

Автореф.

5 43

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Аспирант БЕЛЫЙ Л.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЗВЕСИ С ТОРМОЗЯЩИМИ
СПИРАЛЬНЫМИ ВСТАВКАМИ

274 - теоретические основы теплотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1988

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Аспирант БЕЛЫЙ Л.М.

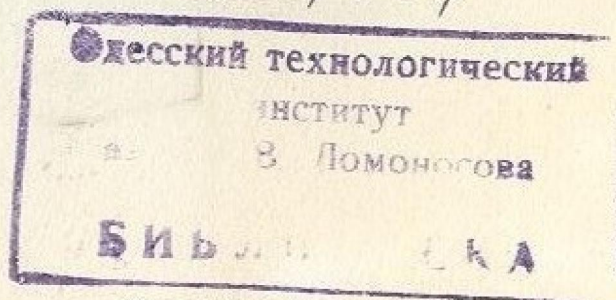
ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВЗВЕСИ С ТОРМОЗЯЩИМИ
СПИРАЛЬНЫМИ ВСТАВКАМИ



274 - теоретические основы теплотехники

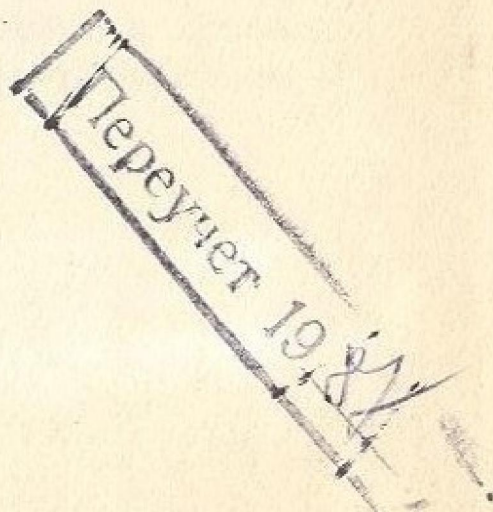
А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

С.В. / 464



Одесса - 1968

V 001464



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: доктор технических наук,
профессор ГЕЛЛЕР З.И.

кандидат технических наук,
доцент НАРЕМСКИЙ Н.К.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1968 г.

Защита состоится " 14 " ИЮНЯ _____ 1968 г.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИ.

Ученый секретарь Совета

ЗАПОРОЖЕЦ Л.А.

Создание эффективных теплообменников, работающих с высокой интенсивностью, является одной из важнейших задач, которые определяют дальнейшее развитие теплоэнергетики. Существующие конструкции воздухоподогревателей котельных и др. установок не удовлетворяют современным требованиям из-за малой эффективности теплообмена, больших затрат металла на изготовление поверхностей нагрева, возможной коррозии, особенно при использовании сернистого топлива и мазута. Проведенные в последние годы исследования показали, что для интенсификации теплообмена с успехом могут применяться теплообменные аппараты, в основу которых положен принцип механического торможения частиц, падающих во встречном потоке газов/„механически торможенная газовзвесь“/. Теплообменники типа „газовзвесь“ отличаются высокой интенсивностью тепло- и массообмена, малым гидравлическим сопротивлением, простотой конструкции, занимают небольшие производственные площади и могут быть надежны в работе. Замена на существующих паровых котлах и установка на вновь создаваемых высокоэффективных воздухоподогревателей типа „торможенная газовзвесь“ позволяет совершенно отказаться от металлозатрат на изготовление поверхностей нагрева, использовать тепло уходящих газов при глубоком их охлаждении без опасности кислотной коррозии и при значительной экономии топлива. Однако, широкому использованию подобных воздухоподогревателей препятствует недостаточность, разрозненность, а в ряде случаев и противоречивость данных по механике движения и теплообмену этих сред.

В настоящее время в литературе известны лишь несколько работ, посвященных исследованию процессов, протекающих в „торможенной газовзвеси“: С.А. Круглова и Ю.И. Скоб-ло, Д.Н. Толкачева, Г.И. Элькина и З.Р. Горбиса, Ю.И. Морозова. Поэтому изучение теплообмена в газовзвеси и исследование влияния на него различных факторов представляется как актуальная и важная проблема.

Обзор современного состояния вопроса показал необходимость решения следующих задач:

1. Попытка теоретической оценки времени пребывания твердых частиц в условиях противоточного процесса при наличии тормозящих элементов сетчатого спирального типа.

2. Экспериментальное исследование времени движения частиц и локального распределения концентрации с выбором методов исследования для получения непосредственных данных и определенной проверки теоретического решения.

3. Изучение потерь давления и интенсивности теплообмена:

а) оценка коэффициентов аэродинамического сопротивления в противоточной газозвеси при наличии сетчатых спиральных вставок с целью получения расчетных зависимостей;

б) получение коэффициентов теплообмена в зависимости от основных определяющих факторов /особенно - концентрации/ с целью выявления критериальных зависимостей, позволяющих вести тепловой расчет исследуемого типа теплообменников.

4. Оценка эффективности подобных аппаратов и разработка методики их расчета.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций.

1. Теоретическое определение времени

пребывания твердых частиц в „торможенной газозвеси“

При проектировании теплообменных аппаратов большое значение имеет знание относительных и абсолютных скоростей движения твердых частиц в газовом потоке. Имеющиеся в литературе методы определения скорости движения в газозвеси непригодны для расчета и исследования изучаемых теплообменников, т.к. они получены с учетом допущений, не свойственных теплообменникам с механическим торможением падающих частиц. З.Р.Горбисом разработан полуэмпири-

ческий способ определения времени пребывания в „торможенной газовой взвеси“, который требует определения коэффициента „С“ для учета особенности геометрических характеристик тормозящих элементов и др. факторов. Поэтому разработка менее приближенных теоретических моделей, позволяющих с приемлемой точностью рассчитывать эту величину, представляется весьма актуальной задачей. Точность решения этой задачи представляет известные трудности ввиду сложности движения частиц в подобных условиях. Поэтому, естественно, нельзя обойтись без упрощающих предпосылок для получения расчетных уравнений, имеющих практическую ценность при достаточной точности.

Можно полагать, что при незначительных объемных концентрациях движение совокупности твердых частиц аналогично движению одиночной частицы в турбулентном потоке /1-е допущение/.

