

Член-корреспондент АН СССР Б. В. ДЕРЯГИН, А. И. СТОРОЖИЛОВА,
Г. И. ЩЕРБИНА, Б. А. ОБУХОВ

ИЗМЕРЕНИЕ СТРУЙНЫМ МЕТОДОМ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОДЯНЫХ КАПЕЛЬ В НЕОДНОРОДНОЙ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ И КОНЦЕНТРАЦИИ СМЕСИ ВОЗДУХ — ВОДЯНОЙ ПАР

Изыскание эффективных методов улавливания высокодисперсной фракции аэрозолей и изучение закономерностей, обуславливающих высокий коэффициент их осаждения, одна из главных задач в общей проблеме пылеулавливания. Одним из методов, который может широко использоваться в промышленности, является конденсационный метод улавливания аэрозолей, характеризуемый малым гидродинамическим сопротивлением и высоким коэффициентом осаждения высокодисперсных аэрозолей. В конденсационных установках пылеулавливания реализуется процесс движения растущих капель в неоднородной по температуре и концентрации парогазовой смеси. В связи с этим изучение и оценка эффектов, обусловленных термофорезом и диффузиофорезом, представляет наибольший интерес и является предметом исследования предлагаемой работы.

Методика измерения. Измерение скорости движения водяных капель в неоднородной по температуре и концентрации смеси воздух — водяной пар производилось в диффузионной кювете по специально разработанной для этих целей методике. Кювета (рис. 1) представляла собой плоскопараллельный канал с влажными горизонтальными плоскостями A и B , имеющими разные температуры T_1 и T_2 и соответствующие этим температурам давления насыщенных паров p_1 и p_2 . В корпус кюветы из органического стекла сверху и снизу вставлялись кассеты из меди, термостатируемые при помощи ультратермостатов. В кассеты закладывались тампоны из обезжиренной ваты, на поверхность которых помещались термопары. Тампоны прижимались колпачками с натянутыми латунными сетками. Вставленные кассеты вместе с корпусом образуют внутренний плоскопараллельный канал с геометрическими размерами $10 \times 5 \times 0,8$ см. С внешней стороны кассет впаяны трубки для ввода термопар (медь — константан) и дозированного количества дистиллированной воды, смачивающей тампоны. Точность измерения температуры поверхностей испарения и конденсации составляла $\pm 0,1^\circ$.

Зависимость между давлением пара и температурой по высоте разнотемпературного канала с плоскопараллельными влажными стенками для неподвижной среды рассмотрена в ⁽¹⁾. Эти же соотношения справедливы и в случае наличия в канале ламинарного потока воздуха ⁽²⁾. При небольшой разности температур T_1 и T_2 профиль пересыщения по высоте канала имеет параболический вид с максимальным пересыщением водяных паров $S_{\max}$ приблизительно в средней горизонтальной плоскости канала.

В описанную камеру вводится два потока с ламинарным режимом течения: воздушный поток с ядрами конденсации (по каналу 2), выходящий из клиновидного сопла C , расположенного посередине между плоскостями A и B , и омывающий его поток фильтрованного воздуха с той же или несколько большей скоростью (канал 1). Выходное сечение сопла имеет размеры $1 \times 0,02$ см. Конденсационный рост идет только на вводимых

искусственных ядрах, в результате чего образуется видимая аэрозольная струя, которая наблюдалась при боковом освещении в вертикальной плоскости HH_1 , перпендикулярной направлению потока, при помощи микроскопа M , оптическая ось которого совпадала с направлением потока.

Положение струи в кювете с влажными стенками при $T_1 = T_2$ принималась за нулевое. При $T_1 \neq T_2$ возникает, как следствие появления пере-сыщения водяных паров в объеме, градиентов температуры и концентра-ции, вертикальная составляющая скорости капель, что приводит к откло-нению струи от нулевого положения. Отклонение струи a складывается из отклонения a_g , вызванного действием силы тяжести в результате конденса-ционного роста капель на ядрах, и отклонения a_{TD} , вызванного дейст-вием сил термо- и диффузиофореза. Если при этом все силы направлены

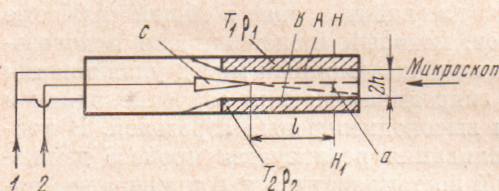


Рис. 1

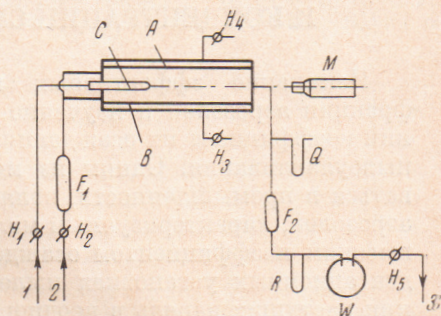


Рис. 2

в одну сторону ($T_1 > T_2$), то $a = a' = a_g + a_{TD}$. При изменении направле-ния температурного поля ($T_1 < T_2$) при той же заданной величине его градиента силы термо- и диффузиофореза действуют против силы тяжести, тогда $a = a'' = a_g - a_{TD}$.

