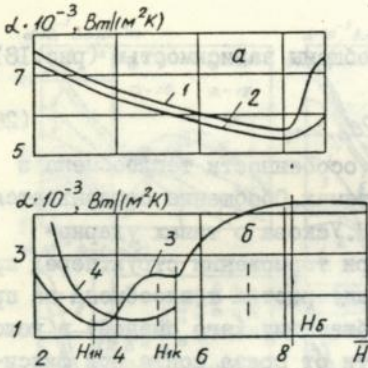


Рис.19. Коэффициент теплоотдачи в центре преграды в зависимости от H (сверхзвуковое обтекание). а- $M_a=3$; $\delta=1,25$; $\Gamma=1,4$; $2-\Gamma=1,85$; б- $\delta=1,4$; $3-M_a=1$; $\Gamma=3,7$; $4-2$; $2,7$

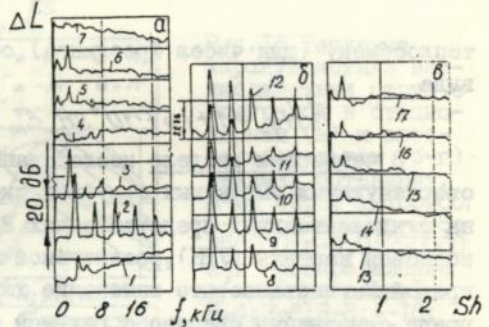
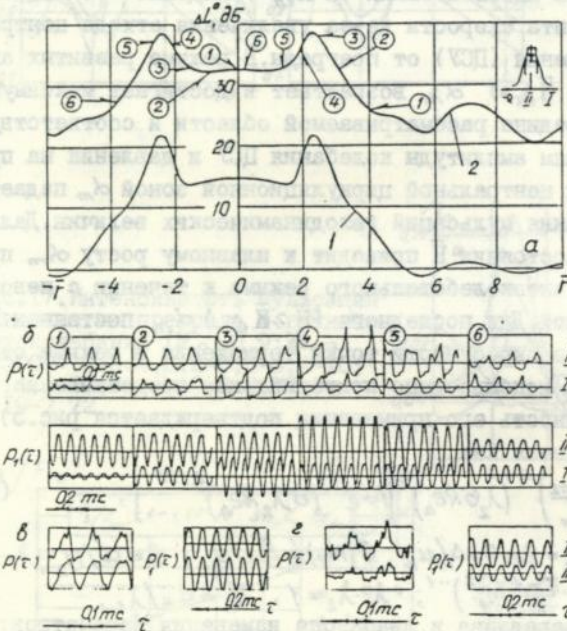


Рис.20. Спектры пульсаций давления на преграде ($M_a=2,14,17=5$, $\delta=1,4$, $Re_\tau=1360000$). а- $\Gamma=2$: 1- $H=0,62$; 2- $0,7$; 3- $0,88$; 4- $1,0$; 5- $1,32$; 6- $1,38$; 7- $1,45$; 8- $H=0,7$; 8- $\Gamma=4,37$; 9- $2,63$; 10- $2,05$; 11- $1,47$; 12- 0 ; в- $H=1,38$; 13- 4 ; 14- $3,2$; 15- $2,57$; 16- $1,66$; 17- 0



1-й режим автоколебаний
 $M_a=2,14$; $\Gamma=5$

Рис.21. Интегральный уровень пульсаций давления (а) и фаза колебаний (б, в) давления на безграничной преграде. 1- P_w , 2- ΔL , $P(t)$ - сигнал отфильтрован: режим пропускающего полосового фильтра на частоте f_r ; б- $f_r=3,4$ кГц; в- $3,1$ кГц; 0,8

линейно от 0,05 до 0,45 при удалении преграды в пределах стационарного обтекания ($0,25 \leq H/x_{MG} < 1$). При этом отмечается, что данные по теплообмену получены автором в ходе исследований, проводившихся совместно с И.А.Беловым, В.С.Комаровым и В.С.Терпигорьевым.

