

МЧВ1278

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНОВ ЛЕНИНА, ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

СЕМЕНОВ Юрий Павлович

УДК 532.517:536.24:536.25

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ПРИ СМЕШАННОЙ
КОНВЕКЦИИ (ВНЕШНЕЕ ОБТЕКАНИЕ)

Специальность 05.14.05 — Теоретические основы
теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена на кафедре теплотехники Московского лесотехнического института.

Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор *В. М. Поляев*;
доктор технических наук,
профессор *Б. П. Миронов*;
доктор технических наук,
профессор *Э. Д. Сергиевский*.

Ведущая организация — Институт технической тепло-
физики АН УССР.

Защита диссертации состоится «...»
в 14 часов на заседании специализированного совета
Д 053.15.09 «Энергетические установки» при Московском
государственном университете им. Н. Э. Баумана по адресу:
107005 Москва Лефортовская наб., д. 1, корпус «Энерго-

...ться в библиотеке

УХ ЭКЗЕМПЛЯРАХ,
ДЕНИЯ, просьба на-
2-я Бауманская ул.,
му секретарю специа-

... 1990 г.

...лизованного совета
цент *А. Г. ЧУКАЕВ*

МЧ91 278

Актуальность проблемы. Современный подход к совершенствованию энергетического оборудования, технологических процессов, радиоэлектронной аппаратуры и т.п. требует точной оценки тепловых режимов. Расчет теплообмена в условиях вынужденной и естественной конвекции большей частью не вызывает серьезных трудностей, поскольку эти режимы теплообмена исследованы достаточно полно для многих инженерных задач. В то же время в ряде технических приложений приходится иметь дело с режимами, в которых подъемные силы оказывают заметное влияние на вынужденную конвекцию. Такие режимы получили название смешанной конвекции. Процессы смешанной конвекции имеют место в технологии газозафазного осаждения полупроводниковых материалов, производства стекла, производства древесностружечных плит, в металлургии, в системах охлаждения радиоэлектронной аппаратуры, кондиционирования, в технологии производства крупногабаритных фарфоровых электроизоляторов, в газовых ядерных реакторах в режиме аварийного расхолаживания, в атмосфере и т.д. Возникновению смешанной конвекции способствуют большие градиенты плотности и значительные характерные размеры при относительно умеренной скорости потока. Первоначально задачи смешанной конвекции в практическом приложении пытались решать с использованием так называемого правила Мак-Адамса — считались коэффициенты теплоотдачи для вынужденной конвекции и для естественной, а затем в расчет принималось большее значение. Однако первые же проверки показали, что такой упрощенный подход может привести к серьезным ошибкам.

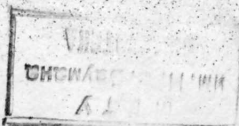
К моменту начала настоящих исследований был опубликован ряд работ, посвященных смешанной конвекции. Из них необходимо отметить исследования теплообмена и гидродинамики в трубах, выполненные под руководством Б.С.Петухова и А.Ф.Полякова; исследования ламинарной смешанной конвекции при обтекании вертикальной пластины, выполненные под руководством П.М.Брдилика; монографии О.Г.Мартыненко и Д.А.Соковишина и другие работы. Позднее были проведены исследования турбулентной смешанной конвекции в трубах под руководством В.Н.Попова, внешнем обтекании (В.Н.Ерошенко и др.). В меньшей степени была исследована

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1491278

Семенов Ю.П. Процессы перен



смешанная конвекция при внешнем обтекании вертикально ориентированным потоком поверхностей различной формы. В случае ламинарного обтекания плоских поверхностей было мало изучено влияние градиента давления, вдува - отсоса на поверхности, изменения физических свойств, влияние различных факторов на отрыв пограничного слоя для противоположной смешанной конвекции.

В случае обтекания вертикальных цилиндров было выполнено решение совпадающей конвекции в ограниченном диапазоне изменения влияния выталкивающих сил.

В исследованиях смешанной конвекции на горизонтальных цилиндрах были получены отдельные данные по среднему теплообмену и выполнены решения уравнений пограничного слоя в доотрывной области без учета реального распределения скорости на границе пограничного слоя.

Турбулентная смешанная конвекция на вертикальных поверхностях практически не изучалась.

Таким образом, по рассматриваемой проблеме выполнялись отдельные работы, результаты которых не полны и не обобщены, за исключением ламинарного обтекания вертикальной пластины. Здесь необходимо отметить обобщение, выполненное П.М.Брдликом и А.А.Петровой на основе решения интегрального уравнения энергии. Были попытки провести обобщение (Churchill S.W. и др.) путем комбинации данных для вынужденной и естественной конвекции. Поэтому последние 10 - 15 лет в нашей стране и за рубежом проводились интенсивные исследования смешанной конвекции в различных условиях. Наши работы в том числе. Результаты публикаций других авторов учитывались нами при проведении исследований и для обобщения.

Работа выполнялась в соответствии с координационным планом Научного совета АН СССР по комплексной проблеме "Тепло-массообмен и гидромеханика однофазных систем при различных воздействиях и условиях течения".

Цель работы - установление физических закономерностей ламинарной и турбулентной смешанной конвекции в условиях обтекания вертикально ориентированным потоком поверхностей различной формы; систематизация и обобщение полученных в настоящей работе и других экспериментальных и расчетных работах

данных; разработка зависимостей и рекомендаций для расчета теплогидродинамических характеристик смешанной конвекции в рассматриваемых условиях.

Научная новизна. В связи с практической потребностью создания методов расчета режимов смешанной конвекции в работе развито перспективное научное направление современной теплофизики "Смешанная конвекция при внешнем обтекании".

В работе впервые:

- проведено комплексное исследование влияния различных факторов - градиента давления, неизотермичности стенки, изменения физических параметров, числа Pr , проницаемости стенки на ламинарную смешанную конвекцию при обтекании вертикальных плоских поверхностей; получены обобщающие универсальные зависимости для расчета теплообмена и трения; установлено влияние различных факторов на возникновение отрыва пограничного слоя в случае противоположной смешанной конвекции;

- выполнен численный расчет противоположной смешанной конвекции на вертикальных цилиндрах; расширены имеющиеся ранее сведения по совпадающей конвекции на вертикальных цилиндрах; получены обобщающие зависимости теплообмена при совпадающей конвекции; даны рекомендации для расчета теплообмена в случае несовпадающей конвекции и установлены условия возникновения отрыва пограничного слоя;

- проведено комплексное экспериментальное исследование теплообмена и гидродинамики при обтекании горизонтального цилиндра для числа $Re_c < 3000$; для вынужденного обтекания предложены зависимости положения точки отрыва от числа Re и скорости на границе пограничного слоя от Re и угла φ в пределах $Re_c = 20 + 3000$; получены экспериментальные данные по локальному теплообмену и характеристикам пограничного слоя в широком диапазоне изменения чисел Re , Gr и

$Ri = Gr/Re^2$ для совпадающей и несовпадающей смешанной конвекции; предложены зависимости положения точки отрыва пограничного слоя от чисел Re и Ri для совпадающей и несовпадающей конвекции; на основе решения интегрального уравнения энергии получена обобщающая зависимость локального теплооб-

мена в докритической области для различных чисел Pr ; предложена зависимость для расчета среднего теплообмена;

- проведено комплексное экспериментальное исследование характеристик пограничного слоя в переходном режиме и в режиме развитого турбулентного течения при смешанной конвекции на вертикальной пластине и цилиндре; экспериментально исследован теплообмен на пластине и цилиндре; выполнено численное исследование влияния выталкивающих сил на трение при обтекании пластины (принятая модель замыкания отработана на базе полученных экспериментальных данных); на основе интегрального метода получены зависимости для расчета трения и теплообмена при турбулентной смешанной конвекции на пластине в условиях развитого турбулентного пограничного слоя (зависимости по теплообмену обобщены для $Pr = 0,7 + 6$); предложены зависимости для расчета теплообмена при обтекании цилиндра в случае смешанной конвекции в области близкой к вынужденному течению и для естественной конвекции.

Автор защищает перечисленные выше новые физические результаты, обобщения и рекомендации для выполнения инженерных расчетов.

Практическая ценность. Выполненные исследования раскрывают новые стороны физики конвективного теплообмена. Полученные зависимости позволяют более обоснованно прогнозировать тепловые режимы энергетических аппаратов и технологических процессов, работающих в условиях смешанной конвекции.

Результаты работы использованы в проектной и исследовательской работе рядом организаций: Государственным специальным конструкторским бюро теплофизического приборостроения (ГСКП ТФП), Запорожским титано-магнелийским комбинатом, Государственным научно-исследовательским и проектным институтом редкометаллической промышленности (ГИРЕДМЕТ), Белорусским отделением ВНИИ Энергопром, предприятием п/я А-7220.

