

**Чернова Е.А., Турецкий А.Е., Липатов Г.Н., Копыт Н.Х.**

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова,  
ПНИЛ ФАС, ул. Дворянская, 2, Одесса, 65026, Украина*

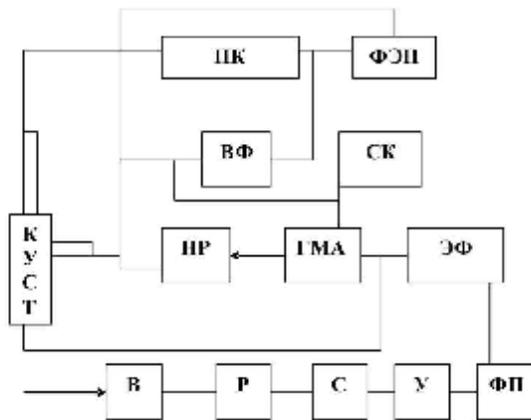
### **Термофорез умеренно крупных частиц**

*Получены экспериментальные данные скорости термофореза умеренно крупных аэрозольных частиц. Описан метод определения скорости термофореза, основанный на измерении коэффициента захвата аэрозольных частиц в плоском щелевом разнотемпературном канале. Приводится сравнение с имеющимися теоретическими и экспериментальными исследованиями. Установлено, что при коэффициентах аккомодации  $\alpha_t = 1$ ,  $\alpha_e = 0.8$  полученные данные хорошо описываются зависимостью Бернесева С.А., Черняка В.Г.*

В газах с неоднородным распределением температуры на частицы действует термофоретическая сила, вызывающая установившееся движение частиц в область с более низкой температурой. Явление термофореза было обнаружено давно. Еще Тиндаль в 1870 году заметил, что вокруг зажженной свечи, внесенной в запыленную атмосферу, появляется чистая прозрачная область. С тех пор изучению этого явления уделялось много внимания. Были теоретически достаточно точно описаны крайние режимы течения газа – гидродинамический (число Кнудсена  $Kn \ll 1$ ) и свободно-молекулярный ( $Kn \gg 1$ ) в рамках гидродинамики и кинетической теории газов [1, 2] ( $Kn = \lambda / r$ , где  $\lambda$  – длина свободного пробега молекул газа,  $r$  – размер частицы). Для переходного режима течения газа ( $Kn \approx 1$ ) существуют разногласия в результатах теоретического описания [3, 4]. Экспериментальные исследования зачастую выполнены для нескольких значений чисел  $Kn$ . Разработанные методики измерений скорости (силы) термофореза дают противоречивые результаты. Нет систематических исследований, которые бы охватывали достаточно большой диапазон размеров частиц, материала частиц, сред.

В связи с этим, нами продолжены, ранее проведенные для свободно-молекулярного режима течения газа [5, 6] экспериментальные исследования скорости термофореза, для более крупных частиц, т.е. для режима течения со скольжением и переходного режима течения газа. Была усовершенствована методика определения скорости термофореза, позволяющая более точно определять захват частиц в плоско-параллельном канале, путем прямого измерения коэффициента захвата (ранее использовали метод так называемого «нулевого проскока»). Коэффициент захвата определялся путем сопоставления интенсивности рассеянного частицами света до и после устройства с помощью нефелометра.

Метод определения скорости термофореза заключался в измерении коэффициента захвата аэрозольных частиц при ламинарном движении в плоском