Пятый раздел посвящен изучению автоколебаний в сверхзвуковых недорасширенных импактных струйных системах. Расширены существующие представления о втором режиме автоколебаний для безграничной преграды:

- наличие единственной дискретной составляющей в частотном спектре, уровень превышения которой над общим широкополосным фоном ($\sim 10 + 15$ дБ) значительно меньше, чем для первого режима автоколебаний (~ 40 дБ) (рис.20, а-кривые 6;2);

- отсутствие ярко выраженной периодичности формы колебаний давления $\rho(\tau)$ (рис.22, б) на преграде из-за наложения пульсаций случайной (турбулентной) компоненты внутренней зоны смешения, сходящейся с тройной точки струи;

- в распределении интегрального уровня пульсаций давления вдоль преграды ΔL° (рис.22-кривая 2) существует периферийный максимум, совпадающий с местоположением периферийного максимума статического давления ρ_w (кривая 1) (это утверждение справедливо и для первого режима автоколебаний-рис.21); разница уровней ΔL° на периферии и в центре ~ 15 дБ.

В работе получены фазовые характеристики колебаний давления на преграде для первого и второго нестационарных режимов, ранее неизвестные в литературе. Из анализа результатов следует, что:

- фаза колебаний давления на периферии (кривые 1,2 для датчика 1, рис.21, б) одинакова;

- колебания давления на преграде в зоне постоянного уровня ΔL° и за периферийным максимумом ΔL° происходят в противофазе;

- колебания давления в симметричных относительно оси точках преграды (рис.21, в, г) совпадают по фазе.

Указанные закономерности говорят о симметричном, продольном характере колебаний, а анализ полученных результатов свидетельствует в пользу автоколебательной природы нестационарных режимов.

Для ответа на вопрос о каналах прямой и обратной связи, через которые осуществляется поддержка колебаний, поставлен специальный эксперимент, в котором из-за спутного сверхзвукового потока не существует обратной акустической связи с помощью акустических волн,

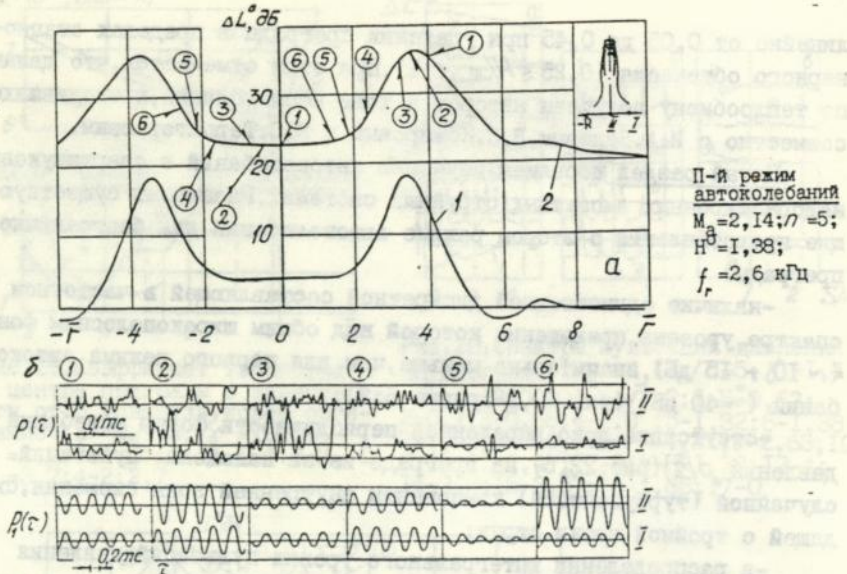


Рис. 22. Интегральный уровень пульсаций давления (а) и фаза колебаний давления (б) на безграничной прегредае.

