

М407623

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ  
УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

---

На правах рукописи

ВИНОКУРОВ Юрий Николаевич

ТЕПЛООБМЕН В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ ПРИ  
МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Специальность 05.14.05  
Теоретические основы теплотехники

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 1983

Работа выполнена в МВТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент Н.К.Корнейчук

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор  
С.Б.Белов,  
к.т.н., старший научный сотрудник  
Ю.П.Мацковский

Ведущее предприятие - Институт высоких температур АН СССР

Защита состоялась "20" июня 1983 г. в 14 часов в МВТУ на заседании специализированного совета К.053.15.05 "Тепловые машины и теоретические основы теплотехники" при Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: г.Москва, Лефортовская набережная, д. 1, фак. "Энергомашиностроение".

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просить направлять в МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: г.Москва, Лефортовская набережная, д. 1, фак. "Энергомашиностроение" на имя члена совета К.053.

Автореф

Ученый секретарь  
специализированного  
совета К.053.15.05  
к.т.н., доцент

M 407623

Актуальность темы. Процессы тепло- и массообмена при течении газов или жидкостей через проницаемые пористые структуры широко применяются в энергетике, в установках и аппаратах химической технологии, в холодильной и других областях техники. Расчеты теплообмена в гетерогенных каталических реакторах, адсорберах, регенераторах криогенных установок, в которых используются мелкие частицы, требуют знания коэффициентов межфазного теплообмена в области малых значений критериев Пекле и Рейнольдса, в которой экспериментальные данные по коэффициентам теплообмена различаются на порядок и более. Основной причиной различий является пренебрежение или некорректный учет теплопроводностей по твердой фазе и теплоносителю при обработке экспериментов. Новые возможности повышения точности экспериментальных данных дают методы идентификации динамических систем, широкое применение которых стало возможным с развитием вычислительной техники.

Цель исследования. Разработка метода экспериментального определения коэффициентов межфазного теплообмена в пористых образцах плоской, цилиндрической или сферической формы с учетом продольных теплопроводностей отдельно по твердой фазе и по теплоносителю. Численное и экспериментальное исследование теплообмена в засыпках шаров и в других применяемых на практике образцах пористых сред.

Научная новизна. Численно изучено влияние пористости, распределения скоростей в окрестности частиц и неоднородностей пористости на средние коэффициенты теплообмена между частицами и теплоносителем в засыпках при малых числах Пекле и Рейнольдса.

Впервые разработан простой в реализации метод экспериментального определения коэффициентов межфазного теплообмена в пористых образцах плоской, цилиндрической или сферической формы с учетом продольных теплопроводностей отдельно по твердой фазе и по теплоносителю и учетом возможной неизотермичности по толщине частиц твердой фазы. Задача определения коэффициентов межфазного теплообмена решена как задача параметрической идентификации линейной динамической системы в частотной области. Коэффициенты теплообмена оценивались в соответствии с критерием минимальной среднеквадратической ошибки из условия минимума

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1407623

Винокуров Ю.Н. Теплообмен



рассогласования частотных спектров температур потока теплоносителя на выходе из пористого образца - рассчитанного при искомом коэффициенте теплообмена и определенного по результатам измерений. В опытах применялись ступенчатые по форме возмущения температуры теплоносителя на входе в образец. Экспериментально подтверждена возможность применения метода для определения и коэффициентов межфазного теплообмена и эффективных коэффициентов продольной теплопроводности по теплоносителю путем минимизация функционала рассогласования по этим переменным.

Практическая ценность. Разработан применимый в стандартной форме метод исследования теплообмена в пористых средах. Создана программа обработки экспериментов на ЭВМ. Справедливость метода подтверждена сравнением полученных результатов с литературными данными и анализом ошибок. По результатам численного и экспериментального исследований даны практические рекомендации для расчета средних коэффициентов межфазного теплообмена и эффективных коэффициентов продольной теплопроводности в засыпках шаров, а также в базальтовой и дисковой насадках, используемых в регенераторах воздухоразделительных установок. По результатам исследования теплообмена в натуральных блоках аппаратуры с принудительной вентиляцией дана зависимость для оценки средних коэффициентов теплообмена между блоками и охлаждающим воздухом.

Автор выносит на защиту результаты расчетного исследования, методику и результаты экспериментального исследования и сделанные по результатам работы выводы, сформулированные в заключительной части автореферата.

