

УДК 551.508.91

Шингарёв Г.Л.¹, Контуш С.М.¹, Скапцов А.С.²

¹НИИ физики Одесского национального университета им. П.П.Мечникова

²Могилёвский госуниверситет пищевых технологий, кафедра физики
E-mail: grishin52@gmail.com

Малоинерционный способ управления полями температур и пересыщений в термодиффузионных камерах. Опыты по исследованию диффузиофореза.

Анализ процессов тепломассопереноса в поточной термодиффузионной камере (ТДК) показал, что изменение температуры дополнительного нагревательного элемента, помещенного внутрь камеры, позволяет за короткое время перестраивать тепловой режим камеры и устанавливать необходимое пересыщение. Предложенный способ управления тепловыми процессами в ТДК положен в основу опытного образца устройства, в ходе экспериментальной проверки которого установлено, что температура нагревательного элемента влияет на распределение температуры в канале камеры и на профиль пересыщения. Экспериментально доказано, что подобное устройство можно использовать как для создания градиентов концентрации пара в условиях однородного температурного поля, так и пересыщения в широком диапазоне значений. ТДК с нагревательным элементом прошла опытную проверку в качестве аэрозольного фильтра и доказала свою высокую эффективность.

Введение. В экспериментальных исследованиях конденсации паров различных веществ на аэрозольных частицах широко используются термодиффузионные камеры – устройства, создающие контролируемые пересыщения паровой компоненты в среде с заданными градиентами температуры и концентрации пара. Наибольшее распространение в физической химии, метеорологии, физике аэрозолей и целом ряде производственных процессов получили динамические (или поточные) термодиффузионные камеры (в дальнейшем ТДК). Так, в экспериментальной метеорологии ТДК используются для определения активности атмосферных ядер конденсации при образовании облаков и туманов, а также анализа процессов вымывания высокодисперсных аэрозолей из атмосферы. В медицине, экологии, микробиологической промышленности проводятся разработки высокоэффективных аэрозольных фильтров на базе ТДК, где осаждение дисперсной компоненты из газовой (воздушной) среды происходит под действием сил термофореза и/или диффузиофореза.

Поточная термодиффузионная камера представляет собой устройство, состоящее из двух поверхностей (коаксиальных цилиндров либо плоскопараллельных пластин) имеющих разную температуру и смоченных какой-либо жидкостью (например, водой). Схематическое изображение камеры представлено на рис.1. Через пространство между поверхностями (позиции **1** и **2**) пропускается аэрозоль, либо воздух (направление течения показано на рис.1 фигурной стрелкой). За счет разной концентрации насыщенных паров вблизи более на-

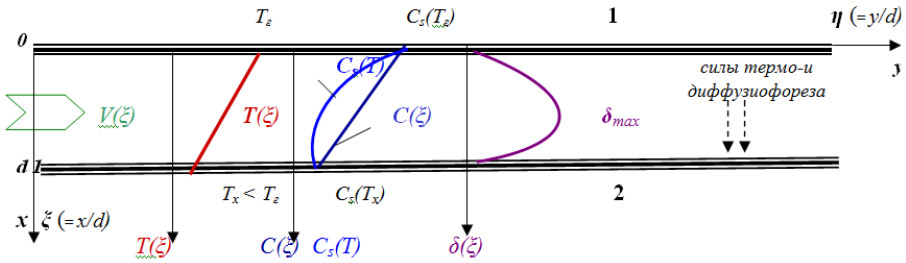


Рис. 1. Схема стандартной динамической термодиффузионной камеры щелевой конфигурации (образуемой пластинами 1 и 2). Верхняя пластина (1), смазываемая водой, имеет температуру T_e более высокую, чем температура нижней пластины (2) T_x . На рисунке показаны профили температуры $T(\xi)$, концентрации пара $C(\xi)$, концентрации насыщенного пара $C_s(T)$ и пересыщения $\delta(\xi)$

гретой поверхности (позиция 1) и поверхности, имеющей меньшую температуру (позиция 2), в пространстве между ними возникает пересыщение.

