

M387609

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

НА ДОМ
НЕ ВДАЕТСЯ

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

На правах рукописи

ИЛЬИНСКИЙ Александр Иосифович

ЛАМИНАРНАЯ СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ С ПРОДОЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ
ДАВЛЕНИЯ ОКОЛО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОНИЦАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Специальность 05.14.05 - "Теоретические основы
теплотехники (включая техническую термодинамику
тепло- и массообмен)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1981

Работа выполнена на кафедре теплотехники Московского лесотехнического института.

- Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор И.М. Брдлик.
- Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент Ю.П. Семенов.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор В.П. Мотулевич,
- кандидат технических наук,
доцент И.А. Кожинков.
- Ведущее предприятие - Институт тепло- и массообмена
АН БССР.

Защита состоится "...." 1981 г. на заседании специализированного совета по присуждению ученой степени кандидата наук К.053.15.05 МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., Фортковская набережная, д. 1, факультета.

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

Ваши отзывы на автореферат и предложения по его доработке просим направлять в печать ПЕЧАТЮ УЧРЕЖДЕНИЯ, просим посылать по адресу: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., совет К.053.15.05. Ученому секретарю.

Автореферат разослан "....."

Ученый секретарь
кандидат технических наук



11384609

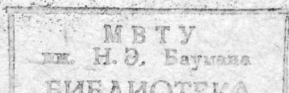
Л - 86759 от 19.11.81 г.

Типография МВТУ имени Н.Э. Баумана

Аннотация. Работа посвящена теоретическому изучению теплообмена и гидродинамики около поверхностей элементов теплообменных аппаратов, где реализуется ламинарная смешанная конвекция в пограничном слое. Рассмотрены возможности управления теплообменом при смешанной конвекции. Изучено влияние температурного фактора, подъёмных сил, градиента давления, неизотермичности и проницаемости поверхности, чисел Прандтля на поверхностное трение и теплообмен при смешанной конвекции в пограничном слое. Исследовано явление отрыва пограничного слоя при противоположной смешанной конвекции. Результаты исследования обобщены методами теории пограничного слоя в безразмерном виде и получены корреляционные уравнения для расчёта трения и теплообмена при смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей.

Актуальность. Процессы смешанной конвекции определяют эффективность работы теплообменных аппаратов систем кондиционирования, высокотемпературных газовых ядерных реакторов в режимах аварийного расхолаживания, систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры, низкотемпературных преобразователей солнечной энергии и т.д. Значительный интерес к изучению смешанной конвекции вызван исследованиями в области получения полупроводниковых, особо чистых и специальных материалов из газовой фазы для электронной, электротехнической промышленности и других отраслей народного хозяйства.

В современных промышленных установках производства полукристаллического и эпитаксиального кремния качество получаемой продукции определяется процессами переноса при ламинарной смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермической проницаемой поверхности растущего слоя. Теплообмен и гидродинамика при смешанной конвекции в этих условиях в настоящее время изучены недостаточно. Таким образом, изучение ламинарной смешанной конвекции в пограничном слое с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей является актуальным как в практическом, так и научном плане.



609788W

Целью работы является определение основных закономерностей необходимых для расчета теплообмена и гидродинамики при ламинарной смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей и разработка алгоритма управления процессами переноса при смешанной конвекции.

Научная новизна. Впервые исследовано влияние внешнего потенциального течения и тепловой предистории потока на теплообмен при смешанной конвекции. Впервые найдены необходимые условия существования и исследованы автомодельные течения газа с переменными теплофизическими свойствами при смешанной конвекции около проницаемых поверхностей.

Проведено систематическое исследование совместного влияния температурного фактора, подъёмных сил, продольного градиента давления, неизотермичности и проницаемости поверхности, чисел Прандтля на смешанную конвекцию в пограничном слое. Получены корреляционные уравнения для расчета теплообмена и трения при смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей.