Реализация результатов работы. Полученные в работе результаты использованы на предприятиях отраслевых министерств. Акты о внедрении прилагаются.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на III Всесоюзной школе-семинаре молодых ученых и специалистов "Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках", 1981 г. (г. Нарва); на отраслевой конференции молодых ученых и специалистов, 1981 г. (г. Жуковский); на межвузовском научном семинаре МВТУ, МЭИ, МИФИ, МТИ, МИХМ, 1982 г. (г. Москва).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано три статьи.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 218 страницах, включает 140 страниц машинописного текста, содержит 40 рисунков, 4 таблицы и состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка цитируемой литературы, включающего 100 источников, приложений на 26 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Дано обоснование актуальности работы, кратко сформулированы цель и основные результаты исследования.

Глава первая. Приведен обзор расчетных и экспериментальных исследований. Рассмотрены геометрическая структура, гидродинамика, продольная теплопроводность и межфазный теплообмен в неподвижном зернистом слое. Отмечено, что данные по межфазному теплообмену и в зернистых слоях, и в консолидированных пористых средах различаются при числах Пекле  $Pe < 40$  более, чем на порядок.

Дан обзор экспериментальных методов определения коэффициентов межфазного теплообмена в пористых средах. Общим недостатком рассмотренных работ, кроме статьи *Littman'a* и др. (1968 г.) является пренебрежение продольной теплопроводностью по одной из фаз, для засыпок — по частицам, для пористых металлов — по теплоносителю. В области малых чисел Пекле такой упрощенный подход является возможной причиной погрешностей определения коэффициентов межфазного теплообмена  $\alpha$  в случаях, когда эффективные коэффициенты теплопроводности по твердой фазе и по теплоносителю являются величинами одного порядка. Источником погрешностей определения  $\alpha$  с использованием режимов нагрева или охлаждения исследуемых образцов при повышенных числах  $Re$  и  $Pe$  является обычно используемое допущение об изотермичности по толщине частиц твердой фазы. Кроме того, известные методики определения  $\alpha$  используют решения уравнений теплопереноса при фильтрации через плоскую пористую пластину и, поэтому, не могут быть непосредственно распространены на случаи радиального течения теплоносителя.

По результатам анализа состояния проблемы сделаны выводы, которые определяли цель настоящей работы, сформулированную выше.

Глава вторая. В приближении "ползущего" течения несжимаемой жидкости с постоянной вязкостью описано аналитически течение вблизи частиц, составляющих неподвижный зернистый слой. Полученное решение гидродинамической задачи использовано в третьей главе для численного решения уравнения энергии в расчетах коэффициентов теплоотдачи на поверхности частиц. Для описания гидродинамики и теплопереноса в окрестности частиц использовалась ячейная модель со "свободной" поверхностью Хэппеля (рис. I), то есть краевая задача была сведена к рассмотрению одиночной сферической частицы, с окружающей ее жидкой оболочкой, внешний радиус которой вычислялся из условия равенства пористостей модельной ячейки и реальной засыпки. Действительное трехмерное течение аппроксимировалось осесимметричным. Полагалось, что на внешней поверхности жидкой оболочки отсутствует трение, то есть  $\tau_{zv} = 0$ . Массовыми силами пренебрегалось. Принятые допущения позволяли использовать известные решения стоксовых уравнений гидродинамики и описать радиальную и тангенциальную компоненты вектора скорости в сферической системе координат рядами по полиномам Лежандра и Гегенбауэра первого рода. В граничных условиях для уравнений гидродинамики предполагались известными распределения радиальной компоненты вектора скорости  $v_r(\vartheta)$  на поверхности частицы -  $v_a(\vartheta)$  и на внешней поверхности жидкой оболочки -  $v_b(\vartheta)$  при  $\vartheta = \vartheta$  (рис. I). Тангенциальная составляющая вектора скорости  $v_\vartheta(\vartheta)$  на поверхности частицы и напряжение трения  $\tau_{zv}$  на внешней поверхности  $\vartheta = \vartheta$  полагались равными нулю.

Глава третья. Коэффициенты межфазного теплообмена в неподвижном зернистом слое определялись из решения уравнения энергии для теплоносителя, обтекающего сферическую частицу (рис. I), - то есть применялась рассмотренная во второй главе модель со "свободной" поверхностью Хэппеля. В настоящей работе, в отличие от изложенного в статье Хэппеля и Преффера (1964 г.) расчета теплообмена, использовались другие граничные условия на внешней поверхности жидкой оболочки, а определяющая температура теплоносителя вычислялась осреднением по характерным средним массовым температурам теплоносителя. Дополнительно к принятым во второй главе допущениям пренебрегалось свободной конвекцией, лучистым переносом и вязкой диссипацией. Теплофизические свойства теплоносителя считались постоянными, поверхность частицы изотерма-

Рис.1. Схема элементарной ячейки и система координат:

1 - частица;

2 - жидкая оболочка

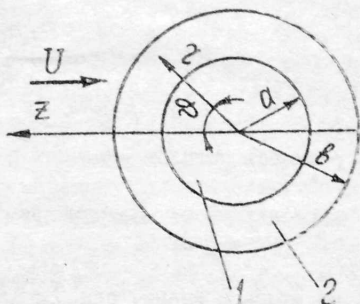


Рис.2. Влияние пористости на средние коэффициенты теплоотдачи на частице

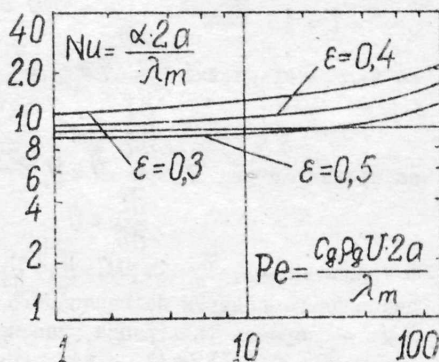


Рис.3. Изменение средних коэффициентов теплоотдачи в зависимости от средней относительной скорости потока  $\bar{v}_a$  с поверхности частицы:

1 -  $\bar{v}_a = \bar{V}_a/U = -0,2$ ;

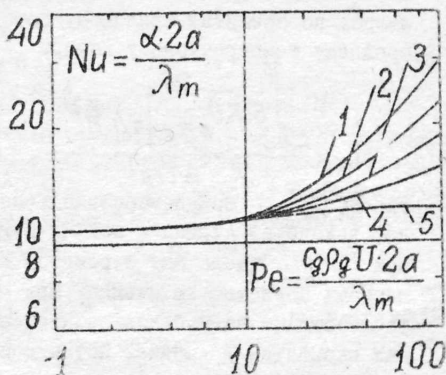
2 -  $\bar{v}_a = -0,1$ ;

3 -  $\bar{v}_a = 0,0$ ;

4 -  $\bar{v}_a = 0,1$ ;

5 -  $\bar{v}_a = 0,2$ .

Пористость  $\epsilon = 0,4$



ческой. Уравнение энергии в сферическом слое теплоносителя

$$\frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left( \bar{r}^2 \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{1}{\bar{r}^2 \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left( \sin \vartheta \frac{\partial t}{\partial \vartheta} \right) = \frac{Pe}{2} \left( \bar{v}_r \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} + \bar{v}_\vartheta \frac{\partial t}{\partial \vartheta} \right) \quad (1)$$

решалось методом конечных разностей. Использовались граничные условия:

на поверхности частицы при  $\bar{r} = r/a = 1$

$$t = 0; \quad (2)$$

на входе в ячейку при  $\bar{r} = b/a, \bar{v}_r < 0$

$$t = 1 \quad \text{или} \quad \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} = \frac{Pe \bar{v}_r}{2} (t - 1); \quad (3)$$

на выходе из ячейки при  $\bar{r} = b/a, \bar{v}_r > 0$

$$\frac{\partial t}{\partial \bar{r}} = 0; \quad (4)$$

на оси симметрии  $\vartheta$  при  $\vartheta = 0, \pi$

$$\frac{\partial t}{\partial \vartheta} = 0. \quad (5)$$

В уравнении (1)  $\bar{v}_r = v_r/U$ ,  $\bar{v}_\vartheta = v_\vartheta/U$  — радиальная и тангенциальная компоненты безразмерного вектора скорости  $\bar{v} = v/U$ ,

$U$  — скорость фильтрации, рассчитанная по полному сечению слоя,  $Pe = c_p \rho_g U 2a / \lambda_m$  — число Пекле,  $\lambda_m$  — коэффициент молекулярной теплопроводности теплоносителя. Число Нуссельта определялось по среднему тепловому потоку с поверхности частицы и среднему температурному напору

$$Nu = \frac{\int_0^\pi \sin \vartheta \left. \frac{\partial t}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=1} d\vartheta}{\Delta t_{cp}}, \quad \Delta t_{cp} = \frac{1}{4} (\bar{t}_1 + 2\bar{t}_{12} + \bar{t}_2), \quad (6)$$

где  $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_{12}$  — среднемассовые температуры теплоносителя на входе, выходе из ячейки и при  $\vartheta = \pi/2$ . Установлено расчетами, что при  $Pe \rightarrow 0$  число  $Nu$  стремится к постоянному пределу, определяемому пористостью ячейки. При  $Pe < 10$  средние коэффициенты теплоотдачи на частице практически не зависели от распределения скоростей в ячейке. Поток с поверхности частицы при  $Pe < 10$  также не влиял на расчетные средние коэффициенты теплоотдачи (рис. 3).