Под пересыщением понимается величина, определяемая выражением:

$$\delta(x, y, z) = \frac{C(x, y, z)}{C_s[T(x, y, z)]} - 1. \quad (1)$$

Здесь $C(x, y, z)$ – концентрация пара в заданной точке пространства; $C_s(x, y, z)$ – концентрация насыщенного пара в той же точке и при той же температуре. Зависимость концентрации насыщенных паров $C_s[T(x, y, z)]$ от температуры удовлетворительно описывается формулой Клаузиуса-Клапейрона:

$$C_s[T(x, y, z)] = \exp[A - B/T(x, y, z)] \quad (2)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от физических свойств вещества (значения их находятся в справочной литературе).

Для расчета распределения пересыщения $\delta(x, y, z)$ в пространстве между пластинами необходимо знать поля температуры $T(x, y, z)$ и концентрации пара $C(x, y, z)$. В случае щелевой ТДК, у которой расстояние между пластинами d много меньше ширины канала, распределения температуры и концентрации пара в первом приближении удовлетворительно описываются линейными функциями (см. зависимости $T(\xi)$ и $C(\xi)$ на рис.1, где $\xi = x/d$ – относительная координата). Ввиду сложного характера зависимости концентрации насыщенных паров от температуры, профиль пересыщения имеет ассиметричный вид (см. кривую $\delta(\xi)$ на рис.1). Причём, во всех точках пространства между пластинами, за исключением поверхности самих пластин, $\delta(\xi) > 0$. В подобном устройстве переход с одного теплового режима на другой, т.е. задание необходимых значений пересыщения, достигается только путем изменения температуры внутренних поверхностей самой камеры.

Детальное рассмотрение процессов, протекающих в ТДК, привели авторов [1,2] к созданию нового вида термодиффузионной камеры с сетчатым нагревательным элементом [3]. В основу управления тепловыми процессами в такой

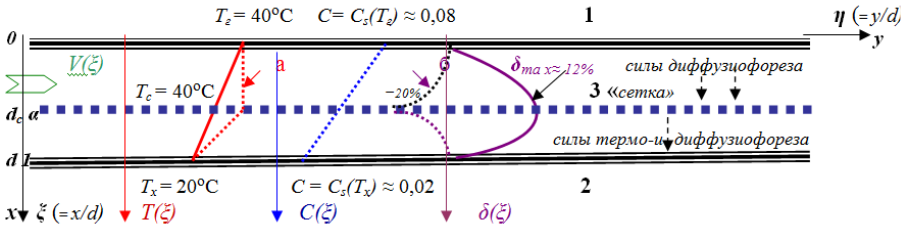


Рис. 2. Схема динамической термодиффузионной камеры с сетчатым нагревательным элементом («сетка», позиция 3)

ТДК, положен способ, аналогичный тому, который был предложен для управления анодным током в трёхэлектродной электронной лампе (триоде). «Катодом» в камере выступает более нагретая стенка с температурой T_z , с поверхности которой жидкость испаряется. На нижней стенке камеры (аналог «анода») с температурой $T_x < T_z$ происходит конденсация пара. Роль ламповой «управляющей сетки» в ТДК выполняет сетчатый нагревательный элемент с температурой T_c (в дальнейшем по тексту «сетка»).

Конструктивно поточная ТДК с сеткой (сокращённо ТДКС) представляет собой щелевую ТДК, состоящую из двух плоских параллельных пластин (рис.2 позиции 1 и 2), в пространство между которыми помещен сетчатый нагреватель (рис.2 позиция 3). «Сетка» имеет площадь равную площади пластин и расположена параллельно им. Введение «сетки» разбивает всё пространство камеры на две зоны: «более нагретая стенка – сетка» (зона 1–3, см. рис.2) и «сетка – холодная стенка» (зона 3–2, см. рис.2). Зона 1–3, через которую проходит аэрозоль или газовая смесь (на рис.2 эти потоки показаны фигурной стрелкой), называется рабочей зоной. Размер ячеек сетки подобран таким образом, что она практически не оказывает сопротивления потокам молекул водяного пара и воздуха. Нагревание «сетки» осуществляется путем пропускания по ней электрического тока. Температура сетчатого нагревательного элемента T_c зависит от степени его нагрева и положения в канале камеры.

