

Автор еф.

М 21

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Аспирант МАЛЬЦЕВА Г.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОМЕХАНИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПОПЕРЕЧНО
ПРОДУВАЕМОМ ДВИЖУЩЕМСЯ СЛОЕ

Специальность 274 - теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Одесса - 1969

см

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

Аспирант МАЛЬЦЕВА Г.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОМЕХАНИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПОПЕРЕЧНО
ПРОДУВАЕМОМ ДВИЖУЩЕМСЯ СЛОЕ

Специальность 274 - теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОНАХТ 13.09.12
Исследование гидROME



v001690

v001690



Одесса - 1969

Работа выполнена на кафедре атомных энергетических установок Одесского технологического института имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Горбис З.Р.

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и
техники, доктор технических
наук,
профессор Большаков А.Г.

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Эльперин И.Т.

Автореферат разослан "_____" _____ 1969 г.

Защита состоится "_____" _____ 1969 г.

на заседании Совета Одесского технологического института имени М.В.Ломоносова. Просьба отзывы на автореферат направлять в двух экземплярах по адресу: г.Одесса, ул.Свердлова, 112, Одесский технологический институт им.М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ОТИЛ.

Ученый секретарь Совета

Запорожец Л.А.

ВВЕДЕНИЕ

Аппараты с продуваемым движущимся слоем, обладавая рядом преимуществ (высокая интенсивность теплообмена, компактность, непрерывность процесса и пр.), находят широкое применение в химической технологии, металлургии, энергетике и др. ведущих отраслях промышленности. Однако, для теплообменников с противоточной схемой, как правило, характерна неравномерность высоты слоя и скоростей движения частиц по сечению, что приводит к неравномерности движения газовой фазы. По указанным причинам интенсивность теплообмена в противоточно движущемся слое намного ниже, чем в неподвижном. Одним из перспективных видов теплообменников с плотным движущимся слоем представляются теплообменники с поперечно продуваемым, вертикально движущимся слоем, в значительной степени свободные от указанных недостатков. В этом случае формируется небольшой, постоянной толщины слой, упрощается конструкция воздухопроводов, обеспечивается равномерный подвод и отвод газа, облегчается компоновка теплообменника, уменьшаются потери в окружающую среду. Крайняя ограниченность в литературе данных для расчета таких аппаратов указывает на актуальность дальнейших исследований в этой области.

Настоящая работа посвящена исследованию гидромеханики и теплообмена в поперечно продуваемом движущемся слое.

1. Анализ литературных данных и задачи исследования

Основной механизм передачи тепла в движущемся слое остается таким же, как и в неподвижном продуваемом слое. Процессы механики, аэродинамики и теплообмена изучены недостаточно.

Характер движения слоя в узких (при $\Phi_{\text{жв}}/d_r < 30$) и щелевидных каналах изучен мало. Исследования аэродинамического сопротивления в основном проведены для неподвижного слоя. Наличие большого количества форм

мул в литературе для расчета аэродинамического сопротивления слоя объясняется множеством различных факторов, влияющих на процесс аэродинамики.

Имеющиеся в литературе немногочисленные данные по аэродинамическому сопротивлению движущегося слоя (Чукина, Нортон, Дурнова, Халпея, Сурина) получены при противо- и прямоточном движении компонентов. Данные для поперечно продуваемого вертикально движущегося слоя отсутствуют. По теплообмену в неподвижном слое получены многочисленные опытные данные (работы Чуханова, Тимофеева, Аэрова, Дантона, Микка и др.). Интенсивность этого процесса достаточно высока и в основном зависит (при $Bi < 0,2$ и в широких каналах) от скорости и свойств газа и в меньшей степени от размера частиц. При температурах ниже 500°C теплообмен в продуваемом слое определяется главным образом конвективной составляющей. По теплообмену в движущемся продуваемом слое работ сравнительно немного (Нортон, Пиро, Комиссаров). Общим результатом подобных исследований являются весьма низкие величины коэффициентов теплоотдачи (в 5-10 раз ниже, чем в неподвижном слое), что объясняется особенностями механики и аэродинамики движущегося слоя. Перевод слоя в движение ухудшает равномерность распределения газовой фазы, может вызывать неравномерность движения твердого компонента и в этой связи — снизить интенсивность теплообмена. Теплообмен в вертикальном движущемся поперечно продуваемом слое совершенно не изучен. Единственные опытные данные Е.И.Кашунина по теплообмену при перекрестном движении компонентов („зажатый” слой) получены в очень малом диапазоне изменения критерия Рейнольдса. Принятый автором косвенный метод определения коэффициентов теплоотдачи в камерах условен и в ряде положений ошибочен.

Теоретический анализ и математическое описание процессов, протекающих в вертикальном поперечно продуваемом слое, отсутствуют.

Указанное состояние вопроса определило основные задачи исследования процесса в вертикально движущемся

поперечно продуваемом слое: 1) провести теоретический анализ процессов; 2) изучить свойства насадки и механику ее движения; 3) исследовать аэродинамическое сопротивление и распределение газа в слое; 4) исследовать процесс теплообмена; 5) разработать методику расчета таких теплообменных аппаратов.