Дана оценка уменьшения коэффициентов межфазного теплообмена в засыпках за счет неоднородностей пористости. Показано, что неоднородности пористости в слое одинаковых шаров при  $Pe < 40$  снижают средние коэффициенты межфазного теплообмена в 1,5–2,0 раза по сравнению с вычисленными по модели со "свободной" поверхностью.

Глава четвертая. Разработана методика экспериментального определения коэффициентов межфазного теплообмена по изменению температуры потока теплоносителя на выходе из пористого образца – отклику на ступенчатое или импульсное по форме возмущение температуры потока на входе. Теплообмен в пористой среде без источников тепла описывался системой уравнений

$$\frac{1}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} (x^n \gamma_s \frac{\partial t_s}{\partial x}) + Nu_v (t_g - t_{sg}) = \frac{\partial t_s}{\partial \theta}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} (x^n \gamma_g \frac{\partial t_g}{\partial x}) - Pe \frac{\partial t_g}{\partial x} + Nu_v (t_{sg} - t_g) = \beta_g \frac{\partial t_g}{\partial \theta} \quad (8)$$

с граничными условиями:

на входе при  $x = x_1$

$$-\gamma_s \frac{\partial t_s}{\partial x} = Nu_{sx} (t_{g1} - t_{sg}), \quad -\gamma_g \frac{\partial t_g}{\partial x} = Pe (t_{g1} - t_g) + Nu_{gx} (t_{sg} - t_{g1}); \quad (9)$$

на выходе при  $x = x_2$

$$\frac{\partial t_s}{\partial x} = \frac{\partial t_g}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

и начальными условиями

$$t_s = t_{sg} = t_g = 0. \quad (11)$$

В уравнениях (7), (8)  $n=0$  для пористой пластины и  $n=1,2$  для пористых цилиндрического и сферического образцов;  $t_s, t_g, t_{sg}$  – безразмерные средние температуры твердой фазы, теплоносителя и поверхности раздела фаз;  $x = X/d$  – безразмерная продольная координата;  $d$  – характерный размер;  $\theta = \Omega \tau$  – безразмерное время;  $\Omega = \lambda_m / [(1-\varepsilon) c_s \rho_s d^2]$  – величина, имеющая размерность частоты  $[c^{-1}]$ ;  $\varepsilon$  – пористость;  $c_s, \rho_s$  – удельная теплоемкость и плотность материала твердой фазы;  $\gamma_s = \lambda_s / \lambda_m$ ,  $\gamma_g = \lambda_g / \lambda_m$  – безразмерные эффективные коэффициенты продольной теплопроводности по твердой фазе и по теплоносителю;  $\lambda_m$  – коэффициент молекулярной теплопроводности теплоносителя;  $Nu_v = \alpha_v d^2 / \lambda_m$  – критерий Нуссельта, рассчитанный по объемному коэффициенту тепло-

отдачи  $\alpha_p = \alpha S_p$ ;  $\alpha$  - поверхностный коэффициент теплоотдачи;  $S_p$  - удельная поверхность;  $Pe = c_g \rho_g U d / \lambda_m$  - критерий Пекле;  $c_g, \rho_g$  - удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность теплоносителя;  $U$  - скорость фильтрации;  $Nu_{\beta x} = \alpha_{\beta x} d^2 / \lambda_m$  - критерий Нуссельта, рассчитанный по коэффициенту теплоотдачи на входе  $\alpha_{\beta x}$ ;  $\beta_g = \varepsilon c_g \rho_g / [(1-\varepsilon) c_s \rho_s]$  - отношение объемных теплоемкостей фаз.

Средняя температура твердой фазы  $\bar{t}_g$  связывалась с температурой на ее поверхности  $t_{sg}$  с помощью одномерного уравнения теплопроводности по толщине частиц твердой фазы.

Оценивание коэффициентов межфазного теплообмена  $\alpha_p$  или  $\alpha$  проводилось в частотной области, для чего применялось преобразование Фурье

$$\hat{t}(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} t(\theta) e^{-i\eta\theta} d\theta \quad (I2)$$

к уравнениям (7), (8) с учетом нулевых начальных условий (II), к граничным условиям (9), (10) и к полученным из эксперимента температурам теплоносителя на входе  $t_{g,1}^{экс}(\theta)$  и выходе  $t_{g,2}^{экс}(\theta)$  из исследуемого образца. Оценки коэффициентов межфазного теплообмена определялись минимизацией функционала от рассогласования рассчитанного при искомом  $\alpha_p$  и определенного из эксперимента частотных спектров температуры теплоносителя на выходе из образца

$$F = \int_{\eta_{min}}^{\eta_{max}} |\hat{t}_{g,2}^{расч}(\eta) - \hat{t}_{g,2}^{экс}(\eta)|^2 d\eta. \quad (I3)$$