Практическая ценность работы состоит в определении корреляционных уравнений для расчета теплообмена и трения при ламинарной смешанной конвекции. На основании корреляционных уравнений разработаны инженерные методики расчета тепло-массопереноса при смешанной конвекции, которые внедрены на Запорожском титано-магнелиевом комбинате.

Автор защищает:

а) результаты теоретического анализа процессов переноса в ламинарном пограничном слое при смешанной конвекции;

б) алгоритмы управления процессами переноса в режиме смешанной конвекции;

в) результаты расчетов характеристик пограничного слоя при смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей;

г) метод обобщения исследований процессов переноса при смешанной конвекции в пограничном слое.

Апробация и объём работы. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 печатных работах. Материалы диссертации докладывались на шести научно-технических конференциях Московского лесотехнического института в 1976/81 г.г., I-ом Всесоюзном совещании-семинаре молодых ученых "Газодинамика и теплообмен в энергетических установках" (Иваново, 1977), Межвузовском (МВТУ, МЛТИ, МЭИ, МИХМ, МИФИ) семинаре по теплофизике (Москва, 1977, 1980), XII конференции молодых исследователей Института теплофизики СО АН СССР (Новосибирск, 1978), I-ой Всесоюзной школе по теплофизике (Новосибирск, 1979), VI Всесоюзной конференции по тепломассообмену (Минск, 1980).

Диссертация изложена на 197 страницах машинописного текста, включая 42 рисунка, списка литературы из 54 наименований, 31 страницы приложений и состоит из введения, четырех глав и выводов.

Содержание работы. Во введении кратко сформулированы предмет и задачи исследования, обоснованы актуальность и научная новизна работы, определены достоверность и практическая ценность результатов диссертации.

В первой главе дана характеристика современного состояния вопроса и определены предмет и задачи исследования.

Анализ работы промышленных установок газофазного осаждения кремния показал, что производительность оборудования, качество получаемой продукции и воспроизводимость технологического процесса обусловлены процессами переноса в газовой фазе, где реализуются режимы смешанной конвекции в ламинарном пограничном слое. Прогресс в области проектирования и рациональной эксплуатации установок водородного восстановления кремния связан с развитием методов расчета тепловых режимов парогазовой смеси и скорости осаждения кремния с учетом влияния продольного градиента давления, подъемных сил, неизотермичности и проницаемости поверхности, изменения теплофизических свойств парогазовой смеси и т.д.

Выполненный обзор современного состояния исследований смешанной конвекции показал, что:

1. Методы теории пограничного слоя позволяют рассчитать теплообмен и трение при смешанной конвекции, которая определяется процессами переноса в пристенной области. Важную роль при изучении закономерностей смешанной конвекции играют автомодельные течения, для которых профили скорости и температуры в любых поперечных сечениях отличаются только масштабами координат, скоростей и температуры.

2. Существуют разрозненные данные о влиянии продольного градиента давления, неизотермичности и проницаемости поверхности на характеристики смешанной конвекции. Предлагаемые различными авторами эмпирические и полуэмпирические формулы не позволяют рассчитать теплообмен при смешанной конвекции с точностью необходимой для практики.

3. В литературе отсутствуют данные о возможности управления теплообменом при смешанной конвекции.

Сформулированы задачи исследования:

1. Разработка на основании теории пограничного слоя методики теоретического изучения процессов смешанной конвекции.

2. Изучение возможностей управления теплообменом при смешанной конвекции.

3. Систематическое изучение и обобщение закономерностей процессов переноса при ламинарной смешанной конвекции в пограничном слое с продольным градиентом давления около проницаемых неизотермических поверхностей.

Во второй главе дано математическое описание процессов ламинарной смешанной конвекции в пограничном слое.

Рассмотрено стационарное обтекание плоского и осесимметричного тела с неизотермической проницаемой поверхностью температурнооднородным набегающим потоком ньютоновской вязкой теплопроводной газовой среды. Отличие температур тела и газа, а также взаимодействие гравитационного поля с неизотермическим газовым потоком приводят к возникновению архимедовых сил в пограничном слое.