11. Теоретический анализ процессов, протекающих в поперечно продуваемом движущемся слое

Общая система уравнений, описывающая процессы в движущемся поперечно продуваемом слое, получена при использовании предложенной З.Р.Горбисом модели гетерогенной элементарной ячейки. В качестве последней предлагается понимать минимальный объем дисперсной системы, который, включая все компоненты потока, приходится на дискретную частицу и прилегающие к ней зоны частиц и жидкой среды. В дальнейшем протекание различных процессов рассматривается в пределах подобной ячейки, при этом феноменологические гипотезы, исходные фундаментальные законы применяются в отдельности к каждому компоненту. В результате получена система уравнений сплошности, движения, энергии, конвективного теплообмена и теплопроводности для шара. Полученная система уравнений рассматривается совместно с условиями однозначности. На основе теории подобия получены в общем виде следующие критериальные уравнения:

а) механики
$$\bar{V}_{ca}/V_{ca}^{max} = f(Fr_t, Re, f_{in}/f_n, \Delta/d_t, \ell/d_n) \quad (1)$$

б) аэродинамики
$$\xi = f(Fr_t, Re, Ho, Ho_t, f_{in}/f_n, \Delta/d_t, \ell/d_t, \tau_t/\tau) \quad (2)$$

в) теплообмена
$$Nu = f(Re, Fr_t, Ho, Ho_t, Pr, Bi, f_{in}/f_n, \Delta/d_t, \ell/d_t, \tau_t/\tau) \quad (3)$$

Значение критерия Bi оценивается предварительно. В дальнейшем эти зависимости приводятся к расчетному виду на основе полученных экспериментальных данных.

В связи с тем, что рассматриваемые теплообменники, обладая рядом преимуществ по сравнению с проти-

воточными, имеют существенный недостаток — неравномерный нагрев (охлаждение) компонентов, необходимо оценить эту неравномерность. Методика расчета локальных и средних температур в камере и на выходе греющего агента при перекрестном течении несмешивающихся жидких сред была разработана Нуссельтом. Для расчета локальных выходных температур нагреваемого агента (т.е. слоя частиц) нами был использован тот же подход Нуссельта при ряде допущений: 1) расход частиц и газа по сечению равномерен; 2) обе среды не перемешиваются в теплообменной камере; 3) внутреннее термическое сопротивление частиц мало ($Bi < 0,2$), при этом $K \approx \alpha$. Правомерность этих допущений была проверена экспериментально. Вывод уравнения основывается на исходных выражениях теплового баланса и теплообмена на границе. При этом безразмерный комплекс температур $\xi_{II} = \frac{t_{II} - t_{II,i}}{t_{I,i} - t_{II,i}}$ определяется как:

$$\xi_{II}(\xi', 1) = \gamma_0(\xi', 1) + \gamma_1(\xi', 1) + \gamma_2(\xi', 1) + \dots + \gamma_n(\xi', 1); \quad (4)$$

где

$$\gamma_0(\xi', 1) = e^{-A\xi'}(1 - e^{-B});$$

$$\gamma_1(\xi', 1) = A\xi' e^{-A\xi'}(1 - e^{-B} - Be^{-B});$$

$$\gamma_2(\xi', 1) = \frac{A^2}{2!} \xi'^2 e^{-A\xi'}(1 - e^{-B} - Be^{-B} - \frac{B^2}{2!} e^{-B});$$

$$\gamma_n(\xi', 1) = \frac{A^n}{n!} \xi'^n e^{-A\xi'}(1 - e^{-B} - Be^{-B} - \dots - \frac{B^n}{n!} e^{-B}).$$

III. Исследование свойств и механики движения насадки

В качестве исследуемых материалов использовались частицы плавленого MgO (средневзвешенный размер частиц $d_r = 5$ мм), керамические цилиндры (размер частиц:

1) $d_r/L = 7,5/16,5$; 2) $d_r/L = 5,5/11,5$) и шарики марки Г-70 ($d_r = 5,3$ мм и $d_r = 9,2$ мм). В связи с тем, что в дальнейших исследованиях использовались только шарики Г-70,

для них определялись необходимые физико-механические и теплофизические свойства. Выбор этих частиц основан на их хорошей сыпучести, наиболее равномерном движении в канале и на высокой износостойкости.

Насыпная плотность движущегося слоя шаров определялась методом отсечек. Скорость слоя при этом изменялась от 0,318 см/сек до 33,4 см/сек, эквивалентный диаметр канала - от 68,5 мм до 196 мм, отношение Δ/d_r , характеризующее фактор стесненности, - от 8,6 до 47,2; симплекс Δ/ϵ - от 0,174 до 1,08, критерий Фруда Fr_r - от 6,0 до 80.800. В области плотного слоя насыпная плотность практически не зависит от скорости. Для движущегося и неподвижного слоя насыпная плотность увеличивается с уменьшением размера частиц.

Угол естественного откоса для частиц исследуемых фракций примерно одинаков и составляет $\sim 26^\circ$.

Удельная теплоемкость шаров Г-70 составляет 1,07 кдж/кг гр.и не зависит от температуры в исследуемом диапазоне. Следует отметить удовлетворительное совпадение полученных результатов с данными Жукова, Мармера и др. Исследование механики движения слоя проведено в вертикальных полуканалах прямоугольного сечения. Боковые стенки канала были сменными с различной шероховатостью, передняя стенка - стеклянная. Исследования ограничивались изучением ряда факторов, которые оказывают влияние на интенсивность теплоотдачи - характера движения слоя в канале, продольной и поперечной неравномерности движения частиц.