Полученные научные результаты включены в курс лекций "Теплотехника" и использованы при написании учебной и методической литературы в Московском лесотехническом институте.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались на 6-ой международной конференции CHISA-78, Прага, СССР (два доклада), на 2-ом международном симпозиуме

по турбулентным сдвиговым течениям, Лондон, 1979 г., на международной школе-семинаре "Современные методы исследования процессов тепло- и массообмена", Минск, 1981 г., на 5-ой и 6-ой международных конференциях по использованию фотонно-корреляционной техники в механике жидкости, Киль, ФРГ, 1982 г., и Кембридж, Великобритания, 1985 г.; на Всесоюзном семинаре "Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений", Новосибирск, 1982 г.; на 6-ой и 7-ой Всесоюзных конференциях по тепломассообмену, Минск, 1980 г. и 1984 г.; на Минском международном форуме, Минск, 1988 г.; на Московском межвузовском теплофизическом семинаре в 1978 г., 1981 г. и 1988 г.

По теме диссертации в отечественных и зарубежных изданиях опубликовано 38 статей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. В приложении приводятся основные экспериментальные и расчетные данные. Общий объем диссертации 524 стр., в том числе 252 стр. текстового материала, 189 рисунков на 171 стр., 14 таблиц по тексту, список литературы на 17 стр., включающий 158 наименований, список публикаций по теме диссертации и перечень выступлений на конференциях и семинарах на 8 стр., 60 стр. приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность и целесообразность выполненных исследований для раскрытия физической сущности и получения расчетных зависимостей ламинарной и турбулентной смешанной конвекции. Сформулированы основные задачи исследования, указана научная новизна, перечислены основные научные результаты, которые выносятся на защиту.

В первой главе рассматривается ламинарная смешанная конвекция на вертикальных и наклонных плоских поверхностях. Сделан обзор литературы, который показал, что ряд аспектов проблемы исследован не в полной мере, а имеющиеся обобщения носят частный характер. Поэтому была поставлена задача провести широкое исследование влияния различных факторов на теплообмен и трение при смешанной конвекции с последующим обобщением результатов. Исследовалось влияние температурного фактора, градиента давления, закона изменения температуры стенки, числа

P_r , массового потока на стенке при совпадающей и несовпадающей конвекции.

Задача решалась в автомодельной постановке, которая возможна для определенной связи между изменением характерных параметров. Рассматривалось степенное изменение скорости невозмущенного потока $U_\infty \sim x^m$. Для автомодельности задачи при этом на распределение температуры поверхности и поперечного потока массы на стенке накладываются ограничения $T_w - T_\infty \sim x^{2m-1}$; $v_w \sim x^{(m-1)/2}$. Решение находится в приближении Буссинеска. Для анализа влияния переменности теплофизических свойств в пограничном слое и определения границ применимости допущений Буссинеска проведен анализ уравнений, записанных с учетом переменности свойств. Принималось $\rho = \rho/(RT)$; $\mu/\mu_\infty = (T/T_\infty)^{n_\mu}$; $\lambda/\lambda_\infty = (T/T_\infty)^{n_\lambda}$, где n_μ и n_λ для различных газов меняются от 0,5 до 1. Теплоемкость принималась постоянной. Показано, что исследование влияния переменности свойств, т.е. температурного фактора, может быть выполнено для $m = 0,5$ решением исходной задачи, если в качестве параметра смешанной конвекции использовать эффективную величину

$$Ri_{\text{эф}} = Ri_\infty + (\bar{T}_w - 1)/2, \quad (1)$$

где Ri_∞ — число Ri , рассчитанное по свойствам невозмущенного потока; $\bar{T}_w = T_w/T_\infty$.

Исходная система в автомодельной постановке решалась численно методом Ньютона-Гафсона. Разработка процедуры интегрирования включала квазилинеаризацию краевой задачи, решение линеаризованной задачи методом конечных разностей, организацию сходящегося итерационного процесса. Внешняя граница интегрирования устанавливалась сращиванием численного решения и асимптотического разложения функций.

Влияние температурного фактора исследовалось для обтекания изотермической непроницаемой поверхности при $P_r = 0,7$ и $m = 1/2$. Температурный фактор изменялся в пределах $10^{-2} \leq \bar{T}_w \leq 4$, параметр смешанной конвекции $Ri_S \leq Ri \leq 10^2$. Результаты расчета приведены на рис. 1.

Штриховыми линиями на графике ограничена область, где отличие реше-

ния с допущениями Буссинеска от решения с учетом переменности свойств не превышает 5 %. С ростом подъемных сил область применимости допущений Буссинеска расширяется.

Выполнены расчеты для $0,1 \leq Pr \leq 10$ при $0 \leq Ri \leq 100$. С ростом сил плавучести влияние числа Pr на трение относительно увеличивается. С ростом Pr трение уменьшается, а теплоотдача относительно увеличивается.

Исследование влияния неизотермичности стенки и градиента давления проводилось при переменных $\gamma = 2m/(m+1)$ и $n = 2m-1$ ($1/2 \leq \gamma \leq 1$; $-1/3 \leq n \leq 1$). Из расчетов следует, что с ростом Ri характер зависимости трения от γ изменяется. Если при малых значениях Ri трение с увеличением γ возрастает, то при больших Ri уменьшается. Это объясняется тем, что при переходе к естественной конвекции определяющим фактором является не продольный градиент давления, а неизотермичность поверхности. Таким образом, с ростом Ri влияние неизотермичности на трение существенно возрастает. Влияние неизотермичности на теплообмен выражено в меньшей степени.

Расчеты для исследования влияния потока массы на стенке проведены для $Pr = 0,7$; $u_\infty \sim x^{1/2}$; $v_w \sim x^{1/4}$. Показано, что с ростом подъемных сил действие поперечного потока на теплоотдачу и трение уменьшается. Вдув усиливает влияние подъемных сил, а отсос — уменьшает.

Для противоположной конвекции получены данные о влиянии температурного фактора, градиента давления, вдува-отсоса и числа Pr на отрыв пограничного слоя. С увеличением $\bar{T}_w$ и числа Pr величина числа Ri_s в точке отрыва возрастает. Ускорение течения и отсос также увеличивают Ri_s .

Для обобщения полученных данных по теплообмену проведен анализ решения интегрального уравнения энергии. В результате решения получено трансцендентное уравнение

$$(\alpha/\alpha_B)^3 = 1 \pm (\alpha_E/\alpha_B)^4 (\alpha_B/\alpha), \quad (2)$$

где α , α_B , α_E — коэффициенты теплоотдачи для смешанной, вынужденной и естественной конвекции соответственно. Уравнение (2) может быть аппроксимировано с погрешностью не выше 3 % уравнением

$$\alpha^3(Re, Gr) = \alpha_B^3(Re) \pm \alpha_E^3(Gr) \quad (3)$$

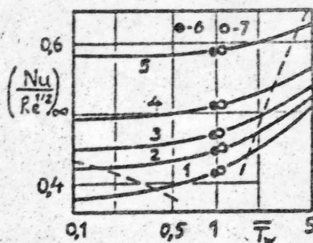


Рис. 1. Влияние температурного фактора на теплообмен при совпадающей конвекции ($u_{\infty} \sim x^{1/2}$; $T_w = \text{const}$; $U_w = 0$; $Pr = 0,7$): 1 - $Ri = 0$; 2 - $Ri = 0,5$; 3 - $Ri = 1$; 4 - $Ri = 2$; 5 - $Ri = 5$; 6 - (Pei D.C., 1968); 7 - (Sparrow E.M., 1959)

или в безразмерном виде

$$Nu/Nu_s = [1 \pm (Ri/Ri_{c,t})^{3/4}]^{1/3} \quad (4)$$

В уравнении (4)

$$Ri_{c,t} = \left(\frac{Nu_s}{Re^{1/2}} \cdot \frac{Gr^{1/4}}{Nu_s} \right)^4 \quad (5)$$

Величина $Ri_{c,t}$ соответствует точке пересечения асимптот $Nu/Re^{1/2}$ при $Ri \rightarrow 0$ и $Nu/Re^{1/2} \rightarrow Nu_s Gr^{-0,25} Ri^{0,25}$ при $Ri \rightarrow \infty$, когда коэффициенты теплообмена для вынужденной и естественной конвекции одинаковы. В случае обтекания изотермической пластины $Ri_{c,t} = 0,486$, для обтекания пластины при $q_w = \text{const}$ $Ri_{c,t} = 0,89$.

Сопоставление формулы (4) с расчетами и данными других авторов дает удовлетворительные результаты.