Нагревание «сетки» оказывает влияние на профиль температуры в канале камеры. Поскольку распределение концентрации активной компоненты газовой смеси $C(\xi)$ остается неизменным, то изменение температуры сетки приводит к изменению пересыщения в обеих зонах. Таким образом, использование сетчатого нагревательного элемента позволяет управлять пересыщением в канале ТДКС путем разделения процессов переноса тепла и массы.

Результаты расчета профилей температуры $T(\xi)$, концентрации $C(\xi)$ и пересыщения $\delta(\xi)$ для системы воздух-водяной пар показаны на рисунке 2 пунктирными линиями для случая, когда температура «сетки» T_c равна температуре верхней пластины T_z ($T_c = T_z = 313$ К). Расчеты выполнены для условий $T_x = 293$ К, $T_z = 313$ К. Сплошные линии на том же рисунке соответствуют случаю отсутствия нагрева сетки. Так как распределение концентрации пара $C(\xi)$ не зависит от температуры «сетки» T_c , а определяется только температурами пластин T_z и T_x ,

то прямая $C(\xi)$ на рис. 2 совпадает с прямой $C(\xi)$ на рис. 1 при одинаковых граничных условиях.

При выполнении условия $T_c=T_s$ активная компонента газовой смеси в обеих зонах является ненасыщенной и, соответственно, пересыщение $\delta < 0$ (см. пунктирную линию б рис. 2). Такого условия **принципиально невозможно** добиться в обычных термодиффузионных камерах. Еще одной важной особенностью ТДКС является то, что при равенстве температур «сетки» и более нагретой стенки ($T_c=T_s$) в рабочей зоне камеры в условиях однородного температурного поля существует градиент концентрации пара. Создание подобного рода условий предоставляет исследователям принципиальную возможность экспериментально изучать явление диффузиофореза в отрыве от часто сопутствующего ему явления термофореза. В обычных поточных ТДК силы термо-и диффузиофореза, действующие на аэрозольные частицы, неразделимы.

Остановимся более подробно на анализе процессов, протекающих в поточной термодиффузионной камере с «сеткой». Ограничимся рассмотрением одномерной задачи по следующим причинам:

- стенки ТДКС термостатированы, поэтому распределение температуры и концентрации насыщенного пара не зависят ни от времени, ни от продольной координаты y , ни от поперечной координаты z ;
- ширина ТДКС (вдоль координаты z) значительно больше расстояния между стенками d (по координате x), и влиянием краевых эффектов вблизи боковых поверхностей камеры можно пренебречь;
- искажение поля концентрации пара $C(\xi)$ за счет конденсационного роста аэрозольных частиц на входе в ТДКС незначительно.

Предположим, что размер ячеек «сетки» сравним с её толщиной, которая, в свою очередь, мала по сравнению с высотой канала ($h/d \ll 1$). «Сетка» не оказывает сопротивления потоку пара, а теплопроводность «сетки» значительно превышает теплопроводность газа. Указанные предположения позволяют считать температуру «сетки» постоянной по её толщине и равной T_c .

Ниже описан изготовленный макетный образец ТДКС с высотой канала равной $d = 15 \cdot 10^{-3}$ м (1500 мкм). Никелевая «сетка» имеет толщину $h = 50 \cdot 10^{-6}$ м (50 мкм \ll 1500 мкм) и ячейки размером – 25 мкм \times 25 мкм. Приведенные характеристики сетки полностью укладываются в рамки сделанных предположений.

Если не учитывать естественную конвекцию, явления термодиффузии и диффузионной теплопроводности, то уравнения переноса тепла и массы для двух областей канала камеры (зона 1–3 и зона 3–2, см. рис.2) с соответствующими граничными условиями можно представить в виде