Характер движения слоя исследовался путем визуализации движения с помощью окрашенных частиц слоя. Скорость отдельных частиц определялась в пяти точках по сечению по длине пути, пройденного за фиксируемое время. Эквивалентный диаметр канала изменялся от 0,13 м до 0,33 м, симплекс Δ/ϵ от 0,174 до 2,17 (для шаров Г-70); от 0,8 до 4,0 (для керамических цилиндров)

и от 1,0 до 5,0 (для частиц MgO), скорость слоя шаров Г-70 от 4 см/сек до 33,4 см/сек; керамических цилиндров от 2 см/сек до 4,5 см/сек; частиц MgO от 0,17 см/сек до 4,0 см/сек.

Установлено, что характер движения слоя частиц в каналах прямоугольного сечения аналогичен движению в цилиндрических каналах и в определенных пределах зависит от степени щелевидности канала, характеризующейся симплексом Δ/e . В ядре потока наблюдается параллельно-струйное движение частиц без видимого градиента скоростей по сечению. Резкое падение скорости, вращение, перемешивание частиц под влиянием шероховатости стенок наблюдается только в пристенных слоях, величина которых возрастает с увеличением щелевидности канала.

Следует различать продольную и поперечную неравномерность при движении частиц плотным слоем. Продольная неравномерность определяется условиями стабилизации движения. Данные об изменении толщины пристенного слоя позволяют по аналогии с движением жидкости выделить 3 участка движения слоя по высоте: а) начальный участок (стабилизации), где формируется поле скоростей; величина пристенного слоя здесь нарастает от 0 до определенной величины; б) участок стабилизированного движения, в котором толщина пристенного слоя и эшюра скоростей практически остаются неизменными; в) выходной участок - участок влияния выпуска, в котором толщина пристенного слоя увеличивается, а „стержнеподобность“ движения частиц в ядре слоя заметно нарушается. Высота участка стабилизации невелика и, примерно, равна $D_{жв}$. Высота выходного участка больше $D_{жв}$ канала, зависит от его геометрии и коэффициента внутреннего трения. Как показали эксперименты, высота этого участка может быть значительно уменьшена при переходе к свободному выпуску (падающим слоем), либо путем увеличения числа выпускных течек (выпуск плотным слоем), что существенно для проектирования вспомогательных устройств.

Поперечная неравномерность на участке стабилизированного движения характеризуется отношением $\bar{V}_{cl}/V_{cl}^{max}$ и возрастает ($\bar{V}_{cl}/V_{cl}^{max}$ — падает) с ростом щелевидности канала. Величина ее зависит от коэффициентов внутреннего и внешнего трения в движении. Установлено, что в „узких“ щелевидных каналах при $0,3 < \Delta/e < 0,7$ (для шаров Г-70) , $0,8 < \Delta/e < 2,0$ (для цилиндров) и $1,2 < \Delta/e < 3,0$ (для частиц MgO), отношение $\bar{V}_{cl}/V_{cl}^{max}$ достигает $0,5 \div 0,7$. С уменьшением щелевидности канала неравномерность движения слоя снижается, величина $\bar{V}_{cl}/V_{cl}^{max}$ возрастает, достигая постоянной величины ($0,90 \div 0,96$) при $\Delta/e \geq 0,7$ (для шаров), $\Delta/e \geq 2,0$ (для цилиндров) и $\Delta/e \geq 3,0$ (для частиц MgO). Влияние скорости на характер движения в ядре потока и на распределение скоростей по сечению не обнаружено.

1У. Исследование аэродинамики движущегося перекрестно продуваемого плотного слоя

Исследование аэродинамического сопротивления движущегося и неподвижного (остановленного) слоя огнеупорных частиц Г-70 ($d_r = 5,3$ мм и $d_r = 9,2$ мм) при поперечной продувке проводилось в изотермических и неадиабатических условиях. Наряду с этим изучалась качественная картина распределения воздуха по сечению в движущемся и неподвижном (остановленном) слое частиц.

Согласно критериальному уравнению (2), которое в данном случае упрощается (в связи с тем, что опыты проводились только с шариками Г-70, при установившихся режимах движения воздуха и насадки и стационарном тепловом режиме нагрева частиц, из рассмотрения выпадают критерии Ho и Ho_r , а также симплекс f_{zn}/f_n), в опытах было исследовано влияние всех основных факторов на распределение воздуха и аэродинамическое сопро-

тивление: геометрических размеров канала, размера частиц, скорости движения воздуха и слоя. Основное внимание уделялось „узким“ щелевидным каналам. Сделана попытка раскрыть механизм влияния исследованных факторов, для чего привлекались результаты наблюдений за характером движения слоя.

Основные положения принятой методики исследования таковы:

1) исследования аэродинамического сопротивления проводились при установившемся движении частиц в изотермических условиях и нагреве частиц при стационарном тепловом режиме;

2) безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления определялся на основании экспериментальных данных из уравнения

$$\xi = \frac{2 \Delta P}{\rho \cdot w_0^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{a} \cdot \frac{1}{H}; \quad (5)$$

3) качественная оценка неравномерности распределения воздуха в слое проводилась двумя способами:

а) с помощью термистора, установленного в выходном диффузоре, включенного по схеме $R = const$;

б) при равномерном вводе CO_2 в слой и анализе проб газозоудной смеси в различных точках по сечению на выходе из камеры.