Интегрированием уравнения энергии в автомодельных координатах получено приближенное соотношение

$$\tau_w = (1/\alpha_0) Nu^3 \quad (6)$$

где α_0 не зависит от подъемных сил.

С учетом (6) из (4) получена аппроксимация для расчета τ_w

$$\tau_w/\tau_{w,s} = 1 \pm (Ri/Ri_c)^{3/4} \quad (7)$$

где Ri_c - число Гичардсона, соответствующее точке пересече-

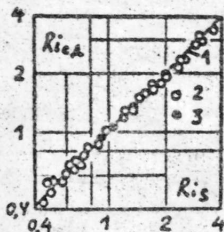


Рис.2. Условия отрыва пограничного слоя смешанной конвекции: 1 - уравнение $Ri_s = Ri_c$; 2 - расчеты автора; 3 - (Sparrow E.H., 1959).

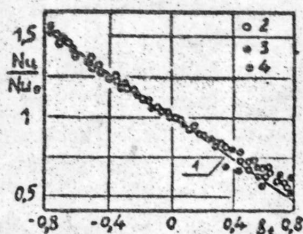


Рис.3. Теплообмен при смешанной конвекции около проницаемой поверхности: 1 - уравнение (8); 2 - расчеты автора; 3 - (Дубовик В.И., 1973); 4 - (Pei D.C., 1968).

ния асимптот $C_{f, \beta} Re^{0.5}$ при $Ri \rightarrow 0$ и $C_f Re^{0.5} \rightarrow 2 \tau_{w, \beta} x^2 / (\rho v^2 Gr^{0.75} f(P_r)) Ri^{0.75}$ при $Ri \rightarrow \infty$, когда трение для вынужденной конвекции равняется трению для естественной конвекции. Формула (7) удовлетворительно аппроксимирует расчетные данные для $Pr = 0.1 - 10$ и $\gamma = 0.5 - 1$.

Из уравнения (7) следует, что отрыв пограничного слоя происходит, когда $Ri_s = Ri_c$ (полагаем, что в точке отрыва $\tau_w = 0$). Это соотношение было проверено по результатам расчета для $0.01 \leq \overline{\tau_w} \leq 5$; $0.1 \leq Pr \leq 10$; $0.5 \leq \gamma \leq 1$; $-0.5 \leq F_w \leq 1.0$. Отклонение от расчетных данных (рис. 2) не превышает 8 %.

Для обобщения данных по теплообмену на проницаемой стенке используется аппроксимация

$$Nu/Nu_0 = 1 - 0.64 \beta_+, \quad (8)$$

где $\beta_+ = [(\rho v)_w / (\rho v)_\infty] / St_0$, Nu_0 и St_0 - на непроницаемой стенке. Сопоставление с расчетом и другими данными приведено на рис. 3. Трение на проницаемой стенке аппроксимируется уравнением

$$C_f/C_{f_0} = 1 - 0.58 \beta, \quad (9)$$

где $\beta = [2(\rho v)_w / (\rho v)_\infty] / C_{f_0}$; C_{f_0} - трение на непроницаемой стенке. Уравнение (9) справедливо для $|\beta| \leq 0.35$.

Во второй главе рассматривается влияние осесимметричности вертикальной поверхности на теплообмен и трение при смешанной конвекции. Проведен обзор опубликованных данных по исследованию теплообмена и гидродинамики на вертикальных цилиндрах при естественной, вынужденной и смешанной конвекции. Исследования смешанной конвекции на вертикальном цилиндре проводились лишь в двух работах для совпадающего случая в области малых значений числа Ri . Результаты обзора определили направление и методику исследования.

Исследовалась ламинарная совпадающая и несовпадающая смешанная конвекция на вертикальном цилиндре с граничными условиями $T_w = const$ и $q_w = const$. Использовалось численное решение уравнений пограничного слоя. За основу был принят метод поступательного интегрирования Патанкара-Сполдинга, который ранее широко использовался для расчета вынужденной и естественной конвекции. Уравнения пограничного слоя записываются в координатах $x - \bar{\psi}$, где $\bar{\psi} = \psi / \psi_\delta$ (ψ - функция тока):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\bar{\psi}(r m)_\delta}{\psi_\delta} \frac{\partial u}{\partial \bar{\psi}} = \frac{\partial}{\partial \bar{\psi}} \left(\frac{r^2 \rho u \mu}{\psi_\delta^2} \frac{\partial u}{\partial \bar{\psi}} \right) \pm \frac{g(\rho_\infty - \rho)}{\rho u}; \quad (I0)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\bar{\psi}(r m)_\delta}{\psi_\delta} \frac{\partial h}{\partial \bar{\psi}} = \frac{\partial}{\partial \bar{\psi}} \left(\frac{r^2 \rho u \lambda}{\psi_\delta^2} \frac{\partial h}{\partial \bar{\psi}} \right), \quad (II)$$

где r - текущий радиус; m - массовый поток на границе, индекс δ означает параметры на внешней границе пограничного слоя; знак "+" последнего члена уравнения (I0) соответствует совпадающей конвекции, знак "-" - несовпадающей. Граничные условия задаются обычным путем. Распределение скорости и температуры в начальном сечении расчетной области принимается равномерным. Внутренняя граница области интегрирования совпадает со стенкой, внешняя граница ($\bar{\psi} \rightarrow I$) определяется косвенно по массовому потоку через внешнюю границу пограничного слоя. Выражение для $(r m)_\delta$ получено из (I0), записанного для некоторой точки $\bar{\psi}_c$, мало отличающейся от единицы:

$$(rm)_s = \left\{ \frac{\frac{\partial}{\partial \psi} \left[\frac{r^2 \rho u \mu}{\psi_s} \frac{\partial \psi}{\partial \psi} \right]}{\partial u / \partial \psi} \right\}_G. \quad (12)$$

Трение и теплообмен на стенке определялись по формулам, полученным из решения уравнения Куэтта для пристенного слоя

$$\frac{C_f}{2} = \frac{1}{Re^*} + \frac{y}{\rho u^2} [\pm g(\rho_\infty - \rho)]; \quad (13)$$

$$St = 1 / (Pr Re^*), \quad (14)$$

где $Re^* = \rho u y / \mu$, y - координата второй от стенки узловой точки расчетной сетки.

Показано, что уравнения (13; 14) справедливы для

$\xi_B = 4(x/R) Re_x^{-0.5} < 3$. Для отработки метода и определения оптимальных параметров расчетной сетки были проведены тестовые расчеты обтекания пластины и цилиндров при вынужденной и естественной ($Ri > 100$) конвекции.

Расчеты при $q_w = const$ показали, что с увеличением параметра осесимметричности ξ_B влияние выталкивающих сил относительно уменьшается. Влияние на трение, так же как и при обтекании пластины, существенно выше, чем на теплообмен. В случае противоположной конвекции на цилиндрах (рис. 4) с увеличением $Ri^* = Gr^* / Re^{5/2}$ трение сначала увеличивается, а затем уменьшается вплоть до точки отрыва. Это объясняется тем, что при малых значениях Ri^* влияние осесимметричности превалирует. Теплоотдача при несовпадающей конвекции возрастает относительно пластины при больших величинах параметра осесимметричности почти до точки отрыва. Аналогичные в качественном отношении получены зависимости и для условий $T_w = const$. Количественно влияние выталкивающих сил при $T_w = const$ значительнее.

Результаты расчета теплообмена при совпадающей конвекции обобщены в виде зависимости

$$Nu_{см,ч} = Nu_{см,п} + A x / R, \quad (15)$$

где $Nu_{см,п}$ - число Нуссельта для смешанной конвекции на

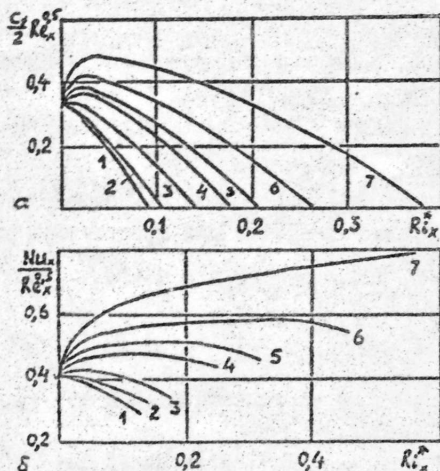


Рис. 4. Трение (а) и теплообмен при смешанной конвекции на вертикальном цилиндре ($q_w = \text{const}$): 1 - пластина; 2 - $\xi_b/x^{1/2} = 0,58$; 3 - $\xi_b/x^{1/2} = 1,45$; 4 - $\xi_b/x^{1/2} = 2,9$; 5 - $\xi_b/x^{1/2} = 3,6$; 6 - $\xi_b/x^{1/2} = 4,8$; 7 - $\xi_b/x^{1/2} = 7,3$. $g\beta v^{0.5} q_w / (\lambda u^{5/2}) = 4,2$ пластине определяется по (4); R - радиус цилиндра. Коэффициент A зависит от граничных условий и параметра смешанной конвекции.