Малосинформативная область низких частот  $\eta < \eta_{min}$  и область высоких частот  $\eta > \eta_{max}$ , в которой велики погрешности обработки результатов и шумы измерений, не учитывались при вычислении (I3). Частотный спектр  $\hat{t}_{g,2}^{расч}(\eta)$  в (I3) определялся решением аналогов уравнений (7), (8) в частотной области методом конечных разностей. Время обработки одного эксперимента на ЭМ ЕС-1022 составляет 4-5 минут.

Глава пятая. Изложены результаты экспериментального исследования. Экспериментальная установка (рис. 4) позволяла проводить процессы нагрева и охлаждения насадки 4 в зависимости от положения трубы 3, устанавливаемой с помощью специального механизма на один из двух одинаковых аппаратов 6.

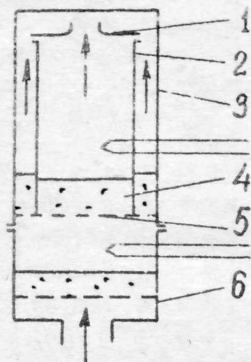


Рис. 4. Схема установки

Через один аппарат постоянно подавался подогретый воздух, через второй — холодный. Расход воздуха определялся с помощью мерного сопла I или крыльчатого анемометра типа АСО-3, устанавливаемых на выходе в атмосферу из трубы 2 диаметром 0,22 м с образцом насадки. Температуры на входе и выходе из насадки, измеряемые с помощью четырехходовых хромель-копелевых термопар, фиксировались автоматическими потенциометрами типа КСП-4. При обработке экспериментов пренебрегалось теплообменом на входе в насадку, т.е. полагалось  $Nu_{\text{вх}} = 0$ , а теплообменом между насадкой 4 и решеткой 5 (рис. 4). Теплообмен между потоком

воздуха и решеткой 5 учитывался с использованием результатов экспериментов без насадки 4 в трубе 3. Изменения температуры потока воздуха на входе в насадку были по форме близкими к ступенчатым.

Результаты исследования теплообмена в засыпках представлены на рис. 5. Полученные значения  $Nu$  (темные точки) удовлетворительно описываются предложенной Gunn'ом формулой

$$Nu = 4(1 + 0,7 Re^{0,2} Pr^{1/3}) + 0,6 Re^{0,7} Pr^{1/3}. \quad (15)$$

Коэффициенты продольной теплопроводности по фазам при определении  $Nu$  рассчитывались по предложенным Kunii и др. формулам

$$\lambda_s = \frac{(1-\epsilon)\lambda_m}{\phi + \frac{2}{3} \frac{\lambda_m}{\lambda_p}}, \quad \lambda_g = \lambda_m (\epsilon + \delta Re Pr), \quad (16)$$

где  $\phi$  — эффективная относительная толщина газовых прослоек между частицами,  $\delta = 0,7$  для  $Re < 50$  и  $\delta = 1,25$  для  $Re \geq 50$ , что соответствует при  $\epsilon = 0,4$  величине  $Pe_{\text{эф}} = 2$ . Приближение  $\lambda_s = \lambda_g = 0$  дало для  $10 < Re < 50$  величины  $Nu$  (светлые точки на рис. 5) в 1,5–5,0 раз меньше значений  $Nu$ , опреде-