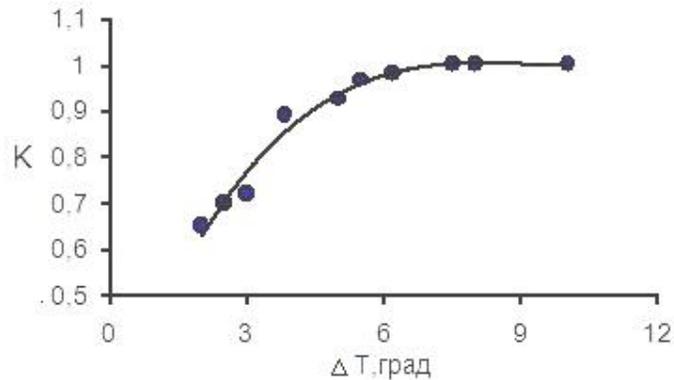


**Рис. 1.** Блок-схема установки: В – воздуходувка; Р – ресивер; С – силикагель; У – уголь; ФП – фильтр Петрянова; ЭФ – электрический фильтр; ГМА – генератор монодисперсного аэрозоля; НР – неселективный разбавитель; ВФ – веерный фильтр; СК – седиментационная камера; ФЭН – фотоэлектронный нефелометр; ПК – плоский канал; КУСТ – конденсационный укрупнитель.

щелевом разнотемпературном канале, построении физико-математической модели осаждения частиц в таком устройстве, в нахождении скорости термофореза с помощью компьютерной программы расчета по данным измерения параметров осаждения (перепада температур между поверхностями канала, скорости течения газа, размера частиц, коэффициента теплопроводности частиц).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Поток воздуха, создаваемый компрессорами типа УК-40 (В) через ресивер (Р), служащий для сглаживания пульсаций давления, поступал в блок фильтрации, где подвергался тщательной очистке, необходимость в которой продиктована высокой чувствительностью укрупнителей типа КУСТ не только к высокодисперсным аэрозолям, но и к молекулярным ядрам конденсации [7].

К выходу генератора монодисперсных аэрозолей (ГМА) подключался блок неселективных разбавителей (НР), служащий для уменьшения счетной концентрации частиц до величины  $\approx 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ . В этом диапазоне концентраций размер укрупненных в КУСТе частиц не зависит от первоначальной концентрации ядер, поданных на вход КУСТа, что позволяет применять нефелометрический метод определения коэффициента захвата. Из ГМА аэрозоль подавался на вход плоского разнотемпературного канала, в котором исследовалось термофоретическое движение высокодисперсного аэрозоля. Плоский щелевой канал длиной  $25 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , шириной  $15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , образован двумя плоскопараллельными медными пластинами, толщиной 0.008 м. Высота канала составляла 0.004 м. Канал устанавливали в горизонтальной плоскости с точностью  $\pm 0.30$ . Температура горячей пластины поддерживалась на заданном уровне с помощью электрического нагревателя, температура холодной пластины – водяным термостатом. Измерения температуры проводили с помощью многозаходных медь-константовых термопар, спаи которых располагались по центру канала в теле пластин в не-



**Рис. 2** Зависимость коэффициента захвата от перепада температур между пластинами канала:  
 $r_g = 15.5$  нм;  $V = 0.39 \cdot 10^{-2}$  м/с;  $\lambda_i / \lambda_e = 243$ .

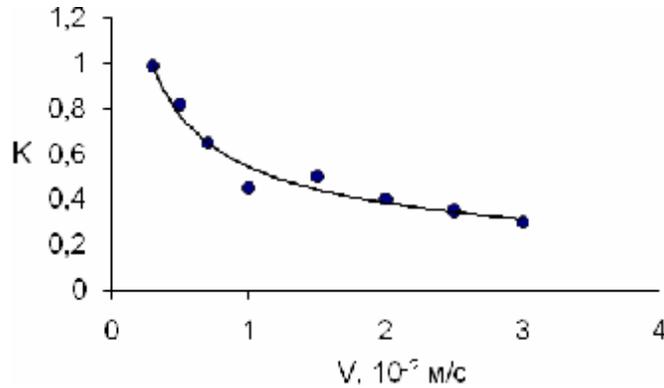
посредственной близости к внутренней поверхности канала. В качестве генератора аэрозолей использовали генератор [8] хлористого натрия ( $\lambda_i / \lambda_e = 243$ , где  $\lambda_i$ ,  $\lambda_e$  – коэффициент теплопроводности частицы и газа, соответственно) для генерирования аэрозолей, размерами 10...300 нм. Для получения более крупного аэрозоля (до 0.7 мкм по радиусу), аэрозоль пропускали через укрупнитель типа КУСТ [9]. Определение размеров и степени полидисперсности аэрозольных частиц осуществлялся с помощью седиментационной камеры, если размер частиц  $r > 0.3$  мкм, и с помощью веерных фильтров (диффузионный метод) при  $r < 0.3$  мкм.