В случае $q_w = \text{const}$

$$A = 0,54 - 0,063 (2 + \text{Pr} Ri_x^*); \quad (16)$$

при $Ri_x^* < 0,01$ $A = 0,54$; при $Ri_x^* > 10$; $A = 0,34$.

В случае $T_w = \text{const}$

$$A = 0,54 - 0,032 [2 + \text{Pr} Ri_x^*]; \quad (17)$$

при $Ri_x^* < 0,01$ $A = 0,54$; при $Ri_x^* > 10$; $A = 0,435$.

Уравнения (15) - (17) справедливы для $\xi_b < 3$. Обобщение получено в результате анализа наших данных, обобщений для естественной и вынужденной конвекции и данных приближенного решения для совпадающей конвекции на цилиндрах (Чжень, Мокоглу, 1978 г.).

В случае несовпадающей конвекции обобщение сделать не

удалось, поскольку теплоотдача зависит сложным образом от параметра осесимметричности ξ_8 и от числа Ri . Для оценки теплообмена в инженерных расчетах рекомендованы графики (рис. 4). Получены зависимости для определения параметра Ri_s в точке отрыва, соответствующей нулевому значению поверхностного трения:

для условий $T_w = const$

$$Ri_{s, \tau} = 0,2 + 0,113 \xi_8 - 0,01 \xi_8^2; \quad (18)$$

для условий $q_w = const$

$$Ri_{s, \tau}^* = 0,09 + 0,09 \xi_8. \quad (19)$$

Третья глава посвящена исследованию совпадающей и несовпадающей конвекции при поперечном обтекании цилиндров. Рассматриваются условия $Re_d < 3 \cdot 10^3$; $Gr_d < 10^6$ и $T_w = const$. Проведен обзор опубликованных данных по смешанной конвекции, рассмотрены основные результаты по вынужденной и естественной конвекции. Основной особенностью вынужденного обтекания цилиндров при $Re_d < 10^3$ является изменение положения точки отрыва с ростом числа Re . При $Re_d < 1$ существует безотрывное течение, с ростом Re угол точки отрыва φ_s уменьшается и при $Re \sim 3000$ достигает $\sim 80^\circ$. С этим связано изменение распределения скорости на внешней границе пограничного слоя и изменение распределения коэффициента теплоотдачи. Эти обстоятельства оказывают влияние на закономерности смешанной конвекции таким образом, что отношение Nu/Nu_8 зависит и от числа Ri и от числа Re . Экспериментальные исследования смешанной конвекции ограничены, в основном, изучением средней теплоотдачи. Приближенные аналитические решения выполнялись в рамках теории пограничного слоя с заданием закона распределения внешней скорости по идеальному обтеканию. Последнее время появились в печати результаты численного расчета полной системы уравнений, но они ограничены малыми числами Re и Gr .

Экспериментальные данные были получены в узких диапазонах изменения определяющих параметров, структура пограничного слоя и локальный теплообмен практически не изучались. Решения в рамках теории пограничного слоя без учета реального изменения скорости на внешней границе не дают корректных результа-

тов, как это было показано в некоторых работах. Данных о распределении скорости на внешней границе при $Re_d < 3000$ получено не было. Каких-либо обобщений в широком диапазоне изменения определяющих параметров не проводилось.

Нами была поставлена задача экспериментального исследования структуры пограничного слоя, локального и среднего теплообмена при совпадающей и несовпадающей смешанной конвекции. Исследования проводились для чисел $Re_d = 100 - 3000$;

$Gr_d = 10^4 - 10^6$; $Pr = 0,7$ (воздух). Измерялись распределения скорости на разных углах φ от лобовой точки лазерными анемометрами DISA и „Malvern“, распределение температуры передвижными микротермопарами и интерферометрическим методом. Проводилась визуализация течения методом лазерного „ножа“. Локальные тепловые потоки определялись по градиентам температуры на стенке, средние тепловые потоки по тепловому балансу и интегрированием значений локальных тепловых потоков.

На рис. 5 приведены интерферограммы, характеризующие изменение структуры течения около цилиндра с изменением числа Ri . При $Ri \approx 5$ имеет место картина, близкая к режиму естественной конвекции, при $Ri \approx 0,2$ видны все признаки вынужденного обтекания с зоной отрыва в кормовой области. Для вынужденного обтекания цилиндра характерен максимум в распределении скорости, который совпадает с границей пограничного слоя. Измерения скорости показали, что с ростом Ri максимум скорости смещается к стенке, но граница пограничного слоя, если судить по профилям температуры, остается на том же уровне. Профили скорости и интерферограммы показывают, что отрыв пограничного слоя происходит ниже по течению, в то время как при вынужденном обтекании и $Re > 10^3$ угол отрыва $\varphi_s \approx 80^\circ$. Как отмечалось, в случае $Re < 10^3$ положение точки отрыва зависит от величины числа Re . Силы плавучести затягивают отрыв, как это следует из рис. 5. На основании наших измерений и данных ряда авторов получены зависимости положения точки отрыва $\bar{\varphi}_s = \varphi_s / \pi$:

для вынужденного движения ($Re_d = 5 \div 3 \cdot 10^3$)

$$\bar{\varphi}_s = Re_d^{-0,09}; \quad (20)$$

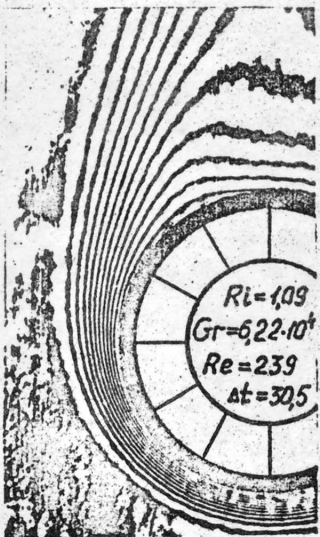
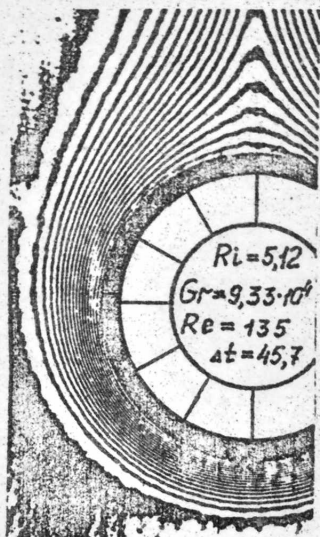


Рис. 5. Интерферогаммы при совпадающей смешанной конвекции около горизонтального цилиндра

для совпадающей смешанной конвекции ($Re_d = 10 - 3 \cdot 10^3$;
 $Ri_d = 0 - 10$)

$$\bar{\Psi}_s = (1 + 0,16 Ri_d^{0,8}) Re_d^{-0,09}; \quad (21)$$

для несовпадающей смешанной конвекции

$$\bar{\Psi}_s = (1 - 0,37 Ri_d^{0,5}) Re_d^{-0,09}. \quad (22)$$

Зависимость несовпадающей конвекции (22) справедлива для $Ri_d < 1,0$ при $Re \approx 40$ и для $Ri_d < 2,5$ при $300 \leq Re \leq 3000$.

По нашим измерениям и опубликованным в литературе данным предложена аппроксимация для скорости на границе пограничного слоя U_δ при вынужденном обтекании

$$\frac{U_\delta}{U_0} = 1,22 \sin(0,9 \varphi Re_d^{0,06}), \quad (23)$$

где U_0 — скорость набегающего потока. Эта зависимость использовалась для получения обобщающих соотношений по теплообмену.

Изменение положения точки отрыва влияет на распределение локального теплообмена.

