

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

П. С. ПРОХОРОВ, член-корреспондент АН СССР Б. В. ДЕРЯГИН  
и Л. Ф. ЛЕОНОВ

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОГО ДЕФИЦИТА НА СКОРОСТЬ КОАГУЛЯЦИИ  
ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ**

1. Как было доказано ранее, слияние капель как в статических (<sup>1,2</sup>), так и в динамических условиях (<sup>3,4</sup>) при соударении затруднено, если окружающая атмосфера не насыщена парами жидкости, образующей капли. Отсюда следует, что увеличение влажного дефицита должно замедлять коагуляцию аэрозолей. В настоящей работе дается для водного аэрозоля прямое экспериментальное подтверждение этого вывода, важного для теории образования дождевых капель, идущего в теплых облаках при обязательном участии коагуляционных процессов (<sup>5</sup>). Ранее в этой теории эффективность соударения всегда принималась равной единице (<sup>6,7</sup>).

В отличие от других авторов, мы предприняли моделирование процессов в облаках в непрерывном стационарном потоке аэрозоля, поднимающегося в вертикальной трубе, ведя наблюдение за образованием капель тех размеров, при достижении которых они под действием силы тяжести выпадают.

2. Методика наблюдения. Для получения аэрозоля пары, образующиеся над водным зеркалом в колбе  $\Pi$  (см. рис. 1), увлекаются потоком воздуха, предварительно освобожденного от ядер конденсации посредством стеклянного фильтра № 4  $\Phi_1$  и фильтра из гигроскопической ваты  $\Phi_2$ . Воздушно-паровой поток  $a$  поступает в зону смешения  $A$  с воздушным потоком  $b$ , имеющим более низкую температуру. Получающееся пересыщение при введении центров конденсации через канал  $c$  приводит к образованию водного тумана, который отводится в термостатируемую вертикальную трубу  $B$ . Скорость потока регистрировалась реометрами  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$ .

В трубе  $B$  имеется расширение  $P$ , задерживающее крупные капли вследствие потери скорости. Более мелкие капли проскакивают и, приобретая прежнюю скорость за счет сужения трубы до первоначального размера, поступают в специальную кювету  $K$ , подробнее изображенную на рис. 2. Корпус кюветы  $M$  металлический, цилиндрической формы, со стеклянной насадкой  $H$ . Металлическая часть кюветы разделена полыми пластинами, соединенными последовательно с целью протока через них воды заданной температуры от ультратермомостата  $U$ . Благодаря этому воздушно-паровой поток в трубке  $B$ , пройдя эту зону, мог быстро приобрести температуру, отличавшуюся от исходной температуры (под металлической частью кюветы) на несколько градусов в ту или другую сторону. Изменение температуры фиксировалось термозлементом.

Для исключения завихрений пластинам придана клиновидная „обтекаемая“ форма. Течение воздушно-парового потока в трубке  $B$  и в кювете  $K$  было ламинарным ( $Re < 2 \cdot 10^3$ ). Кювета  $K$  имеет два боковых круглых стеклянных окошка  $m$  и  $n$  (рис. 1), расположенных взаимно перпендикулярно. Одно из них служило для освещения, а

второе — для наблюдения за частицами тумана с помощью микроскопа. Свет от электрической дуги  $E$  проходит через конденсаторы  $L_1$  и  $L_2$ , параллельную щель  $H$ , стеклянный тепловой фильтр  $\Phi$  и фокусируется объективом  $L_3$  на центральную часть кюветы, что позволяло вести

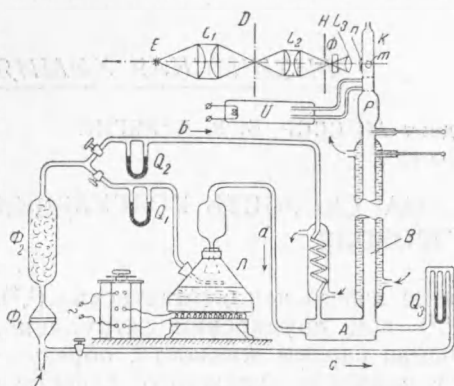


Рис. 1

наблюдения по схеме ультрамикроскопа. Внутренняя часть кюветы была зачернена. Выпадающие капли образовывались при слиянии первичных капель в зоне высотой  $h = 5$  см, между уровнем окошек  $m$  и  $n$  и местом сужения трубы. Увеличение скорости после сужения потока исключало выпадение капель, сливавшихся после этого сужения.

