

А. И. СТОРОЖИЛОВА, Г. И. ЩЕРБИНА

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ДИФфуЗИОФЕРЕЗА КРУПНЫХ НЕЛЕТУЧИХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В СМЕСИ ВОЗДУХ — ВОДЯНОЙ ПАР

(Представлено академиком И. В. Петряновым-Соколовым 10 VII 1974)

Для измерения скорости диффузиофореза V_D крупных аэрозольных частиц применен метод свободно падающих капель трансформаторного масла в вертикальной щели с поперечным градиентом концентрации водяного пара. Вертикальная щель 2 (рис. 1) с $H/L=43$, где $H=30$ см — высота щели, $L=0,7$ см — расстояние между вертикальными плоскостями A и B , укреплена на массивной подставке с установочными винтами для вертикальной ориентации щели. Внутреннюю полость вертикальной щели 2 образуют две съемные кассеты 3, термостатируемые с помощью ультратермостатов.

Между плоскостями A и B создавался поперечный градиент концентрации водяного пара. Для этого в одну из кассет вложена фильтровальная бумага, смоченная дистиллированной водой, а в другую — смоченная насыщенным раствором хлористого лития. Поскольку в результате испарения воды с одной из поверхностей и поглощения ее другой температура поверхностей A и B различна, было необходимо ее выравнивание посредством термостатирования. Равенство температур фиксировалось медь-константановой дифференциальной термопарой 4, спаи которой были помещены на смоченных поверхностях и прижатых к ним капроновыми сетками, натянутыми вдоль всей поверхности кассет.

Образованный с помощью дискового генератора аэрозоль трансформаторного масла с каплями радиуса $R=(13-20) \cdot 10^{-4}$ см попадал в вертикальную щель 2 через другую, плоскую, щель 1 размером $0,02 \cdot 5$ см², помещенную посредине верхнего торца щели 2 параллельно плоскостям A и B .

Капли масла осаждались на обработанную диметилдихлорсиланом стеклянную подложку 5, помещенную на нижнем конце щели 2. Коэффициент растекания капель трансформаторного масла на такой подложке известен⁽¹⁾ и, следовательно, радиус капель можно определить; его определяли с точностью 5%.

Капли, попадая в щель 2 с поперечным градиентом концентрации водяного пара испытывают действие диффузиофоретической силы, направленной перпендикулярно действию силы тяжести. В результате происходит смещение капель от вертикальной прямой на некоторое расстояние l , величина которого зависит от двух составляющих скорости: вертикальной — под действием силы тяжести — и горизонтальной, обусловленной действием диффузиофоретической силы. Таким образом, зная радиус капель и вычисленную по закону Стокса скорость их

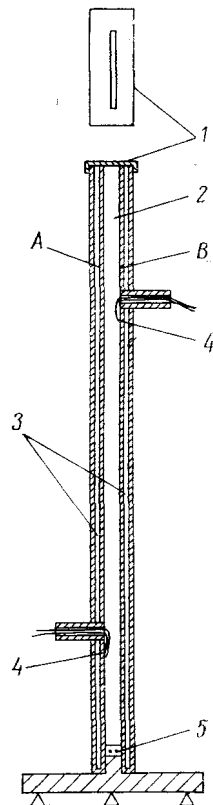


Рис. 1

падения V_g , высоту падения капель (высота вертикальной щели H) и величину смещения капель на подложке l , скорость диффузиофореза (в лабораторной системе координат) можно найти из формулы

$$V_D = V_g l / H. \quad (1)$$

Смещение капель l на подложке отсчитывали от «нулевой» линии, образованной из капель, осевших в отсутствие градиента концентрации водяного пара. Затем по формуле (1) вычисляли скорость диффузиофореза V_D и полученные значения осредняли. Эта операция допустима, поскольку скорость диффузиофореза в выбранной области радиусов частиц от них не зависит. Средняя определенная величина V_D в данной работе составляла $(5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ см/сек (указана средняя квадратичная ошибка серии измерений).

