

УДК 534.29

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

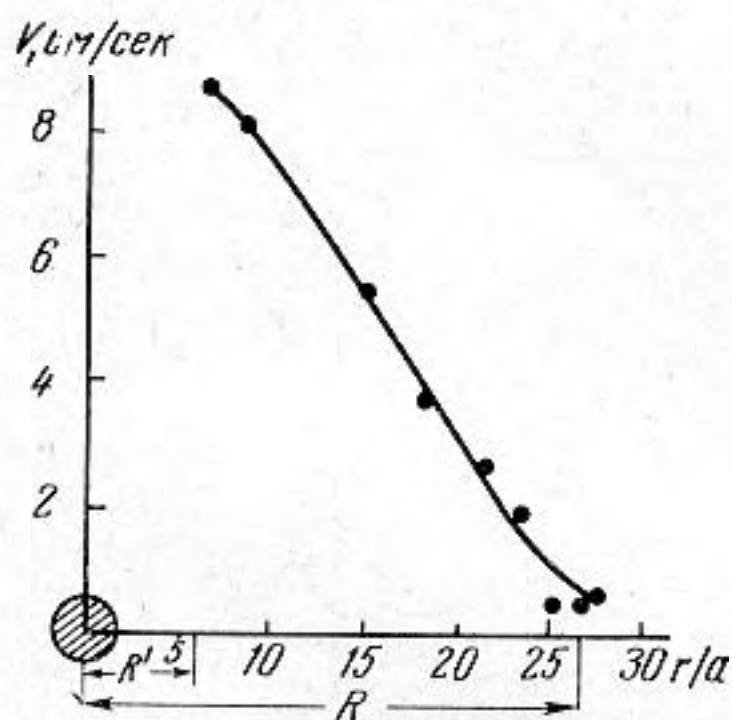
Н. Д. Широкова

Приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия частиц аэрозоля в акустическом поле; показано, как зависит скорость относительного движения частиц, радиус взаимодействия и расстояние ближайшего подхода частиц друг к другу от частоты и уровня звука; делается попытка объяснить полученные закономерности на основе потокового механизма процесса.

Взаимодействие частиц аэрозоля в звуковом поле изучалось нами с помощью скоростной киносъемки. Наиболее детальное исследование было проведено со взвешенным в воздухе порошком ликоподия, частицы которого имеют размер 20 мк. Как сообщалось в работе [1], в результате покадровой обработки киноматериала были построены траектории движения частиц в абсолютной и относительной системах координат. При этом оказалось, что частицы движутся друг относительно друга строго определенным образом. В работе [2] было предложено объяснение элементарных актов взаимодействия частиц на основе рассмотрения потоков, существующих вокруг этих частиц в акустическом поле.

Основной интерес при изучении взаимодействия частиц представляет их относительное движение. Количественными характеристиками процесса являются: 1) радиус взаимодействия (расстояние между частицами, с которого они начинают сближаться или перестают отталкиваться); 2) наименьшее расстояние между центрами частиц, достигаемое при их взаимодействии; 3) максимальное значение модуля скорости относительного движения частиц. На фиг. 1 показано, как изменяется скорость при движении вдоль траектории относительного движения. По оси абсцисс отложено безразмерное расстояние между частицами r/a , где a — радиус частицы. Как видно, величина скорости не остается постоянной и максимальна в месте наибольшего сближения частиц. Расстояние R , с которого скорость относительного движения частиц начинает возрастать, мы будем считать радиусом взаимодействия частиц, а через R' обозначим расстояние максимального сближения.