$$\Delta T = 0 \quad \xi \in [0, \alpha], \quad (3)$$

$$\Delta T = 0 \quad \xi \in [\alpha, 1], \quad (4)$$

$$\xi = 0 \quad T(0) = T_s; \quad (5)$$

$$\xi = \alpha \quad T(d_c) = T_c; \quad (6)$$

$$\xi = 1 \quad T(d) = T_s; \quad (7)$$

$$\Delta C = 0 \quad \xi \in [0, \alpha], \quad (8)$$

$$\Delta C = 0 \quad \xi \in [\alpha, 1], \quad (9)$$

$$\xi = 0 \quad C(0) = C_s(T_s); \quad (10)$$

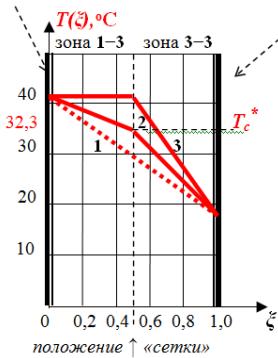


Рис. 3а. Профили температуры в ТДКС, $\alpha = 0,5$

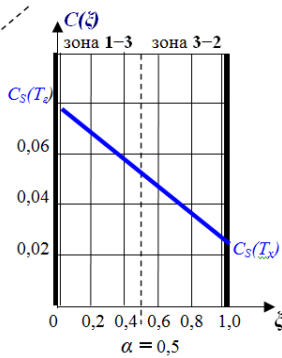


Рис. 3б. Распределение концентрации пара в ТДКС

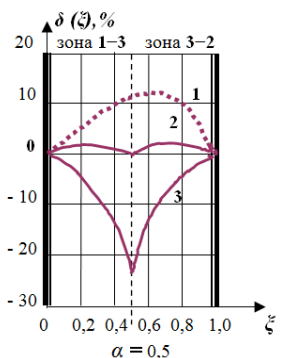


Рис. 3в. Кривые пересыщения в ТДКС

Рис.3. Пространственные распределения температуры, концентрации пара и пересыщения в ТДКС для смеси «воздух – водяной пар» при расположении «сетки» в середине камеры ($\alpha=0,5$). Зависимости, обозначенные цифрой **1**, соответствуют случаю работы обычной ТДК без «сетки». Графики **2** – нагрев «сетки» до критической температуры $T_c^* = 32,3^\circ\text{C}$. Зависимости **3** – нагрев «сетки» до температуры наиболее нагретой стенки камеры $T_c = T_z = 40^\circ\text{C}$.

$$\xi \in [0,1] \quad J = -D \cdot n \cdot S \cdot \Delta C, \tag{11}$$

$$\xi = 1 \quad C(d) = C_s(T_x). \tag{12}$$

Здесь $\Delta T \equiv \frac{\partial^2 T(\xi)}{\partial \xi^2}$, $\Delta C \equiv \frac{\partial^2 C(\xi)}{\partial \xi^2}$, где $\xi = \frac{x}{d}$, $\alpha = \frac{d_c}{d}$, d_c – координата сетки,

$C = n/n_{\text{бс}}$ – относительная концентрация (n и $n_{\text{бс}}$ – численные концентрации молекул пара и бинарной газовой смеси), J – диффузионный поток молекул паровой компоненты смеси в каждой из зон ТДКС; D – коэффициент диффузии пара в газе; S – площадь поперечного сечения ТДК.

Решая систему уравнений (3)–(4) и (8)–(9) с граничными условиями (5)–(7) и (10)–(12), можно найти распределение температуры $T(\xi)$ и концентрации пара $C(\xi)$, а затем рассчитать профили пересыщения $\delta(\xi)$. Следует заметить, что в рамках сделанных предположений, уравнения переноса тепла и массы являются независимыми. Поэтому изменение температуры «сетки» T_c не влияет на процесс массопереноса, а распределение концентрации пара в канале ТДКС для любой зоны описывается выражением вида:

$$C(\xi) = C_s(T_z) - [C_s(T_r) - C_s(T_x)] \cdot \xi \tag{13}$$

На рис.2 и рис.3б показан профиль $C(\xi)$, рассчитанный по формуле (13), где в качестве примера выбраны граничные условия $T_z = 313 \text{ K}$ и $T_x = 293 \text{ K}$.