Положим, что размеры отверстий в тормозящих сетках превышают размер твердых частиц более чем на 1-2 порядка. Тогда можно считать, что часть частиц при столкновении с сетками отскакивает на некоторую высоту, а затем вновь наступает участок разгона; следовательно, вероятность отскока пропорциональна отношению площадей /2-е допущение/.

Частица, выступающая за край отверстия более чем на радиус, проваливается, а меньше - отскакивает /3-е допущение/. Так же не будем учитывать вероятность двух, трех и более кратных отскоков /4-е допущение/.

Тогда очевидно, что для системы с числом n тормозящих элементов, при равном расстоянии между ними, время пребывания τ_{Σ} определится

$$K_1 \rho^{n-1} + K_2 \rho^{n-2} (1-\rho) + K_3 \rho^{n-3} (1-\rho)^2 + \dots + K_{n-2} \rho (1-\rho)^{n-2} + K_{n-1} (1-\rho)^n = \tau_{\Sigma}, \quad (1)$$

где $K_1 = n \tau_1$; $K_2 = \sum_2 [A_i(\tau_1, \tau_2)]$; $K_3 = \sum_3 [A_i(\tau_1, \tau_2, \tau_3)]$;

тогда $K_n = \sum_i [A_i(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)]$

Σ_i - i -ая сумма величин A_i , отличающихся перестановкой либо числом времен τ_i , при условии, что в каждой A_i сумма индексов „ τ “ всегда равна „ n “. A_i в свою очередь есть сумма всех τ_i , входящих в нее.

При необходимости учета времени отскока в каждой сумме A_i следует в 1-м приближении добавить величину $K\tau_0$, где τ_0 - среднее время отскока, а K - число слагаемых в данной сумме.

Вероятность отскока P в соответствии с принятыми допущениями составит

$$P = \frac{f_1 + P_0 \frac{d_T}{2}}{f_1 + f_2}, \quad (2)$$

где f_1 - площадь прохода в отверстии;

f_2 - площадь загромождения;

P_0 - периметр отверстия;

d_T - диаметр частицы.

Следовательно, для расчета необходимо знать время свободного падения частиц с различных высот, время отскока, высоту отскока и его вероятность.

При противоточном движении воздуха вводятся еще некоторые упрощающие допущения:

а) местным изменением скорости противоточного воздуха при прохождении через тормозящие элементы пренебрегаем;

б) рассматривается случай, когда скорость отскочившей частицы в момент отскока меньше скорости воздуха.

Если v_B - скорость противоточно движущегося воздуха, то для отскочившей частицы получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d v \cos \beta}{dt} = -g + \frac{3}{2} \frac{c_f \cdot \tau}{\gamma_T \cdot d} (v_B - v \cdot \cos \beta)^2. \quad (3)$$

Используя соответствующее начальное условие, получим уравнение для скорости отскока

$$v \cos \beta = \frac{(x_0 - v_B) \left[\frac{x_0 + v_B}{x_0 - v_B} - \alpha_1 e^{\frac{2g\tau}{x_0}} \right]}{1 + \alpha_1 e^{\frac{2g\tau}{x_0}}}, \quad (4)$$

где
$$\alpha_1 = \frac{x_0 + v_B - v_0 \cos \beta_0}{x_0 - v_B + v_0 \cos \beta_0}, \quad (5)$$

$$x_0 = \sqrt{\frac{2g\gamma_T d_T}{3\gamma C_f}}. \quad (6)$$

Поскольку конец отскока соответствует условию $v \cos \beta = 0$, получим время отскока $\tau_{от}$

$$\tau_{от} = \frac{x_0}{2g} \ln \frac{(x_0 + v_B)}{(x_0 - v_B)} \left(\frac{x_0 - v_B + \kappa v_0 \cos \beta_0}{x_0 + v_B - \kappa v_0 \cos \beta_0} \right) \quad (7)$$

и высоту отскока $h_{от}$

$$h_{от} = \frac{\beta}{2 \cdot u} \cdot \ln \frac{(1 + \alpha_1)^{1+\alpha}}{(\alpha_1 + e^{-\frac{2g\tau_{от}}{x_0}})(1 + \alpha_1 e^{\frac{2g\tau_{от}}{x_0}})^{\alpha}}, \quad (8)$$

где $\beta = x_0 - v_B$; $\alpha = \frac{x_0 - v_B}{x_0 + v_B}$; $u = \frac{2g}{x_0}$.

При отсутствии противоточного движения воздуха движение отскочившей частицы описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{d_T (v_T \cos \beta)}{dt} = - \left[g + \frac{3}{2} \frac{C_f \gamma}{\gamma_T d} (v_T \cos \beta)^2 \right] \quad (9)$$

$$\frac{d (v_T \sin \beta)}{dt} = \frac{3}{2} \frac{C_f \gamma}{\gamma_T d} (v_T \sin \beta)^2.$$

Поскольку конец отскока физически соответствует условию $v \cos \beta = 0$, получим формулы для расчета времени отскока:

$$\tau_0 = \frac{\arctg \left(\sqrt{\frac{3}{2g} \frac{C_f \gamma}{\gamma_T d}} v_0 \cos \beta_0 \right)}{\sqrt{\frac{3}{2} \frac{C_f \gamma}{\gamma_T d} \cdot g}} \quad (10)$$

и высоты отскока

$$h_0 = - \frac{x_0^2}{g} \frac{\ln \cos \left[\frac{g \tau_0}{x_0} - \arctg \left(\frac{v_0 \cos \beta}{x_0} \right) \right]}{\cos \left(- \arctg \frac{v_0 \cos \beta_0}{x_0} \right)} . \quad (11)$$

II. Экспериментальное исследование механики движения частиц в торможённой газозвеси с помощью метода меченых частиц и бета-изучения

Экспериментальное изучение механизма движения в двухфазном потоке „газ-твёрдые частицы“ сводится к определению истинных и средних значений скоростей и концентраций твёрдых частиц по длине и сечению потока. Как показано З.Р.Горбисом, знание этих важнейших характеристик, определяющих структуру дисперсной системы, соотношение дискретного и сплошного компонентов во времени и пространстве очень важно, т.к. это предопределяет аэродинамические и тепловые процессы в „газозвеси“.

