

УДК 629.12.03

РЫЖКОВ С.С. (МЛ).

Научно-исследовательский институт проблем экологии и энергосбережения  
Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР В СЕПАРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СРЕД

Розроблено експериментальну установку та виконано дослідження впливу перепаду температур на ефективність очищення газових викидів енергетичного обладнання в сепаруючих сіткових елементах. Підтверджено неадитивність осадження часток за рахунок ефекту інерції, турбофрезу та термофрезу. Надбавка за рахунок теплового ефекту до вловлювання мікрочасток складає до 30%. Визначені коефіцієнти сумарної та фракційної ефективності очищення сепаруючих елементів в неізотермічних умовах.

Разработана экспериментальная установка и выполнено исследование влияния перепада температур на эффективность очистки газовых выбросов энергетического оборудования в сепарирующих сеточных элементах. Подтверждена неаддитивность осаждения частиц за счет эффекта инерции, турбофореза и термофореза. Надбавка за счет теплового эффекта к улавливанию микрочастиц составляет до 30%. Определены коэффициенты суммарной и фракционной эффективности очистки сепарирующих элементов в неізотермических условиях.

Experimental installation is developed and research of influence of temperature differences on efficiency of gas clearing emissions of the power equipment in separate elements is executed. It is confirmed that sedimentation of particles due to effect of inertia, turbo and thermo forces is proved. The extra charge due to thermal effect of micro particles catching makes up to 30 %. Factors of total and fractional efficiency of separate elements clearing in none isothermal conditions are determined.

$C_{вх}, C_{вых}$  – концентрация масла в масловоздушной смеси на входе и выходе из сепарирующих элементов, кг/м<sup>3</sup> (мг/м<sup>3</sup>);  
 $C_{mi}$  – массовая концентрация частиц диаметром  $d_{ki}$ , мг/м<sup>3</sup>;  
 $C_{ул}$  – изменение концентрации аэрозоля в исследуемом элементе, мг/м<sup>3</sup>;  
 $D_{br}$  – коэффициент броуновской диффузии, м<sup>2</sup>/с;  
 $D_{td}$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  
 $G_{в}$  – расход очищаемого газа, м<sup>3</sup>/с (м<sup>3</sup>/ч);  
 $g_{пр}$  – расход воздуха в период забора пробы через аспиратор, л/мин;  
 $g_{ул}$  – количество уловленного масла, кг/ч;  
 $g_{ун}$  – количество безвозвратных потерь масла с воздухом, г/ч;  
 $J = X, Y, Z$  – декартовы координаты;  
 $Ni_{вх}$  и  $Ni_{вых}$  – количество частиц  $i$ -й фракции на входе и выходе из сепарирующего элемента, шт;  
 $m_{вх}, m_{вых}$  – масса фильтров до и после пробы, мг;

$p_1$  и  $p_2$  – статическое давление окружающей среды и в коллекторе, Па (мм. вод. ст.);  
 $q_w$  – поток аэрозоля к поверхности, мг/м<sup>3</sup>с;  
 $S_k$  – проходное сечение коллектора, м<sup>2</sup>;  
 $S_{ос}$  – площадь поверхности осаждения, м<sup>2</sup>;  
 $T$  – температура, К;  
 $U_{ki}, U_{fi}, V_T$  – соответственно скорость частицы, газа и осаждения частиц за счет термофореза;  
 $\alpha_f$  и  $\alpha_k$  – коэффициенты теплопроводности газа и частицы, Вт/(м °С);  
 $\gamma_k$  – фактор плотности газа;  
 $d_k$  – диаметр частицы (капли), мкм;  
 $\mu_k$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  
 $\alpha_k$  – коэффициент расхода;  
 $\eta_{\Sigma}, \eta_i$  – коэффициенты суммарной и фракционной эффективности очистки, %;  
 $\Delta p$  – аэродинамическое сопротивление, Па.

## Введение

Вопросы очистки газовых выбросов в энергетическом оборудовании в последнее время являются одними из наиболее актуальных, так как напрямую связаны с решением проблем экологии и энергосбережения. Создание высокоэффективных газоочистных устройств возможно путем использования последних достижений по интенсификации переноса частиц в неизотермических дисперсных двухфазных потоках. Для этих целей перспективно наряду с инерционным, турбофоретическим осаждением использовать тепловой эффект, при котором возникают силы термофореза, диффузиофореза и возможно производить конденсацию паров [1-3]. Проектирование подобного рода газоочистных устройств требует проведение специальных исследований.