Система координат x, y, z связана с формой поверхности обтекаемого тела, продольная координата x направлена

по потоку.

Рассматриваются процессы совпадающей $[(\rho_w - \rho_e) g_z u_e > 0]$ и противоположной $[(\rho_w - \rho_e) g_z u_e < 0]$ смешанной конвекции, причем в последнем случае исследуются течения при доминанте вынужденной конвекции вплоть до зоны отрыва пограничного слоя.

Оценки показали, что следует пренебречь влиянием поперечной компоненты архимедовой силы, эффектами вязкой диссипации и работой сил давления на характеристики смешанной конвекции около элементов теплообменных аппаратов газозаза-го осаждения.

Уравнения неразрывности, движения и энергии, начальные и граничные условия при смешанной конвекции в плоском или осесимметричном пограничном слое с учетом переменности теплофизических свойств газа с помощью переменных Лиза-Дородни-цына ξ , η преобразованы к стандартному виду. В случае предельного перехода $T_w / T_e \rightarrow 1$ краевая задача со-ответствует описанию процессов смешанной конвекции в рамках приближения Буссинеска, т.е. несжимаемой, но термически деформируемой среды.

Рассмотрены возможности управления теплообменом воздей-ствиями на граничные и начальные условия при смешанной кон-векции в пограничном слое, который трактуется как нелинейная динамическая система с распределенными параметрами, состоя-щая из двух нелинейно взаимодействующих каналов - динамичес-кого и теплового. Исследовано влияние внешнего потенциально-го течения на неравномерность тепловых потоков на стенке. Найдено в общем виде необходимое условие обеспечивающее по-стоянство теплового потока на обтекаемой поверхности

$$\frac{2\xi}{u_e} \frac{du_e}{d\xi} + \frac{2\xi}{S'_w} \frac{dS'_w}{d\xi} + \frac{2\xi}{r^k} \frac{dr^k}{d\xi} + \frac{2\xi}{N_w} \frac{dN_w}{d\xi} - \frac{2\xi}{Pr_w} \frac{dPr_w}{d\xi} = 1. \quad I$$

Изучение влияния тепловой предыстории потока на тепло - обмен при смешанной конвекции в пограничном слое около не - изотермического проницаемого клина с углом раскрытия $\pi\beta$ в

рамках приближения Буссинеска при граничных условиях

$$\text{Це} \sim x^m; T_w - T_e \sim x^n; v_w \sim x^l \quad 2$$

где $n = 2m - 1$; $l = (m - 1)/2$, $m = \beta/(2 - \beta)$,

позволило определить размеры зоны влияния начального профиля температуры $\vartheta(\xi_c, \eta)$. Решение уравнения теплового пограничного слоя при граничных условиях /2/ определяется суммой автомодельного решения и неавтомодельной добавки

$$\vartheta(\xi, \eta) = \vartheta_A(\eta) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k (\xi/\xi_c)^{-\mu_k/2} N_k(\eta), \quad 3$$

где μ_k , $N_k(\eta)$ — собственные значения и собственные функции теплового пограничного слоя, которые определяются теплофизическими свойствами газа и гидродинамикой течения, коэффициенты A_k зависят от возмущения начального профиля температуры $\vartheta(\xi_c, \eta) - \vartheta_A(\eta)$ в сечении ξ_c , т.е. от тепловой предыстории потока. Показано, что собственные функции $N_k(\eta)$ образуют полный ортогональный базис в пространстве функций, экспоненциально затухающих на бесконечности, а все собственные значения μ_k действительны, различны, величина минимального собственного значения μ_1 удовлетворяет неравенству

$$\mu_1 > 3\beta - 2 \quad 4$$

Воздействие на начальный профиль температуры изменяет теплообмен на 5% в сечении $\xi^* = \xi_c (20A_1/\vartheta'_{AW})^{2/\mu_1}$. Таким образом, размеры области существенного влияния тепловой предыстории потока на теплообмен при смешанной конвекции равны $\xi^* - \xi_c$. При $\xi > \xi^*$ тепловой пограничный слой забывает свою тепловую предысторию, а течение принимает характер автомодельного. Возмущения начального профиля температуры затухают тем быстрее, чем меньше значения коэффициента A_1 , чем больше величина минимального собственного значения μ_1 и чем ближе возмущение вносится к передней кромке. Выполненные