Проведенный в работе анализ существующих методов экспериментального определения скорости и истинной концентрации в системе „газ-твёрдые частицы“ показал целесообразность использования радиоактивных изотопов. В качестве дублирующего применен групповой метод мгновенных отсечек.

а) определение скорости / времени / движения методом меченых частиц

Экспериментальная установка состоит из стенда торможённой газозвеси и электронного блока для регистрации заряженных частиц. Стенд состоит из цилиндрической камеры высотой 0,8 и диаметром 0,34 м, которая выполнена из органического стекла для осуществления визуального наблюдения.

Конструкция камеры позволяет производить смену тормозящих винтовых сетчатых вставок.

Универсальный двухканальный электронно-релейный блок УРАП-2АМ срабатывает от радиоактивного датчика только при наличии радиоактивного излучения. Для обеспечения срабатывания релейного блока при нахождении заряженной частицы на данной высоте и во избежание ложных срабатываний датчик был помещен в специально изготовленный

свинцовый контейнер.

Источником излучения является частица /шарик алюмосиликата/ диаметром $d_T = 4,35$ мм, меченная ^{60}Co активностью 0,5 мг - экв. Ра.

Вначале для проверки методики были проведены опыты по определению времени свободного падения одиночной меченой частицы, которое сопоставлялось с теоретически рассчитанной величиной при $v_B = 0$. Время τ находилось из выражения

$$H = \frac{v_{\text{внт}}^2}{g} \ln ch \frac{g\tau}{v_{\text{внт}}} \quad (12)$$

Многократное определение /до 20 раз/ опытного времени, в течение которого меченая частица проходила контрольный участок камеры, дало $\tau_{\text{оп}} = 0,25$ сек. Это определение совпадает с расчетным с погрешностью +4%, что лежит в пределах точности эксперимента. В связи с указанным принятая методика проведения опытов в дальнейшем была использована при противоточном движении в воздухе ($v_B > 0$) одиночной частицы и их массы.

Для изучения влияния геометрических характеристик винтовых вставок на длительность движения частиц были изготовлены три сплошные винтовые спирали с шагом $h = 0,2, 0,15, \text{ и } 0,1$ м, углом наклона витка соответственно $10^\circ 30', 8^\circ \text{ и } 5^\circ 20'$ и числом витков $n=4; 5,33 \text{ и } 8$. Высота вставки $H=0,8$ м, что соответствовало высоте камеры стенда.

Для опытов с продуваемыми винтовыми вставками были использованы сетки с диаметром отверстий $d_{\text{от}} = 2,8$ и 5 мм. В первом случае $d_{\text{от}}/d_T < 1$ имеет место лишь качение частиц, а во втором - $d_{\text{от}}/d_T > 1$ / качение совмещалось с просыпанием частиц с одного витка на другой.

Наилучшие результаты по увеличению времени пребывания частицы получены при $d_{\text{от}}/d_T < 1$. При этом τ/τ_c было порядка 40, незначительно изменяясь с увеличением скорости воздуха. В опытах с $d_{\text{от}}/d_T > 1$ превышение длительности нахождения частицы в камере с винтовой вставкой над

временем ее пребывания в камере без вставки составило порядка $\tau_r/\tau_c \approx 18$. Опыты, проведенные с массой частиц при изменении расходной концентрации M до 1,75 кг.час/кг.час показали, что увеличение концентрации частиц приводит к некоторому увеличению τ и, следовательно, τ_r/τ_c , что объяснимо влиянием соседних частиц на условия движения каждой из них.

Однако, так как создаваемая при этом стесненность движения невелика и изменение τ_r/τ_c весьма мало, влиянием концентрации при $M \leq 1,5 \div 2 / \sim 0,0003 \div 0,00035 \text{ м}^3/\text{м}^3$ можно пренебречь. Этот вывод согласуется с представлениями З.Р.Горбиса о влиянии концентрации на характер движения дисперсных частиц в подобных условиях.

б) изучение распределения концентрации методом β -излучения

Исходя из проникающей способности радиоактивного излучения и ожидаемой концентрации твердых частиц в установке в качестве источника излучения был применен стандартный бета-излучатель БИ-1 /препарат стронций 90 + иттрий 90 с максимальной энергией $E_{\text{max}} = 2,18 \text{ Мэв/}$.

При прохождении β -излучения через слой вещества изменение интенсивности излучения I примерно до значения

$X = \frac{?}{\rho}$ / описывается уравнением

$$N = N_0 e^{-M_1 X} \quad (13)$$

Зная линейный коэффициент ослабления M_1 , поток бета-частиц при отсутствии поглотителя N_0 и после прохождения через него N можно определить по (13) толщину просвечиваемого слоя, а затем - линейную концентрацию

$$X = \frac{\ln N_0 - \ln N}{M_1} \quad (14)$$

Для проверки выражения (14) проведены тарировочные опыты. Расхождения опытных и расчетных данных не превышают 3% при $X \leq 0,3$ см.

Экспериментальная установка состоит из стенда „торможенной газозвеси“, радиометра ПП-8 и источника β -излучения БИ-1. Источник излучения и блок фотоумножителя помещаются в свинцовые контейнеры для уменьшения окружающего фона и рассеянного излучения. Для формирования пучка бета-лучей в свинцовых контейнерах имеются соосные цилиндрические каналы /коллиматоры/ диаметром $\Phi=5$ мм.

Просвечивание производилось между витками спиральной вставки в 3-х сечениях по высоте исследуемой камеры и в 3-5 точках по каждому сечению во взаимно перпендикулярных направлениях. В качестве твердой фазы использовался фракционированный кварцевый песок с диаметром частиц $d_T=0,6$ мм.

Среднеквадратичное отклонение числа фиксируемых частиц оценивалось по $G_{\varphi} = \frac{100}{\sqrt{N\tau}}$. В наших опытах $N\tau$ было порядка 7000 импульсов, откуда $G_{\varphi} = \pm 1,2\%$. При движении дисперсного потока G_{φ} возрастает и при $\beta = 38 \cdot 10^{-4}$ достигало $\pm 3,33\%$.