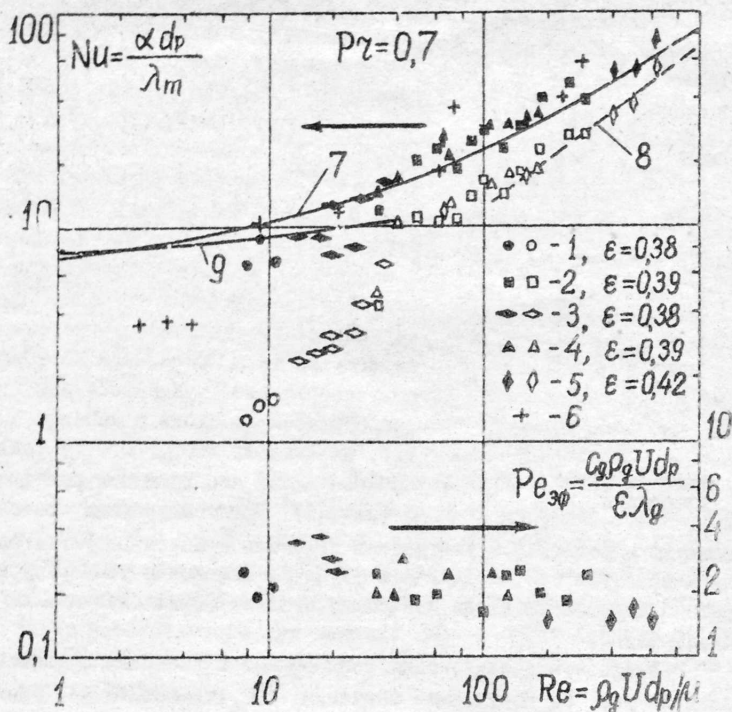


Рис. 5. Обобщение результатов по средним коэффициентам межфазного теплообмена  $\alpha$  и эффективным коэффициентам продольной теплопроводности по теплоносителю в засыпках: 1 - стеклянные шары  $d_p=1,05$  мм, 2 - 3,8 мм; 3 - свинцовая дробь  $d_p=2,5$  мм, 4 - 3,25 мм; 5 - крошка базальта, фракция 9-12 мм, диаметр эквивалентной сферы  $d_p=7,4$  мм; 6 - данные Gunn'a и др. (1978 г.); 7 - формула (15); 8 - аппроксимация данных, полученных в приближении  $\lambda_g=\lambda_s=0$  (Главачка, 1975 г.); 9 - расчет  $Nu$  автором (глава 3), относительный размер неоднородностей пористости  $L/d_p=2$ . Черными точками обозначены данные автора, определенные с учетом  $\lambda_g$  и  $\lambda_s$ , светлыми - без учета

ленных с учетом теплопроводностей. Использование приближения  $t_g = t_{sg}$  в (7,8) приводило при  $Re > 200$  к занижению до 30% определяемых коэффициентов теплоотдачи в засыпках из наиболее крупных и малотеплопроводных частиц – типов 2 и 5. Оценка погрешностей определения  $Nu$  показала, что относительные ошибки  $\Delta Nu$  не превышают  $\pm 10\%$  для  $Re > 100$ , увеличиваются с уменьшением  $Re$  и составляют  $\pm 20\%$  для  $Re = 40$ ,  $+35\%$  и  $-25\%$  для  $Re = 20$  и  $+60\%$  и  $-40\%$  для  $Re = 10$ . Результаты по продольной теплопроводности теплоносителя  $\lambda_g$  (рис. 5), полученные минимизацией функционала (13) по двум переменным –  $\lambda_g$  и  $\alpha$ , хорошо согласуются с известными данными по диффузии газов в засыпках.

Подтверждение разработанного метода исследования данными по теплообмену в засыпках позволяет применять метод для изучения теплообмена в других образцах пористых сред. Исследовался теплообмен в дисковой насадке регенераторов воздухоразделительных установок. Насадка состояла из трех или пяти последовательно расположенных дисков. Каждый диск высотой  $H = 50$  мм был образован двумя скрученными по спирали одинаковыми гофрированными с шагом  $S = 314$  мм алюминиевыми лентами толщиной 0,3 мм так, что гофры пересекались под углом  $30^\circ$ . Средняя пористость насадки была  $\epsilon = 0,735$ , гидравлический диаметр  $d_r = 4F/\Pi = 166$  мм, удельная поверхность  $S_g = 4\epsilon/d_r = 1767 \text{ м}^{-1}$ . Для уменьшения осевой теплопроводности насадки на лентах имелись разрезы. Оценка эффективного коэффициента теплопроводности по диску, вычисленная с учетом разрезов и пористости насадки составляла  $\lambda_s = 16 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

Результаты определения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и коэффициентов продольной теплопроводности по теплоносителю  $\lambda_g$  приведены на рис. 6. Числа Нуссельта, рассчитанные по определенным в приближении  $\lambda_s = \lambda_g = 0$  коэффициентам теплоотдачи (светлые точки), находятся выше предложенной Елухиным и Старосвитским зависимости

$$Nu = \frac{Nu_r}{d_r S_g} = \frac{1,7 Re^{0,78}}{d_r S_g} \left( \frac{H}{d_r} \right)^{-0,9} \left( 1 + \frac{d_r \cos \varphi}{S} \right), \quad (17)$$

преобразованной здесь от  $Nu_r$  к  $Nu$ . Расхождения между (17) и данными автора объясняются различиями исследованных дисков.