расчеты показали, что отсос, увеличение продольного градиента давления и подъемных сил, уменьшение числа Прандтля приводят к росту μ_1 . Следовательно, в случае граничных условий /2/ и $\beta > 2/3$ автомодельные течения реализуются при $\xi > \xi^*$ для любых возмущений начального профиля температуры, а изучение подобных течений позволяет исследовать закономерности смешанной конвекции.

Найдены необходимые условия существования автомодельных течений и линейные однопараметрические группы преобразований растяжения и их инварианты, которые допускаются уравнениями пограничного слоя при смешанной конвекции. так автомодельные течения газа с переменными теплофизическими свойствами при смешанной конвекции существуют при граничных условиях

$$g_x \sim x^p; u_e \sim x^{(p+1)/2}; T_w = \text{const}; v_w \sim x^{(p-1)/4} \quad 5$$

В этом случае исходная краевая задача упрощается

$$(Nf'')' + ff'' + \beta(S - f'^2) + (2-\beta)G(1-S) = 0 \quad 6$$

$$(NP\tau^{-1}S')' + fS' = 0 \quad 7$$

с граничными условиями

$$f(0) = -(2-\beta)^{1/2}(\rho_w v_w)[Re^{1/2}/\rho u]_e; \quad 8$$

$$f'(0) = 0; S(0) = S_w = T_w/T_e;$$

$$f'(\infty) = 1; S(\infty) = 1; \quad 9$$

где $G = g_x x/u_e^2$; $\beta = 2(P+1)/(P+3)$; $N = \rho\mu/\rho_e\mu_e$

Безразмерные коэффициенты трения и теплообмена вычисляются по формулам

$$(C_f Re^{1/2})_e = 2N_w(2-\beta)^{-1/2}f''_w; \quad 10$$

$$(StRe^{1/2})_e = -N_w(2-\beta)^{-1/2}S_w'/(S_w-1)Pr_w. \quad II$$

В случае предельного перехода $S_w \rightarrow 1$ автомодельные течения при смешанной конвекции в пограничном слое несжимаемой, но термически деформируемой среды существуют при граничных условиях /2/ и описываются краевой задачей

$$f''' + ff'' + \beta(1-f'^2) + (2-\beta)\chi\theta = 0; \quad I2$$

$$Pr^{-1}\theta'' + f\theta' + (2-3\beta)f'\theta = 0; \quad I3$$

с граничными условиями

$$f(0) = f_w = -(2-\beta)^{1/2}v_w Re^{1/2}/u_e; f'(0) = 0; \theta(0) = 1; \quad I4$$

$$f'(\infty) = 1; \quad \theta(\infty) = 0; \quad I5$$

где $\chi = \beta_r g_x (T_e - T_w)x/u_e^2$; $|\chi| = Gr/Re^2$; $\beta = 2m/(m+1)$

Безразмерные коэффициенты трения и теплообмена определяются по формулам

$$c_f Re^{1/2} = 2(2-\beta)^{-1/2}f_w''; \quad I6$$

$$Nu Re^{-1/2} = -(2-\beta)^{-1/2}\theta_w'. \quad I7$$

Оценивалось влияние температурного фактора S_w на смешанную конвекцию в случае течений газа с теплофизическими свойствами зависящими от температуры

$$\mu \sim T; \quad \lambda \sim T; \quad \rho \sim T^{-1} \quad I8$$

около изотермической непроницаемой поверхности, когда решения краевых задач /6/ - /9/ и /I2/ - /I5/ совпадают при выполнении условия

$$\chi = G(1-S_w) + (S_w-1)/2. \quad I9$$

Другими словами, учет влияния температурного фактора на смешанную конвекцию возможен в рамках краевой задачи /I2/-/I5/