Анализ полученных результатов показал, что изменение режимов в пределах $Re=0 \div 2,86 \cdot 10^4$ и $M=1,24-2,91 \frac{\text{кг. час}}{\text{кг. час}}$ на характере распределения насадки по камере не сказывалось. За счет эффекта аэродинамического торможения падающих частиц встречным потоком воздуха удалось повысить концентрацию дисперсного компонента лишь на 20% /по сравнению со случаем, когда $U_B=0$ /. Дальнейшее повышение скорости воздуха сверх 1,9 м/сек приводило к уносу твердых частиц. В газозвеси с винтовыми сетчатыми вставками при прочих равных условиях достигалось увеличение концентрации в 3 и более раз. Однако, степень неравномерности распределения частиц по сечению, оцененная по отношению максимального и среднего значения β_1 , различна. Для торможенного потока при использовании пробивной сетки с $\frac{d_{от}}{d_T} = 8,33$

степень неравномерности заметно больше, чем в свободной газовой взвеси, а при использовании плетеной сетки с $d_{от}/d_r = 3,66$ - примерно та же.

Важно отметить влияние числа тормозящих элементов на изменение средней по сечению концентрации, которое удалось оценить благодаря применению метода β - просвечивания. Как выяснилось, каждый последующий виток спиральной вставки увеличивает концентрацию. Зависимость после первого витка - прямая; ее наклон зависит от числа Re , а также от геометрических характеристик используемых сеток.

Результаты, полученные методом β - просвечивания во взаимно перпендикулярных направлениях, показали, что распределение концентрации насадки по камере симметрично.

Прозрачная камера стенда позволила также производить визуальные наблюдения за процессом. Характерным является образование на сетках неразвитого псевдооживленного движущегося слоя, распределенного по виткам спирали. Движение частиц чередуется с просыпанием через отверстия сеток на нижние витки спирали. Высота псевдооживленного слоя колеблется в зависимости от расхода насадки, скорости воздушного потока в камере и вида используемой сетки. Максимальная высота слоя достигла на сетке с $d_{от}/d_r = 8,33$ примерно $25-30 d_r$.

Результаты по определению средней объемной концентрации по камере, полученные двумя методами - методом отсечек и методом бета-просвечивания, сведены в таблицу № 1 /расхождения не превышают 10%/. Значения β_{ϕ} , полученные методом просвечивания, даны несколько заниженными результатами, т.к. полностью не учитывалось повышение концентрации за счет псевдооживления твердых частиц на витках сеток.

Определение β при неравномерной подаче твердой фазы по сечению камеры /насадка подавалась по центру через два отверстия $\phi 25$ мм/ выявило выравнивающее действие спиральной вставки. Однако, при числе витков $n = 5,33$ достичь полной равномерности распределения не удалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОНЦЕНТРАЦИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ
МЕТОДОМ ОТСЕЧЕК И МЕТОДОМ БЕТА-ПРОСВЕЧИВАНИЯ

№ п/п	Расход насадки кг/час	Расход воздуха кг/час	Средняя объемная концентрация $\beta \cdot 10^4$ м ³ /м ³	Метод отсечек		Метод просвечивания	
				Свободная взвесь	Газовзв. сетка	Свободная взвесь	Газовзв. сетка
				$\frac{d\sigma}{dr} = 3,66$	$\frac{d\sigma}{dr} = 8,33$	$\frac{d\sigma}{dr} = 3,66$	$\frac{d\sigma}{dr} = 8,33$
1.	550	0	5,8	12,6	12,8	5,75	11,8
2.	1026	0	9,6	22,3	22,0	9,64	20,6
3.	608	374	6,53	15,6	14,4	6,35	14,5
4.	1090	374	12,0	27,8	28,3	12,0	25,0
5.	663	526	9,2	22,5	24,0	8,9	21,0
6.	1233	526	14,4	32,2	32,0	14,0	29,8

Оценка с помощью β -излучения эшор изменения концентраций по сечению и высоте противоточной камеры позволила выявить нарастание истинной концентрации по ходу частиц, достаточную равномерность распределения частиц по сечению, целесообразность использования сеток с малым отношением $d_{от}/d_1$ и большим живым сечением. Последнее также позволяет заметно снизить аэродинамическое сопротивление.

Ш. Исследование аэродинамики и теплообмена в противоточной газозвеси

Основные экспериментальные исследования проводились на стенде камеры противоточная газозвесь, на котором было изучено влияние геометрических и режимных факторов винтовых сетчатых вставок на аэродинамику и интенсивность теплообмена. В качестве проверки предложенного метода часть опытов проводилась на полупромышленном воздухоподогревателе ОТИЛ на Одесской ТЭЦ.

При проведении опытов по теплообмену на стенде были установлены электронагреватель и циклон для сброса мелких частиц, уносимых из камеры. Замер температур воздуха и насадки осуществлялся хромель-копелевыми термопарами с выводом на потенциометр КП-59, что обеспечивало погрешность измерения, не превышающую $\pm 0,1^\circ\text{C}$ или 0,2 - 0,3%. Поле температур воздуха определялось в трех сечениях по высоте установки с помощью гребенок из семи хромель-алюмелевых термопар (толщиной проводника 0,4 мм). Расположение горячих спаев термопар в гребенке соответствовало тем точкам, в которых измерялись скорости воздушного потока в установке. Горячие спаи термопар защищались от соприкосновения с твердыми частицами мелкой металлической сеткой.

Для определения поля скоростей был использован термистор типа ММТ-1 прямого подогрева в схеме термоанемометра. Термистор помещался в специальный датчик и был защищен от соприкосновения с твердыми частицами насадки мелкой металлической сеткой. Кроме того, конструкция датчика позволила определять не только скоростные характеристики воздушного потока, но и его направление.