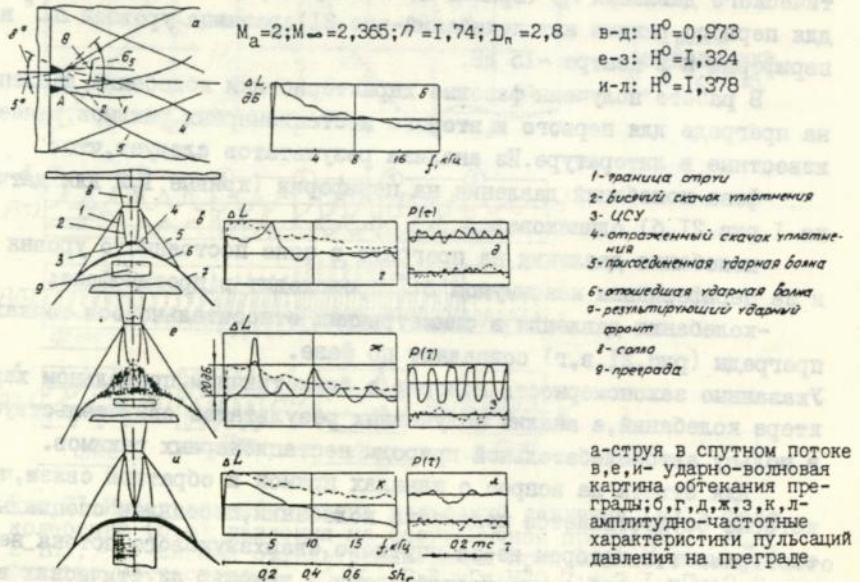


Рис. 23. Влияние спутного сверхзвукового потока на автоколебания

распространяющихся по окружающему пространству к кромке сопла. Описана качественная картина обтекания преграды ограниченных размеров при непрерывном ее удалении от среза сопла (рис.23). Впервые доказано возникновение автоколебаний в данных условиях. При этом в частотном спектре пульсаций давления в центре преграды появляются дискретные составляющие (рис.23,ж), значительно, на 30-40 дБ, превышающие уровень сплошного спектра струи. Колебания давления в точке торможения детерминированы и носят периодический характер (рис. 23,з). Однако в спектрах звукового давления (штриховая кривая-ж) дискретные составляющие отсутствуют, а колебания давления в окружающей среде, фиксируемые микрофоном, имеют случайный характер. Спектрограммы идентичны спектрограммам шума свободной струи (рис. 23,б).

Эти результаты являются фундаментальными и носят принципиальный характер при анализе механизма поддержания нестационарного течения. Не отрицая влияния внешней акустической связи на характеристики автоколебаний (Глазнев В.Н.) показано, что не она играет главную роль в поддержании нестационарного течения. Ее выполняют ударно-волновые процессы в ударном слое перед преградой.

Для разреженной импактной струи впервые установлено два типа обтекания ограниченной преграды: один, когда одновременно существуют первый (I) и второй (II) режим автоколебаний; другой, когда присутствует только I-ый, как и в случае плотных струй. Реализация любого из них зависит от сочетания параметров $M_a, N^0 = H/(d_a M_a \sqrt{\gamma n})$ и $Re_L = Re_{\nu} (P_0/P_H)^{-0,5}$. В свою очередь, первый режим (рис.25,а,в) характеризуется наличием кратных дискретных тонов в частотном спектре (рис.26,а), мощным колебанием УЖ (рис.24,а) и давления (рис.26,б) на преграде большой амплитуды и сравнительно низкой частоты. Колебания имеют ярко выраженную периодическую структуру. Режим протяженен по N^0 . Второй (рис.25,б,г), значительно меньший по уровню ΔL^0 и протяженности N^0 (в три раза по отношению к I-ому), характеризуется единственной дискретной составляющей частотного спектра (рис.26-кривые 7-9), умеренным колебанием УЖ и давления на преграде. Режим чувствителен к изменению параметра разреженности Re_L .

Уменьшение чисел $Re_L < 371$ (увеличение разреженности), наряду с количественным изменением протяженности областей существования автоколебаний, может привести к исчезновению сначала II-го, а затем



Рис.24. Ударно-волновая картина перед ограниченной преградой, обтекаемой недорасширенной разреженной струей ($M_a=2$; $\delta=1,4$). а- $Re_z=371$; $\eta=13,5$; б- 162 ; $2,6$