насадок — без разрезов и с разрезами на ленте, за счет чего коэффициенты теплопроводности  $\lambda_s$  по высоте дисков отличались в три-четыре раза. Числа Нуссельта, рассчитанные по определенным с учетом  $\lambda_s$  и  $\lambda_d$  коэффициентам теплоотдачи (темные точки), вычислялись минимизацией (13) по двум переменным —  $\alpha$  и  $\lambda_d$ . Существенно, что рассчитанные таким образом числа  $Nu$  выше  $Nu_{\text{лам}} = 3,66$  для ламинарного стабилизированного течения в круглой трубе диаметром  $D = d_r$ . Оценка погрешностей определения  $Nu$  показала, что относительные погрешности  $\Delta Nu$  не превышают  $\pm 8\%$  для  $Re > 200$ , увеличиваются с уменьшением  $Re$  и составляют  $\pm 13\%$  для  $Re = 100$  и  $\pm 24\%$  для  $Re = 50$ . Полученные значения  $\lambda_2$  меньше величин, рассчитанных по формуле Ариса-Тейлора для осевой диффузии при ламинарном течении в круглых трубах, преобразованной здесь с учетом пористости (рис. 6). Этот эффект объясняется более интенсивным, чем при течении в трубах, молярным переносом в радиальном направлении, который уменьшает неравномерности толел скоростей, температур и концентраций по свободному сечению насадок.

Средние коэффициенты теплообмена между приборными блоками с принудительной вентиляцией и охлаждающим воздухом и другие параметры тепловой модели трех исследованных блоков определялись по изменениям температур воздуха на выходах из блоков  $t_{g,2}(\tau)$  и температур элементов блоков — откликам на близкие к ступенчатым изменения температур воздуха на входах в блоки  $t_{g,1}(\tau)$  или ступенчатые изменения энерговыделения в блоках. Установлено, что в испытанных блоках средние температуры воздуха на выходе блоков  $t_{g,2}(\tau)$  близки к осредненным по элементам температурам  $\bar{t}_s$ . Поэтому передаваемое в единицу времени от блоков к охлаждающему воздуху тепло

$$Q = G c_p (t_{g,2} - t_{g,1}) = K_i^{3p} (\bar{t}_s - t_{g,1}) \approx (0,8 \div 1,0) G c_p (\bar{t}_s - t_{g,1}) \quad (18)$$

определяется разностью  $\bar{t}_s - t_{g,1}$  с коэффициентом пропорциональности  $K_i^{3p}$ . Эффективные внутренние коэффициенты теплообмена  $K_i^{3p}$  находятся в узкой области (рис. 7) и за счет развитой внутренней поверхности блоков  $S_i$  близки к максимально возможным значениям, определяемым произведением массового расхода  $G$  на теплоемкость охлаждающего воздуха  $c_p$ , хотя коэффициенты теплообмена  $K_i = \alpha_i S_i$  имеют большой разброс

Рис. 6. Теплообмен в дисковой насадке:

1 - коэффициенты теплообмена, определенные с учетом продольных теплопроводностей (черные точки) и в приближении  $\lambda_s = \lambda_g = 0$  (светлые точки);

2 - формула (17);

3 - относительные коэффициенты продольной теплопроводности по теплоносителю;

$$4 - \frac{\lambda_g}{\lambda_m} = \varepsilon \left[ 1 + \frac{(Re Pr)^2}{48} \right]$$

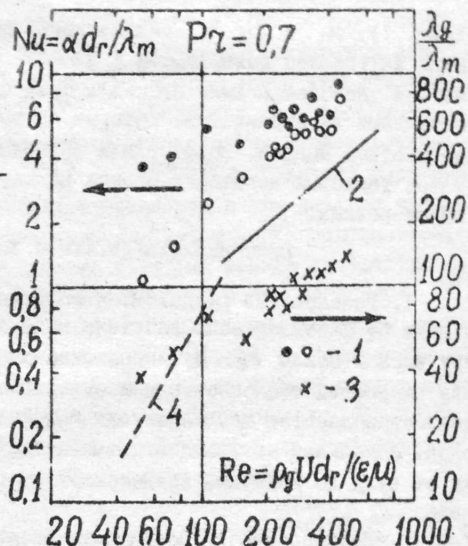
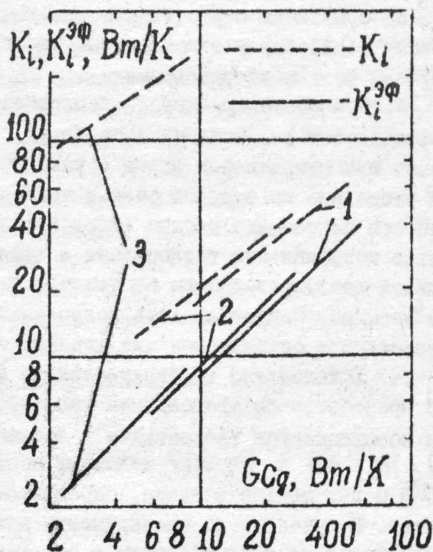


