

М. С. ВОЛЫНСКИЙ

О ДРОБЛЕНИИ КАПЕЛЬ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

(Представлено академиком М. В. Келдышем 22 VII 1948)

В теории распада жидких струй существуют два направления. Ряд авторов, например, Ключенер⁽¹⁾, считают, что капли, образовавшиеся при вытекании струи, дробятся, двигаясь относительно воздуха, и это определяет их конечные размеры. Другие, следуя работе Релея⁽²⁾, определяют размеры капель, изучая развитие неустойчивости струи под влиянием малых возмущений, не рассматривая дробления уже сформировавшихся капель*. Вообще дробление капли в потоке воздуха (прежде чем она окажется увлеченной потоком) оспаривалось.

Для того чтобы выяснить, происходит ли в действительности дробление капель, нами были проделаны следующие опыты. Одиночные капли (ртути, воды, бензина, керосина, спирта, тетраборомэтана) заранее известного размера сбрасывались в свободную струю воздуха** с высоты ≈ 20 мм от края отверстия трубы на расстоянии ≈ 10 мм от плоскости среза сопла. Скорости падения капель были малы (менее 0,4 м/сек.) и могли не учитываться в сравнении со скоростью потока. Измерения велись двумя взаимоконтролирующими методами, позволяющими точно констатировать дробление капли.

1. Фотографирование: черный экран и боковое освещение позволяют держать фотообъектив открытым, не засвечивая пластинки, траектория одиночной капли и ее дробление отображаются на пластинке (рис. 1), когда капля проходит через пучок света; свет преломляется (или отражается) в ней, попадая в объектив аппарата.

2. Капли улавливаются (например, в касторовое масло) и измеряются под микроскопом.

Для дальнейшего введем следующие обозначения: d — начальный диаметр капли, ρ — плотность воздуха, V — скорость потока воздуха, σ — капиллярная постоянная жидкости в воздухе, $D = \rho V_{кр}^2 d / \sigma$ — критерий дробления капли, V_0 — скорость на нижнем пределе устойчивости, $V_{кр}$ — критическая скорость (на верхнем пределе устойчивости),

* В работе Ричардсона и Меррингтона⁽³⁾ рассматривается устойчивость капель в свободном падении, однако их постановка задачи, методика и результаты весьма ограничены и не могут решать поставленный ниже вопрос.

** Для ртути, кроме того, капли выбрасывались из специальной чашечки, помещенной внутри воздушной струи.

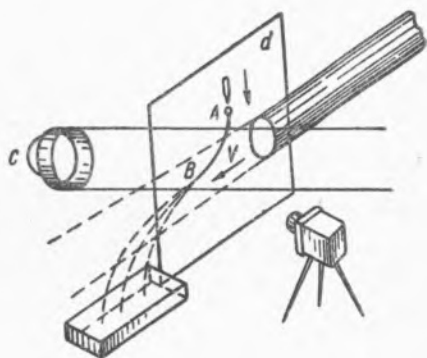


Рис. 1. Схема эксперимента. c — источник света, d — бархатный экран, A — начальное положение капли, B — положение капли в момент дробления

c_x — коэффициент сопротивления при обтекании шара, ν — кинематическая вязкость воздуха, $Re_{кр} = V_{кр} d / \nu$ — критерий Рейнольдса для обтекания капли при критической скорости.

Эксперименты показали следующее: при малых скоростях воздуха капля, действительно, не дробилась, увлекаясь потоком. Но когда скорость потока достигала определенного значения V_0 , капля теряла устойчивость, т. е. из 10 однородных капель 1 или 2 дробились.

С дальнейшим ростом скорости процент дробящихся капель возрастал, и при $V_{кр}$ все 10 капель дробились*. Итак, доказано, что капля, движущаяся в воздухе, при определенном соотношении параметров подвергается дроблению. На рис. 2 приведены фотографии траектории полета и момента самого дробления капель.