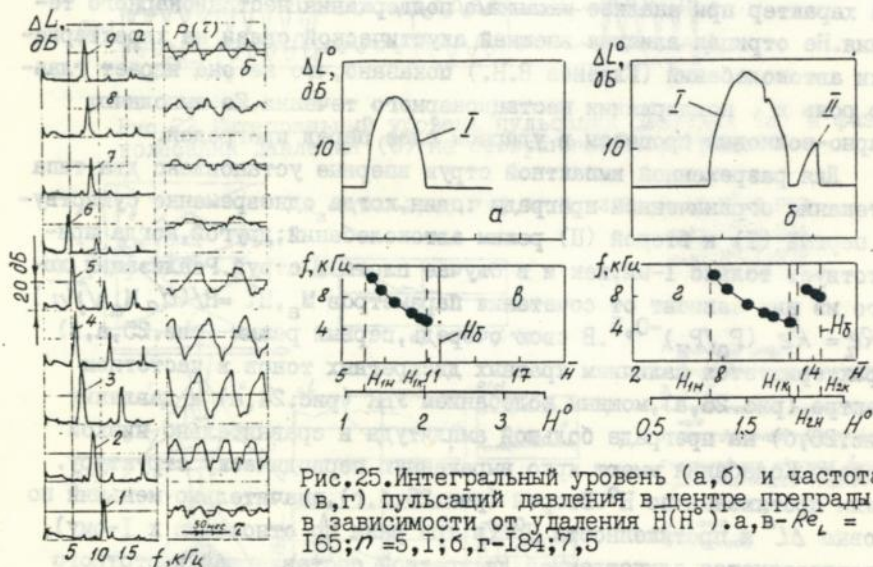


Рис.25. Интегральный уровень (а, б) и частота (в, г) пульсаций давления в центре преграды в зависимости от удаления $H(H^\circ)$. а, в- $Re_z=165$; $\eta=5$; б, г- 184 ; $7,5$

Рис.26. Спектр (а) и форма колебаний (б) пульсаций давления в центре преграды при удалении ее от сопла \bar{H} . кривые 1-9 соответствуют расстояниям \bar{H} рис.25, г

и I-го режимов. Это связано как с переходом к так называемой X-образной структуре ударных волн в разреженной струе (рис. 24, б), так и с "размыванием" УВК первой бочки струи. В работе показано, что при $Re_L \leq 172$ (диапазон $\lambda = 6, 6-2, 6$) существует единственный (I-ый) режим, а для $Re_L < 121$ автоколебания не обнаружены. Исчезновение II-ого нестационарного режима обусловлено уменьшением поперечного размера ударного слоя (уменьшением диска Маха в струе) при переходе к регулярной структуре ударных волн.

Анализ частотных характеристик автоколебаний в импульсных струйных системах позволил обобщить полученные автором и имеющиеся в литературе данные универсальной зависимостью для безразмерной частоты (числа Струхали) вида

$$St_r^{-1} = a_0 / (f_r d_a \sqrt{n}) = A_i \Delta / (d_a \sqrt{n}) + B_i, \quad (28)$$

где коэффициенты A_i, B_i соответствуют номеру режима нестационарного обтекания: а) безграничная преграда - $A_1 = 4, 1; B_1 = 0, 6; A_2 = 1, 9; B_2 = 0, 1; б) конечная преграда, разреженная струя - A_1 = 4, 3; B_1 = 1, 2; A_2 = 1, 3; B_2 = 1, 4; в) конечная преграда, спутный поток - A_1 = 3, 6; B_1 = 1, 3.$ Рис. 27 иллюстрирует сравнение опытных данных с расчетом по (28).

В шестом разделе рассмотрен круг новых задач, которые сформулированы как задачи организации течения и теплообмена на поверхности обтекаемых преград для целей управления локальными (интегральными) характеристиками и интенсификации теплообменных процессов. Указаны пути применения полученных результатов на практике в различных энергетических и технологических процессах. Так обобщение теплообмена для сопловых крышек установок для испытания ТЗМ (рис. 28) успешно проведено по критериальному соотношению (II). Установленные физические представления о течении в ограниченном объеме и разработанный метод расчета теплообмена позволили предложить способы регулирования уровня тепловых нагрузок при испытаниях теплозащитных покрытий (ТЗП).

Оптимизацией течения и теплообмена в импульсной струйной системе с периферийным максимумом скорости на срезе сопла достигнуто 40% увеличение среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ по сравнению с обычным круглым соплом (рис. 29).

Сформулирована и решена задача о движении и нагреве частиц примеси в струе плазмы. Использован траекторный подход. При этом в отличие от существующих постановок, где параметры струи, как пра-



Рис. 27. Обобщение данных по частотам автоколебаний в сверхзвуковых импульсных струйных системах. а-безграничная преграда; б-ограниченная преграда, разреженные струи; в-ограниченная, спутный поток и без него; I-й режим автоколебаний, II-й режим автоколебаний; расчет по (28)

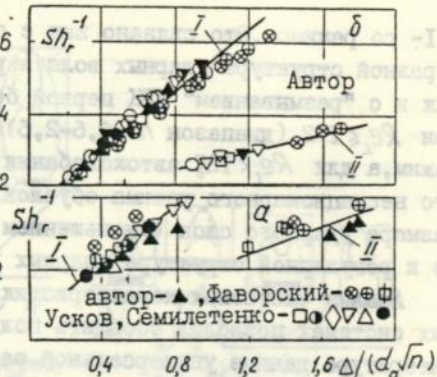


Рис. 28. Обобщение данных по теплообмену в окрестности точки торможения сопловой крышки установок для испытания ТЭМ. значки-экспер.: H=1, 4-12; $\alpha_K=14-130$; $\delta=1, 2-1, 4$; Расчет по II: 4- $\xi_K=0, 02$; 5-0, 03; 6-0, 06; 7-0, 085; 8-0, 14; 9-0, 23; 10-0, 32