Получено обобщение по теплообмену на основе решения интегрального уравнения энергии с учетом реального распределения скорости на границе при вынужденном обтекании (23):

$$\frac{Nu_d}{Re_d^{0,5} Pr^{0,4}} = 0,5 \frac{K Re_d^{0,5} \left(\frac{Pr^{0,4}}{1,14 + Pr} \right)^{0,5} f_1(\varphi) \sin^{1/3} \varphi + 2 \sin(\zeta \varphi)}{\left[K Re_d^{0,5} \left(\frac{Pr^{0,4}}{1,14 + Pr} \right)^{0,5} f_2(\varphi) + \frac{2}{\zeta} (1 - \cos(\zeta \varphi)) \right]^{0,5}}, \quad (24)$$

где $K = 1$ для совпадающей конвекции; $K = -1$ — для несовпадающей; $\zeta = 0,9 Re^{0,06}$; $f_1(\varphi) = \int_0^\varphi \sin^{1/3} \psi d\psi$;

$$f_2(\varphi) = \int_0^\varphi \left(\int_0^\psi \sin^{1/3} \xi d\xi \right)^{0,5} \sin^{1/3} \psi d\psi.$$

Уравнение (24) имеет переходы к вынужденной и естественной конвекции. Оно справедливо в пределах существования пограничного слоя, т.е. до точки отрыва, координаты которой могут быть установлены по зависимостям (21) и (22). Расчеты по (24) удовлетворительно совпадают с экспериментальными и рас-

четными данными. Установлены пределы применимости формулы (24): $T_w = \text{const}$; $Re_d = 20 - 3000$; $Ri_d = 0 - 10$; $Gr_d = 10^2 - 10^6$; $P_r = 0,1 - 10$. На базе (24) получена формула для расчета средней теплоотдачи

$$\frac{Nu_d}{Re_d^{0,5} P_r^{0,4}} = 0,53 \left[K Ri_d^{0,5} \left(\frac{P_r^{0,4}}{1,14 + P_r} \right)^{0,5} + \frac{1,44}{2} \right]^{0,5}, \quad (25)$$

имеющая предельные переходы к вынужденной и естественной конвекции.

В четвертой главе рассматривается состояние вопроса по исследованию турбулентной смешанной конвекции. В наибольшей степени исследована турбулентная смешанная конвекция при стабилизированном течении в трубах. Выполнены экспериментальные исследования структуры течения и интегральных характеристик, проведены численные расчеты и сделаны обобщения. Ряд работ посвящен исследованию турбулентной смешанной конвекции на горизонтальных поверхностях. Турбулентная смешанная конвекция на вертикальных поверхностях к моменту начала работы была практически не изучена. Имелись экспериментальные данные Холла и Прайса по локальному теплообмену, полученные в узкой области изменения числа Ri . Была сделана Оостьюзенем попытка численного моделирования процесса. В более позднее время была предложена модель турбулентной смешанной конвекции группой авторов (Ерошенко и др.), которая не нашла практического воплощения. Косвенно касались вопроса Поляков и Попов в своих работах по исследованию смешанной конвекции в трубах. В обзоре рассмотрены возможные подходы к моделированию турбулентного переноса при смешанной конвекции. Таким образом, имеющиеся сведения не раскрывали в полной мере физику процесса и были недостаточны для обобщений. По результатам обзора разработаны задачи и направления исследований турбулентной смешанной конвекции.

Пятая глава посвящена экспериментальному изучению турбулентной смешанной конвекции воздуха на вертикальных поверхностях. Исследования проведены на пластине и цилиндре с $x/d < 150$. Для проведения работы построены специальные установки, оснащенные необходимыми измерительными приборами. Исследовалась структура течения путем измерения распределения

в пограничном слое осредненных и пульсационных составляющих скорости и температуры. Определялись тепловые потоки по соотношениям теплового баланса. Опыты проводились в области развитого турбулентного течения и в области перехода. В отдельных опытах для получения развитого турбулентного течения использовались турбулизаторы в виде уступа, устанавливаемого в нижней части пластины. При этом измерения проводились в области, в которой место положения уступа и его высота влияния не оказывали. Определяющие параметры, соответствующие турбулентному режиму течения, $Re_x > 10^5$ и $Gr_x > 10^{10}$ предопределили размеры установки и параметры опытов. Рабочий участок представлял собой вертикальный канал прямоугольного сечения $0,5 \times 0,8$ м высотой 3 м. Устройства входного участка (сопло, хонейкомб, сетки) обеспечивали необходимые качества потока. Одна из узких сторон канала оборудовалась плоским электронагревателем и соответствующими датчиками, позволившими исследовать смешанную конвекцию на пластине. Исследуемый цилиндр диаметром 20 мм устанавливался на оси канала. В канале поддерживался нулевой градиент давления путем регулируемого изменения площади сечения по высоте.

Для исследования динамических характеристик пограничного слоя использовался лазерный анемометр "Maevern", работающий по принципу корреляции фотоотсчетов, обеспечивающему высокую чувствительность. Для проведения измерений в большинстве случаев было достаточно естественной запыленности потока. Использовалась схема с прямым рассеиванием. Диаметр измерительного объема составлял $\sim 0,2$ мм. Измерялись средняя скорость и продольная составляющая пульсаций скорости. Средняя температура и пульсация температуры воздуха измерялись микротермометром сопротивления из вольфрамовой нити, диаметром 10 мкм и длиной 2 мм. Специальной проверкой установлено, что используемый датчик обладает необходимой для условий эксперимента разрешающей способностью.

Основным результатом действия сил правучести при турбулентной конвекции является ламинаризация течения в случае совпадающей конвекции и повышение интенсивности турбулентности в случае несовпадающей конвекции.

Спутный внешний поток стабилизирует течение в пограничном

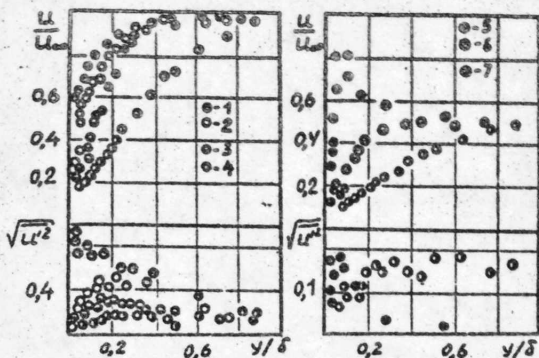


Рис: 6. Влияние выталкивающих сил на распределение средней скорости и пульсаций скорости в области, близкой к переходному режиму: 1 - $Re_x = 0,4 \cdot 10^6$; $Ri_x^* = 0$; 2 - $Re_x = 0,45 \cdot 10^6$; $Ri_x^* = 0,088$; 3 - $Re_x = 0,55 \cdot 10^6$; $Ri_x^* = 0,136$; 4 - $Re_x = 0,44 \cdot 10^6$; $Ri_x^* = 0,6$; 5 - $Gr_x^* = 7,57 \cdot 10^{13}$; $Ri_x^* = 10,8$; 6 - $Gr_x^* = 9,05 \cdot 10^{13}$; $Ri_x^* = 4,4$; 7 - $Gr_x^* = 8,26 \cdot 10^{13}$; $Ri_x^* = 0,6$

слое при естественной конвекции, что приводит к увеличению критического числа Gr на порядок.

Ламинаризация течения происходит с одной стороны вследствие деформации профиля скорости, которая сопровождается уменьшением градиента в средней части пограничного слоя и, как результат, уменьшением генерации турбулентной энергии. С другой стороны энергия турбулентности уменьшается под действием выталкивающих сил. При переходе в область, близкую к естественной конвекции, на профиле скорости появляется максимум, что приводит к возрастанию генерации турбулентности и переходу к турбулентному режиму.

На рис. 6 показано изменение распределения средней скорости и продольной составляющей пульсации скорости на цилиндре в области, близкой к переходному режиму ($Re_x = 0,4 \cdot 10^6$).

На рис. 7 приведены данные о распределении скорости и температуры и их пульсационных составляющих при смешанной конвекции в области развитого турбулентного режима. Возрастание действия выталкивающих сил приводит сначала к уменьшению пульсаций скорости и температуры, а затем они снова воз-

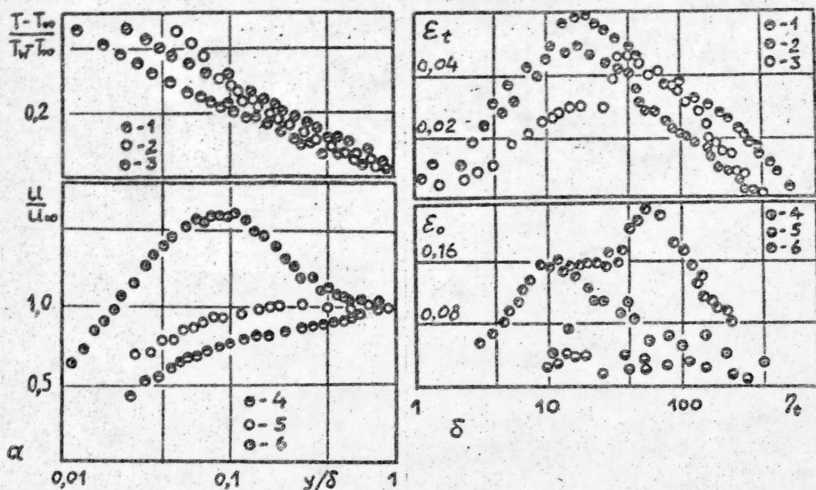


Рис. 7. Распределение температуры и средней скорости (а) и пульсационных составляющих (б) в пограничном слое на пластине: 1 - $Ri_x^* = 0,67$; 2 - $Ri_x^* = 1,25$; 3 - $Ri_x^* = 2,24$; 4 - $Ri_x^* = 0,67$; 5 - $Ri_x^* = 1,25$; $Ri_x^* = 5,6$.