Процесс образования аэрозоля имел несколько стадий. На первой стадии (1-ая печь) происходило образование высокодисперсного аэрозоля фтористого натрия, на второй стадии (2-я печь) на частицах фтористого натрия, как на ядрах, конденсировались пары хлористого натрия. На 3-ей стадии (3-я печь) протекало дальнейшее укрупнение и перестройка спектра размеров. После каждой стадии размер частиц увеличивался.

Скорость осаждения частиц (поперечная скорость движения частиц) тесно связана с экспериментально измеряемой величиной коэффициента захвата, т.е. определения доли частиц, осевших в канале к общему числу частиц, вошедших в канал.

В работе определяли коэффициент захвата в зависимости от перепада температур между пластинами канала (рис. 2) при фиксированной скорости течения в канале и размере частиц. Из рисунка следует, что осаждение частиц возрастает с ростом перепада температур. На рис. 3 показана зависимость коэффициента захвата от скорости течения в канале. С увеличением продольной скорости течения осаждение частиц уменьшается, т.к. уменьшается время нахождения частиц в канале.

Скорость осаждения частиц на стенки канала в общем случае обусловлена тремя процессами: седиментацией, термофорезом и броуновской диффузией, степень влияния которых зависит от размера частиц.



**Рис. 3** Зависимость коэффициента захвата от скорости течения газа в канале:  
 $r = 12.5 \text{ нм}$ ;  $\dot{N}T = 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ К/м}$ ;  $\lambda_i / \lambda_e = 243$ .

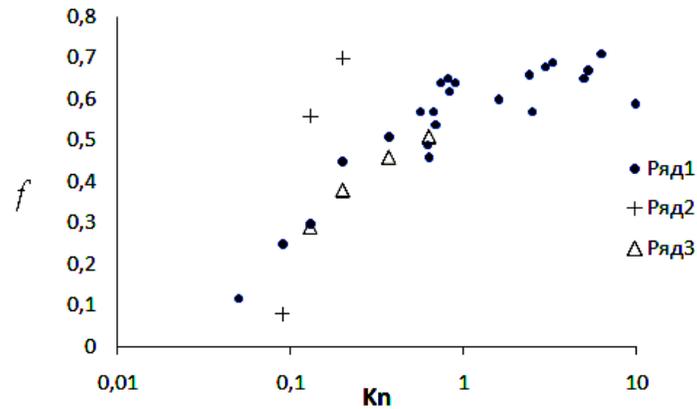
Система уравнений, описывающая теплоперенос в плоском щелевом разнотемпературном канале имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0; \\ V_x \frac{\partial N}{\partial x} + V_z \frac{\partial N}{\partial z} - D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = 0; \\ x = 0, \quad T = T_1; \\ x = h, \quad T = T_2; \\ N(0, z) = N(h, z) = 0; \\ N(x, 0) = N_0; \\ V_x = -f \cdot \frac{n}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + V_g. \end{aligned}$$

Коэффициент захвата связан с коэффициентом проскока следующей зависимостью.