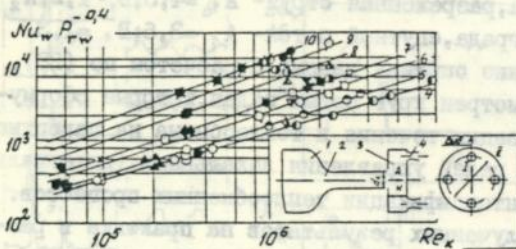


Рис. 29. Интенсификация теплоотдачи в импульсной струйной системе с периферийным максимумом скорости на срезе сопла. I- $U_2/U_1=4$; $d_2/d_1=0, 5$; 2-2; 0, 5

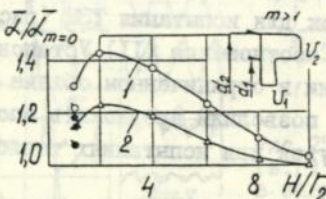
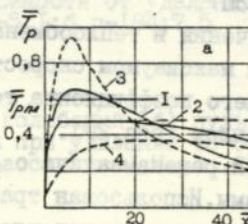
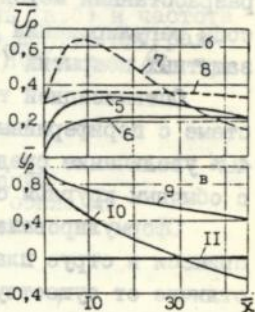


Рис. 30. Температура, скорость и траектория частицы Al_2O_3 вдоль струи плазмы при поперечном и продольном вдувах ($V_{pa}=4$ м/с-попер.; $U_{pa}=150$ м/с-прод.) I, 5, 9- $d_p=10$ мкм; 2, 6, 10-50 мкм



I, 2, 5, 6, 9, 10 - поперечный вдув
3, 4, 7, 8, 11 - продольный



вило, задаются зависимостями (например, скорости и температуры вдоль оси струи), решение ищется во всем расчетном поле струи (раздел 2). Предложены рекомендации по оптимальному вводу частиц в струю плазмы для конкретных параметров технологического процесса напыления тугоплавких покрытий. Рис.30 иллюстрирует нагрев частиц Al_2O_3 в воздушной струе плазмы с параметрами: $T_a=4800$ К; $U_a = 497$ м/с; $d_a=9$ мм. Также приводятся примеры практического использования результатов для автоколебательных импактных струйных систем.

В В О Д Н

1. Сформированы общие положения о влиянии внешней турбулентности на интенсификацию процессов теплопереноса в пристеночных областях для до- и сверхзвуковых изотермических и неізотермических струй газа и плазмы, взаимодействующих с преградами; установлен определяющий вклад турбулентных пульсаций в механизм теплообмена на обтекаемых поверхностях. Подобный подход позволяет обобщить практически все имеющиеся данные по теплообмену для импактных струйных систем в условиях сильного влияния начальных возмущающих факторов (турбулентность, неізотермичность, сжимаемость и т.п.).
2. Найдены критериальные соотношения для расчета трения и теплообмена на поверхности преград, универсальность которых обоснована в широком диапазоне изменения определяющих параметров: $M_a=0,02-3$; $\lambda=2-30$; $T_a=290-9000$ К; $Re=10^4-10^7$. Критериальная зависимость (19) для точки торможения в сочетании с иными установленными соотношениями для распределения характеристик теплоотдачи вдоль преграды позволяет также определить поток тепла от газовой фазы при анализе и расчете теплообмена в двухфазной импактной системе плазмы.
3. Построена новая модель турбулентности, учитывающая влияние внешней турбулентности на переносные свойства пристеночных пограничных слоев. Она положена в основу численного исследования течения и теплообмена при обтекании преград. Указаны новые аппроксимирующие численный эксперимент соотношения для расчета теплообмена.
4. Получены полуэмпирические зависимости для определения структуры турбулентности в свободных затопленных струях, в области взаимодействия, в пристеночном динамическом и тепловом пограничных

слоях импактных систем. Эти результаты являются вкладом автора в дальнейшее развитие теории турбулентности струйных потоков.