Результаты эксперимента (табл. 1) удовлетворяют формуле

$$D = \rho V_{кр}^2 d \sigma = 14 \text{ (величины в кг, м, сек.)} \quad (1)$$

Таблица 1

Результаты эксперимента

Род жидкости	σ в кг/м	d в мм	V в м/сек.	D
Ртуть	0,0444	3,17	40	13,82
		2,0	53	15,31
Вода	0,0073	3,9	15	14,55
		3,5	15	13,45
		3,38	16	14,35
Тетрабромэтан	0,0044	2,55	12,5	11
		2,18	14,8	12,8
Керосин	0,0027	3,15	9	11,5
		2,77	11	15
Спирт этиловый	0,0023	2,97	9,8	15
Бензин	0,002	3,48	7,8	13
		2,8	9,6	15,8
$D_{ср}$				14

Безразмерную величину D в уравнении (1) назовем критерием дробления. Он пропорционален отношению сил, деформирующих каплю $\sim \rho V^2 / 2$ (скоростной напор обтекающего потока), к силам поверхностного натяжения $\sim \sigma / d$. Весом капли, архимедовой силой и сжимаемостью воздуха пренебрегаем. Отметим, что плотность жидкости не влияет на рассматриваемое явление и не входит в критерий, хотя среди испытуемых жидкостей были такие тяжелые, как ртуть и тетрабромэтан. Для нижней границы неустойчивости V_0 имеем:

$$\rho V_0^2 d / \sigma = 10,7. \quad (1')$$

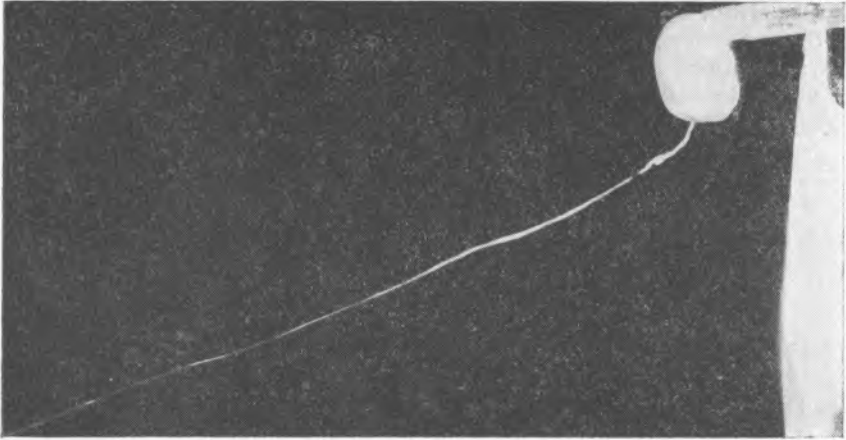
Было проведено исследование влияния условий входа капли в поток, т. е. влияния градиента скоростей на границе спокойного воздуха и струи на ход явления. Опыты показали, что критерий дробления сохраняется, но его численное значение несколько меняется и зависит от величины градиента.

Как показывают опыты для жидкостей большой вязкости (например для глицерина), явление зависит от вязкости жидкости.

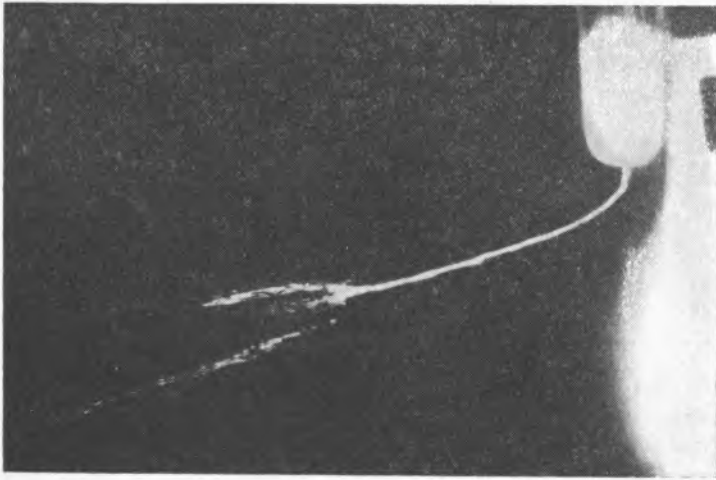
Кривые на рис. 3 показывают максимально возможный диаметр капли, не распадающейся при движении в воздухе с данной началь-

* Критической скоростью назовем скорость потока такую, что для всех $V > V_{кр}$ 100% капель теряют устойчивость и разрушаются, а для всех $V < V_{кр}$ процент раздробившихся капель меньше 100%.

a



б



в



Рис. 2. *a* — дробление отсутствует; $d = 3,17$ мм, $V = 35$ м/сек.; Ртуть.
б — режим раздвоения; $d = 3,17$ мм, $V = 37,0$ м/сек.; ртуть.
в — режим распыла; $d = 3,17$ мм, $V = 40$ м/сек.; ртуть