$$K_{np} = 1 - K = \frac{1}{\langle V_z \rangle} \int_0^h V_z(x) N_z(x) dx;$$

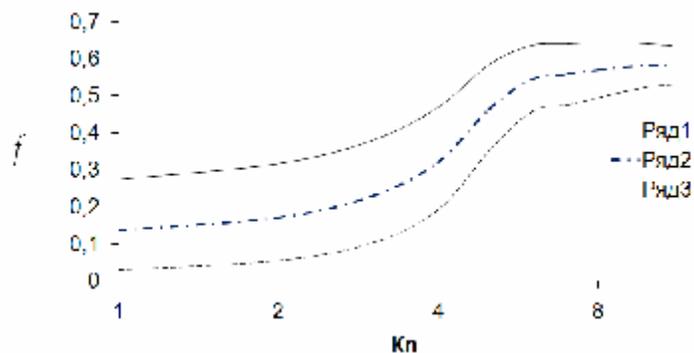
где  $N(x, z)$  – численная концентрация аэрозольных частиц;  $D$  – коэффициент броуновской диффузии частиц;  $V_z$  – продольная составляющая скорости частицы;  $V_x$  – поперечная составляющая скорости частицы;  $V_g$  – скорость под действием силы тяжести;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $f$  – приведенная скорость термофореза, скалярная величина, зависящая от характеристик газовой среды и частицы, а также от числа Нуссельта.



**Рис.4** Экспериментальные данные приведенной скорости термофореза: ряд 1 – наши экспериментальные данные, ряд 2 – данные работы [10], ряд 3 – данные работы [11].

Система уравнений решалась численно методом конечных разностей с использованием неявной четырехточечной однородной схемы. Такая схема расчета дает возможность, по измеренным характеристикам осаждения частиц при движении в плоском разнотемпературном канале, определить скорость термофореза аэрозольных частиц.

При построении модели были введены некоторые упрощающие предположения. При записи уравнений предполагалось, что процесс теплообмена установившийся. Однако известно, что на входе в канал существует участок, где значения температур и скоростей отличны от их значений на бесконечности. Это участок тепловой и гидродинамической стабилизации потока. Расчеты участков показали, что их величина несущественна по сравнению с длиной канала. Таким образом, экспериментальная модель реализует предположения теории и позволяет использовать её для определения скорости термофореза.



**Рис.5** Сравнение экспериментальных данных с данными работы [12, 13]: ряд 1 –  $\alpha_\tau = \alpha_e = 1$ , ряд 2 – экспериментальные данные; ряд 3 –  $\alpha_\tau = 1, \alpha_e = 0.6$ .

На рис. 4 показаны наши экспериментальные данные и данные других авторов для аэрозоля хлористого натрия.

Сравнение наших экспериментальных данных с имеющимися теориями для переходного режима течения газа показало, что зависимости Береснева С.А., Черняка В.Г. [12,13] при коэффициентах аккомодации  $\alpha_t = 1$ ,  $\alpha_e = 0.8$  наилучшим образом описывают наши экспериментальные данные [14,15].

Отсутствие надежных данных по коэффициентам аккомодации не позволяет провести более точное сравнение. Для переходной области течения теоретические зависимости скорости термофореза монотонно возрастают с увеличением числа Кн кроме зависимости [4] и при  $Kn \approx 10$  выходят на Вальдмановский предел. Экспериментальные данные также дают монотонно возрастающую зависимость.