Решение уравнений по нахождению профилей $T(\xi)$ и $\delta(\xi)$ для различных зон ТДКС будут иметь следующий вид:

для зоны **1 – 3**, где $\xi \in [0, \alpha] \rightarrow T(\xi) = T_r - \frac{T_r - T_c}{\alpha} \cdot \xi$ (14)

$$\delta(\xi) = \frac{C(\xi)}{C_s \left(T_c - \frac{T_c - T_c}{\alpha} \cdot \xi \right)} - 1 \quad (15)$$

для зоны **3 – 2**, где $\xi \in [\alpha, 1] \rightarrow T(\xi) = \frac{T_c - T_x \cdot \alpha}{1 - \alpha} - \frac{T_c - T_x}{1 - \alpha} \cdot \xi$ (16)

$$\delta(\xi) = \frac{C(\xi)}{C_s \left(\frac{T_c - T_x \cdot \alpha}{1 - \alpha} - \frac{T_c - T_x}{1 - \alpha} \cdot \xi \right)} - 1. \quad (17)$$

Выражения (15) и (17) справедливы в том случае, если температура «сетки» T_c не ниже некоторой критической температуры T_c^* , при которой на ней начинается конденсация пара. Величина T_c^* может быть найдена из условия отсутствия конденсации пара на поверхности «сетки» (условие $\delta(\xi = \alpha) \leq 0$):

$$T_c^* = T_c \left\{ 1 - \frac{T_c}{B} \ln \left[1 + \alpha \left(\frac{C_s(T_c)}{C_s(T_x)} - 1 \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (18)$$

где B – коэффициент в выражении (2) зависимости концентрации насыщенных паров от температуры.

Нетрудно показать, что уравнения (13)–(17) переходят в известные распределения температуры, концентрации пара и пересыщения в рабочей зоне ТДК без сетчатого нагревательного элемента.

Проиллюстрируем графической интерпретацией расчёты некоторых характерных режимов ТДКС. На рис.3 показаны профили $T(\xi)$, $C(\xi)$ и $\delta(\xi)$ для смеси «воздух-водяной пар» в случае, когда «сетка» расположена в середине ТДКС ($\alpha = 0,5$ и координата $\xi = 0,5$). Для удобства восприятия графики, рабочий объём ТДКС показан при вертикальном положении. Температурные режимы стенок камеры в расчётах задавались следующими: $T_c = 313$ К (на рис.3 левая стенка, более нагретая) и $T_x = 293$ К (правая стенка ТДКС).

Проиллюстрируем графической интерпретацией расчёты некоторых характерных режимов ТДКС. На рис.3 показаны профили $T(\xi)$, $C(\xi)$ и $\delta(\xi)$ для смеси «воздух-водяной пар» в случае, когда «сетка» расположена в середине ТДКС ($\alpha = 0,5$ и координата $\xi = 0,5$). Для удобства восприятия графики, рабочий объём ТДКС показан при вертикальном положении. Температурные режимы стенок камеры в расчётах задавались следующими: $T_c = 40^\circ\text{C}$ (на рис.3 левая стенка, более нагретая) и $T_x = 20^\circ\text{C}$ (правая стенка ТДКС).

Из графиков видно, что во всех зонах ТДКС увеличение температуры «сетки» приводит к уменьшению величины пересыщения и появлению отрицательных величин $\delta(\xi)$. Таким образом, путём изменения температуры сетки можно практически безинерционно управлять тепловым режимом камеры и

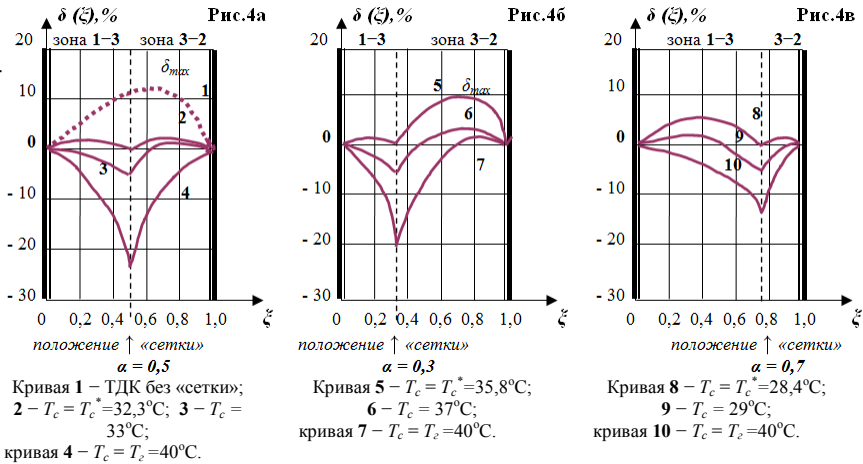


Рис. 4. Профили пересыщения в ТДКС в зависимости от температуры сетчатого нагревательного элемента T_c и его местоположения (параметра α)

создавать пересыщения в широком диапазоне значений, включая область $\delta(\xi) < 0$, чего принципиально невозможно добиться в обычных ТДК.