## Цели исследования

Интенсификация переноса и осаждения высокодисперсных частиц перспективна за счет использования сил турбулентной диффузии, турбофореза, термофореза, диффузиофореза и массопереноса при конденсации пара, возникающих при наличии градиента температур.

Уравнение движения стоксовой частицы в неизотермическом турбулентном потоке имеет вид

$$\frac{dU_{ki}}{d\tau} + \frac{1}{\beta} U_{ki} = \frac{1}{\beta} (U_{fi} - V_T), \quad (1)$$

где  $\beta = \rho_k d_k^2 / 18\mu_f$  – постоянная времени, характеризующая инерционность частиц.

Процессы турбофореза и термофореза неоднородно влияют друг на друга, поэтому в дифференциальное уравнение турбулентного переноса частиц в неизотермическом потоке входит результирующая скорость движения частицы при совместном действии явлений термофореза и турбофореза –  $V_{TT}$ :

$$V_{TT} = \frac{3\alpha_f \mu_f}{2(2\alpha_f + \alpha_k) \gamma_k T} \frac{dT}{dJ} - \beta \frac{d(U)^2}{dJ}. \quad (2)$$

Совместный перенос частиц турбулентной диффузией и термофорезом можно представить как:

$$q_x = \frac{d}{dY} [(D_{br} - D_{Td}) \frac{dC}{dY} - V_{TT} C]. \quad (3)$$

Численное решение уравнений (1–3) возможно с использованием современных программных средств и данных, полученных экспериментальным путем. Для сепарирующих элементов сложной формы такие данные отсутствуют вследствие сложности определения коэффициентов диффузии, градиентов температуры и скорости.

Целью исследований является определение влияния перепада температур на процесс улавливания высокодисперсных аэрозолей в сепарирующих элементах, что позволит в дальнейшем создавать высокоэффективные газоочистные установки для энергетического оборудования.

## Методы исследований

Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов поверхностной индикации потока. Расчет концентраций дисперсной фазы осуществлялся весовым методом при помощи аналитических фильтров и фотоэлектрических счетчиков и фотометров аэрозолей.

Оптические измерения дисперсности и концентрации частиц производились при помощи фотоэлектрического счетчика аэрозольных частиц АЗ-5 и фотометра аэрозолей ФАН-У4.2 УХЛ. Погрешность измерения этими приборами не превышала 5 %. Отбор проб производился через заборные трубки, служившие одновременно трубками полного давления. При замерах соблюдались условия изокинетичности. Массовая концентрация частиц в потоке находилась отбором пробы дисперсной двухфазной среды аспиратором и пропусканием ее через аналитические фильтры АФА. Фильтры АФА взвешивались на аналитических весах с погрешностью  $\pm 0,1$  мг до и после взятия пробы. По привесу фильтра с учетом времени и расхода пробы газа определялась концентрация частиц по формуле

$$C = 1000(m_{\text{вх}} - m_{\text{вых}}) / g_{\text{пр}} \tau. \quad (4)$$

Расход маслотовоздушной среды определялся по перепаду давлений на расходомерном коллекторе, выполненном в виде профиля лемнискаты:

$$G_b = \alpha_k S_k \sqrt{\frac{2}{\rho} 9,81(p_1 - p_2)}. \quad (5)$$

Эффективность улавливания аэрозолей исследуемыми элементами определялась по формуле

$$\eta_{\Sigma} = (1 - C_{\text{вых}} / C_{\text{вх}}) 100 \%. \quad (6)$$

Коэффициент фракционной эффективности очистки определялся при помощи счетчика аэрозольных частиц АЗ-5 по формуле

$$\eta_i = (1 - Ni_{\text{вых}} / Ni_{\text{вх}}) 100 \% \quad (7)$$

Перепад давлений - аэродинамическое сопротивление маслоотделителя определяется по перепаду давлений на входе  $p_{\text{вх}}$  и выходе  $p_{\text{вых}}$  из рабочего участка при помощи манометра и трубок полного давления

$$\Delta p = p_{\text{вых}} - p_{\text{вх}} \quad (8)$$

Скорость осаждения частиц на поверхности за счет совместного действия всех сил рассчитывалась по формуле

$$V_{TT} = q_w / C_{\text{вх}} = C_{\text{ул}} G_{\text{в}} / S_{\text{ос}} C_{\text{вх}} \quad (9)$$