Для того чтобы исключить влияние термофореза на получаемые результаты, температура плоскостей A и B , как было сказано выше, выравнивалась, иначе возникающая термофоретическая сила, действуя навстречу диффузиофоретической, уменьшала бы отклонение капель. Выравнивание температур плоскостей A и B (опыты проводились при температуре 20°C) не исключало конвективного движения в щели за счет разности плотностей газа на этих плоскостях, которая составляла $\Delta\rho = 0,13 \cdot 10^{-4}$ г/см³. Для этого случая стационарного конвективного движения газа в плоскопараллельной равнотемпературной вертикальной щели, внутри которой создается заданная разность плотностей газа, можно аналогично (2) найти распределение плотности и скорости движения газа по ширине щели:

$$\rho = \rho_0 + \frac{\Delta\rho}{L} x \quad V_k = \frac{g\Delta\rho(L/2)^2}{12\nu\rho_0} \left[\left(\frac{x}{L/2} \right)^3 - \left(\frac{x}{L/2} \right) \right], \quad (2)$$

где x — текущая координата, $\Delta\rho$ — разность плотностей среды между стенками канала, ν , ρ_0 — соответственно кинематическая вязкость и плотность среды, g — ускорение силы тяжести.

Максимальная скорость стационарного конвективного движения газа в вертикальной плоскопараллельной щели возникает на расстояниях $1/4L$ от медианной плоскости. Чем меньше капли, тем больше их смещение в горизонтальной плоскости щели, а следовательно, тем больше влияние на их движение возникающей конвекции. В данной схеме опытов конвективное движение газа действовало в сторону, противоположную направлению скорости падения капель, что приводило к увеличению величины отклонения капель l .

Оценки показали, что для капель радиуса $13 \cdot 10^{-4}$ см скорость конвективного движения газа не превышает 13% от скорости падения капель под действием силы тяжести, а для капель радиуса $20 \cdot 10^{-4}$ см эта величина составляет 7%. Это учитывалось при определении V_g : вычисленная по измеренному радиусу капли скорость осаждения V_g уменьшалась на величину V_k , рассчитанную следующим образом. Так как на всем пути движения капель x изменяется от 0 до l , то в формулу (2) для V_k вместо x подставляем $l/2$, что и дает указанную поправку. С учетом этой поправки скорость диффузиофореза капель и составляет $(5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ см/сек. Из-за конвективного движения в щели капли оказываются в поле поперечного градиента скоростей, что приводит к вращению частиц и, следовательно, к возникновению силы Мангуса (3, 4), действующей в горизонтальной плоскости и вызывающей поперечное смещение частиц со скоростью

$$V_M = \frac{4R^2 V_g \omega}{9\nu}, \quad (3)$$

где ω — угловая скорость вращения частиц. Скорость бокового смещения в данном случае направлена противоположно скорости движения капель под

действием силы Мангуса, которая не превышала 0,01% от скорости диффузиофореза.

Используя принцип Онзагера термодинамики необратимых процессов, Б. В. Дерягин и Ю. И. Яламов получили (⁵, ⁶) выражение для скорости диффузиофореза больших нелетучих аэрозольных частиц относительно центра инерции бинарной газовой смеси

$$V_D^c = -D_{12} \frac{n(m_2 - m_1)}{\rho} \text{grad } C_1, \quad (4)$$

где m_1 и m_2 , n_1 и n_2 — массы молекул компонентов и их концентрация; D_{12} — коэффициент взаимной диффузии бинарной газовой смеси; n — общая концентрация газовой смеси, $n = n_1 + n_2$, ρ — плотность смеси. Для движения частиц в поле диффузии, например, водяного пара, когда газ неподвижен (компонента 2) и водяной пар (компонента 1) диффундирует через него (испаряется одной стенкой и поглощается другой), центр инерции смеси будет иметь скорость

$$V_C = -D_{12} \frac{m_1 n^2}{\rho n_2} \text{grad } C_1. \quad (5)$$

Суммируя (4) и (5), получим для случая $n_1 \ll n_2$

$$V_D = -D_{12} \frac{n(m_2 - m_1)}{n_2 m_2} \text{grad } C_1 - D_{12} \frac{m_1 n}{n_2 m_2} \text{grad } C_1 = -D_{12} \text{grad } C_1. \quad (6)$$

Таким образом, направление и величина этой скорости те же самые, что и средние массовые скорости диффузионного потока легкого компонента.