Рис. 7. Коэффициенты теплообмена в блоках с принудительной вентиляцией:

1 - выпрямитель;

2 - преобразователь;

3 - бычислитель



(рис. 7),  $\alpha_i$  и  $S_i$  - средние коэффициенты теплоотдачи и площади внутренней поверхности в блоках. Определение других параметров тепловой модели блоков и сравнение расчетов по модели с данными экспериментов, которые не использовались для оценки параметров модели, подтвердила возможность пересчета результатов тепловых испытаний блоков на другие нестационарные тепловые режимы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено расчетом, что средние коэффициенты теплоотдачи от частиц к теплоносителю в неподвижном зернистом слое при числах Пекле  $Pe < 10$  практически не зависят от распределения скоростей теплоносителя в окрестности частиц и определяются теплопроводностью теплоносителя и геометрической структурой слоя. Локальные коэффициенты теплоотдачи изменяются практически от нуля до величин, превышающих средние значения в 1,5-2,0 раза.

2. Неоднородности пористости в слое одинаковых шаров снижают средние коэффициенты теплоотдачи при  $Pe < 40$  в 1,5-2,0 раза по сравнению с расчетными. Поэтому надежные данные по межфазному теплообмену в конкретных дисперсных системах могут быть получены только из эксперимента.

3. Разработан расчетно-экспериментальный метод определения коэффициентов теплоотдачи в пористых образцах плоской, цилиндрической или сферической формы с учетом продольных теплопроводностей раздельно по твердой фазе и теплоносителю и учетом неизотермичности по толщине частиц твердой фазы. Определены экспериментально коэффициенты теплоотдачи и эффективные коэффициенты продольной теплопроводности по теплоносителю в засыпках и в дисковой насадке. Справедливость полученных результатов обоснована сравнением с опубликованными данными и анализом ошибок.

4. Установлено экспериментально и подтверждено расчетами, что пренебрежение продольными теплопроводностями при определении коэффициентов теплоотдачи в засыпках дает в области  $10 < Re < 50$  и  $Pr \approx 0,7$  величины коэффициентов теплоотдачи в 1,5-5,0 раз меньше величин, определяемых с учетом теплопроводностей. Полученные из эксперимента данные по продольной теплопроводности по теплоносителю в засыпках хорошо согласуются с данными по продольной диффузии газов, когда процессы переноса

не осложняются взаимодействием с частицами.

5. Коэффициенты теплоотдачи в дисковой насадке при одинаковых числах Рейнольдса превышают коэффициенты теплоотдачи в круглых трубах. Пренебрежение продольными теплопроводностями при определении коэффициентов теплоотдачи в дисковой насадке дает в области  $Re < 100$  и  $Pr \approx 0,7$  величины коэффициентов теплоотдачи, заниженные более чем в два раза по сравнению с величинами, определенными с учетом теплопроводностей.

6. По результатам испытаний натуральных блоков аппаратуры с принудительной вентиляцией установлено, что для оценочных расчетов теплообмена таких блоков с охлаждающим воздухом целесообразно в качестве определяющей температуры воздуха использовать температуру воздуха на входе в блок. В этом случае эффективные коэффициенты теплообмена не более, чем на (10-20)% меньше своих максимальных значений, определяемых произведением расхода на теплоемкость охлаждающего воздуха.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Винокуров Ю.Н., Корнейчук Н.К., Чукаев А.Г. Влияние источников или стоков на поверхности раздела фаз на локальную гидродинамику потока вязкой несжимаемой жидкости в неподвижном зернистом слое при малых числах Рейнольдса. - Труды МИТИ, 1977, вып. 102 - Вопросы теплопередачи, с. 131-137.

2. Винокуров Ю.Н., Рубцов В.Н. Численное исследование теплоотдачи в неподвижном зернистом слое при малых числах Рейнольдса. - Тепло- и массообмен при взаимодействии потока с поверхностью. - М.: МАИ, 1981, с. 43-48.

3. Винокуров Ю.Н., Туманов А.И. Экспериментальное исследование теплообмена в пористых средах при малых числах Рейнольдса. - Балашиха, 1982. - 21 с. - Рукопись представлена ИПО "Криогенмаш". Деп. в ЦНТИхимнефтемаш 27 мая 1982 г., № 888 хн.



Л - 99701      Заказ 741      Объем I п.л.      Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, д. 5