путем введения эффективного параметра подъемных сил

$$\left(\frac{Gr}{Re^2}\right)_{эфф} = \left(\frac{Gr}{Re^2}\right)_e + \frac{S_w - 1}{2} \quad 20$$

Исследована смешанная конвекция с продольным градиентом давления около проницаемой неизотермических поверхностей в случае малых подъемных сил ($Gr/Re^2 \leq 0,5$). Показано, что при слабых вдувах-отсосах $|v_w| \leq 0,5(u_e \gamma/x)^{1/2}$ коэффициенты теплообмена и трения определяются по корреляционным уравнениям

$$Nu/Nu_n = 1 - 0,64 b_T; \quad c_f/c_{fn} = 1 - 0,58 b \quad 21$$

для различных граничных условий (2) когда

$$1/3 \leq m \leq 1; \quad -1/3 \leq n \leq 1; \quad -1/3 \leq l \leq 0.$$

В случае преобладающего влияния подъемных сил $Gr/Re^2 > 5,0$ относительное влияние вдува-отсоса и внешнего потенциального течения на совпадающую смешанную конвекцию уменьшается, а величина максимума скорости u_{max} и его положение η_{max} в пограничном слое связаны асимптотическим соотношением

$$\eta_{max}^2 u_{max} / u_e = \text{const} \quad 22$$

В третьей главе представлена методика решения уравнений пограничного слоя при смешанной конвекции.

Рассмотрен вопрос единственности решений уравнений пограничного слоя при смешанной конвекции и сформулированы необходимые условия, обеспечивающие выбор решений, имеющих физический смысл. Предложен прием сшивки численного решения с асимптотическим, приводящий к переносу граничных условий из бесконечности на конечное удаление от стенки, которые имеют вид при $\eta = \eta^*$

$$\begin{aligned} \theta' + P_z f(1 - (1 - 3\beta)/P_z f^2) \theta &= 0; \\ f'' + f(1 + (1 + 2\beta)/f^2)(f' - 1) + \gamma f(1 - (1 - 3\beta)/f^2) \theta &. \end{aligned} \quad 23$$

Указанный прием позволил уменьшить затраты машинного времени и повысить точность аппроксимации граничных условий на бесконечности. Разработана методика решения уравнений пограничного слоя, включающая квазилинеаризацию краевой задачи по Ньютону-Рафсону, решение линейной задачи методом конечных разностей и организацию сходящегося итерационного процесса. Методика реализована в виде программы, составленной на алгоритмическом языке ФОРТРАН /Минск-32/. С помощью тестовых расчетов определена оптимальная разностная сетка и показана эффективность методики решения.

В четвертой главе приведены результаты исследования закономерностей смешанной конвекции в ламинарном пограничном слое с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей.

Расчеты теплообмена и трения при смешанной конвекции выполнены для ламинарного пограничного слоя ($10^2 \leq Re \leq 10^4$, $10^4 \leq Gr \leq 10^9$) с граничными условиями /2/ когда $1/3 \leq m \leq 1$; $-1/3 \leq n \leq 1$; $-1/3 \leq l \leq 0$; $0,1 \leq Pr \leq 10$;
 $|U_w| \leq (U_e \nu / x)^{1/2}$; $|T_w - T_e| \leq 100 U_e^2 / \beta_t g_x x$; $T_w / T_e \leq 5$.

Влияние температурного фактора на теплообмен при совпадающей смешанной конвекции около изотермической непроницаемой поверхности в случае течения газа с теплофизическими свойствами /18/ показано на рис.1. Штриховые линии ограничивают область пригодности приближения Буссинеска.