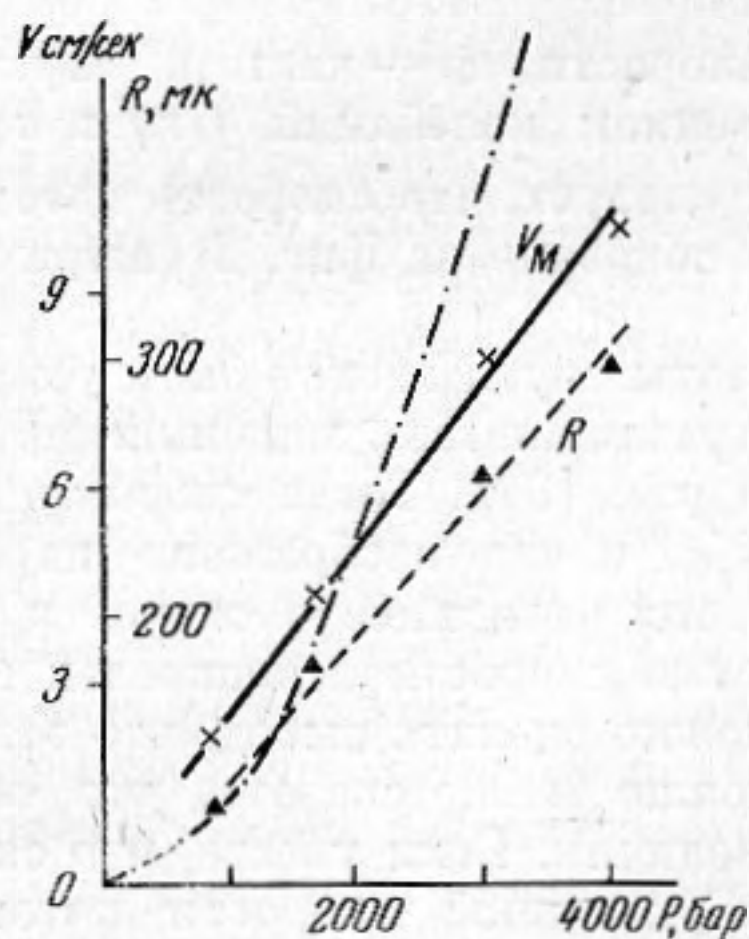
Все перечисленные характеристики являются функциями акустических условий. Радиус взаимодействия и максимальная скорость имеют одинаковый характер зависимости от уровня и частоты звука. На фиг. 2 видно, что обе эти величины увеличиваются с ростом звукового давления при частоте звука 2 кгц (штриховая кривая — радиус взаимодействия, сплош-



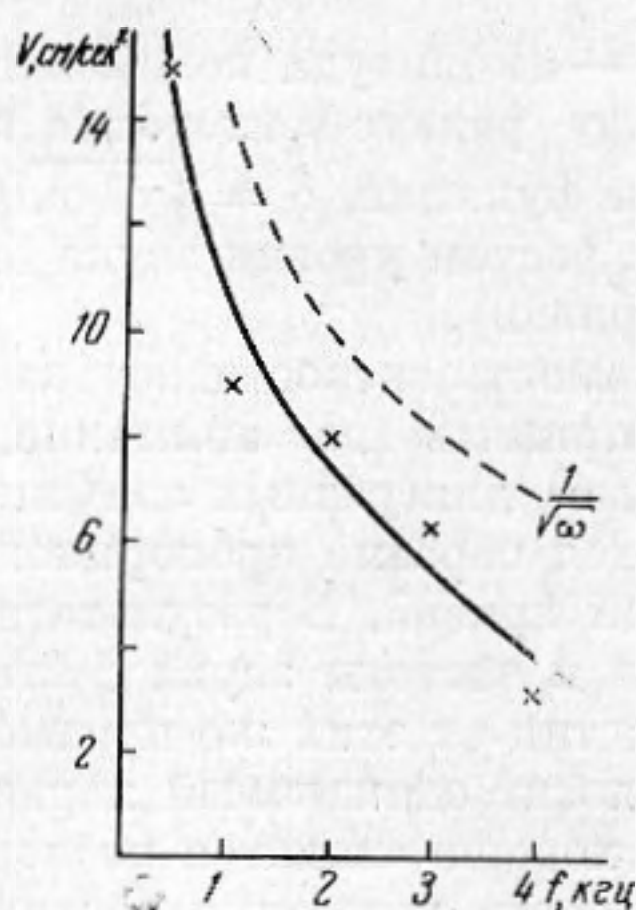
Фиг. 1

ная кривая — скорость). Зависимость максимальной скорости относительного движения частиц V_M от частоты звука при постоянном звуковом давлении (3000 бар) приведена на фиг. 3 сплошной линией, где видно, что на более высоких частотах частицы взаимодействуют менее интенсивно. Однако при этом они ближе подходят друг к другу, как это следует из фиг. 4, где по оси ординат отложено минимальное расстояние между частицами в микронах, падающее с ростом частоты.

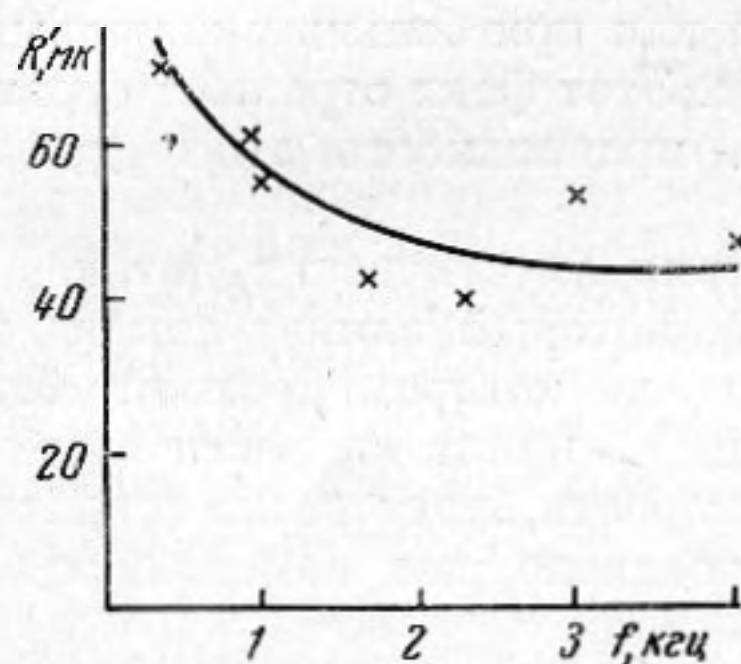
На характер взаимодействия частиц оказывают влияние свойства среды, в которой находятся частицы. Наши опыты показали, что в гелии, который обладает кинематической вязкостью ν , почти в семь раз большей,