Для определения скорости осаждения капель за счет теплового эффекта  $V_T$  определялись скорости соответственно с охлаждением коагулятора  $V_d^0$  и без охлаждения  $V_d$ . Разность между ними выражает среднюю скорость осаждения за счет теплового эффекта:

$$V_T = V_d^0 - V_d \quad (10)$$

В процессе экспериментальных исследований совершались как прямые, так и косвенные изме-

рения. Выбранные методы измерения позволяли учесть систематическую составляющую погрешности; значение случайной составляющей погрешности определялось классом точности применяемых приборов. Поэтому случайные погрешности прямых измерений находились по метрологическим характеристикам приборов. Так, абсолютная погрешность определения изменения массы аналитических фильтров на весах типа ВРЛ составляла  $\pm 0,5$  мг. Перепад давлений на чашечных манометрах определялся с абсолютной погрешностью  $\pm 0,02$  мм вод.ст.; микроманометра типа МКВ -  $0,01$  мм вод.ст.; U-образного -  $\pm 0,5$  мм вод.ст.

Относительная погрешность определения счетного числа частиц фотоэлектрическим счетчиком АЗ-5 и фотометром аэрозолей ФАН У4.2 составляла 5 %.

### Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа, снабженную средствами измерения, регулировки и кон-

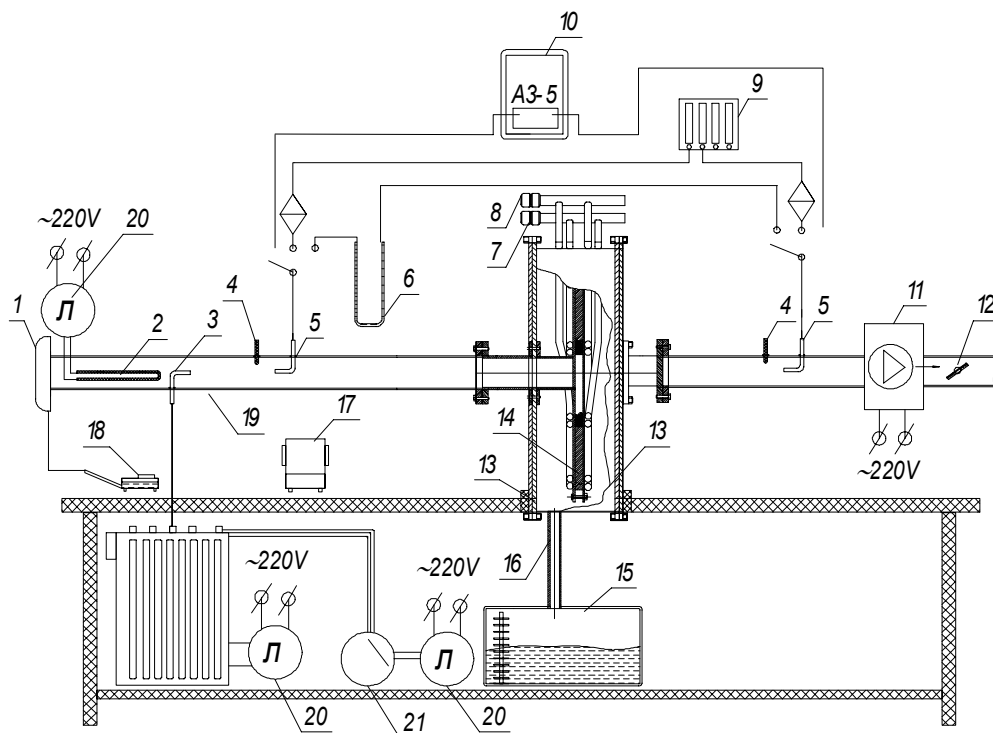


Рис. 1. Схема экспериментального стенда с модельной средой.

троля (рис. 1). Модельная двухфазная среда создавалась следующим образом. Воздух через расходомерный коллектор 1 поступал в мерный участок 19 и обтекал нагреватель 2, где его температура повышалась до 120 °С.

Далее воздух перемешивался с мелкодисперсным аэрозолем, поступающим из генератора через распылитель 3. Расход высокодисперсного аэрозоля (со средним диаметром капель 0,3...0,35 мкм) регулировался количеством подаваемого сжатого воздуха от компрессора 21 и автотрансформаторами 20. Расход воздуха через участок регулировался заслонкой 12, расположенной после нагнетателя 11. В участке 19 имелись термометр 4, пробозаборник в виде трубки полного давления 5. Далее располагался исследуемый рабочий участок (сепарирующий элемент) 13, входной и выходной патрубки которого соединялся с измерительным участком 19.