Расчеты автора подтвердили теоретическую оценку влияния температурного фактора на теплообмен и трение при смешанной конвекции /18/ - /20/, и показали увеличение области пригодности приближения Буссинеска с ростом подъёмных сил, что позволило использовать приближение несжимаемой, но термически деформируемой среды при дальнейшем анализе закономерностей смешанной конвекции в рамках краевой задачи /12/ - /15/.

Численно исследовано влияние подъёмных сил, продольного градиента давления, неизотермичности и проницаемости поверхности, чисел Прандтля на характеристики смешанной конвекции.

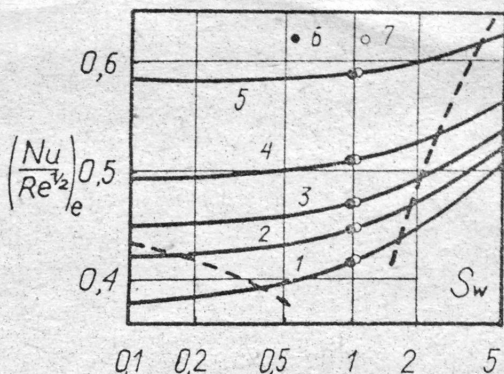


Рис. I. Влияние температурного фактора на теплообмен при смешанной конвекции. Расчеты автора: 1 - $(Gr/Re^2)_e = 0$; 2 - $(Gr/Re^2)_e = 0,5$; 3 - $(Gr/Re^2)_e = 1$; 4 - $(Gr/Re^2)_e = 2$; 5 - $(Gr/Re^2)_e = 5$; 6 - Спэрроу и др. (1959); 7 - Пэй и др. (1968).

Решения в случае совпадающей смешанной конвекции асимптотически переходят в решения для вынужденной ($Gr/Re^2 \rightarrow 0$) и для естественной конвекции ($Gr/Re^2 \rightarrow \infty$) и согласуются с существующими экспериментальными и теоретическими данными по теплообмену и гидродинамике при смешанной конвекции. Для определения закономерностей смешанной конвекции используется приближенная гипотеза суперпозиции поверхностного трения, согласно которой касательное напряжение на непроницаемой стенке равно сумме касательного напряжения вынужденной и естественной конвекции

$$\tau_{wn}(Gr, Re) = \tau_{wnb}(Re) \pm \tau_{wne}(Gr) \quad 24$$

где знак плюс или минус соответствуют совпадающей или противоположной смешанной конвекции. Максимальное отличие расчетов трения от уравнения /24/ не превышает 16%. Условие отрыва пограничного слоя при противоположной смешанной конвекции в рамках гипотезы суперпозиции трения записывается в виде

$$\tau_{wnb}(Re) = \tau_{wne}(Gr) \quad 25$$

или в безразмерной форме

$$(Gr/Re^2)_s = \gamma_D \quad 26$$

где $\gamma_D = (\lim_{\gamma \rightarrow 0} f_w'' / \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \gamma^{-3/4} f_w'')^{4/3}$ - эффективный параметр подъёмных сил в точке пересечения асимптот коэффициента поверхностного трения при вынужденной и естественной конвекции. Корреляция условий отрыва автомодельного пограничного слоя при противоположной смешанной конвекции представлена на рис.2, где отличие расчетов отрывного параметра подъёмных сил от уравнения /26/ не превышает 8%. Расчеты Цуруно и др. (1979) отрыва неавтомодельного пограничного слоя при противоположной смешанной конвекции допускают обработку предложенным методом в диапазоне $1 \leq Pr \leq 100$.

Корреляционное уравнение для расчета теплообмена при смешанной конвекции около непроницаемой поверхности, полученное интегрированием уравнения теплового пограничного слоя с учетом гипотезы суперпозиции, имеет вид

$$\alpha_H^3(Re, Gr) = \alpha_{HB}^3(Re) \pm \alpha_{HE}^3(Gr); \quad 27$$

или в безразмерной форме

$$Nu_H / Nu_{HB} = (1 \pm Z_T^{3/4})^{1/3}; \quad 28$$

где $Z_T = (Gr/Re^2) / \gamma_T$

$$\gamma_T = (\lim_{\gamma \rightarrow 0} \theta_w' / \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \gamma^{-1/4} \theta_w')^4$$

эффективный параметр подъёмных сил в точке пересечения асимптот коэффициента теплообмена при вынужденной и естественной конвекции, знак плюс или минус соответствует сопадающей или противоположной смешанной конвекции.