Для определения направления движения капель был применен вращающийся диск  $D$ , имеющий по окружности систему щелевидных отверстий, расположенных

попарно так: широкое — узкое — интервал — широкое — узкое — интервал и т. д.

3. Теория метода. Пусть в потоке, прошедшем место расширения и место наблюдения, концентрация капель с радиусами от  $r$  до  $r + \Delta r$  равна  $n(r) dr$ . Число слияний капель радиусов  $r_1$  и  $r_2$  в единице объема за единицу времени равно  $\epsilon_{12} \tau_{12} n(r_1) n(r_2) dr_1 dr_2$ , где  $\epsilon_{12}$  — вероятность соударения капель с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , а  $\tau_{12}$  — его эффективность, могущая зависеть от влажного дефицита  $\Delta E$ . Число капель с радиусом  $\rho > r_c$  (где  $r_c$  — радиус капли, начинающей выпадать в потоке), образующихся путем слияния в единице объема за единицу времени, равно:

$$N(r_c) = \iint n(r_1) n(r_2) \epsilon_{12} \tau_{12} dr_1 dr_2, \quad (1)$$

где область интегрирования ограничена условием

$$r_1^3 + r_2^3 > r_c^3. \quad (2)$$

Вводя вместо  $r_2$  другую переменную интеграции  $\rho$ , связанную с  $r_1$  и  $r_2$  соотношением  $\rho = (r_2^3 + r_1^3)^{1/3}$ , получим вместо (1):

$$N(r_c) = \int_{r_c}^{r_{\max}} d\rho \int_{r_{0\min}}^{r_{0\max}} n(r_1) n(\rho^3 - r_1^3)^{1/3} \rho^2 \epsilon_{12} \tau_{12} dr_1 d\rho, \quad (3)$$

где  $r_{0\min} = (r_c^3 - r_{0\max}^3)^{1/3}$  — минимальный радиус капли, которая после слияния с каплей максимального радиуса  $r_{0\max}$  будет в состоянии падать в потоке. При этом  $r_{\max} = 2^{1/3} r_{0\max}$  ( $r_{\max}$  — радиус капли, образующейся в результате слияния двух капель с  $r_{0\max}$ ).

Из выражения (3) для  $N(r_c)$  следует, что изменение числа падающих капель при изменении температуры позволяет судить об изменении эффективности соударений  $\tau_{12}$  в том случае, если одновременно не происходит таких изменений величин  $n(r_1)$ ,  $r_{0\max}$ ,  $r_{\max}$ , которые могут вызвать изменения интеграла, стоящего в (3), того же порядка.

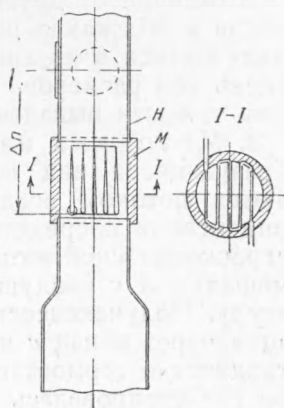


Рис. 2

Отсюда, обозначая соответствующие изменения величин знаком вариации  $\delta$ , получим условия:

$$\frac{\delta r_{\max}}{r_{\max} - r_c} \ll 1, \quad \frac{\delta r_{0\max}}{r_{0\max} - r_{0\min}} \ll 1, \quad (4)$$

$$\frac{\delta n(r)}{n(r)} \ll 1 \quad \text{для } r_{0\min} < r < r_{0\max}. \quad (5)$$

Для выполнения этих условий необходимо прежде всего, чтобы  $r_c$  находилось между значениями  $r_{\max} = 2^{1/2} r_{0\max}$  и  $r_{0\max}$  достаточно далеко от каждого из них.