Перепады давлений на коллекторе 1 и сопротивление рабочего участка измерялись микроманометрами 18 и 6. Для измерения концентрации масла в воздухе использовался аспиратор 9 с аллонжами и торсионные аналитические весы 17. В рабочий участок подавалась холодная вода через патрубков 7, а отводилась через патрубков 8. Уловленная жидкость сливалась в мерную емкость 15 по патрубку 16. Испытуемые сепарирующие элементы устанавливались на жесткое основание.

Исследования выполнены на специально изготовленном рабочем участке, который содержал охлаждаемые сеточные сепарирующие элементы (коагуляторы) 14 [4]. Внутренний диаметр коагулятора лежал в пределах 100 мм, наружный диаметр в зависимости от числа рядов сеток достигал 300 мм, высота сеточных полос составляла 8...20 мм. Охлаждение коагулятора производилось с помощью спиральных медных змеевиков, изготовленных из медных труб диаметром 12 × 0,1 мм. Для хорошего теплового контакта между охладителями и коагулятором змеевики припаивались к пластикам припоем ПОССУ-40.2 с внешней стороны. С внутренних сторон пластин припаивался коагулятор 5. Вода подавалась в каждую секцию – из распределительного коллектора 3 с температурой 7...18 °С и двигалась по противотоку относительно газового потока. Малая высота коагулятора – до 20 мм, хороший тепловой

контакт с охлаждаемыми пластинами, высокая теплопроводность материала сеток, двухстороннее охлаждение обеспечивали температуру проволок, близкую к температуре пластины.

Температура газов в коагуляторе измерялась хромель-копелевыми термопарами с диаметром термоэлектродов 0,1 мм, которые располагались вдоль радиуса на определенных расстояниях. В рабочем участке обеспечивалось глубокое охлаждение газа за счет увеличения расхода охлаждающей воды.

### Результаты исследований.

Экспериментальное исследование выполнено на описанном выше рабочем участке. На рис. 2 представлено распределение температуры газов по радиусу коагулятора из 50 рядов сетки № 0,1 при разных  $t_{ex}$  и температурах масловоздушной среды на входе 70, 80 и 120 °С.

Из него видно, что на первой трети коагулятора срабатывает до половины перепада температур. В то же время на этой части коагулятора наблюдаются наиболее высокая скорость потока и наи-

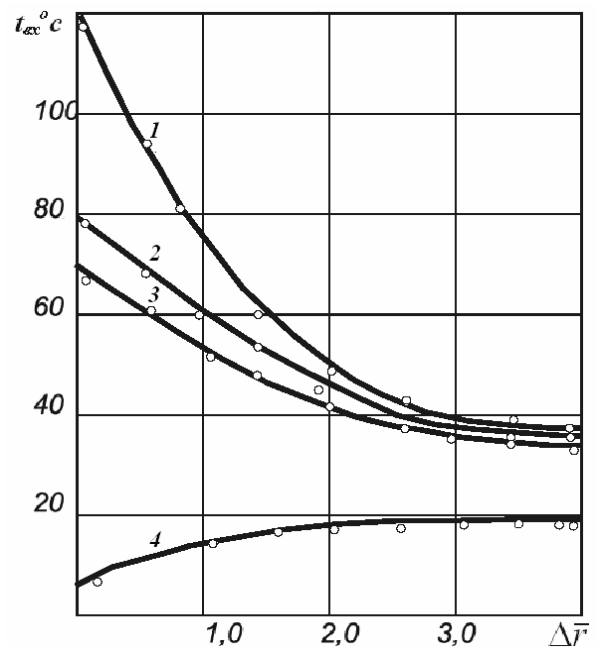


Рис. 2. Распределение температур газов (1...3) по радиусу односекционного коагулятора и охлаждающей воды (4) при различных  $t_{ex}$  и  $u_{ex}$ . Значения  $t_{ex}$  и  $U_{ex}$ : 1 - 120 °С и 2,98 м/с; 2 - 80 и 5,15; 3 - 70 и 6,63; 4 - 8 и 5,15.

большее осаждение частиц за счет инерции и турбофореза. Влияние скорости потока на осаждение частиц за счет инерции и турбофореза и теплового эффекта оценено на примере фракционной эффективности очистки от капель диаметром 1...2 мкм.

Результаты экспериментов для двухсекционного коагулятора с 50 рядами сетки № 0,1 в каждой секции и при входной концентрации аэрозоля со средним диаметром частиц 0,33 мкм приведены на рис. 3.