ной скоростью. Точки в заштрихованной области соответствуют режимам конечной вероятности распада капли. Эта вероятность тем больше, чем ближе точка к верхней кривой; над кривой зона абсолютной неустойчивости (вероятность дробления 100%), под нижней пунктирной кривой — зона абсолютной устойчивости (вероятность дробления 0%). Как показало сравнение фотографий и результатов улавливания,

нижней границе V_0 соответствует раздвоение капли на почти равные части с образованием мельчайших капелек — режим раздвоения.

На рис. 4 изображена капля касторового масла в фазе



Рис. 4. Капля в фазе раздвоения. $d=3,18$ мм, $V=28$ м/сек.; касторовое масло

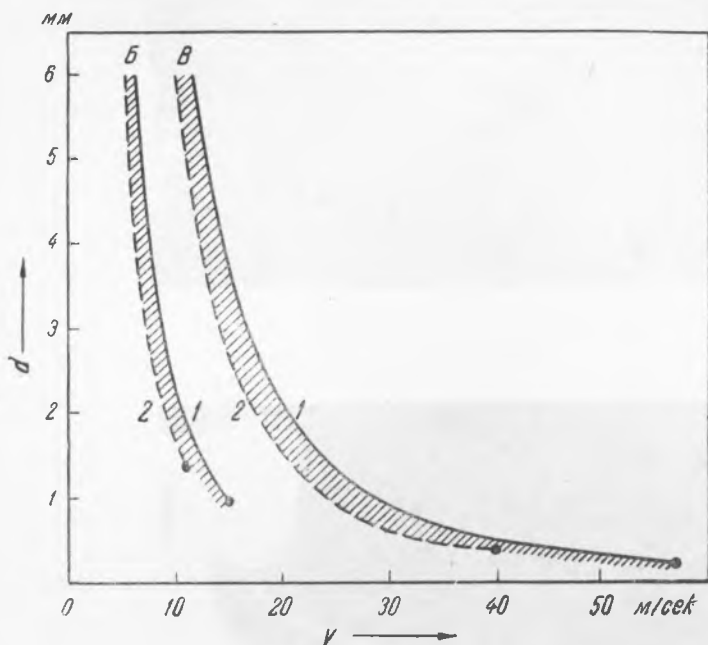


Рис. 3. Кривые устойчивости капель, движущихся в воздухе. Б — бензин, В — вода. 1 — верхний предел устойчивости, $\rho V_{кр}^2 d/\sigma = 14$; 2 — нижний предел устойчивости, $\rho V_0^2 d/\sigma = 10,7$

раздвоения. Капля была уловлена на экран при скорости воздуха V_0 , вдалеке от среза сопла воздушной трубы. Верхней границе соответствует режим распыла. Разрушение капли происходит в виде миниатюрного взрыва с образованием частиц, значительно меньших исходной капли.

Отметим следующее: наши эксперименты проводились на диапазоне чисел Рейнольдса обтекания капли $1700 \leq Re_{кр} \leq 8500$; $Re_{кр} = V_{кр} d / \nu$. По кривой Визельсбергера (4) обтекания шара $c_x = f(Re)$ обнаруживаем, что $c_x = \text{const} \approx 0,4$ для указанного интервала $Re_{кр}$. Мы считаем, что постоянство критерия дробления, выражаемое уравнением (1), связано с постоянством c_x для наших $Re_{кр}$ и что в общем случае на всем диапазоне изменения Re имеет место зависимость: $D = F(Re_{кр})$.

Повидимому, простая экстраполяция зависимостей, полученных для одиночной капли, на более сложное явление распада жидких струй неправильна, однако рассмотренное явление должно дать исходную точку для рациональной гипотезы в теории распада жидкостей.

Поступило
21 VII 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. Ключенер, Процесс впрыскивания в бескомпрессорных дизелях, Сб. Двигатели внутреннего сгорания, ч. I, 1936. ² Rayleigh, Proc. Roy. Soc., 29 (1879). ³ A. C. Merrington and E. G. Richardson, Proc. Phys. Soc., 59, No. 331 (1947). ⁴ А. Прандтль и О. Титъенс, Гидро- и аэромеханика, ч. II, 1933.