Предполагая приближенно справедливой формулу Стокса, будем иметь:

$$\frac{r_c}{r_{0\max}} = \left(\frac{U_1}{U_0}\right)^{1/2} = \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^{1/2} = \frac{R_0}{R_1}, \quad (6)$$

где  $R_0$  и  $R_1$  — радиусы расширенной и прямой частей трубы. Нами было выбрано отношение  $R_0/R_1 = 1,12$ , что находится в требуемых пределах между 1 и  $2^{1/2} = 1,26$ .

Для вычисления числителей левых частей неравенств (4) необходимо вычислить изменения размеров капель вследствие конденсации или испарения в потоке на протяжении 5 см между зоной нагрева и верхом камеры. Для этой цели используем теорию роста капель в восходящем потоке (5), в которой получено следующее уравнение\* (см. уравнения (4) и (5)):

$$\frac{v_1^2}{2} + \int_0^h \frac{4}{9} g \frac{D}{\eta} [c(h) - c_0(h)] dh = \text{const} = \frac{v_0^2}{2}, \quad (7)$$

где  $v_1$  — скорость подъема капли радиуса  $r_1$  на высоте  $h$ ,  $v_0$  — скорость подъема капли сразу после зоны нагрева,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $D$  — коэффициент диффузии паров воды,  $\eta$  — вязкость,  $c$  — плотность водяных паров на высоте  $h$ ,  $c_0$  — их насыщающая плотность,  $h$  — высота над зоной нагрева.

Разность  $\Delta c_0 = c(h) - c_0(h)$  для  $h = 0$  можно вычислить, зная изменение температуры  $\Delta t$ , получаемое после прохождения потока через зону нагрева.

При  $h > 0$   $|\Delta c| < |\Delta c_0|$  ввиду наличия испарения (или конденсации) капель. Поэтому, беря в (7) значение  $\Delta c = \Delta c_0$ , не зависящее от  $h$ , мы получаем завышенную оценку возможного изменения скорости  $\Delta v$ , а следовательно, и радиуса  $\Delta r$ . Мы получаем при этом:

$$\frac{v_1^2 - v_0^2}{2} = \frac{4}{9} g \frac{D}{\eta} \Delta c_0 h, \quad (8)$$

где  $v_0 = U - \frac{2}{9} g \frac{\rho}{\eta} r_{0\max}^2$ .

Вычисляя из (8)  $v_1$ , можно затем найти и  $r_1$ , пользуясь законом Стокса по формуле:

$$v_1 = U - \frac{2}{9} g \frac{\rho}{\eta} r_1^2. \quad (8a)$$

На рис. 3 приведены вычисленные этим путем значения  $r_1$  для разных  $\Delta t$  для значения  $U = 39,3$  см (прямая  $BB_1$ ), полагая  $h = 5$  см\*\*.

\* Мы его пишем в несколько видоизмененном, применительно к рассматриваемой задаче, виде.

\*\* Отклонения от формулы Стокса для капель, способных надуть в таком потоке, как легко доказать, только усиливают справедливость дальнейших оценок и выводов.

Из малости относительных изменений  $\Delta r_1$  вытекает, что условия (5) будут выполнены. Легко также подсчитать, подставляя в левые части неравенств (4)  $\delta r_{0 \max}$  и  $\delta r_{\max}$  значения, соответственно равные  $\Delta r_0$  и  $2^{1/2} \Delta r_0$ , а для  $r_c / r_{0 \max}$  — значение 1,12, степень выполнения условий (4); мы найдем, например, для  $\Delta t = -4^\circ$ :  $\frac{\Delta r_0}{r_{0 \max} - r_{0 \min}} = 0,188$  и  $\frac{2^{1/2} \Delta r_0}{r_{0 \max} - r_c} = 0,436$ ;

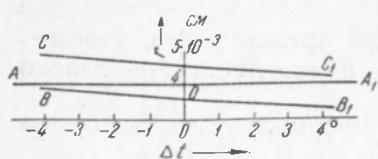


Рис. 3

при  $\Delta r_0 = 1,8 \mu$ ;  $r_{0 \max} = 36,7 \mu$ ;  $r_{0 \min} = 27,1 \mu$ ;  $2^{1/2} \Delta r_0 = 2,27 \mu$ ;  $r_{\max} = 46,2 \mu$ ;  $r_c = 41,0 \mu$ .