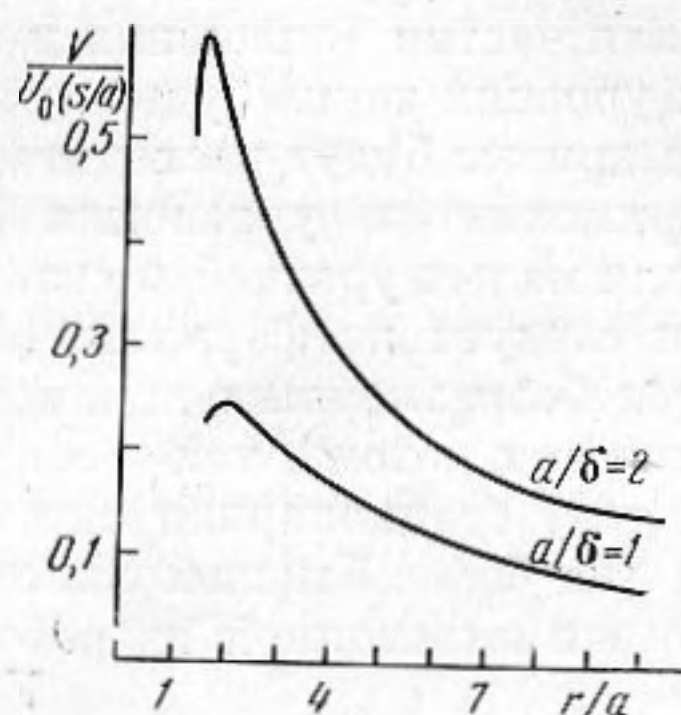
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

чем воздух, частицы взаимодействуют при одинаковой колебательной скорости и частоте звука менее интенсивно и на большем расстоянии. Так, при частоте звука 3 кГц и амплитуде колебательной скорости 70 см/сек максимальная относительная скорость частиц в воздухе 6 см/сек, а в гелии — 2 см/сек; расстояние ближайшего подхода в воздухе 50 мк, в гелии — 150 мк.

Такого рода закономерности хорошо согласуются с особенностями акустических течений около препятствий. Точное решение задачи о потоках вокруг аэрозольных частиц потребовало бы решения нелинейных уравнений, поскольку пренебрежение в уравнении Навье — Стокса нелинейным членом $(U\nabla)U$, имеющим порядок U^2/a , по сравнению с членом

$\frac{\partial U}{\partial t} \sim \frac{U^2}{s}$, где s — амплитуда смещения, возможно лишь при условии $S/a < 1$, которое не выполняется для частиц самых малых размеров. Для

акустических режимов, в которых нами изучалось взаимодействие частиц, всегда справедливо обратное неравенство $s/a > 1$. Однако, согласно данным работы [3], потоки, рассчитанные при условии $s/a < 1$, наблюдались экспериментально также и при больших амплитудах. Поэтому будем проводить сравнение особенностей взаимодействия частиц со свойствами потоков, полученными на основании работы [3], где уравнение функции тока потока, возникающего в звуковом поле около цилиндра, представлено следующим образом:

$$\psi = -\frac{U_0^2}{4\omega} f(r/a, a/\delta) \sin 2\theta. \quad (1)$$

Здесь U_0 — амплитуда колебательной скорости, ω — частота звука, θ — угол между радиус-вектором и направлением колебаний, $f(r/a, a/\delta)$ — некоторая функция, $\delta = \sqrt{\nu/\omega}$. Отсюда следует, что скорость потока возрастает с ростом уровня звука, как это показано на фиг. 2 (штрих-пунктирная кривая).