5. Выполнен анализ влияния концентрации дисперсной примеси на характеристики теплообмена в двухфазной импактной струйной системе плазмы. Установлены соотношения потоков тепла от дисперсной и газовой фаз в газодисперсном потоке типа "газ-расплавленные частицы"; разработан метод расчета теплообмена в пятне нагрева преграды.
6. Проведено численное параметрическое исследование влияния спутности ($0 \leq m \leq 2$) и перегрева ($0,52 \leq \varrho_a \leq 138$) на характеристики затухания (длину начального участка, коэффициенты нарастания зон смешения и т.п.) струй газа и плазмы переменного состава. Для них получены новые аппроксимирующие расчеты зависимости, справедливость которых подтверждена значительным количеством экспериментальных данных, известных в литературе (включая и работы автора).
7. Обнаружены неизвестные ранее особенности, вызванные влиянием когерентных структур слоя смешения на локальный теплообмен в режиме автоколебаний; для дозвуковых струй он реализуется в диапазоне чисел Маха $0,6 \leq M_a \leq 0,95$ и определяется областью существования $\{M_a; Re_a\}$. Указано соотношение (26) для определения чисел Фрешлинга с учетом случайной и периодической составляющих пульсирующих величин.
8. Новые закономерности и эффекты автоколебаний найдены при обтекании сверхзвуковыми недорасширенными струями преград ограниченных размеров:
 - впервые доказано возникновение автоколебаний в спутном сверхзвуковом потоке; этот результат является фундаментальным и носит принципиальный характер при анализе механизма поддержания нестационарного течения; не отрицая влияния внешней акустической связи на характеристики автоколебаний, показано, что не она играет главную роль в поддержании нестационарного взаимодействия; ее выполняют ударно-волновые процессы в ударном слое перед преградой;
 - для разреженных струй впервые обнаружен второй режим автоколебаний (в отличие от плотных струй) в пределах первой бочки струи; выявлены параметры, при которых реализуется только первый, либо первый и второй режим автоколебаний одновременно; исследовано

влияние чисел Re на существование автоколебаний.

Для обтекания безграничной преграды плотными струями получены фазовые характеристики колебаний, ранее не описанные в литературе. Указаны обобщающие эмпирические зависимости (28) для расчета частотных характеристик автоколебаний в рассмотренных импульсных струйных системах.

9. Разработанные способы организации течения и теплообмена для целей управления и интенсификации теплообменных процессов в свободных струях и импульсных системах позволяют:

-обеспечить максимальный нагрев (теплосъем) поверхностей как за счет турбулизации струи, так и за счет организации устойчивого циркуляционного течения; режим работы соплового устройства, формирующего на срезе сопла профиль с периферийным максимумом скорости, при котором достигнуто 40% увеличение среднего коэффициента α (по сравнению с обычным соплом), следующий: $m = U_2/U_1 = 4$; $D = d_1/d_2 = 0,5$ и $\bar{N} = 2-4$;

-осуществить регулирование уровня тепловых нагрузок при испытаниях ТЗМ в стендах и установках, использующих открытые струи плазмы и ограниченные объемы при повышенном давлении;

-с помощью разработанного метода расчета движения и нагрева частиц примеси в струе найти оптимальные режимы ввода частиц в струю, обеспечивающие требуемый нагрев и распыление примеси в задачах плазменной обработки материалов и нанесения покрытий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ :

1. Белов И.А., Горшков Г.Ф., Комаров В.С., Терпигорьев В.С. Экспериментальное исследование газодинамических параметров при струйном обтекании преграды // Изв. АН СССР. МЖГ. - 1971. - №2. - С. 139-142.
2. Белов И.А., Горшков Г.Ф., Комаров В.С., Терпигорьев В.С. Экспериментальное исследование теплообмена дозвуковой струи с нормально расположенной плоской преградой // ИФЖ. - 1971. - Т. 20, №5. - С. 893-897.
3. Белов И.А., Гинзбург И.П., Горшков Г.Ф., Комаров В.С., Маев М.М., Терпигорьев В.С. К вопросу экспериментального исследования теплообмена в установках для испытания ТЗМ // ИФЖ. - 1972. - Т. 23, №6. - С. 988-992.
4. Белов И.А., Гинзбург И.П., Горшков Г.Ф., Комаров В.С., Терпигорьев В.С. Вопросы теплообмена струй с преградой // Тепло- и массо-