Эта процедура позволяет по отдельности определить величину откло-нения, обусловленного действием силы тяжести, $a_g = (a' + a'') / 2$ и ве-личину отклонения, обусловленного действием сил термо- и диффузиофо-реза, $a_{TD} = (a' - a'') / 2$.

Общая схема установки изображена на рис. 2. При закрытых кранах H_1, H_2, H_3, H_4 посредством крана H_5 система присоединялась к водоструй-ному насосу и в системе устанавливалось заданное давление, измеряемое манометром Q . Через краны H_3, H_4 вводилось дозированное количество дистиллированной воды для смачивания ватных тампонов. После выравнивания температур ($T_1 = T_2$) по каналу 2 вводился воздушный поток, регулируемый микрокраном H_2 . Поток предварительно фильтровался через фильтр F_1 . Затем по каналу 1 вводился поток с ядрами хлористого нат-рия, скорость которого регулировалась микрокраном H_1 . Объемная ско-рость проходящего через кювету воздуха определялась с помощью реометра R . При вводе ядер в увлажненную кювету ($T_1 = T_2$) в плоскости HH_1 появлялась слабо светящаяся струя обводненных ядер. Положение верхней границы струи «проявленных» ядер в увлажненной камере, а иногда положение верхней границы струи контрольного аэрозоля (табач-ный дым), служило начальной координатой отсчета. После этого уста-навливался определенный перепад температур между плоскостями и по-верхней кромке струи выросших капель измерялось ее отклонение при из-менении направления поля $T_1 > T_2$ и $T_1 < T_2$ при равной величине его градиента.

Конвекция между параллельными горизонтальными пластинами при подогреве нижней возникает лишь при некотором критическом значении критерия Рэлея

$$Ra = \rho^2 (2h)^3 c_p g \beta \Delta T / \eta \kappa \quad (^{\circ}),$$

где ρ , κ , η и c_p — соответственно плотность, теплопроводность, вязкость и теплоемкость газа; β — коэффициент объемного расширения, $2h$ — расстояние между плоскостями. При этом может происходить движение двух видов: движение среды в стдельных малых объемах (ячейках), возникающее при $Ra = 1620$, и движение более общего вида, характеризующееся подъемом газа вверх в центре пластины с гораздо менее заметным обратным движением, возникающее при более низком значении Ra . Для наших условий $2h = 0,8$ см, $\Delta T = 2,4^\circ$, $Ra \approx 120$, т. е. конвекция первого вида должна отсутствовать.

Было также проведено экспериментальное определение условий, при которых в нашей кювете действие конвекции второго вида становится ощутимым. Постепенно повышали разность температур и измеряли отклонения струи табачного дыма, в сухой кювете при $T_1 > T_2$ и $T_1 < T_2$ и средней линейной скорости потока $0,5$ см/сек. Отсутствие искажения струи и равные величины отклонения в ту и другую сторону при заданной величине ΔT свидетельствовали об отсутствии конвекции. Оказалось, что конвекция отсутствует при таком ΔT , при котором разность плотностей воздуха у верхней и нижней плоскости кюветы не превышает $0,02 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Поэтому измерения отклонений струи в кювете с влажными стенками производились при температурах $T_1 = 293,8^\circ \text{K}$ и $T_2 = 291,4^\circ \text{K}$ и общем давлении в кювете $P = 700$ мм рт. ст., при которых разность плотностей смеси воздух — водяной пар у верхней и нижней плоскости составляет $0,011 \cdot 10^{-3}$ г/см³.

Обсуждение результатов измерений и сравнение с теоретическими формулами. Применялись ядра хлористого натрия, получаемые испарением соли на хромелевой спирали. Этот метод генерации ядер характеризуется нестабильностью величины образуемых ядер и, следовательно, нестабильностью величины вырастающих на них капель. Вследствие этого наблюдался разброс в значениях отклонения a_s , обусловленного действием силы тяжести и заметно зависящего от размера капли, которые соответствовали значениям радиусов капель (средним за время нахождения в кювете в каждом опыте) от $0,2$ до $0,8$ μ . Различия в значениях отклонения a_{TD} , обусловленного совместным действием термодиффузионных сил и движения центра масс газа, напротив, невелико и лежит в пределах точности эксперимента. Последнее обстоятельство позволяет принять значение радиуса капли при теоретическом расчете термодиффузионного отклонения a_{TD} , равным среднему между указанными выше ($\bar{r} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ см).