Зависимость скорости потока от частоты звука может быть установлена, если принять во внимание, как различаются значения функции $f(r/a, a/\delta)$ для разных значений a/δ (см. [3]). Тогда скорость потока оказывается обратно пропорциональной $\omega^{1/2}$, что изображено на фиг. 3 штриховой кривой. В результате сравнения зависимости скорости потока от уровня и частоты звука с зависимостью скорости относительного движения частиц от этих же параметров можно сделать вывод, что эти зависимости носят одинаковый характер; можно также сказать, что обе эти скорости хорошо сходятся по порядку величин. Если учесть, что скорость относительного движения частиц равна удвоенной скорости потока, поскольку каждая из взаимодействующих частиц движется в потоке, возникающем около другой, то совпадение скоростей потока и относительного движения частиц (сплошная и штрих-пунктирные кривые на фиг. 2) при малых уровнях звука будет лучше, тогда как при больших звуковых давлениях кривые будут расходиться сильнее. Этот факт отражает ограниченную применимость уравнения (1), т. е. правильность этого уравнения лишь для малых уровней звука.

Как следует из формулы (1), геометрия акустических потоков определяется безразмерным параметром a/δ , который влияет как на значение скорости потока, так и на расстояние, на котором проходит ближайшая к телу стационарная линия тока, где величина скорости еще значительна (на более близких линиях тока скорость будет резко спадать). На фиг. 5, заимствованной из работы [3], показано, как изменяется безраз-

мерная скорость потока $\frac{V}{U_0(s/a)}$ вдоль линии тока для разных значений a/δ .

Изменение величины скорости потока с расстоянием носит тот же характер, что и изменение скорости относительного движения частиц, изображенное на фиг. 1 ($a/\delta = 0,3$). Для больших значений $a/\delta = a\sqrt{\omega}/\nu$ линии тока ближе подходят к телу, для малых, наоборот, отодвигаются от него. Это обстоятельство объясняет тот факт, что с ростом частоты звука расстояние ближайшего подхода частиц уменьшается. Изменение частоты от 400 гц до 4 кгц соответствует изменению a/δ от 0,15 до 0,4.

Еще заметнее влияние параметра a/δ на величину скорости и минимальное расстояние в опытах с гелием. В этом случае величина a/δ принимает значения 0,05—0,13. Линии тока проходят на еще большем расстоянии от тела, а величина скорости снижается, что согласуется с результатами экспериментов по взаимодействию частиц в гелии.

Исходя из особенностей акустических потоков, можно дать качественное объяснение также и эффекту образования в звуковом поле простран-

ственных агрегатов. Как сообщалось в работе [4], в акустическом поле частицы монодисперсных аэрозолей образуют два типа агрегатов: частицы ликоподия ($a = 10^{-3}$ см) в агрегатах соприкасаются друг с другом, тогда как споры ликопердона ($a = 1,7 \cdot 10^{-4}$ см) образуют пространственные агрегаты, в которых они находятся на некотором расстоянии друг от друга, хотя движутся, а также взаимодействуют с другими частицами и агрегатами как одно целое.

Эксперименты с полидисперсными аэрозолями — цинковыми белилами (максимум распределения частиц по размерам лежит в районе 1 мк) и пылью полихлорвинила (большинство частиц имеет размер более 20 мк) — подтвердили предположение о том, что тип агрегатов определяется размером частиц: мелкие образуют пространственные агрегаты, крупные — комки.

Если говорить об акустических потоках около больших и малых частиц, то нужно отметить, что для ликопердона a / δ имеет значение 0,03—0,07, т. е. почти на порядок меньше, чем для ликоподия. Поэтому частицы ликопердона будут взаимодействовать на расстояниях, значительно превосходящих их размеры, когда захват частиц в принципе невозможен. При этом частицы, подойдя на ближайшее расстояние, будут двигаться дальше в общем потоке в виде пары, уже не взаимодействуя между собой. При снятии акустического поля пространственные агрегаты, образованные частицами разного размера, будут постепенно разрушаться, тогда как образованные одинаковыми частицами, оказываются более стабильными. В связи с тем, что сопротивление, испытываемое несколькими частицами, движущимися одним фронтом, меньше сопротивления, испытываемого одной частицей [5], пространственные агрегаты будут седиментировать с большей скоростью, чем одиночные частицы.

Автор пользуется случаем выразить свою признательность Ю. Г. Статникову за обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Л. Широкова, О. К. Экнадиосянц. О взаимодействии частиц аэрозоля в акустическом поле. Акуст. ж., 1965, 11, 3, 409—411.
2. Ю. Г. Статников, Н. Л. Широкова. Роль микропотоков в процессе взаимодействия частиц в звуковом поле. Акуст. ж., 1968, 14, 1, 143—146.
3. G. M. Anders, U. Ingard. Acoustic streaming at low Reynolds numbers. J. Acoust. Soc. America, 1953, 25, 932—938.
4. N. L. Shirokova, O. K. Eknadiosyants. On the nature of acoustic aerosol coagulation. 5 Congres International d'Acoustique, Liège, 1965, D61.
5. Н. А. Фукс. Успехи механики аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1961, стр. 31.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
6 февраля 1967 г.