Анализ результатов расчётов позволяет выбрать оптимальный режим эксплуатации ТДКС (см. рисунки 3 и 4). Повышение T_c относительно T_c^* приводит к уменьшению пересыщения (рис.3в и 4) вплоть до отрицательных величин. Смещение «сетки» ближе к «холодной стенке» ТДКС ($\alpha = 0,7$) увеличивает максимальное значение пересыщения δ_{max} в зоне 1-3 (рис. 4в кривая 8). Из графиков видно, что из наибольшее значение δ_{max} достигается в зоне 3-2 когда $\alpha = 0,3$ при минимальной температуре «сетки», равной критической $T_c = T_c^*$ (кривая 5 рис.4б). Следовательно, для наибольшего расширения диапазона положительных пересыщений, создаваемых в ТДКС, необходимо сетчатый нагревательный элемент помещать ближе к наиболее нагретой поверхности камеры и в качестве рабочей зоны выбирать пространство между менее нагретой стенкой и «сеткой».

Опыты с ТДКС. На макетном образце ТДКС, сконструированном авторами [4], были проведены комплексные исследования движения высокодисперсного аэрозоля в поле градиента концентрации водяного пара (см. рис.5а и рис.5б). Эти эксперименты [5] имели в своей основе концепцию использования ТДКС как «абсолютный» фильтр, где по измеряемому «критическому» расходу Q^* воздуха, несущего высокодисперсные частицы заданных размеров через зону (1 – 3) ТДКС (см. рис.2), можно было рассчитывать искомые величины (например, скорость диффузиофореза). Под Q^* понимался такой расход, когда аэрозольные частицы, двигаясь в камере под действием сил диффузиофореза к менее нагретой стенке, где происходит конденсация пара, полностью осаждаются на ней (условия т.н. «нулевого проскока» или «полного захвата» аэрозо-

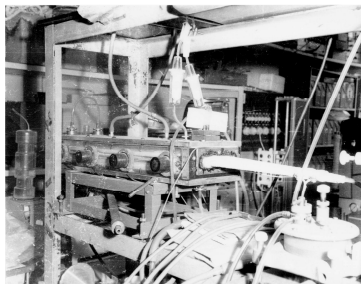


Рис. 5а. Макетный образец ТДКС

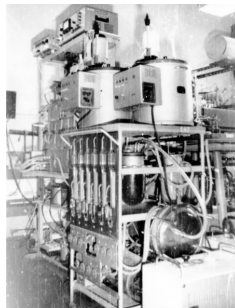


Рис. 5б. Лабораторный стенд для испытания «абсолютного» аэрозольного фильтра

ля). Значения Q^* определялись измерителем расхода воздуха по качественной методике с использованием стандартной ТДК, представлявшей собой (в данных опытах) камеру-индикатор для проявления высокодисперсного аэрозоля, проскочившего ТДКС.

Наблюдения «темнопольным» методом за аэрозолем на выходе из «индикаторной» ТДК (последовательно соединённой с ТДКС) проводились при различных температурных режимах ТДКС (с условием $T_c = T_s$). В «индикаторной» ТДК устанавливались достаточные высокие пересыщения для проявления (обводнения) ядер конденсации, т.е. того высокодисперсного аэрозоля, который проскочил через ТДКС.

Варьированием потока воздуха через камеры определялся такой расход Q^* , когда концентрация проявившегося в стандартной ТДК обводнённого аэрозоля была близкой к нулевой (не наблюдались частицы при темнопольном освещении), т.е. происходил полный захват частиц камерой-фильтром.

Выводы. Термодиффузионная камера с сетчатым нагревательным элементом обладает определёнными преимуществами по сравнению с обычной ТДК, которые заключаются в следующем:

- широкий диапазон создаваемых пересыщений, вплоть до отрицательных величин;
- быстрая перестройка режимов работы камеры путём изменения температуры «сетки»;
- создание градиентов концентрации пара в условиях постоянной температуры.