### Литература:

1. *Epstein P.S.* Zur Theorie des Radiometers // Zeitschrift fur Physik. – 1929. – Bd 54, H.7-8. – S. 537-563.
2. *Баканов С.П., Дерягин Б.В.* О теории термопреципитации высокодисперсных систем // Коллоидный журнал. – 1959. – Т.21, № 4. – С. 377-384.
3. *Brock J.R.* On the Theory of Thermal Forces // Journal of Colloid and Interface Science – 1962. – Vol. 17. – P. 768-780.
4. *Dwyer H.A.* Thirteen-Moment Theory of the Thermal Force on a Spherical Particle // Physics of Fluids. – 1967. – Vol. 10, № 5. – P. 976-985.
5. *Lipatov G.N., Chernova E.A.* Thermophoresis of highly dispersed aerosols // Journal of Aerosol Science. – 1989. – Vol.20, № 8. – P.931-933.
6. *Чернова Е.А.* Термофорез высокодисперсных аэрозолей. / Дисс. канд. физ.-мат. наук. – 1987. – 158 с.
7. *Коган Я. И.* Молекулярные ядра конденсации // Доклады АН СССР. – 1965. – Т. 161, №2. – С. 388-391.
8. *Espenscheid W.F., Matijevic E., Kerker M.* Aerosol Studies by Light Scattering. III Preparation and Particle Size Analysis of sodium Chloride Aerosols of narrow soze distribution // Journal of Chemical Physics. – 1964. – Vol. 68, N 1. – P. 2831-2842.
9. *Коган Я.И., Бурнашева З.А.* Укрупнение и измерение ядер конденсации в непрерывном потоке // Журнал физической химии. – 1960. – Т. 34, № 12. – С. 2630-2639.
10. *Сторожилова А.И., Щербина Г.И.* Измерение скорости термофореза крупных аэрозольных частиц и применение результатов измерения к определению коэффициента теплового скольжения газа // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 217, № 2. – С. 386-389.
11. *Prodi F., Santacihara G.* Measurements of thermophoresic velocities of aerosol particles in the transition region // Journal Aerosol Science. – 1979. – Vol. 10, № 4. – P. 421 - 425.
12. *Береснев С.А., Черняк В.Г.* Термофорез сферической аэрозольной частицы при произвольных числах Кнудсена. Постановка задачи и метод решения // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Т. 24, № 2. – С. 313-321.

13. Береснев С.А., Черняк В.Г. Термофорез сферической аэрозольной частицы при произвольных числах Кнудсена. Обсуждение результатов // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Т. 24, № 3. – С. 549 -557.
14. Чернова Е.А., Турецкий А.Е., Липатов Г.Н., Копыт Н.Х. Экспериментальное исследование термофореза умеренно-крупных аэрозольных частиц // Прикладные задачи математики и механики. XV научная конференция ученых Украины, Беларуси, России, 17-21 сент. 2007г., Севастополь / Тез. докл. – Севастополь: НТУ. – 2007. – С.162-163.
15. Чернова Е.А., Турецкий А.Е., Липатов Г.Н., Копыт Н.Х. Термофорез умеренно-крупных частиц // Дисперсные системы. XXII научная конференция стран СНГ, 22-26 сент. 2008 г., Одесса, Украина / Тез. докл. – Одесса: Астропринт, 2008. – С.375-376.

***Chernova E.A., Turetsky A.E., Lipatov G.N., Kopyt N.Kh***

### **Thermophoresis of moderately large particles.**

#### SUMMARY

*Experimental data of thermophoresis rate of aerosol moderately large particles are obtained. Thermophoresis rate determination method based upon aerosol particles trapping coefficient measuring in plane-slot channel of different temperatures is described. Comparison with existing theoretical and experimental researches is given. It's determined that obtained results are in good agreement with Beresnev S.A., Chernyak V.G. dependence when accommodation coefficients possess the values:  $\alpha_{\tau} = 1$ ,  $\alpha_e = 0.8$ .*

***Чернова Е.О., Турецкий О.Е., Липатов Г.М., Копит М.Х.***

### **Термофорез помірно великих частинок**

#### АНОТАЦІЯ

*Отримані експериментальні дані швидкості термофорезу помірно великих аерозольних частинок. Описаний метод визначення швидкості термофорезу, що оснований на вимірюванні коефіцієнту захоплення аерозольних частинок в плоскому щілинному різномінературному каналі. Приводиться порівняння з наявними теоретичними і експериментальними дослідженнями. Встановлено, що при коефіцієнтах акомодатії  $\alpha_{\tau} = 1$ ,  $\alpha_e = 0.8$ , отримані дані добре описуються залежністю Береснева С.А., Черняка В.Г.*