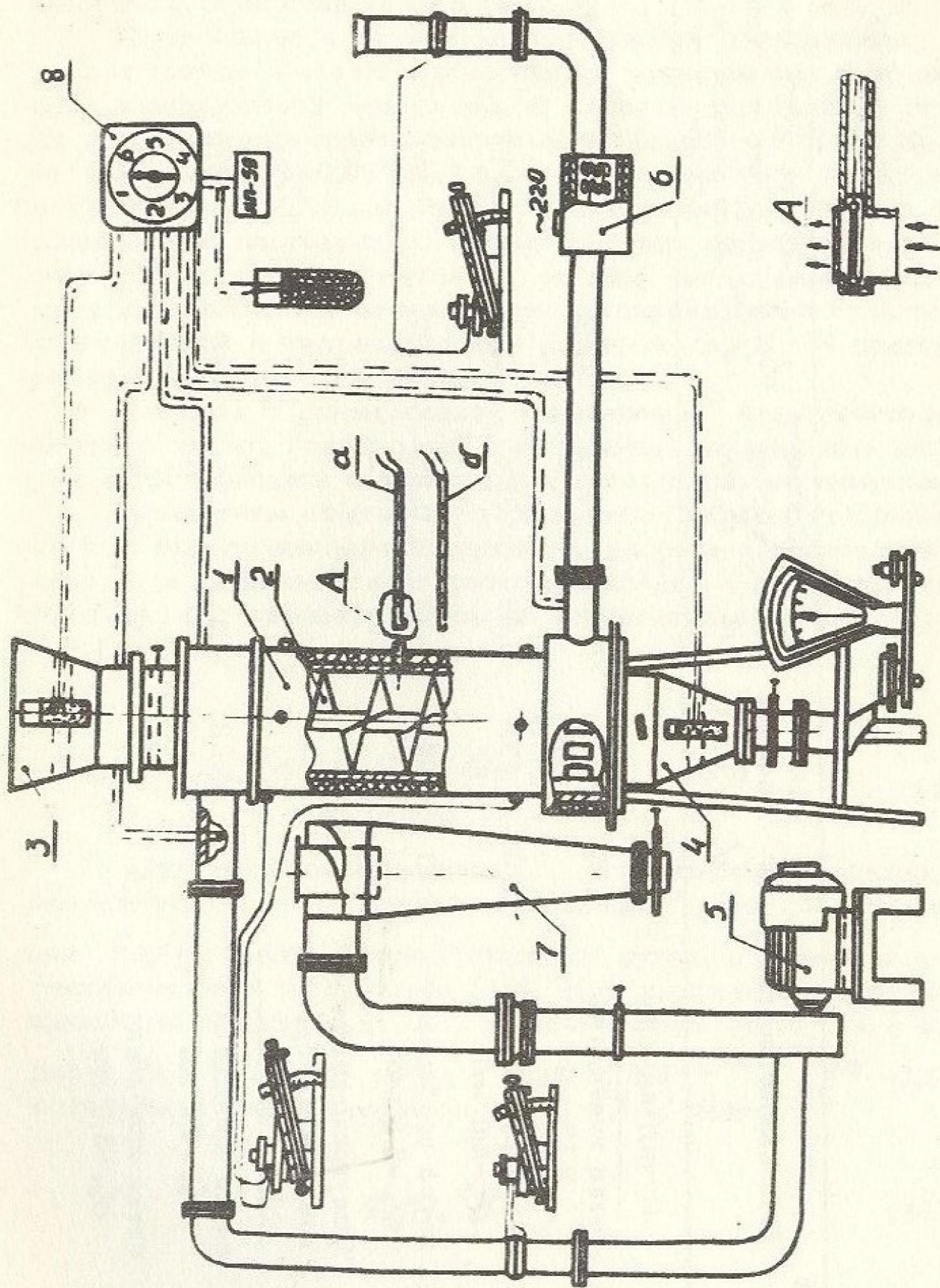


Рис. 1. Схема измерений

Таблица № 2

№№ п.п.	Используемые сетки	$d_{от} / d_{т}$	Живое сечение $F_{ж.с.} \%$	Число витков n	Диаметр частиц $d_{т}$ мм	$d_{от} \cdot F_{ж.с.} / d_{т}$	Эквивалентный диаметр камер $D_{к}$, мм	Высота камеры L , мм.
Стенд камеры								
1.	сетка плетеная $2,18$ мм	3,35	66	5,33	0,65	2,22	340	800
2.	сетка пробивная $d_{от} = 5,0$ мм	7,70	35,9	5,33	0,65	2,76	340	800
3.	сетка пробивная $d_{от} = 2,8$ мм	4,30	29,8	5,33	0,65	1,28	340	800
Полупромышленный воздухоподогреватель								
тель								
4.	сетка пробивная $d_{от} = 4,5$ мм	6,0	32,8	7,50	0,75	1,97	670x670	1680
5.	сетка пробивная $d_{от} = 3,0$ мм	4,0	30,7	7,50	0,75	1,23	670x670	1680

Схема замеров, производимых при проведении опытов по теплообмену, представлена на рис.1.

Теплообмен в измерительном участке определялся с учетом потерь в окружающую среду, оцениваемых с помощью поверхностной термодпары. В качестве насадки на стенде использовался фракционированный кварцевый песок диаметром частиц $d_T = 0,65$ мм, а на полупромышленном воздухоподогревателе $d_T = 0,75$ мм. Расход насадки контролировался в течение опыта многократно. Геометрические характеристики используемых винтовых сетчатых вставок представлены в таблице 2. Теплообмен изучался при установленном стационарном тепловом и гидравлическом режимах при 3 - 4 повторных замерах для каждого режима работы.

Опытам с „торможеной газозвесью“ предшествовали опыты с чистой /свободной/ газозвесью, результаты которых сопоставлялись с известными литературными данными.

Результаты опытов по определению времени теплообмена τ , определяющего поверхность нагрева в теплообменной камере, в зависимости от расхода насадки G_H и скорости воздуха V_B обрабатывались по теоретической формуле З.Р.Горбиса.

$$\frac{\tau_T}{\tau_c} = C \frac{(n+1) \cdot V_{\text{внт}}^2 \cdot \ln \frac{2}{1+K_V} + Lg}{V_{\text{внт}}^2 \cdot \ln \frac{2}{1+K_V} + Lg} \quad (15)$$

При этом коэффициент „С“, учитывающий специфику механического торможения, определялся путем сопоставления τ_T/τ_c , полученного опытным путем, с величинами, рассчитанными по формуле (15). Как выяснилось, этот правочный коэффициент „С“ зависит только от K_V и в пределах $29,8 < F_{\text{ж.с}} < 66\%$; $d_{\text{от}}/d_T = 3,35 - 7,7$; $M = 0,5 - 6$ с погрешностью, не превышающей 9,1%, равен

$$C = 1,51 K_V^{0,545} \quad (16)$$

V 00 1464
С.В. 1464

Полученные опытные данные по времени пребывания /теплообмену/ твердых частиц в газозвеси, торможение которых осуществлялось с помощью винтовых сетчатых вставок, позволили сопоставить их при прочих равных условиях (рис.2), с расчетными величинами, полученными по предложенной методике теоретического определения времени, представленной в главе 1, и значениям, найденным по формуле (15). Результаты сопоставления опытных и расчетных данных