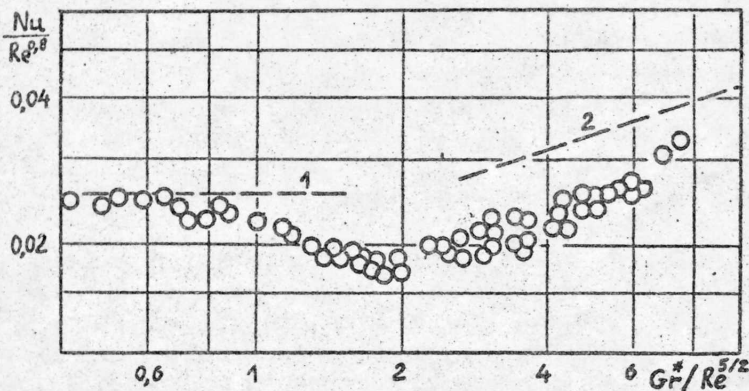


Рис. 8. Теплообмен при турбулентной смешанной конвекции на вертикальной пластине: 1 - $Nu_x = 0,0256 Re_x^{3/8}$; 2 - $Nu_x = 0,19 Gr_x^{*0,25}$ при $Gr_x^* = 0,4 \cdot 10^{14}$.

растает.

На рис. 8 показано влияние выталкивающих сил на теплоотдачу при совпадающей конвекции. Относительное уменьшение теплообмена и его последующее возрастание коррелируется с изменением уровня турбулентности в пограничном слое. Экспериментально не удалось получить данных по влиянию выталкивающих сил на поверхностное трение. Для выяснения этого вопроса было использовано численное исследование.

В шестой главе рассматривается численное исследование турбулентной смешанной конвекции на пластине в области, прилегающей к вынужденной конвекции, и проведено обобщение экспериментального исследования и численного расчета. В основе численного решения задачи лежал метод Патанкара-Сполдинга, который нами использовался для исследования ламинарной смешанной конвекции на вертикальных цилиндрах. Решается система (I0), (II) с эффективными коэффициентами переноса $M_{\text{эф}}$ и $\lambda_{\text{эф}}$. В начальном сечении расчетной области принималось распределение скорости и температуры, соответствующее развитому турбулентному пограничному слою вынужденного течения, а величина $R_{i,1} < 0,1$. Теплообмен и трение на стенке определялись по (I3) и (I4). Для этого около стенки при $J < 3$ необходимо было обеспечить условие $(y/\mu)\sqrt{\tau_{wp}} \leq 1$, (J – номер узла расчетной сетки). Это достигалось применением расчетной сетки с переменным поперечным шагом в соответствии с выражением

$$\bar{\Psi}(J) = \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{J}{N} \right) \right]^3, \quad (26)$$

где N – число узлов сетки в поперечном направлении.

Продольный шаг расчетной сетки принимался пропорциональным толщине пограничного слоя $\Delta x = 0,005 \delta$.

Для определения турбулентной вязкости использовалось алгебраическое выражение, основанное на гипотезе Прандтля о длине пути смещения ℓ , с введением параметров, учитывающих влияние подъемных сил. Полагаем, что алгебраические модели не исчерпали своих возможностей, особенно для решения узких конкретных задач, если для их получения или уточнения используется анализ дифференциальных уравнений турбулентного переноса. Выражение для ℓ было получено в работе Ерошенко и др. (ИФЖ, 1985) путем

анализа уравнений вторых моментов

$$\ell = \ell_0 F(Ri_{rp}), \quad (27)$$

где ℓ_0 - длина пути смещения вынужденного течения, $F(Ri_{rp})$ - некоторая функция градиентного числа Ричардсона $Ri_{rp} = g\beta(\partial T/\partial y)/[\partial u/\partial y \partial v/\partial y]$. Нами использовано выражение

$$F(Ri_{rp}) = 0,32[1 + f(Ri_{rp})] Ri_{rp} / f(Ri_{rp}). \quad (28)$$

Для расчета $f(Ri_{rp})$ использовались аппроксимации, следующие из указанной работы. Для расчета ℓ_0 около стенки использовалось модифицированное уравнение Ван-Дриста

$$\ell_0 = 0,41y[1 - \exp(-y^+ \tau^+)^{1/2}/26)], \quad (29)$$

где $y^+ = y(\tau_w \rho)^{1/2}/\mu$; $\tau^+ = \tau/\tau_w$; $\tau = \tau_w + g y |\rho - \rho_\infty|$.

Во внешней части пограничного слоя $\ell_0 = 0,09\delta$.

В работе Брошенко было получено выражение для турбулентного числа Прандтля в виде $Pr_\tau = [1 + f(Ri_{rp})] Pr_{\tau,0}$, однако использование непосредственно этого выражения в расчетах не дало удовлетворительного результата. С учетом данных для естественной конвекции и экспериментальных результатов по турбулентной смешанной конвекции в трубах (Поляков, Шиндин) было принято

$$Pr_\tau = [1 + \phi(Ri; y/\delta)][1 + f(Ri_{rp})] Pr_{\tau,0}, \quad (30)$$

где $\phi(Ri; y/\delta) = A + C(Ri - Ri_m)(1 - y/\delta)$.

Для $\phi(Ri; y/\delta)$ использовалась кусочная аппроксимация, поэтому величины A , C и Ri_m зависели от диапазона изменения Ri . Число $Pr_{\tau,0} = 0,9$.

Особенности при использовании записанных соотношений возникают в максимуме скорости, где происходит разрыв функций. Кроме того, на участке $Ri_{rp} < -7$ турбулентная вязкость становится отрицательной. Учитывая узость этой области (1 - 3 шага расчетной сетки) были приняты ограничения по максимальному значению $|Ri_{rp}|$. Эффективная вязкость принималась равной физической в условиях, когда турбулентная вязкость принимала отрицательное значение.

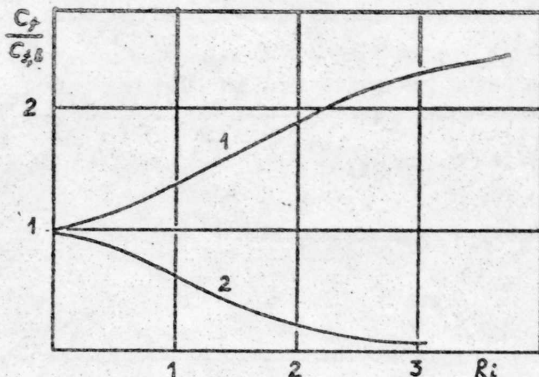


Рис. 9. Результаты расчета трения при турбулентной смешанной конвекции на вертикальной пластине: 1 – совпадающая конвекция; 2 – несовпадающая конвекция.

Метод отрабатывался с помощью тестовых расчетов вынужденной конвекции. Модельные соотношения для турбулентной вязкости и турбулентного числа Прандтля корректировались сопоставлением расчетов с экспериментальными данными профилей скорости, температуры и локального теплообмена. Было получено хорошее согласование по профилям скорости и локальному теплообмену. Профили температуры хорошо коррелируются с экспериментом в пристенной области, но заметно расходятся в средней части слоя, особенно при наличии максимума скорости.

Удовлетворительное совпадение расчета и эксперимента по профилям скорости и по локальному теплообмену дало основание считать использование описанной модели для расчета трения приемлемым. На рис. 9 приведены результаты расчета трения при совпадающей и несовпадающей конвекции. В отличие от теплообмена трение на поверхности под действием выталкивающих сил в случае совпадающей конвекции возрастает, а в случае несовпадающей уменьшается. Это происходит за счет деформации профилей скорости, которая приводит к увеличению градиента скорости около стенки при совпадающей и к уменьшению при несовпадающей конвекции.

Проведено обобщение экспериментальных и расчетных данных

по теплообмену и трению. Для этого выполнено приближенное решение интегрального уравнения энергии. Профили скорости и температуры принимались в виде

$$\frac{u}{u_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \pm \frac{u_1}{u_{\infty}} \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^4 + \frac{\psi(R_i)}{u_{\infty}} \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^4; \quad (31)$$

$$(T - T_{\infty}) / (T_w - T_{\infty}) = 1 - (y/\delta)^{1/7}, \quad (32)$$

где $u_1 = 1,845 [g\beta(T_w - T_{\infty})]^{1/2} (2,14 + Pr^{2/3})^{-1/2} x^{1/2}$;

функция $\psi(R_i)$ устанавливалась путем сопоставления с экспериментальными профилями скорости.