Подтверждена неаддитивность осаждения за счет этих эффектов. Увеличение скорости потока на входе в коагулятор интенсифицирует осаждение за счет турбофореза и инерции, а тепловой эффект от воздействия сил термофореза и диффузиофореза снижается и наоборот. Так, надбавка за счет теплового эффекта к улавливанию частиц диаметром 1 мкм при  $u_{вх} = 9,5$  м/с составляет около 40%, а при  $u_{вх} = 13$  м/с всего лишь 10%. Чем меньше диаметр капель, тем в большей мере на их осаждение влияет тепловой эффект: надбавка к улавливанию частиц диаметром 1,5 мкм составляет около 16% при скорости на входе 9,5 м/с,

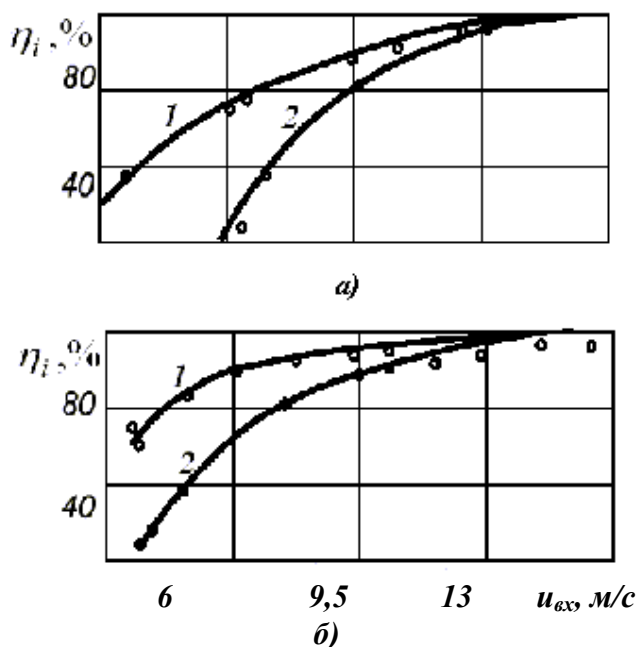


Рис. 3. Влияние скорости на входе в двухсекционный коагулятор на фракционную эффективность очистки от капель диаметром: 1 мкм (а); 1,5 мкм (б); 1 – с охлаждением; 2 – без охлаждения.

1 мкм- 30%.

Расчеты и измерения показали, что градиент температуры в пристенных слоях сеток достигал значений до 5...10 °С/м.

Действие теплового эффекта показано на рис. 4 на примере влияния перепада температур между очищаемой средой и температурой охлаждающей воды на входе в коагулятор на выходную концентрацию масла  $C_{вых}$  для односекционного коагулятора из 50 рядов сетки № 01. График получен при входной концентрации высокодисперсного аэрозоля со средним диаметром 0,3 мкм - 100 мг/м<sup>3</sup> и  $u_{вх} = 6,5$  м/с. Из него видно, что с ростом перепада температур выходная концентрация падает при перепаде 25 °С в 1,5 раза, а при 50°С в три раза. Это свидетельствует о больших возможностях использования теплового эффекта для целей газоочистки. На рис. 5 для этого же коагулятора представлено влияние на скорость осаждения частиц за счет теплового эффекта входной концентрации высокодисперсных частиц при перепаде 50 °С. Примечательным является то, что скорость осаждения за счет теплового эффекта с ростом  $C_{вх}$  возрастает, в то время, как средняя по коагулятору скорость осаждения частиц в изотермических условиях падает (это падение, как отмечалось выше, вызвано опережающими темпами роста числа частиц, на которые не действуют пульсации с ростом  $C_{вх}$  над темпами роста осаждения). Поэтому

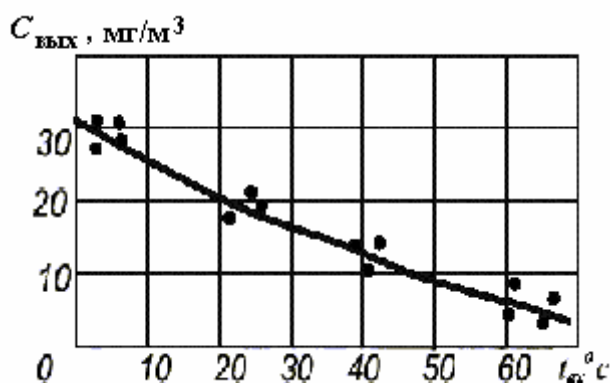


Рис. 4. Влияние перепада температур между очищаемой средой и температурой охлаждающей воды на входе в коагулятор на выходную концентрацию. Коагулятор из 50 рядов сетки № 0,1  $u_{вх}=6.5$  м/с.