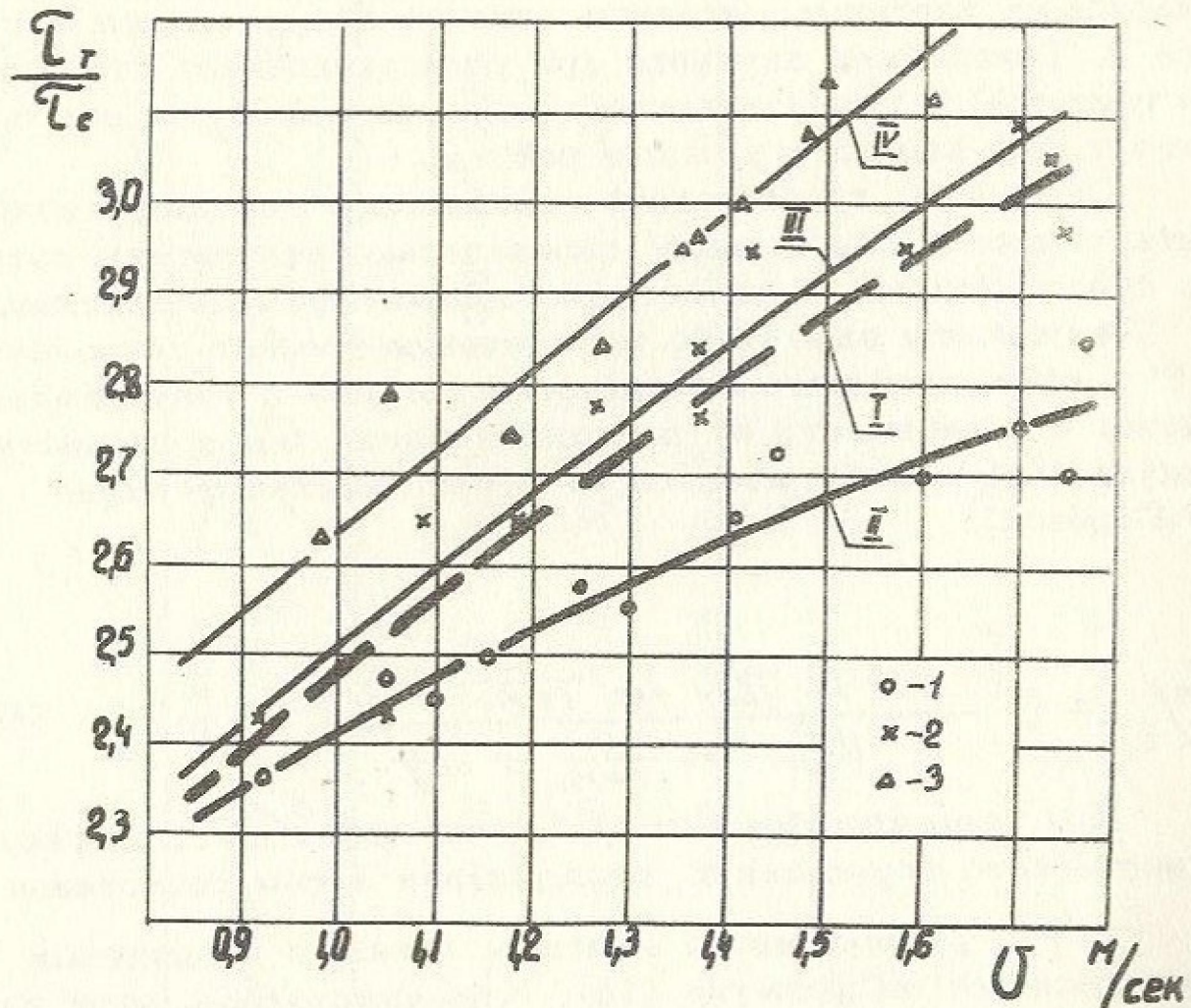


Рис. 2.

1 - по формуле З.Р.Горбиса
 П, Ш, 1У - расчет
 1, 2, 3 - опыт

времени пребывания в „торможенной газозвеси“ подтверждают целесообразность принятой теоретической модели рас-

чета, т.к. расхождения значений можно признать вполне удовлетворительными /± 8%/ и не выходящими за пределы погрешности экспериментальных данных.

Исследование распределения воздушного потока в камере стенда показало необходимость установки вертикальных глухих перегородок, препятствующих проходу воздуха между витками, и направляющих поток строго противоточно падающей насадке. Изучение полей скорости воздуха позволило обнаружить следующее: а) спиральные сетки благоприятно влияют на равномерность распределения воздуха и насадки по сечению камеры; б) присутствие насадки в камере несколько /до 8%/ увеличивает среднюю скорость воздуха в ней, что объяснимо уменьшением живого сечения камеры; в) наличие твердых частиц сглаживает неравномерность распределения воздуха, благодаря своеобразному перемешивающему и решеточному эффекту. Коэффициент аэродинамического сопротивления сетчатых вставок $\xi_{сет}$, на основе полученных опытных данных при $29,8 < F_{ж.с.} < 66\%$; $3,35 < d_{от}/d_r < 7,7$; $Re = /1,98-3,2/ \cdot 10^4$; $n = 5,33$ может быть определен по формуле

$$\xi_{сет} = 19,5 \cdot Ae^{-0,25} \left(\frac{1}{F_{ж.с.}} \cdot \frac{d_{от}}{D_k} \right)^{-0,3}, \quad (17)$$

с ошибкой, не превышающей ± 6,8%.