- перенос: Мат-лы к IV Всесоюз. совещ. по тепло- и массообмену (Минск, 1972). - Минск: ИТМО АН БССР. - 1972. - Т. I, Ч. 2. - С. 271-281.
5. Белов И. А., Горшков Г. Ф., Комаров В. С., Терпигорьев В. С. Влияние струйной турбулентности на течение в пристеночном пограничном слое // ПМТФ. - 1972. - № 6. - С. 77-82.
6. Горшков Г. Ф., Комаров В. С., Терпигорьев В. С. Некоторые результаты измерения средней и продольной компоненты пульсации скорости на начальном участке осесимметричной дозвуковой струи // Гидромеханика и теория упругости: Межвуз. научн. сб. - Днепропетровск: ДГУ. - 1973. - Вып. 16. - С. 46-52.
7. Горшков Г. Ф., Комаров В. С., Маев М. М., Терпигорьев В. С. Методы интенсификации теплообменных процессов при испытании теплозащитных материалов // ИЖ. - 1973. - Т. 25, № 3. - С. 403-408.
8. Белов И. А., Гинзбург И. П., Горшков Г. Ф., Терпигорьев В. С. Течение и теплообмен струи низкотемпературной плазмы, взаимодействующей с преградой // Теплообмен-У: Мат-лы к V Всесоюз. конф. по теплообмену (Минск, май 1976). - Минск: ИТМО АН БССР. - 1976. - Т. I, Ч. 2. - С. 131-139.
9. Горшков Г. Ф., Терпигорьев В. С. О закономерностях распространения турбулентных струй вязкой жидкости переменного состава // ИЖ. - 1979. - Т. 36, № 1. - С. 75-79.
10. Горшков Г. Ф., Терпигорьев В. С. Расчет основного участка турбулентной неизотермической струи переменного состава, истекающей в затопленное пространство // ИЖ. - 1979. - Т. 36, № 5. - С. 885-890.
11. Белов И. А., Горшков Г. Ф., Терпигорьев В. С. Процессы теплопереноса и микроструктура пограничного слоя в окрестности точки торможения при струйном обтекании преграды // Теплообмен-У: Мат-лы У I Всесоюз. конф. по теплообмену (Минск, сентябрь 1980). - Минск: ИТМО АН БССР. - 1980. - Т. I, Ч. 2. - С. 13-17.
12. Белов И. А., Горшков Г. Ф., Терпигорьев В. С. Течение и теплообмен при обтекании преграды коаксиальными струями // ИЖ. - Т. 38, № 1. - 1980. - С. 38-43.
13. Горшков Г. Ф. К расчету теплообмена в окрестности точки торможения при обтекании преграды плазменными потоками // Физика и химия обработки материалов. - 1982. - № 6. - С. 18-21.
14. Горшков Г. Ф. Микроструктура потока в области взаимодействия струи с преградой // Струйные течения жидкостей и газов: Тез. Всесоюз. научн. конф. (2-5 июля 1982, Новополоцк). - Новополоцк:

- НПИ. -1982. -Ч.1. -С.122-128.
15. Горшков Г.Ф., Терпигорьев В.С. Расчет начального участка турбулентной неизотермической струи переменного состава, истекающей в затопленное пространство//Физика и химия обработки материалов. -1983. -№5. -С.46-50.
16. Горшков Г.Ф. Исследование пристенной турбулентности при струйном обтекании преграды//ПМТФ. -1984. -№2. -С.73-82.
17. Горшков Г.Ф. Анализ влияния струйной турбулентности на теплообмен в пристеночном пограничном слое преграды//Тепломассообмен-УП:Мат-лы к УП Всесоюз. конф. по тепломассообмену (Минск, май 1984). -Минск:ИТМО АН БССР. -1984. -Т.1, Ч.2. -С.69-73.
18. Горшков Г.Ф. Распространение спутных неизотермических струй газа и плазмы переменного состава//Динамика неоднородных и сжимаемых сред:Межвуз. сб./Под ред.Н.Н.Поляхова. -Л.:ЛГУ. -1984. -С.164-175.
19. Горшков Г.Ф. Исследование влияния дисперсного компонента на характер теплообмена при обтекании преграды гетерогенной струей//ПМТФ. -1986. -№6. -С.63-68.
20. Горшков Г.Ф., Иванов В.Д. Влияние начальной концентрации дисперсной компоненты на тепло- и массообмен при струйном обтекании преград//Динамика однородных и неоднородных сред:Межвуз. сб./Под ред.Н.Н.Поляхова. -Л.:ЛГУ. -1987. -С.3-9.
21. Горшков Г.Ф. Течение и теплообмен при взаимодействии сверхзвуковых недорасширенных струй с нормально расположенной плоской преградой//Газодинамика и акустика струйных течений/Сб. научн. трудов. -Новосибирск:ИПМ СО АН СССР. -1987. -С.20-26.
22. Горшков Г.Ф. Особенности теплообмена при дозвуковом струйном обтекании преграды на режиме автоколебаний//Тепломассообмен. ММФ:Тез. докл. Минского междунар. форума (Минск, май 1988). -Минск:ИТМО АН БССР. -1988. -Т.1, Ч.2. -С.28-30.
23. Горшков Г.Ф. Влияние когерентных структур на течение и теплообмен при дозвуковом струйном обтекании преграды в режиме автоколебаний//Пром. теплотехника. -Киев:Наук. думка. -1989. -Т. II, №2. -С.20-27.
24. Горшков Г.Ф. Анализ теплообмена при обтекании преграды двухфазной струей типа "газ-твердые или расплавленные частицы"//Совершенствование теории и техники тепловой защиты энергетических устройств:Тез. докл. П Респуб. конф. (Житомир, сентябрь 1990). -Киев:НТК ИТФ АН УССР. -1990. -С.77-78.