Сравнение корреляционного уравнения /28/ с расчетами теплообмена при неавтомодельной смешанной конвекции в работе Спэрроу и др.(1959), Меркина (1969), Цуруно и др. (1969), Ллойда и др.(1970), Дубовика (1971) и экспериментальными данными Кляйтгеля (1959), Петровой (1975), Гризагоридиса (1975), Бабежи и др.(1979) показало, что отклонение результатов указанных авторов от обобщающего уравнения /28/

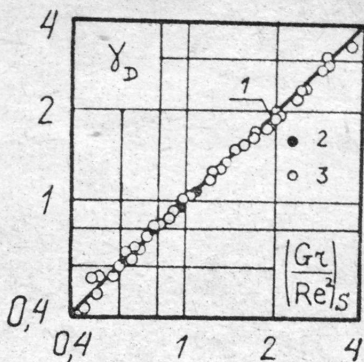


Рис.2. Орывной параметр подъёмных сил при противоположной смешанной конвекции. 1 - ур. /27/, 2 - Спэрроу и др. (1959), 3 - расчеты автора.

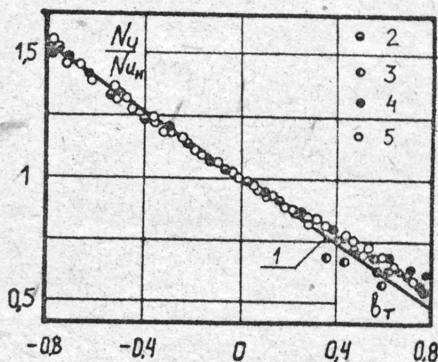


Рис.3. Теплообмен при смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей. 1-ур./21/, 2-Дубовик (1971), 3-Ливингуд (1955), 4-Пэй и др. (1968), 5 - расчеты автора.

не более 10%. Это позволяет рассчитывать теплообмен при ламинарной смешанной конвекции около непроницаемой поверхности по формуле /28/ с точностью необходимой для практики, когда граничные условия не удовлетворяют связям /2/ в случае

$$3 \cdot 10^{-3} \leq Pr \leq 100 ; 0 \leq m \leq 1 ; -1/3 \leq n \leq 1$$

Границы области смешанной конвекции определяются с помощью правила 5%-го отклонения коэффициента теплообмена от асимптот вынужденной и естественной конвекции, что с учетом зависимости /28/ дает

$$1/2 < \alpha_{не}(Gr)/\alpha_{нв}(Re) < 2 \quad 29$$

Обобщение влияния проницаемости поверхности на теплообмен при смешанной конвекции представлено на рис.3, где данные различных авторов хорошо коррелируют с уравнением /21/ для $0 \leq Gr/Re^2 \leq 100$

По результатам проведенных исследований были разработаны инженерные методики расчета тепло- и массообмена для систем термостатирования замкнутых объемов и для реакторов водородного восстановления химически чистого кремния. Указанные методики применяются на Запорожском титано-магнелиевом комбинате.