Экспериментальная установка представляла собой вертикальную прямоугольную шахту со сменными стенками. Теплообменная камера высотой $h = 0,15$ м, шириной $\ell = 0,25$ м и глубиной $\Delta = 0,1 \div 0,25$ м расположена вне зоны влияния выпускного отверстия и условий входа.

В 2-х противоположных стенках высверлены решетки (с живым сечением - 80%) для прохода воздуха. Конструкция экспериментальной установки предусматривала запорные узлы до и после камеры. Движение материала в камере осуществлялось плотным слоем под действием гравитационных сил. Непрерывная поперечная продувка осуществлялась с помощью вентилятора. В опытах замеряли расход воздуха на входе и выходе (с помощью нормаль-

ных кольцевых диафрагм), расход насадки (весовым способом), статическое давление на входе и выходе из камеры с помощью гребенок-заборников статических давлений в 75 точках по сечению; температуры воздуха и частиц на входе и выходе из камеры в 5-9 точках по сечению для замера температурного поля на выходе (гребенками из малоинерционных термопар), а также плотность укладки в движении. При исследовании распределения воздуха в слое с помощью термисторов замеряли дополнительно силу тока в термисторе в момент равновесия моста сопротивлений. При использовании метода CO_2 проводили также газовый анализ в различных точках выходного сечения. Проведено 3 серии опытов. Толщина слоя изменялась от 250 до 100 мм, симплекс Δ/d_r от 18,9 до 28,3, скорость движения воздуха от 1,1 м/сек до 4,95 м/сек, а скорость слоя от 160 см/час до 1600 см/час. Обнаружено увеличение расхода воздуха в пристенной зоне, максимальная неравномерность распределения воздуха имеет место в тех случаях, когда наблюдается наибольшая стесненность движения слоя, т.е. симплексы Δ/d_r и ℓ/d_r минимальны. Качественная картина распределения воздуха в движущемся слое аналогична той, которая наблюдается в неподвижном (остановленном) слое. Значительное изменение скорости движения частиц не оказывает влияния на распределение воздуха в слое, что объясняется неизменностью режима движения частиц в области плотного слоя. Анализ данных по распределению воздуха в слое, полученных разными методами, показал, что неравномерность при поперечной продувке не превышает 25%, что значительно меньше, чем при противотоке. Это в основном объясняется равномерной толщиной слоя, равномерным подводом и отводом газа.

В опытах по изучению аэродинамического сопротивления скорость фильтрации изменялась от 0,2 м/сек до 6,0 м/сек, скорость слоя - от 160 см/час до 1600 см/час, критерий Рейнольдса - от 250 до 2500, симплекс Δ/d_r от

10,88 до 47,2, симплекс ℓ/d_r от 27,0 до 47,2, температура воздуха и насадки - от 50°C до 280°C , $Fr_r > 68 \cdot 10^3$. Всего проведено 96 опытов. На основе обработки опытных данных обнаружено следующее:

1) коэффициент сопротивления снижается при увеличении симплексов Δ/d_r и ℓ/d_r . Это объясняется уменьшением относительной толщины разрыхленного пристенного слоя;

2) с увеличением критерия Рейнольдса (в исследованном диапазоне) коэффициент сопротивления незначительно падает;

3) скорость движения слоя ($7 \cdot 10^4 < Fr_r < 12 \cdot 10^6$) не оказывает влияния на коэффициент сопротивления. Это объясняется неизменностью режима движения слоя в плотной структуре ($Fr_r > Fr_{кр}$);

4) коэффициент сопротивления движущегося и неподвижного слоя при прочих равных условиях одинаков;

5) сопротивление слоя увеличивается с уменьшением размера частиц, возрастанием скорости движения газа и толщины продуваемого слоя.

В результате обобщения опытных данных на основе критериального уравнения (2) получена обобщенная зависимость с вероятной погрешностью $\pm 5,8\%$.

$$\xi_{ca} = 3,83 Re^{-0,17} (\ell/d_r)^{-0,17} (\Delta/d_r)^{-0,47} \quad (6)$$

Формула справедлива при $27,2 < \ell/d_r < 47,3$;

$10,88 < \Delta/d_r < 47,3$; $250 < Re < 2500$; $0,7 < T_r/T < 0,9$; $7 \cdot 10^4 < Fr_r < 12 \cdot 10^6$;

$\varepsilon = 0,35 \div 0,37$. Здесь $Re = \frac{4 W_p \cdot \rho}{a \cdot \mu}$; $Fr_r = \frac{g \cdot D_{инл}}{\sqrt{V^2}}$.

В качестве определяющей температуры принята средняя температура воздуха; в качестве определяющей скорости - средняя скорость фильтрации воздуха в камере.

На фиг 1 представлен график зависимости коэф -
фициента сопротивления от Рейнольдса для различных ка -
налов и сопоставление с литературными данными. Удов -
летворительное согласование с данными для движущегося
слоя и более низкие значения по сравнению с неподвиж -
ным слоем объясняются отличием структуры неподвижного
слоя, засыпанного в сосуд, и сформировавшейся при уста -
новившемся движении слоя. Полученная зависимость спра -
ведлива как при изотермическом, так и при неизотермиче -
ском потоке.