25. Горшков Г.Ф., Усков В.Н., Ушаков А.П. Автоколебательный режим взаимодействия недорасширенной струи с преградой при наличии сверхзвукового спутного потока // ПМТФ. - 1991. - №4. - С. 50-58.
26. Горшков Г.Ф. Теплоперенос при взаимодействии с преградами двухфазных неравновесных струй плазмы промышленных плазмотронов // Физика низкотемпературной плазмы: Мат-лы VIII Всесоюз. конф. - Минск: АНК ИГМО АН БССР. - 1991. - Ч.3. - С. 127-128.
27. Горшков Г.Ф. Процессы теплопереноса при обтекании преград газодисперсными струями, содержащими твердые или расплавленные частицы // Пром. теплотехника. - 1991. - №5.

Авторские свидетельства

28. А.с. 73456 СССР // В.С. Терпигорьев, М.М. Маев, А.М. Кулик, А.М. Иванов, Г.Ф. Горшков, В.С. Комаров (СССР). - 1972.
29. А.с. 399686 СССР Горелочный насадок для бытовых газовых плит // И.А. Белов, И.-Г.Ф. Гинзбург, Г.Ф. Горшков, В.С. Комаров, В.С. Терпигорьев (СССР). - Спубл. 03. 10. 1973. Бюл. №39.
30. А.с. 1207385 СССР Распылитель плазменный // Г.Ф. Горшков, С.И. Жигач (СССР). - 1984.

Условные обозначения

x, r (r, y или x, y) - продольная и поперечная струйная (ПС) координаты; d - диаметр; δ, z - ширина динамической зоны смещения; Δ - отход ЦСУ от преграды; a - скорость звука; ρ - плотность; λ - коэфф. теплопроводности; μ, ν - коэфф. динамической и кинематической вязкости; C_{ps} - физическая теплоемкость материала частицы; h - теплосодержание; $\theta_a = h_a / h_n$; $q_a = 0,5(\rho U^2)_a$ - динамический напор; $C_f = 2 \tau_w / (\rho U^2)_\delta$ - коэфф. трения; $\eta_1 = y \sqrt{\beta / \nu}$; $\eta_2 = y \sqrt{U_\delta / (\nu y)}$; $P = \sqrt{\langle \rho^2(z) \rangle}$; числа подобия: $Re_x = U x / \nu$ - Рейнольдса; $Nu_x = \alpha x / \lambda$ - Нуссельта; $Fs = Nu / (Re_{aw}^{0,2} \rho_r^{0,4})$ - Фреслинга; $P_r = \rho_u / \rho_r$ - Прандтля; индексы: а - срез сопла; к - канал, конечный; w - стенка; н - наружный, начальный; т - тепловой, турбулентный; δ - внешняя граница ПС; m - вдоль оси; * - критический, перехода; ∞ - спутный; ρ - частица; Mg - маховый диск; о - торможение, модифицированный и пр.; 2 - за ЦСУ; 1 - до него; m_0 - внутренняя граница зоны смещения струи.



MS. 50. 177

469936

AB 26.496

AB 26.496