Там же (кривая  $CC_1$ ) приведены результаты аналогичных расчетов изменения размеров капли двойного объема с радиусом  $r_{\max} = 2^{1/2} r_{0 \max}$ .

Прямая  $AA_1$  выражает величину радиуса  $r_c$  при достижении которого капли выпадают из потока в кювете.

4. Результаты измерений. Опыты по соударению водных капель в воздушно-паровом потоке при разных значениях влажного дефицита проводились при скорости потока  $U = 21,2$  см/сек для одной серии и  $39,3$  см/сек для другой серии опытов. Данные значения для скоростей потока дали нам возможность вычислить по формуле (8а) максимальные радиусы поднимающихся в потоке капель, равные минимальным радиусам выпадающих капель. При  $U = 21,2$  см/сек  $r = 3 \cdot 10^{-3}$  см и при  $U = 39,3$  см/сек  $r = 4 \cdot 10^{-3}$  см.

Результаты опытов приведены на рис. 4, где на оси абсцисс отложено изменение температуры  $\Delta t$  в кювете по сравнению с температурой в расширении трубы, а на оси ординат — число капель, выпавших за 5 мин. Как видно из графика (рис. 4), чем меньше насыщение, тем меньше эффективность соударения между каплями (ср. (3, 4)).

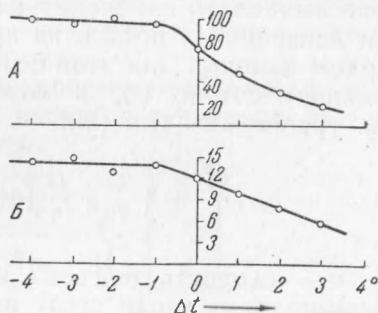


Рис. 4. А —  $U = 21,2$  см/сек, Б —  $U = 39,3$  см/сек

Приведенные графики ясно показывают, что эффективность соударения капель  $\sigma_{12}$  становится 100-процентной при отсутствии влажного дефицита. В противном случае изменение знака влажного дефицита повышало бы  $\sigma_{12}$  и увеличивало число выпадающих капель в противоречии с наблюдениями, для которых характерно примерное постоянство числа выпадающих капель при различных пересыщениях (отрицательные  $\Delta t$ ) в отличие от недосыщений. Эта же особенность графиков доказывает, что изменение числа выпадающих капель не есть следствие изменения их размеров в результате конденсации или соответственно испарения, так как в этом случае при пересыщении число капель возрастало бы примерно с такой же быстротой или падало бы с увеличением  $\Delta t$ .

Лаборатория поверхностных сил  
Института физической химии  
Академии наук СССР

Поступило  
9 X 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. В. Дерягин и П. С. Прохоров, ДАН, 54, 511 (1946). <sup>2</sup> П. С. Прохоров, ЖФХ, 21, в. 9 (1947); Б. В. Дерягин и П. С. Прохоров, сборн. Новые идеи в области изучения аэрозолей, изд. АН СССР, 1949. <sup>3</sup> П. С. Прохоров и В. Н. Яшин, Коллоидн. журн., 10, 2 (1948). <sup>4</sup> П. С. Прохоров, сборн. Новые идеи в области изучения аэрозолей, изд. АН СССР, 1949. <sup>5</sup> Б. В. Дерягин и О. М. Годес, ДАН, 62, № 1 (1948); сборн. Новые идеи в области изучения аэрозолей, изд. АН СССР, 1949. <sup>6</sup> Н. И. Шишкин, Тр. ГГО, в. 7 (1948). <sup>7</sup> Л. Крыстанов, ДАН, 76, № 1 (1951).