Коэффициент аэродинамического сопротивления, вызванный наличием движущейся насадки ξ_r , определялся как

$$\xi_r = \xi_{общ} - \left(\xi_{сет} + \xi_e \frac{D}{L} \right) \approx \xi_{общ} - \xi_{сет}. \quad (18)$$

Окончательная обработка результатов позволила получить обобщенную расчетную формулу /с ошибкой ±10%/ коэффициента аэродинамического сопротивления ξ_r

$$\xi_r = 2,51 \cdot 10^{10} \cdot Ae^{-0,9} \left(\frac{d_{от}}{d_r} \cdot F_{ж.с.} \right)^{-7,8} \cdot \beta^{0,726} \quad (19)$$

в пределах изменения величин $1,98 \cdot 10^4 < Re < 8,0 \cdot 10^4$;

$$1,23 < \left(\frac{d_{or}}{d_T} \cdot F_{ж.с.} \right) < 2,76; \quad 0,65 \cdot 10^{-3} < \beta < 12 \cdot 10^{-3}.$$

Анализ экспериментально полученных полей температур воздуха по сечению камеры показал их симметричность с максимумом по оси и спадом к периферии. С увеличением объемной концентрации частиц β в камере профиль температур выравнивается по сечению, а при $\beta > 2,5 \cdot 10^{-3}$ наблюдается тенденция к снижению температуры газа по оси камеры.

Для каждого участка теплообменной камеры стенда методом тепловых балансов и на основе измеренных температурных полей рассчитывался температурный напор Δt . Как выяснилось, изменение расходной концентрации β способствует перераспределению температурного напора по высоте установки. Кроме того, оценка температурного напора только по граничным значениям температур компонентов приводит к кажущимся величинам α , которые только в силу неточной оценки $\Delta t_{ср}$ занижены на 11%.

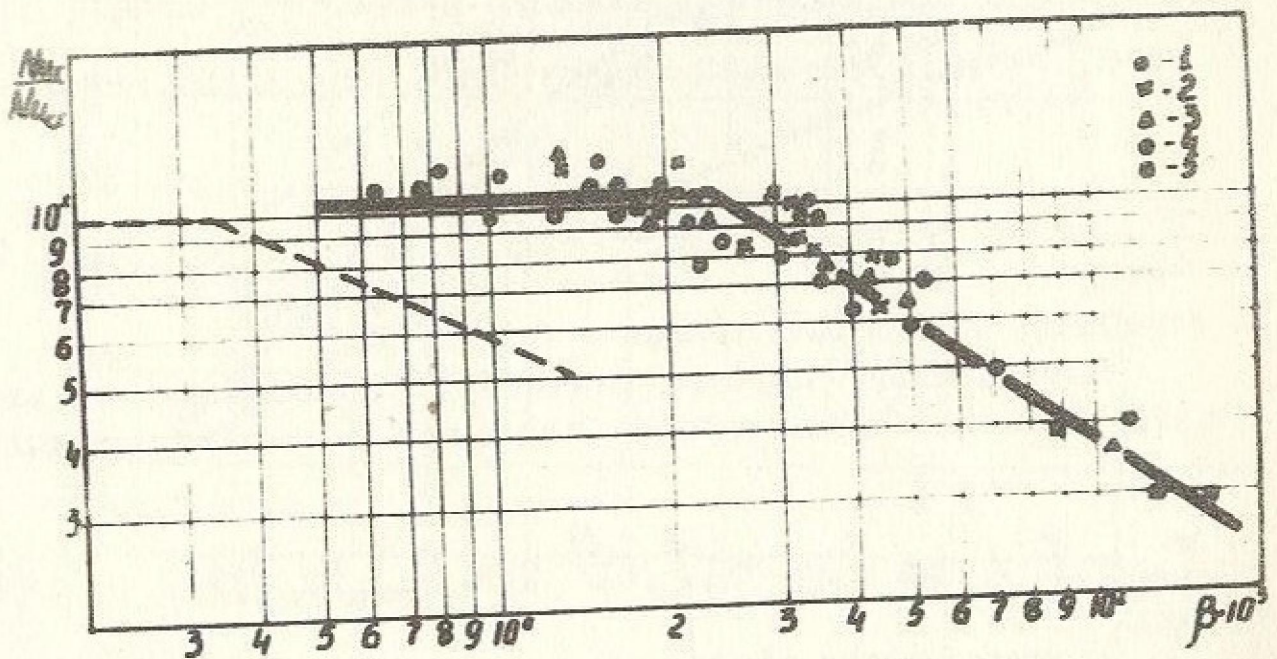


Рис. 3.

Для изученных условий влияние концентрации β на падение относительной интенсивности теплоотдачи Nu_T / Nu_C наступает значительно позже, чем при свободной газовой взвеси /примерно, при $\beta = 2 \cdot 10^{-3}$ / (рис.3). Полученные опытные данные:

анприксимируются зависимостью

$$\frac{Nu_T}{Nu_c} = 0,0166 \cdot \beta^{-0,692}, \quad (20)$$

которая справедлива с точностью $\pm 5,3\%$ в пределах изменения основных определяющих факторов

$$0,65 \cdot 10^{-3} < \beta < 12 \cdot 10^{-3}; \quad 3,35 < d_{or}/d_T < 7,7;$$

$$1,82 \cdot 10^4 < Re < 8,2 \cdot 10^4; \quad 29,8 < F_{ж.с.} < 66\%.$$

Подставляя в (20) зависимость, полученную З.Р.Горбисом, для случая „свободной газозвеси“ $Nu_c = 0,186 \cdot Re_T^{0,8}$, окончательно получим

$$Nu_T = 0,0031 \cdot Re_T^{0,8} \cdot \beta^{-0,692}. \quad (21)$$

Очевидно, что для определения Nu_T необходимо знание β . Она может быть определена как

$$\beta = m \frac{\gamma_B}{\gamma_T} \cdot \frac{K_V}{1 - K_V} \cdot \frac{\tau_T}{\tau_c} \quad (22)$$

где τ_T/τ_c оценивается зависимостью (15).

Как видно, интенсивность теплообмена снижается с ростом объемной концентрации β , что согласуется с литературными данными. Наряду с этим, увеличение β все более приводит к оценке кажущегося эффективного, а не истинного коэффициента теплообмена α .

Однако, следует учесть, что количество передаваемого тепла определяется не только коэффициентом теплообмена

α , но и размером поверхности одновременно находящихся в камере частиц $F = f(\beta)$. Таким образом, торможение газозвеси целесообразно лишь в том случае, когда уменьшение первого фактора снижается в меньшей степени, чем увеличение второго. Для оценки этого положения использовалось понятие об объемном коэффициенте теплообмена α_V . Связь между критериями Nu_T и Nu_V может быть представлена как

$$Nu_V = 6\beta \cdot Nu_T. \quad (23)$$

Окончательная обработка экспериментальных результатов велась методом наименьших квадратов на электронной цифровой вычислительной машине „Раздан-2“.