Прямой метод расчета (⁶, ⁷) скорости диффузиофореза в той же самой системе координат дает близкое значение для $K_n = \lambda/R \rightarrow 0$:

$$V_D = -D_{12}(K_{sl} + m_1/m_2) \text{grad } C_1 = -D_{12}\epsilon \text{grad } C_1, \quad (7)$$

где K_{sl} — коэффициент диффузионного скольжения, равный 0,36 для случая смеси водяной пар — воздух. С учетом членов порядка λ/R согласно (⁷) формула (7) имеет вид

$$V_D \approx -D_{12} \frac{\epsilon}{(1 + 2C_m \lambda/R)} \text{grad } C_1, \quad (8)$$

где C_m — коэффициент газокинетического скольжения газа, равный 1,13; $\epsilon = 0,98...$

Ранее полученный Брокром (⁸) результат для коэффициента диффузионного скольжения примерно в 2 раза меньше, чем в формулах (7), (8).

Измеренные нами скорости диффузиофореза капель масла в интервале радиусов $(13-20) \cdot 10^{-4}$ см ($K_n = 0,005-0,003$) сравнили с результатами расчета по формулам (6) и (8). Теоретические значения, согласно этим обеим формулам, для условий нашего эксперимента практически не отличаются и составляют $6,6 \cdot 10^{-3}$ см/сек. Таким образом, в эксперименте получается значение $V_D = (5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ удовлетворительно согласующееся для этих размеров частиц с данными формул как (6), так и (8).

Сравнение ранее полученных нами экспериментальных данных (⁹) с формулами (6) и (8) показывает, что в интервале $K_n \sim 0,3 - 0,5$ экспери-

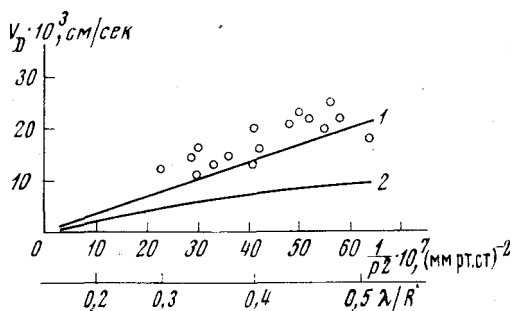


Рис. 2

ментальные результаты удовлетворительно описываются формулой (6), они в 1,5—2 раза больше, чем это следует из формулы (8), и примерно в 3 раза больше, чем дает формула в работе (8). На рис. 2 изображена зависимость V_D от $K_n \sim 0,3 - 0,5$. Теоретическая кривая 1 построена на основании формулы (6), кривая 2 согласно формуле (8).

Таким образом, полученные результаты подтвердили формулу для скорости диффузиофореза, выведенную Б. В. Дерягиным и Ю. И. Яламовым на основе принципа симметрии кинетических коэффициентов Онзагера, и опровергли формулу Брока. Преимущество формулы Б. В. Дерягина и Ю. И. Яламова состоит в том, что она выведена из более общих положений и ее крайне простая форма имеет смысл важного физического закона. Та же формула применима и к диффузиофорезу однокомпонентных летучих частиц (6).

Авторы выражают благодарность чл.-корр. АН СССР Б. В. Дерягину за общее руководство и ценные советы.

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
3 VII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ З. М. Южный, Колл. журн., т. 20, № 4 (1968). ² Ф. З. Гершун, Е. М. Жуховицкий, Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости, «Наука», 1972. ³ М. А. Гольдштик, В. Н. Сорокин, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 6 (1968). ⁴ G. B. Jeffery, Proc. Roy. Soc., v. 102A, 164 (1922). ⁵ B. V. Derjaguin, Yu. I. Yalamov, A. I. Storozhilova, J. Coll. Sci., v. 22, 117 (1966). ⁶ B. V. Derjaguin, Yu. I. Yalamov, The Theory of Thermophoresis and Diffusiophoresis of Aerosol Particles and their Experimental Testing, Topic in Current Aerosol Research, Part 2, v. 3. London, 1972. ⁷ Ю. И. Яламов, Б. А. Обухов, ЖТФ, т. 42, в. 5 (1972). ⁸ J. R. Brock, J. Coll. Sci., v. 18, 489 (1963). ⁹ А. И. Сторожилова, ДАН, т. 155, № 2, 426 (1964).