У. Исследование теплообмена в движущемся перекрестно продуваемом плотном слое

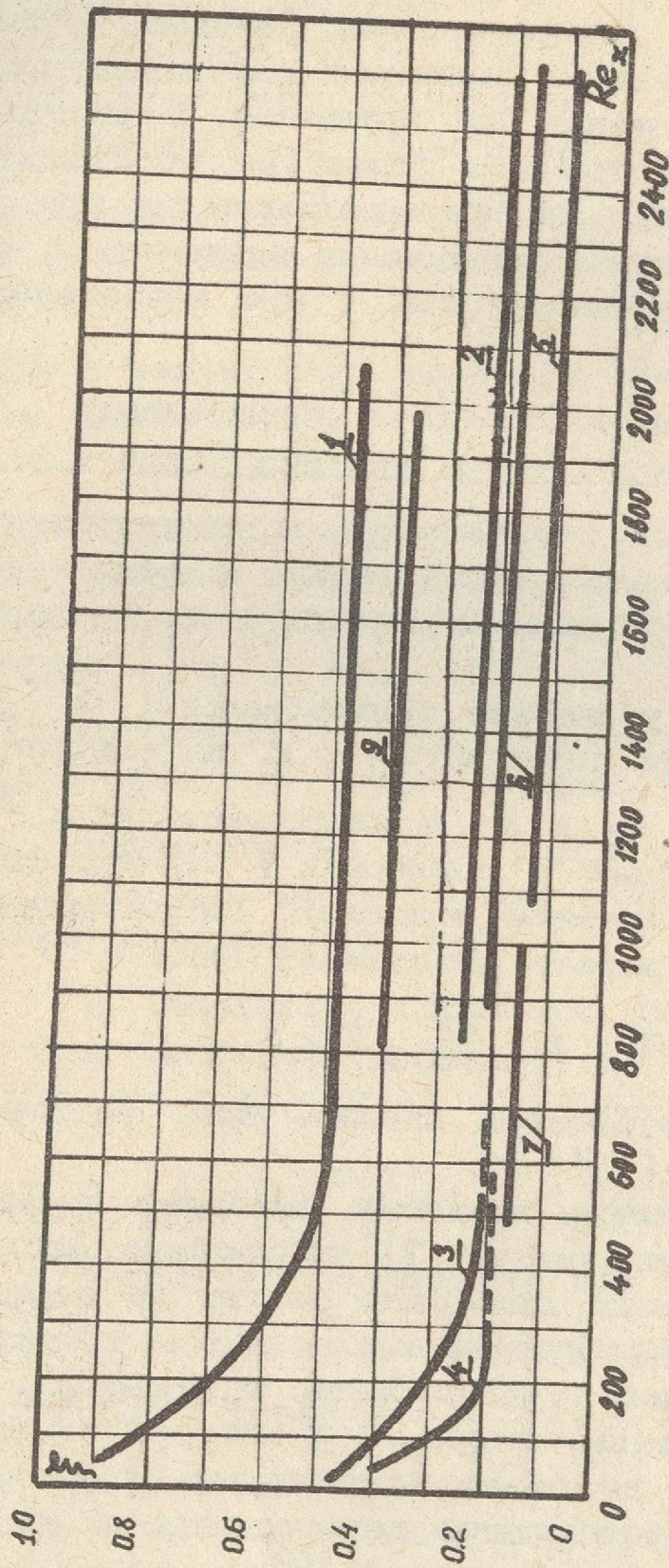
При исследовании теплообмена определялись сред -
ние по камере коэффициенты теплоотдачи, а также каче -
ственное распределение локальных значений по сечению и
толщине слоя.

Критериальное уравнение теплообмена (3) для
рассматриваемого случая упрощается, т.к. из рассмотрения
выпадают критерии Pr , Ho и Na , и симплексы T_i/T_w и f_L/f_w
(опыты проводились только с шариками Г-70 при охлаж -
дении воздуха в стационарном режиме). Тогда критери -
альное уравнение приобретает следующий вид:

$$Nu = f(Re, Fr, Bi, A/d, l/d) . \quad (7)$$

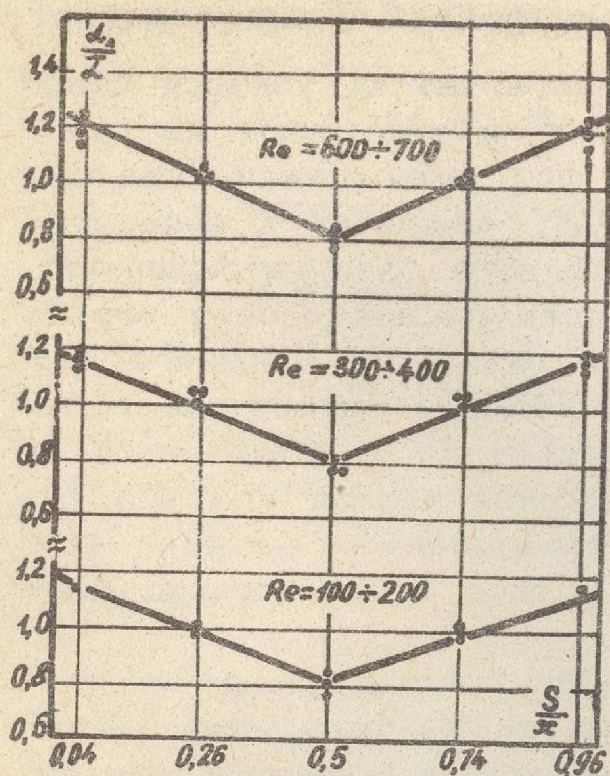
В опытах исследовалось влияние всех факторов ,
входящих в уравнение (7).