Опытные данные, полученные на исследовательском стенде и на полупромышленном воздухоподогревателе ОТИИ, хорошо согласуются, подтверждая высокую эффективность теплообменников подобного типа.

1У. Методика и расчет воздухоподогревателя „газовзвесь“

Методика теплового и аэродинамического расчета воздухоподогревателя типа „торможенная газовзвесь“ разработана на основе полученных обобщенных расчетных зависимостей.

Используя разработанную методику расчета, был произведен примерный расчет воздухоподогревателя применительно к котлу ПК-19 Добротворской ГРЭС, производительностью 120 т/час со снижением температуры уходящих газов $t_{ух} = 75^{\circ}\text{C}$.

На основании приведенного технико-экономического расчета определен годовой экономический эффект при установке воздухоподогревателя на котел, который составит 22 500 руб, при стоимости топлива 12 руб. за 1000 нм^3 газа Дашавского месторождения.

Основные выводы

1. Для создания эффективных и неметаллических теплообменников с успехом могут применяться воздухоподогреватели, в основу которых положен принцип механического торможения противоточной дисперсной системы типа „газовзвесь“. Однако, недостаточность данных о подобных системах препятствует их широкому использованию.

2. Получена методика теоретического расчета времени пребывания в подобных аппаратах с учетом вероятностных условий движения твердых частиц. Сопоставление расчетных и опытных данных подтверждает целесообразность выбранной

модели расчета, т.к. расхождение результатов вполне удовлетворительное и не выходит за пределы погрешности эксперимента.

3. Экспериментальное исследование скорости движения и концентрации твердых частиц выполнено на основе использования радиоактивных изотопов: методом меченых частиц и бета-излучения. Одновременно использован метод быстрых отсечек. Выявлено, нарастание истинной концентрации по ходу частиц, достаточная равномерность распределения частиц по сечению, выравнивающее действие спиральных вставок, целесообразность использования сеток с малым отношением $d_{от}/d_T$ и большим живым сечением. Также установлено, что влияние противоточного воздуха на весовую концентрацию сказывается в большой степени для механически торможеной газозвеси, чем для свободной.

4. Использованные сетчатые винтовые вставки, позволили наиболее эффективно реализовать метод механического торможения. На основе опытных данных выбран оптимальный угол наклона и шаг витка спирали. Предложены некоторые рекомендации по изготовлению и установке винтовых вставок в аппаратах различной формы и габаритов теплообменных камер. Установлено, что использование винтовых сетчатых вставок позволяет на порядок увеличить длительность нахождения частиц в противоточной газозвеси и организовать различные режимы их движения /качение, качение-просывание, псевдооживление с просыванием и без него и пр./.

5. Получены обобщенные зависимости для расчета коэффициентов аэродинамического сопротивления движению твердых частиц ξ_T и сетчатых винтовых вставок $\xi_{сет}$, учитывающие влияние основных определяющих факторов.

6. Установлено, что характерный профиль поля температур газа, с максимумом по оси и симметричным спадом к периферии, с увеличением концентрации в камере выравнивается по сечению, но при $\beta > 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$ этот эффект нарушается.

7. Подтверждено, что интенсивность теплообмена в газозвеси с исследованными винтовыми вставками с ростом

объемной концентрации падает. Однако, при преобладающей роли поверхности нагрева (поверхности насадки, одновременно находящейся в камере) количество передаваемого тепла (оцененное α_v , Nu_v) растет и оказывается заметно выше, чем для свободной газовой взвеси.

Влияние концентрации на падение относительной интенсивности теплообмена Nu_t/Nu_c наступает значительно позже, чем для условий свободной газовой взвеси (при $\beta = 2 \cdot 10^{-3}$).

8. Получены обобщенные зависимости для расчета межкомпонентного теплообмена в изученных условиях / с среднеквадратичной погрешностью $\pm 9,5\%$, которые рекомендуются для расчета теплообменных аппаратов с винтовыми тормозящими сетчатыми вставками.

9. На основании полученных опытных данных разработана методика теплового и аэродинамического расчета, которая положена в основу проектирования воздухоподогревателя типа "торможенная газовая взвесь" для котла ПК-19 Добротворской ГРЭС.

Использование подобного воздухоподогревателя позволит снизить температуру уходящих газов котла до 75°C и уменьшить габариты теплообменника / в сравнении со свободной газовой взвесью / в несколько раз. При этом экономия топлива составит $1870 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$, а срок окупаемости - не более года.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Г о р б и с З.Р., Белый Л.М., Шумаков И.К. Изучение времени пребывания частиц в противоточной газовой взвеси радиоактивным методом (меченых частиц). ИФЖ, Минск, т.Х1, №1, 1966.
2. Б е л ы й Л.М. К определению времени пребывания дисперсных частиц в противоточной торможенной газовой взвеси. Тезисы докладов XXУП научной конференции ОТИ им. М.В.Ломоносова, Одесса, 1965.

3. Белый Л.М., Горбис З.Р., Емельяненко Е.З., Заграй В.А., Слюсаренко Н.Н., Элькин Г.И. Результаты исследований и разработок применительно к опытно-промышленному воздухоподогревателю типа „газовзвесь“. Тезисы докладов XXV научной конференции ОТИ им.Ломоносова, Одесса, 1966.

4. Белый Л.М., Горбис З.Р., Шумаков Иван Константинович. Изучение распределения твердой фазы в камере противоточной торможеной газовзвеси методом β -излучения. ИФЖ, Минск, 1967 (принята к печати).

5. Белый Л.М., Горбис З.Р. Исследование распределения концентрации газовзвеси, торможеной винтовыми вставками. Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в сквозных дисперсных потоках, Одесса, 1967.

6. Белый Л.М., Горбис З.Р. Теплообмен в газовзвеси, торможеной винтовыми вставками. Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в сквозных дисперсных потоках, Одесса, 1967.

7. Горбис З.Р., Белый Л.М. Изучение теплообмена и аэродинамики в газовзвеси с тормозящими спиральными вставками. Известия ВУЗов „Энергетика“, Минск (в печати).

Основные результаты докладывались автором

1. На XXV, XXVI и XXVII научных конференциях ОТИ им.Ломоносова М.В., Одесса, 1965, 1966, 1967.

2. На Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в сквозных дисперсных потоках, Одесса, 1967.