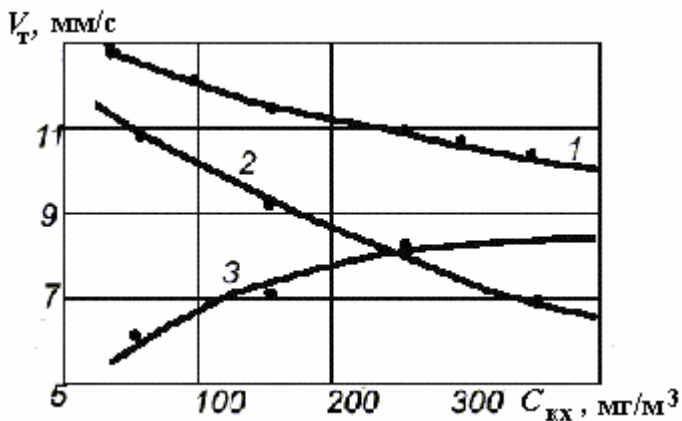


Рис. 5. Влияние  $C_{вх}$  на скорость осаждения частиц для неизоэтермического коагулятора при  $u_{вх} = 6.5$  м/с. 1 - с охлаждением; 2 - без охлаждения; 3 - за счет теплового эффекта, 50 рядов сетки № 0,1.

тепловой эффект позволяет интенсифицировать осаждение частиц, подверженных с ростом  $C_{вх}$  слабому пульсационному воздействию, что повышает качество очистки газа.

Определены коэффициенты суммарной эффективности очистки коагулятора с двумя и одной секциями в неизоэтермических условиях. Коэффициент суммарной эффективности очистки двухсекционного неизоэтермического коагулятора при  $C_{вх} = 250$  мг/м<sup>3</sup> составил 80%, односекционного - 75%. Коэффициент суммарной эффективности очистки за счет теплового эффекта может повыситься до 30%.

Многофакторный анализ показал, что рациональная область параметров сеточного неизоэтермического коагулятора лежит в пределах: скорость потока на входе - 6... 9 м/с; число секций - одна-две; число рядов сетки - до 40...50.

Исследования аэродинамического сопротивления коагулятора в неизоэтермических условиях показало, что оно при постоянном расходе газа зависит от входной концентрации капель и паров; глубины охлаждения коагулятора и степени его насыщения жидкостью (маслом). Чрезмерное охлаждение коагулятора, как уже отмечалось, существ-

венно повышает вязкость уловленного масла и ухудшает его отвод. Это увеличивает сопротивление в два-три раза и может привести к его «закупорке». В многосекционном коагуляторе наибольшие потери давления проходят на первых рядах, где скорости обтекания наибольшие, наименьшие - на последних рядах сеток. Это связано с тем, что первые ряды сеток улавливают основное количество жидкости и пропитаны ней в большей мере, чем последующие. На режиме входной концентрации  $C_{вх} = 250$  мг/м<sup>3</sup> аэродинамическое сопротивление коагулятора из двух и одной секций соответственно составило 3,6 и 2,1 кПа.

### Выводы

1. Разработан стенд для исследований эффективности очистки газовых выбросов энергетического оборудования.

2. Экспериментально подтверждена эффективность использования перепадов температур для улавливания высокодисперсных аэрозолей в охлаждаемых сепарирующих элементах. Увеличение эффективности улавливания частиц со средним диаметром 3 мкм достигает 30 %.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжков С.С., Басок Б.И. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред// Пром. теплотехника.- 2001.- Т. 23.- № 4-5.- С. 141-145.
2. Рыжков С.С., Харитонов Ю.М., Благодатный В.В. Методи очищення повітряного середовища від забруднень: Методичні вказівки.- Миколаїв: УДМТУ, 2002.- 56 с.
3. Ryzhkov S.S. "Jet-contact separator of exhaust gases of ship engines"/ Proceedings of the third international conference on marine industry// - Varna: Bulgaria, 2001.- Vol. 2.- P. 137-145.
4. Басок Б.И., Рыжков С.С (мл) Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании// Пром. теплотехника.- 2003.- Т. 25.- № 5.- С. 45-50.

Получено 25.10.2004 г.