Основные положения принятой методики исследова -
ния предусматривали следующее: 1) теплообмен исследо -
вался при установившемся движении частиц по замкнуто -
му контуру, стационарном тепловом режиме и охлаждении
воздуха; 2) интенсивность теплообмена оценивалась с по -
мощью коэффициента теплоотдачи α , который подсчиты -
вался непосредственно по опытным данным; 3) качествен -
ное распределение коэффициентов теплоотдачи по сечению
изучалось с помощью термисторов ММТ-1, расположенных
в слое. Схема установки и измерений описана выше.



Фиг. 1. Зависимость коэффициента сопротивления ξ_{cl} от критерия Рейнольдса Re_x .

1 - неподвижный слой (по формуле Аэрова); 2 - противоточно движущийся слой (по данным Нортон); 3 - противоточно движущийся слой (по данным Сурина); 4 - противоточно движущийся слой (по данным Кузнецова и Чукина); 5, 6, 7 - перекрестно продуваемый слой (данные автора).



Фиг. 2. Распределение локальных коэффициентов теплоотдачи по сечению в слое.

В опытах по распределению локального теплообмена в слое использовались частицы Г-70 со средним диаметром 9,2 мм; толщина слоя составляла 250 мм, скорость продувки от 1,2 м/сек до 0,168 м/сек; $60 < Re < 600$; $7 \cdot 10^4 < Fr_r < 12 \cdot 10^6$, $\Delta/d_r = \ell/d_r = 27,2$. Всего было проведено 108 опытов. Распределение локальных коэффициентов теплоотдачи свидетельствует о наличии неравномерности теплообмена в слое (фиг.2).

Максимальный коэффициент теплоотдачи наблюдается в пристенном слое; по мере удаления к центральной зоне интен-

сивность теплообмена падает до минимума на оси канала. Подобная картина объясняется механикой движения частиц и аэродинамикой продувки слоя: максимальные коэффициенты теплоотдачи объясняются увеличением скорости воздуха в пристенной зоне, а минимальные — снижением расхода воздуха на оси канала. Анализ результатов показал, что значительное изменение расхода слоя (в 7 раз) не оказывает влияния на распределение локальных коэффициентов теплоотдачи; картина распределения в движущемся и неподвижном (остановленном) слое аналогична; равномерность распределения практически не зависит от изменения скорости движения воздуха (в исследуемых пределах). Полученные результаты согласуются с результатами исследований механики и аэродинамики. При этом неравномерность локального теплообмена в слое при поперечной продувке не превышает $\sim 25\%$, что значительно ниже, чем в случае противоточной продувки.

Зависимости интенсивности средней теплоотдачи от симплексов l/d_r и Δ/d_r , характеризующих условия стесненности, носят одинаковый характер и указывают на снижение коэффициента теплоотдачи при уменьшении этих симплексов. Уменьшение величины l/d_r приводит к возрастанию относительной толщины пристенного слоя, что влечет за собой увеличение неравномерности распределения воздуха по сечению. Это приводит к снижению среднего коэффициента теплоотдачи в слое. Падение интенсивности теплоотдачи при уменьшении симплекса Δ/d_r объясняется увеличением неравномерности движения частиц при возрастании фактора щелевидности. С уменьшением размера частиц интенсивность теплообмена в слое незначительно увеличивается.

Влияние скорости движения частиц на интенсивность теплообмена в слое обнаружено не было, что объясняется неизменностью режима движения — режим связанного движения. Увеличение скорости фильтрации приводит к возрастанию коэффициента теплоотдачи во всех сериях проведенных опытов. Влияние Vi в опытах не обнаружено.

Конечные температуры нагрева частиц и воздуха неравномерны по сечению, что характерно для перекрестноточных систем. Согласно опытным данным температуры частиц снижаются по ходу движения газа. Неравномерность температурного поля частиц увеличивается при малых расходах воздуха и снижается при малых расходах насадки. Конечные температуры воздуха возрастают по ходу движения частиц. Неравномерность температурного поля снижалась при больших скоростях движения насадки; изменение расхода воздуха практически не оказывало влияние на неравномерность конечных температур. При этом обнаружено, что степень нагрева частиц (охлаждение газа) уменьшалась при увеличении отношения водяных эквивалентов. Проведенные для характерных режимов сопоставления результатов, полученных теоретически и экспериментально, показали удовлетворительное согласование (расхождение не превышало $\pm 7\%$).