Закон теплообмена принят в виде

$$q_w = c_p c_p (T_w - T_{\infty}) \bar{u} \left(\frac{\nu}{\bar{u} \delta}\right)^{0,25} Pr^{2/3}, \quad (33)$$

где $\bar{u}$ — средняя скорость по толщине пограничного слоя

$$\bar{u} = 0,875 u_{\infty} \pm 0,145 [u_1 - \psi(R_i)]. \quad (34)$$

В результате решения получено

$$Nu_x / Re_x^{0,8} = C^{0,3} [0,88 \pm 0,27 F(Pr) R_{ix}^{0,5} \mp 0,15 \psi(R_i) / u_{\infty}]^{0,6} \\ [0,1 \pm 0,07 F(Pr) R_{ix}^{0,5} \mp 0,04 \psi(R_i) / u_{\infty}]^{0,2} Pr^{0,47}, \quad (35)$$

где $F(Pr) = (2,14 + Pr^{2/3})^{-1/2}$

Для воздуха ($Pr = 0,7$) получено:

$$\psi(R_i) = 0,46 u_{\infty} \exp[-10(R_i - 1)^2] \quad \text{для} \quad R_i \leq 1;$$

$$\psi(R_i) = 0,46 u_{\infty} \exp[-0,5 \frac{(R_i - 1)^2}{R_i}] \quad \text{для} \quad R_i > 1;$$

в случае совпадающей конвекции

$$C = 0,0233 / (1 + 0,316 R_{ix}^{1/5}) \quad \text{для} \quad R_i \leq 2,5;$$

$$C = 0,0126 (1 - 0,1 R_i + 0,035 R_i^4) \quad \text{для} \quad R_i > 2,5;$$

в случае несовпадающей конвекции

$$C = 0,025 (1 + 0,36 R_{ix}^{1/5}) \quad \text{для} \quad R_i \leq 1;$$

$$C = 0,034 (1 + 0,67 (R_{ix} - 1)) \quad \text{для} \quad R_i > 1.$$

Используя данные экспериментального исследования турбулентной смешанной конвекции воды (Кисатуна К., 1987) получены значения $\varphi(R_i)$ и C с учетом влияния числа R_r в случае совпадающей конвекции:

для $R_i / R_r^{0,5} < 1,2$

$$\varphi(R_i; R_r) = 0,385 \exp[-1,0 (R_i / R_r^{0,5} - 1,2)^2] R_r^{-0,5};$$

для $R_i / R_r^{0,5} > 1,2$

$$\varphi(R_i; R_r) = 0,385 \exp[-0,5 \frac{(R_i / R_r^{0,5} - 1,2)^2}{R_i / R_r^{0,5}}] R_r^{-0,5};$$

для $R_i / R_r^{0,5} \leq 3$

$$C = 0,0233 / [1 + 0,316 (R_i / R_r^{0,5})^{1,15}];$$

для $R_i / R_r^{0,5} > 3$

$$C = 0,018 [1 + 0,085 R_i / R_r^{0,5} + 0,006 (R_i / R_r^{0,5})^2].$$

Обобщение данных по трению проведено на основе принятого закона

$$\tau_w = C_1 \rho \bar{u}^2 \left(\frac{\nu}{\bar{u} \delta_1} \right)^{0,25}, \quad (36)$$

где $\delta_1 = \delta R_r^{0,5}$.

В результате решения получена формула

$$C_1/2 = C_1 R_{ix}^{-0,2} [1 + 0,166 f_1(R_i)]^{1,6} [1 + 0,37 f_1(R_i)]^{0,2}, \quad (37)$$

где $f_1(R_i) = \pm [1,845 R_i^{0,5} F(R_r) - \varphi(R_i) / u_w]$.

Значение коэффициента C_1 найдено по сопоставлению с расчетными данными для $R_r = 0,7$.

В случае совпадающей конвекции

$$C_1 = 0,0296 (1 - 0,254 R_{ix}^{0,5}) \quad \text{для } R_i \leq 0,3$$

$$C_1 = 0,0255 [1 + 0,479 (R_{ix} - 0,3) - 0,096 (R_{ix} - 0,3)^2] \quad \text{для } 0,3 < R_{ix} < 4$$

В случае противоположной конвекции

$$C_1 = 0,0296(1 + 0,254 Ri_x^{0,5}) \quad \text{для } Ri_x \leq 0,3;$$

$$C_1 = 0,034[1 - 0,475(Ri_x - 0,3)] \quad \text{для } 0,3 < Ri_x \leq 1;$$

$$C_1 = 0,023[1 - 0,368(Ri_x - 1)] \quad \text{для } 1 < Ri_x < 3.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено комплексное исследование совпадающей и несовпадающей смешанной конвекции при внешнем обтекании поверхностей различной формы вертикально направленным потоком. Рассмотрены ламинарный и турбулентный режимы течения. Значительно расширено физическое представление о смешанной конвекции с помощью современных методов исследования. Получен ряд новых физических и прикладных результатов.

2. Ламинарная смешанная конвекция на вертикальных плоских поверхностях исследовалась в автомоделльной постановке. Установлено качественное и количественное влияние подъемных сил, числа Прандтля, продольного градиента давления, граничных условий, проницаемости поверхности, температурного фактора на гидродинамику и теплообмен.

Предложен метод учета влияния температурного фактора на смешанную конвекцию в рамках приближения Буссинеска путем введения эффективного параметра смешанной конвекции (I).

Определены условия возникновения отрыва пограничного слоя для противоположной смешанной конвекции (рис. 1) с учетом влияния перечисленных ранее факторов.

Получены зависимости теплообмена (4) и трения (7) для вертикальных плоских непроницаемых поверхностей, которые могут быть использованы так же для расчета наклонных поверхностей, если в расчет вводить тангенциальную составляющую подъемных сил. Формулы (4) и (7) имеют предельные переходы на вынужденную и естественную конвекцию. Получены формулы для расчета теплообмена (8) и трения (9) на проницаемых поверхностях с однородным вдувом и отсосом.

3. Проведено численное исследование влияния поперечной кривизны поверхности теплообмена на ламинарную смешанную конвекцию при обтекании вертикальных цилиндров.

Установлено, что с увеличением параметра ξ_A влияние выталкивающих сил на теплообмен и трение снижается.

Определены условия возникновения отрыва пограничного слоя для несовпадающей конвекции (18; 19).

Предложена обобщенная зависимость (15) для теплообмена при совпадающей конвекции. Для оценки теплообмена в случае несовпадающей конвекции рекомендовано использовать графики (рис. 4).

4. Выполнено экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при обтекании горизонтальных цилиндров с применением оптических методов исследования: лазерной анемометрии, интерферометрии и визуализации. Опыты проведены в условиях $Gr_d = 10^4 - 10^6$; $Re_d = 100 - 3000$; $Ri_d = 0 - 10$, т.е. рассмотрена вся область существования смешанной конвекции.

Измерены характеристики пограничного слоя, локальный и средний теплообмен. Показан переход режима обтекания под действием сил тяжести от вынужденной к естественной конвекции. Установлены зависимости положения точки отрыва пограничного слоя (20) ÷ (22) от числа Re и Ri при $Re_d = 20 ÷ 3000$.

Предложена зависимость (23) распределения по окружности цилиндра тангенциальной составляющей скорости на внешней границе пограничного слоя при вынужденном обтекании в рассмотренном диапазоне изменения числа Re .

Получены зависимости локального (24) и среднего (25) теплообмена из решения уравнения энергии с учетом реального распределения скорости на внешней границе пограничного слоя.

5. Выполнено экспериментальное исследование турбулентной смешанной конвекции на вертикальных поверхностях (цилиндр, пластина) в области развитого турбулентного слоя ($Re_x \sim 5 \cdot 10^5$; $Ri_x^* = 0 - 6$), а также в области переходного режима течения ($Re_x = 10^5 - 5 \cdot 10^5$; $Ri_x^* = 0 - 6$).

Установлено, что при совпадающей конвекции выталкивающие силы способствуют ламинаризации пограничного слоя вследствие деформации профиля скорости и влияния градиента плотности на турбулентные пульсации (рис. 7). С переходом к области, приближающейся к режиму естественной конвекции, уровень турбулентности потока снова возрастает. Установлено, что при совпадающей конвекции теплоотдача с ростом влияния выталкивающих сил сначала уменьшается, а затем возрастает в связи с изменением уровня турбулентности в пограничном слое (рис. 8). При несовпадающей конвекции теплоотдача под влиянием выталкивающих сил

возрастает.

Для переходного режима также отмечено явление ламинаризации пограничного слоя в случае совпадающей конвекции, что приводит к уменьшению теплоотдачи и к затягиванию переходной области.