Следует заметить, что капли во время их нахождения в кювете, вообще говоря, могут значительно вырасти. Однако при сравнении экспериментального «термодиффузионного» отклонения a_{TD} с теоретическим мы можем считать их размеры постоянными. Действительно, расчеты, проведенные для непрерывно растущей и дающей наибольшее «гравитационное» отклонение капли в опытах и для капли, размер которой считался постоянным, равным соответствующему среднему размеру за время роста, дают значения отклонений a_{TD} , практически совпадающие между собой. Поэтому для расчета экспериментальной суммарной скорости термо- и диффузиофореза была использована формула

$$U_{TD} = (a_{TD}/l) \cdot V_{\max} (1 + a_{TD}^2/3h^2), \quad (1)$$

где a_{TD} — смещение частиц в вертикали, $V_{\max}$ — максимальная скорость потока в кювете, l — расстояние от сопла до плоскости наблюдения, $2h$ — высота канала.

Формула (1) получается при решении уравнений движения частиц в плоскопараллельном канале при наличии постоянной вертикальной силы, действующей на частицу в ламинарном потоке. Следовательно, при этом принято, что U_{TD} не зависит от размера капель и что частицы вводятся

в зону канала с установившимся режимом, характеризуемым постоянством вертикальных градиентов ⁽⁷⁾. Таким образом, была вычислена средняя суммарная скорость переноса капель: $\bar{U}_{TD} = (2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ см/сек.

Условиям опыта соответствовали: $T_1 = 293,8^\circ \text{K}$, $T_2 = 291,4^\circ \text{K}$, $\text{grad } T = 3,09$ град/см, $\text{grad } \rho = 3,28$ мм рт. ст./см, $P = 700$ мм рт. ст. Абсолютная ошибка эксперимента составляла $\Delta \bar{U}_{TD} = 0,44 \cdot 10^{-3}$ см/сек. Полученную величину суммарной скорости переноса аэрозольных частиц относительно стенок кюветы (относительно лабораторной системы координат) сравнивали с величиной скорости, рассчитанной по теоретическим формулам Б. В. Дерягина, Ю. И. Яламова, В. С. Галояна ⁽⁸⁾:

$$\begin{aligned} U_{TD}^{\text{теор}} &= U_T^{\text{теор}} + U_D^{\text{теор}} + U_{\text{ц.и.}}^{\text{теор}} = \\ &= \left\{ \frac{2\sigma [K_{Sl} + (m_1/m_2)(1 + 6C_m\lambda/r)] \kappa D_{12}}{n\Phi (1 + 2C_m\lambda/r)(1 + 2K_c\lambda/r)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2K_{TSl}v}{T\Phi (1 + 2C_m\lambda/r)} \left[\kappa_e + \left(\kappa_i + \frac{2Lm_1D_{12}\delta}{1 + 2K_c\lambda/r} \right) \frac{C_t\lambda}{r} \right] \right\} \text{grad } T - \\ &\quad - \frac{n_0}{n_{02}} D_{12} \left(1 + \frac{1 + 6C_m\lambda/r}{1 + 2C_m\lambda/r} \right) \frac{m_1}{m_2} \text{grad } C, \\ \Phi &= \left[2\kappa_e + \left(\kappa_i + \frac{2Lm_1D_{12}\delta}{1 + 2K_c\lambda/r} \right) \left(1 + 2C_t \frac{\lambda}{r} \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_T^{\text{теор}}$ — скорость термофореза летучих частиц, $U_D^{\text{теор}}$ — скорость диффузофореза летучих частиц, $U_{\text{ц.и.}}^{\text{теор}}$ — скорость переноса центра инерции относительных стенок прибора.

При расчете приняты следующие значения коэффициентов: $K_{Sl} = 0,36$; $K_{TSl} = 1,5$; $C_t = 2,16$ ⁽⁴⁾; $C_m = 1,13$ ⁽⁵⁾; $K_c = 1$ ⁽⁶⁾; $\delta = 3,36 \cdot 10^{16}$.

Теоретическая величина суммарной скорости по формуле (2) для наших условий составляет:

$$U_{TD}^{\text{теор}} = U_T^{\text{теор}} + U_D^{\text{теор}} + U_{\text{ц.и.}}^{\text{теор}} = (0,7 + 1,2 + 0,8) \cdot 10^{-3} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ см/сек.}$$

Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с формулами для термо- и диффузофореза умеренно крупных летучих частиц.

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
15 VI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Г. Амелин, Теоретические основы образования тумана при конденсации пара, М., 1966. ² А. И. Сторожилова, Сборн. Исследования поверхностных сил, Изд. АН СССР, 1961. ³ Р. Ч. Босворт, Процессы теплового переноса, М., 1957, стр. 132. ⁴ Ю. И. Яламов, Теория движения аэрозольных частиц в неоднородных газах, Диссертация, ИФХ АН СССР, 1968. ⁵ Ю. И. Яламов, И. Н. Ивченко, Изв. АН СССР, Мех. жидкости и газа, № 6, 139 (1968). ⁶ Н. А. Фукс, Испарение и рост капель в газообразной среде, Изд. АН СССР, 1958. ⁷ Н. И. Сторожилова, ДАН, 155, № 2 (1964). ⁸ Б. В. Дерягин, Ю. И. Яламов, В. С. Галоян, ДАН, 201, № 2 (1971).