Обобщение опытных данных по теплообмену в движущемся поперечно продуваемом слое выполнено при ве-

роятной погрешности $\pm 8\%$ на основе критериального уравнения (6). Обобщенная зависимость имеет вид:

$$Nu = 24 Re^{0.6} (\Delta/d_r)^{0.42} (\ell/d_r)^{-0.7} \quad (8)$$

Формула справедлива при $28,3 \leq \ell/d_r \leq 47,2$;

$$10,88 \leq \Delta/d_r \leq 28,3; \quad 250 \leq Re \leq 3000; \quad 0,6 \leq T_r/T \leq 0,92; \quad 7 \cdot 10^4 \leq Fr_r \leq 12 \cdot 10^6.$$

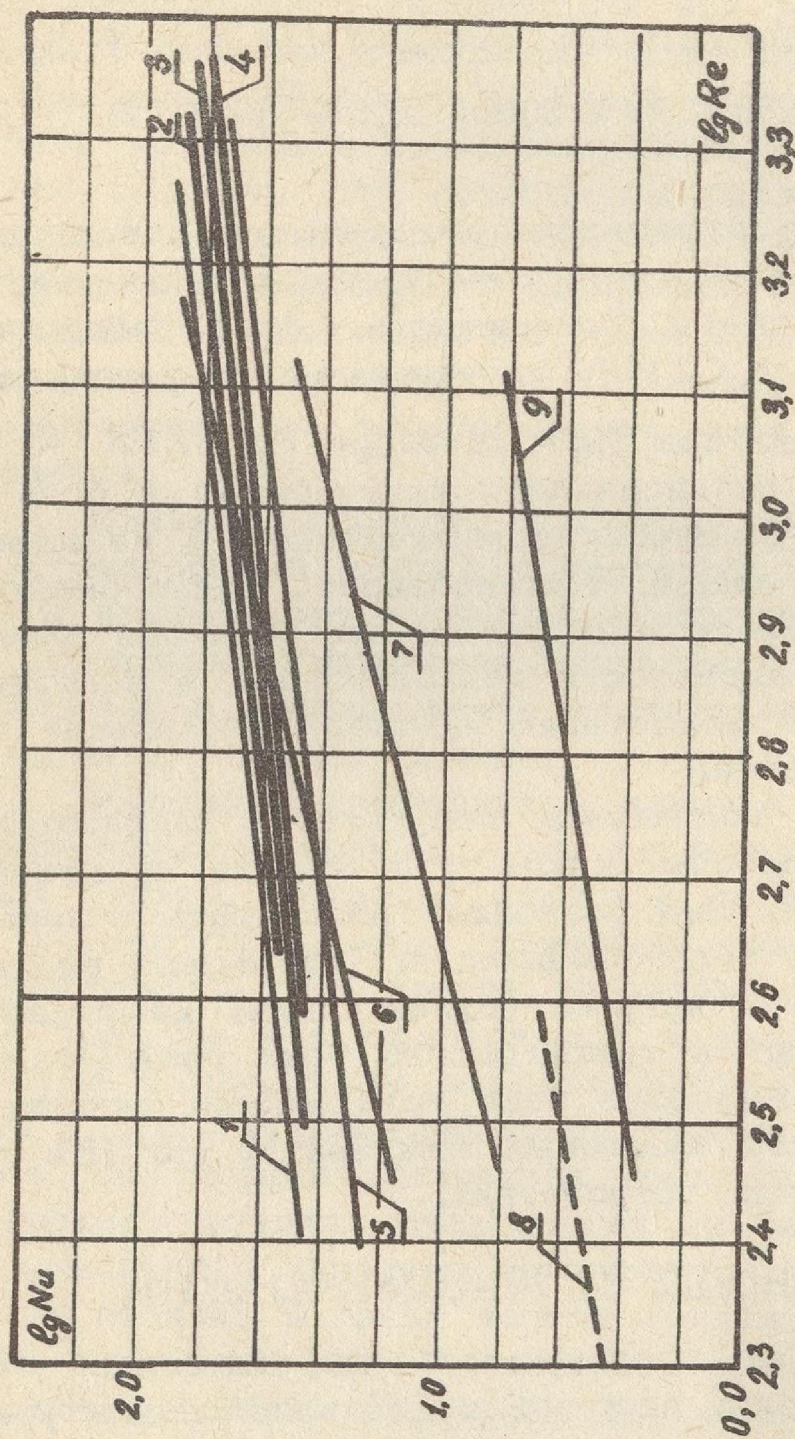
В качестве определяющего размера принят диаметр частицы, определяющей температуры — средняя температура газа в камере. Зависимость (8) обобщает также опытные данные ОТИЛ, полученные при использовании той же насадки, но при $\Delta/d_r = \ell/d_r = 40$ при $\bar{T} = 1273^\circ\text{K}$.

Сравнение интенсивности теплообмена в слое при различных схемах движения компонентов и в неподвижном слое приведено на фиг.3. Интенсивность теплообмена при поперечной продувке в 5-10 раз выше, чем при противотоке и близка к интенсивности теплопереноса в неподвижном слое. Это является следствием лучшей организации процессов, отмеченной выше.

На основе полученных результатов разработана методика расчета теплообменников с поперечно продуваемым движущимся слоем. Она позволяет рассчитать основные характеристики таких теплообменников. Проведена оценка степени неравномерности нагрева (охлаждения) компонентов в случае одно-, двух- и трехходового тока газа. Показано что за счет многоходового тока газа можно снизить степень неравномерности выходных температур до 16% против 35% при одноходовых устройствах.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основе проведенного теоретического анализа процессов получена система дифференциальных уравнений сплошности, движения, энергии, теплообмена и теплопроводности. Из анализа этих уравнений на основе теории подобия получены критериальные уравнения для механики, аэродинамики и теплообмена.



Фиг. 3. Зависимость критерия Нуссельта Nu от числа Рейнольдса Re при различных схемах движения компонентов.