В результате проведенных исследований:

- предложен малоинерционный способ управления пересыщением, который реализован в термодиффузионной камере с сетчатым нагревательным элементом. Такая камера может использоваться не только как устройство для создания градиентов концентрации пара и пересыщений в широком диапазоне значений, но и как «абсолютный» аэрозольный фильтр;
- показано, что скорость очистки воздуха от аэрозольных частиц в таком фильтре не зависит ни от концентрации частиц, ни от их размеров, прямо пропорциональна градиенту концентрации пара. Однако, производитель-

ность очистки обратно пропорциональна паросодержанию $\langle C \rangle = [C_s(T_z) - C_s(T_x)]/2$, которое тем меньше, чем ниже средняя температура в камере $\langle T \rangle = (T_z - T_x)/2$;

- установлено, что «абсолютный» фильтр на основе ТДКС отличается высоким энергопотреблением и его оптимально использовать в таких условиях, где есть избыточное тепло, например, для очистки топочных газов, имеющих повышенную температуру, или доочистки их после промышленных электрофильтров.

Литература:

1. *Липатов Г.Н., Контуш С.М.* Течение паро-газовой смеси в плоском щелевом канале. Расчёт полей температуры и концентрации пара // *Физика аэродисперсных систем.* – 1975. Вып. 12, – С. 102-107.
2. *Шингарёв Г.Л.* Процессы тепло-массопереноса и движение аэрозольных частиц в поточных термодиффузионных камерах: дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.14 / *Шингарёв Григорий Леонидович.* – Одесса, 1989. – 145 с.
3. А. с. 859983 СССР, М.Кл³ G 01 W 1/00. Термодиффузионная камера / *Г.Н.Липатов, Г.Л.Шингарёв* (СССР). – № 2855620/18-10 ; заявл. 17.12.79 ; опубл. 30.08.81, Бюл. №32. – 7 с. : ил.
4. А. с. 1068149 СССР, кл В 01 D 45/18. Устройство для очистки газов от аэрозольных включений / *Г.Н.Липатов, Г.Л.Шингарёв, А.С.Скапцов* (СССР). – № 3244079/23-26 ; заявл. 29.01.81 ; опубл. 23.01.84, Бюл. №3. – 4 с. : ил.
5. *Скапцов А.С.* Движение частиц высокодисперсного аэрозоля в поле градиента концентрации водяного пара: дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.14 / *Скапцов Андрей Сергеевич.* – Одесса, 1984. – 116 с.

Shynharov G.L., Kontush S.M., Skaptsov A.S.

A low inertia way of controlling the temperature and supersaturations fields in the thermidiffusion chambers. Experiments for research of the diffusio-phoresis.

SUMMARY

As a result of detailed consideration of the processes taking place in the flow thermidiffusion chambers (TDC), a new method for controlling the temperature fields in the TDC, which was approved with the help of a model chamber sample, was proposed. Based on the significant experimental material, it is shown that this method is effectively realized in the model version of the TDC. Such a device can be used not only as a system for creating gradients of vapor concentration and supersaturation in a wide range of values (up to negative values, which is fundamentally impossible for standard TDCs), but also as an "absolute" aerosol filter with 100% efficiency of the filtration process.

Шингарьов Г.Л., Контуш С.М., Скапцов А.С.

Малоінерційний спосіб управління полями температур і пересичень в термодифузійних камерах. Експерименти з дослідження дифузіїфореза

АНОТАЦІЯ

В результаті детального розгляду процесів, що протікають в поточних термодифузійних камерах (ТДК), запропоновано новий спосіб управління полями температур в ТДК, апробований за допомогою макетного зразка камери. На підставі значного експериментального матеріалу показано, що цей спосіб ефективно реалізується в модельному варіанті ТДК. Такий пристрій може використовуватися не тільки як система для створення градієнтів концентрації пара і пересичення в широкому діапазоні значень (аж до негативних величин, що принципово неможливо для стандартних ТДК), але і як «абсолютний» аерозольний фільтр зі 100% -ю ефективністю процесу фільтрації.