Установлено, что при наложении спутного малоскоростного внешнего течения на турбулентную естественную конвекцию ($Ri_* > 100$), происходит стабилизация режима течения на внешней границе пограничного слоя, что смещает переходный режим в область больших чисел Gr (практически на порядок).

6. Влияние подъемных сил на трение в режиме развитого турбулентного течения исследовано с помощью численного решения уравнений пограничного слоя. Для расчета турбулентной вязкости и теплопроводности используются алгебраические соотношения, основанные на гипотезе о длине пути смешения Прандтля, с учетом влияния выталкивающих сил.

Установлено, что в случае совпадающей конвекции поверхностное трение возрастает (рис. 9) несмотря на ламинаризацию пограничного слоя, что объясняется деформацией профиля скорости, приводящей к росту градиента скорости около стенки.

В случае несовпадающей конвекции трение уменьшается вплоть до отрыва пограничного слоя.

7. Проведено обобщение результатов экспериментального и численного исследования турбулентной смешанной конвекции на основе интегрального метода. Получены зависимости для расчета теплообмена (35) и трения (37).

8. По результатам исследования опубликовано 38 статей, сделано пять докладов на международных конференциях за рубежом, пять докладов на международных и всесоюзных конференциях и семинарах в нашей стране, три раза работа докладывалась на Московском межузовском Теплофизическом семинаре. В работе предложены зависимости для инженерной практики. Результаты работы внедрены в ряде исследовательских и проектных организаций и в учебном процессе.

Условные обозначения: $Ri = Gr/Re^2$; $Ri^* = Gr^*/Re^{2/2}$;
 $\gamma = 2m/(m+1)$; $\eta = [(\rho c_p u_\infty q_w)/(T_w - T_\infty)]^{1/2} (\eta/\lambda) R$;
 $\varepsilon_0 = \sqrt{u_\infty^2}/u_\infty$; $\varepsilon_t = \sqrt{T^{1/2}}/(T_w - T_\infty)$; $\zeta = 0,9 Re_x^{2/3}$; $\varphi_s = \varphi_s/\pi$;
 $\xi_0 = 4(x/R) Re_x^{-1/2}$.

Индекс: δ - вынужденная конвекция; E - естественная конвекция; n - параметры в начальном сечении; π - параметры для пластины; cm - смешанная конвекция; λ - параметры для цилиндра; S - параметры в точке отрыва пограничного слоя; δ - параметры на внешней границе пограничного слоя. Остальные обозначения общепринятые или указаны в тексте.

Основные результаты диссертации
 опубликованы в следующих работах:

1. Экспериментальное исследование теплообмена на горизонтальных цилиндрах в условиях смешанной конвекции воздуха / Ю.П.Семенов, В.А.Беляков, Л.В.Грудников и др. // Вопросы теплопередачи. - М., 1976. - С. 86-98.
2. Семенов Ю.П., Беляков В.А., Левин А.Б. Измерение скорости в пограничном слое при естественной и смешанной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра с помощью ЛДИС // Методы лазерной доплеровской диагностики в гидродинамике. - Минск, 1978. - С. 95-99.
3. Брдлик П.М., Семенов Ю.П., Ковалев Б.Н. Исследование теплообмена при турбулентной смешанной конвекции на вертикальной пластине // Расчетные методы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1978. - С. 55-63.
4. Исследование теплообмена при смешанной конвекции около горизонтального цилиндра в потоке воздуха / Ю.П.Семенов, В.А.Беляков, В.А.Дмитроц, А.Б.Левин // Расчетные методы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1978. - С. 63-74.
5. Brdlik P.M., Semenov Y.P., Kovalev B.N. Heat transfer investigation for mixed free and forced turbulent convection on vertical plate // 2nd symposium on turbulent shear flows. - London, 1979. - P. 9.35-9.40.

6. Беляков В.А., Брдлик П.М., Семенов Ю.П. Экспериментальное исследование смешанной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра // ЦМТФ. - 1980. - №2. - С. 86-92.

7. Брдлик П.М., Ильинский А.И., Семенов Ю.П. Управление тепломассообменом при смешанной конвекции в пограничном слое // Тепломассообмен-IV. - Минск, 1980. - Т.1. - Ч.3. - С. 26-37.

8. Экспериментальное исследование смешанной конвекции на вертикальных поверхностях / П.М.Брдлик, Ю.П.Семенов, В.А.Беляков, В.И.Алабушев // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1981. - С. 21-32.

9. Расчет производительности стержневого реактора газо-фазного осаждения / Ю.П.Семенов, А.И.Ильинский, А.Б.Левин, В.А.Беляков // Научные труды МТИ. - 1981. - Вып. 134. - С. 11-14.

10. Брдлик П.М., Семенов Ю.П., Беляков В.А. Экспериментальное исследование характеристик пограничного слоя при ламинарной и турбулентной свободной и смешанной конвекции воздуха // Современные экспериментальные методы исследования процессов тепло- и массообмена. - Минск, 1981. - С. 81-95.

11. Семенов Ю.П. Численное исследование ламинарной смешанной конвекции около вертикального цилиндра при постоянном тепловом потоке на поверхности // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1982. - С. 16-27.

12. Теплообмен при турбулентной смешанной конвекции на вертикальном цилиндре / В.П.Алабушев, В.А.Беляков, П.М.Брдлик, Ю.П.Семенов // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1982. - С. 12-16.

13. Семенов Ю.П. Ламинарная несовпадающая смешанная конвекция на вертикальном цилиндре // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1983. - С. 18-27.

14. *Experimental investigation of the turbulent boundary layer associated with mixed free and forced convection inside a vertical cylinder / P.M. Brdlik, Y.P. Semenov, V.A. Belyakov, V.P. Alabushchev // Photon correlation techniques in fluid mechanics. - Berlin: Springer, 1983. - P. 100-104.*

15. Семенов Ю.П. Ламинарная смешанная конвекция около

вертикального цилиндра с постоянной температурой поверхности // ПМТФ. - 1984. - №. - С. 47-52.

16. Влияние продольного вынужденного движения на характеристики турбулентной естественной конвекции на вертикальном цилиндре / П.М.Брдлик, Ю.П.Семенов, В.А.Беляков, А.И.Ильинский // Пристенные турбулентные течения. - Новосибирск, 1984. - С. 18-22.

17. Семенов Ю.П., Ильинский А.И. Исследование теплообмена и турбулентных пульсаций температуры при смешанной конвекции около вертикальной поверхности // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1984. - С. 133-142.

18. Экспериментальное исследование характеристик турбулентного пограничного слоя при смешанной конвекции на вертикальной поверхности / П.М.Брдлик, Ю.П.Семенов, А.И.Ильинский, В.А.Беляков // Теплообмен-УП. - Минск, 1984. - Т.1. - Ч.2. - С. 34-38.

19. Семенов Ю.П., Ильинский А.И. Экспериментальное исследование теплового турбулентного пограничного слоя около вертикального цилиндра при смешанной конвекции // Научные труды. - 1984. - Вып. 159. - С. 57-61.

20. Семенов Ю.П. Турбулентная смешанная конвекция на вертикальной пластине ($q_w = \text{const}$) // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1985. - С. 114-123.

21. Семенов Ю.П. Теплообмен при смешанной конвекции: Тексты лекций. - М.: МТИ, 1985. - 63 с.

22. Семенов Ю.П. Теплообмен на вертикальной пластине при совпадающей смешанной конвекции воздуха в переходной области // Гидромеханика и теплообмен в технологических процессах. - М., 1986. - С. 124-132.

23. Семенов Ю.П., Беляков В.А., Хроменко А.В. Ламинарная совпадающая смешанная конвекция около горизонтального изотермического цилиндра // Научные труды МТИ. - 1987. - Вып. 192. - С. 165-169.

24. Семенов Ю.П., Алабушев В.П. Турбулентная совпадающая смешанная конвекция на вертикальном цилиндре ($q_w = \text{const}$) // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1987. - С. 33-41.

25. Брдлик П.М., Семенов Ю.П., Хроменко А.В. Локальный теплообмен горизонтального цилиндра при совпадающей смешанной конвекции и $T_w = \text{const}$ // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. - М., 1987. - С. 42-50.

26. Гидродинамика и теплообмен при смешанной конвекции в условиях внешнего обтекания / П.М.Брдлик, Ю.П.Семенов, В.Г.Малинин, А.В.Хроменко // Тепломассообмен - МФ: Тез. докл. - Минск, 1988. - Секция I. - Ч. I. - С. 24-26.

27. Семенов Ю.П., Орехов А.М. Численное исследование турбулентной смешанной конвекции на вертикальной пластине // Гидромеханика и тепломассообмен в технологических процессах. - М., 1988. - С. 24-37.