1 - неподвижный слой (по формуле Тимофеева); 2,3,4 - перекрестно продуваемый вертикально движущийся слой (данные автора); 5 - неподвижный слой (данные Забродского и Житкевича); 6 - перекрестно продуваемый наклонно движущийся слой (данные Комиссарова); 7 - противоточно продуваемый слой (данные Комиссарова); 8 - смешанный ток (данные Любошица); 9 - противоточно продуваемый слой (данные Пиоро).

Полученные аналитические зависимости для расчета конечных температур насадки позволяют оценить неравномерность нагрева последней.

2. Следует различать продольную и поперечную неравномерности при движении частиц в плотном слое. Продольная неравномерность определяется условиями стабилизации движения и сказывается на входном и выходном участках. Поперечная неравномерность движения частиц зависит от соотношения коэффициентов внутреннего и внешнего трения в движении и в определенных пределах от степени щелевидности. С ростом последней поперечная неравномерность увеличивается. Число Фруда в широких пределах его изменения не оказывает влияния на неравномерность.

3. Коэффициент аэродинамического сопротивления зависит от числа Re , от условий движения частиц в канале (симплексов Δ/d_r и ℓ/d_r) и не зависит от $Fr_r = 0 \div 12 \cdot 10^6$. Наличие неизотермичности не сказывается на коэффициенте сопротивления при выборе в качестве определяющей средней температуры газа. Обобщенная зависимость (6) отражает влияние указанных факторов с погрешностью $\pm 5,8\%$.

4. Увеличение критерия Рейнольдса приводит к заметному возрастанию интенсивности теплообмена. С ростом симплексов Δ/d_r и ℓ/d_r наблюдается улучшение теплообмена в слое. Неравномерность распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по сечению невелика (порядка 25%).

5. Обобщенная зависимость (8) учитывает влияние основных определяющих факторов и описывает процесс конвективной теплоотдачи в слое при обычных и повышенных температурах с погрешностью $\pm 8\%$.

6. Основные результаты работы использованы для разработки методики расчета соответствующих теплообменников, позволяющей, в частности, оценить степень неравномерности конечного нагрева (охлаждения) слоя в зависимости от числа ходов газа. Указанная методика была использована для разработки нагревателей клинкерного сырья для ВНИИЦЕММАШа.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\bar{V}_{ca}, V_{ca}^{max}$ - соответственно средняя и максимальная по сечению скорость движения частиц; f_{ca}, f_n - соответственно коэффициенты внутреннего и внешнего трения частиц ;
 Δ, ℓ - соответственно глубина и ширина теплообменной камеры; $Fr_r = \frac{g \cdot D_{жб}}{\bar{V}_{ca}^2}$ - критерий Фруда; $Re = \frac{W_{\phi} \cdot d_r}{\nu}$ - критерий Рейнольдса; $Nu = \frac{\alpha \cdot d_r}{\lambda}$ - критерий Нуссельта; $Bi = \frac{\alpha \cdot d_r}{2 \cdot \lambda_r}$ - критерий Био; α - коэффициент теплоотдачи от газа к частице, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$; d_r - размер частиц; λ $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$, ν $\text{м}^2/\text{сек}$ - физические характеристики газа; $\bar{T}$, $\bar{T}_r$ - соответственно средняя температура газа и частиц; t_{II} - текущая температура частиц; $t_{II,i}, t_{I,i}$ - соответственно температура частиц и газа на входе в камеру; ξ' - безразмерная координата; A, B - комплексы соответственно равные $A = \frac{\alpha \cdot F}{b_{12}}$, $B = \frac{\alpha \cdot F}{b_2}$; ΔP - сопротивление слоя, мм вод.ст.; b_{12} - порозность слоя; a - поверхность теплообмена в единице объема, $1/\text{м}$;

Основное содержание диссертации изложено
 в следующих работах

1. Г.В.Мальцева, З.Р.Горбис. О локальном теплообмене в поперечно продуваемом движущемся слое. Тезисы докладов У1 республиканской межвузовской конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, 1966.
2. З.Р.Горбис, Г.В.Мальцева. О неравномерности движения частиц плотного слоя в вертикальных каналах прямоугольного сечения. ИФЖ, Минск т.У1, № 4, 1966.
3. З.Р.Горбис, Г.В.Мальцева. Исследование теплообмена в поперечно продуваемом движущемся слое. Теплоэнергетика, № 11, 1968.

4. Г.В.Мальцева. Исследование газомеханики движущегося поперечно продуваемого слоя. Материалы УIII Всесоюзной межвузовской конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. 1968.

Одесса. Результаты исследований по теме диссертации
доложены на следующих конференциях:

1. На XXVI, XXVII, XXVIII конференциях Одесского технологического института имени М.В.Ломоносова, Одесса, 1964, 1965, 1966 гг.

2. На симпозиуме по высокотемпературным теплообменникам, Ленинград, 1965.

3. На симпозиуме по тепло- и массопереносу в дисперсных системах, Минск, 1966.

4. На УI и УIII всесоюзной межвузовской конференциях по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем, 1966, 1968 гг.

5. 2 доклада приняты на III Международный конгресс
CHISA Чехословакия, Прага, 1969 .

БР 04160 Подписано к печати 7-5-69 г. Объем 1 печ. л.
Уч.изд.л. 1,2 Заказ № 80 Тираж 200 экз. 1969 г.

Лаборатория фотомеханической печати ОТИ имени М.В.Ломоносова, Одесса, ул.Свердлова,112