Список основных обозначений

$b = 2 \nu_w / \alpha_e Gr_n$; $b_T = \nu_w / \alpha_e St_n$; f - безразмерная функция тока; g_x - тангенциальная компонента вектора ускорения свободного падения; $N = \rho \mu / \rho_e \mu_e$; $S = T / T_e$; r - радиус осесимметричного тела; u, v - тангенциальная и нормальная компоненты вектора скорости; $\beta = 2 \xi (d\alpha_e/d\xi) / \alpha_e$ - параметр продольного градиента давления; β_T - коэффициент термического расширения; $\xi = \int_0^x \rho_e \mu_e \alpha_e \tau^{2K} dx$; $\eta = \rho_e \alpha_e \tau^K (2\xi)^{-1/2} \int_0^\eta \rho / \rho_e d\eta$; $K = 0$ для плоского, $K = 1$ для осесимметричного тела; $\theta = (T - T_e) / (T_w - T_e)$. Индексы: e - внешний поток; w - стенка; v - вынужденная конвекция; e - естественная конвекция; T - тепловой; n - непроницаемая стенка; S - отрыв; A, p - автомоделный и возмущенный параметры; ∂ - оператор $\partial/\partial \eta$.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы возможности управления теплообменом при смешанной конвекции. Разработан алгоритм воздействия на характеристики пограничного слоя, обеспечивающий постоянство тепловых потоков на неизотермической проницаемой поверхности. Определено влияние тепловой предыстории потока на теплообмен при смешанной конвекции и найдены размеры области перехода начального профиля температуры к автомодельной форме.

2. Получены необходимые условия существования автомодельных течений газа с переменными теплофизическими свойствами при смешанной конвекции. Определена область пригодности приближения Буссинеска для теоретического описания процессов смешанной конвекции. Разработан метод учета влияния температурного фактора на смешанную конвекцию в рамках приближения Буссинеска путем введения эффективного параметра подъемных сил.

3. Сформулированы необходимые условия единственности решений уравнений автомодельного пограничного слоя. Предложен метод сшивки численного решения с асимптотическим, что приводит к переносу граничных условий на бесконечности на конечное удаление от поверхности. Разработана методика решения уравнений пограничного слоя при смешанной конвекции, реализованная в виде программы, составленной на алгоритмическом языке ФОРТРАН (Минск-32).

4. Исследовано влияние температурного фактора, подъемных сил, продольного градиента давления, неизотермичности и проницаемости поверхности и чисел Прандтля на смешанную конвекцию в пограничном слое. Изучены условия возникновения отрыва пограничного слоя при противоположной смешанной конвекции.

5. Обобщены данные по теплообмену, трению и отрыву пограничного слоя при смешанной конвекции. Получены корреляционные уравнения для расчета теплообмена и положения зоны отрыва пограничного слоя при смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей.

6. На основании корреляционных уравнений разработаны и внедрены в производство инженерные методики расчета тепломассопереноса при ламинарной смешанной конвекции с продольным градиентом давления около неизотермических проницаемых поверхностей.

1. Ильинский А.И. Влияние градиента давления на трение и теплообмен при ламинарной смешанной конвекции около вертикальной поверхности. - Науч. труды/МЛТИ. Технология древесных пластиков и плит, 1977, вып. 97, с. 120-124.
2. Ильинский А.И. Ламинарная смешанная конвекция около вертикальной поверхности. Асимптотическое разложение решений на больших удалениях от стенки. - Науч. труды/МЛТИ. Вопросы теплопередачи, 1977, вып. 102, с. 55-58.
3. Ильинский А.И. Ламинарная смешанная конвекция на пронизваемом клине. - Науч. труды/МЛТИ. Технология древесных пластиков и плит, 1978, вып. 108, с. 118-121.
4. Ильинский А.И. Смешанная конвекция при гетерогенных химических реакциях. - Науч. труды/МЛТИ. Технология древесных пластиков и плит, 1979, вып. 113, с. 122-124.
5. Ильинский А.И. Гидродинамика и теплообмен при смешанной конвекции на неизотермическом пронизваемом клине. - В кн.: Гидродинамика и теплообмен в одно- и двухфазных средах. Новосибирск, Ин-т теплофизики, 1979, с. 152-156.
6. Брдлик П.М., Ильинский А.И., Семенов Ю.П. Управление тепломассообменом при смешанной конвекции в пограничном слое. - В кн.: Тепломассообмен - УИ. Минск: ИТМО, т. I, ч.3, 1980, с. 26-37.