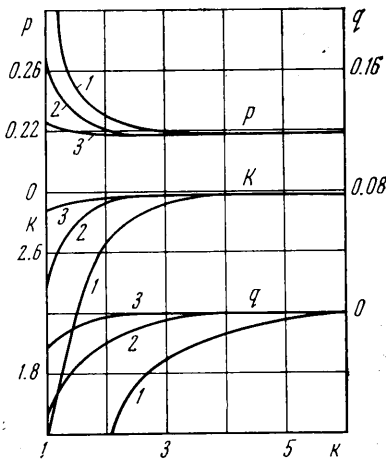
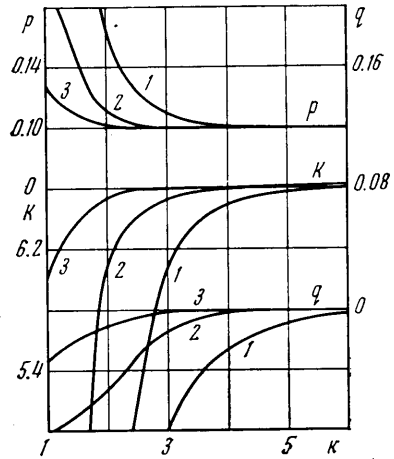


соответственно, где цифрами 1, 2 и 3 обозначены кривые, соответствующие значениям $R=10^{-1}$, 10^{-2} и 10^{-3} . Видно, что с увеличением стреловидности качество оптимальных тел растет, асимптотически приближаясь к K_m , наклон нижней поверхности к оси x убывает, приближаясь к $p_m = \operatorname{tg} \theta$, наклон к оси y стремится к нулю (т. е. поверхность становится плоской)). Видно также, что параметры оптимальных тел тем раньше приближаются к параметрам безграничной пластины, чем меньше толщина R их передних кромок. С увеличением трения влияние передних кромок на форму оптимальных тел уменьшается.



Фиг. 2



Фиг. 3

При решении задачи в более высоких приближениях были получены те же результаты, что и в нулевом приближении. Этого следовало ожидать, учитывая, что полученные в нулевом приближении значения качества практически равны максимально возможным при отсутствии каких-либо ограничений [2].

Таким образом, максимальным аэродинамическим качеством обладают тела с большой стреловидностью передних кромок, плоской нижней поверхностью и верхней поверхностью, находящейся в аэродинамической тени. Сопротивление затупленных передних кромок не оказывает существенного влияния на величину качества оптимальных тел.

Поступила 10 IV 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Филагов Е. И. Оптимальная форма несущих тел для гиперзвуковых скоростей. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 1.
2. Mielé A. The extremization of products of powers of functionals and its application to aerodynamics. Astronaut. Acta, 1966, vol. 12, No. 1.

УДК 536.246

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ПОСТЕПЕННОГО НАРАСТАНИЯ ВНЕШНИХ СИЛ

В. П. ЛОПАРЕВ

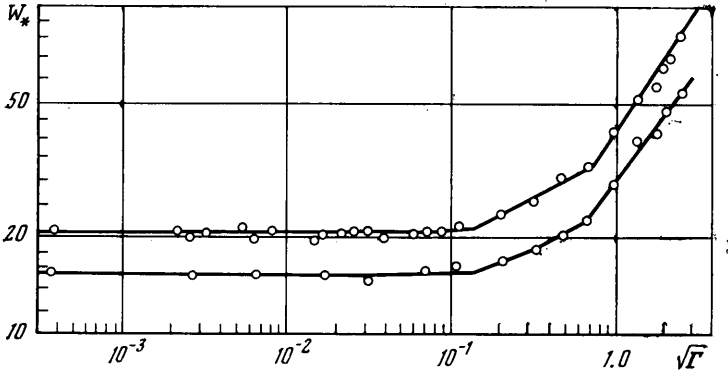
(Свердловск)

Приводятся результаты эксперимента по влиянию физических свойств жидкости и времени контакта фаз на дробление капель в условиях постепенного нарастания аэродинамических сил потока. Показано, что величина критического числа Вебера и механизм дробления капли определяются как условиями изменения относительной скорости газового потока в момент, предшествующий дроблению капли, так и значениями вязкостного комплекса и времени контакта фаз.

Вопрос дробления капель жидкости газовым потоком изучался в ряде теоретических и экспериментальных работ [1-6]. Показано, что основным определяющим параметром является величина соотношения аэродинамических сил и сил поверхностного натяжения или числа Вебера

$$W = \rho(u - u^0)^2 d \sigma^{-1}$$

где ρ , u — плотность и скорость газа; d , u^0 — диаметр и скорость капли, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Значение числа Вебера, при котором происходит дробление, называют критическим.



Фиг. 1

Дробление капель в основном исследовалось в условиях мгновенного (ударного) или кратковременного воздействия потока газа постоянной критической скорости. Поэтому акт дробления был весьма кратковременным и проходил при уменьшающихся относительных скоростях. При этом всеми исследователями наблюдалось перед дроблением капли выдувание ее в «сумку».

В некоторых случаях дробление капель происходит при постепенном нарастании аэродинамических сил, т. е. в случае статической деформации. Проведенные исследования деформации и дробления капель маловязких жидкостей [7, 8] показали наличие двух механизмов дробления капли, отличающихся по характеру ее деформации в момент, предшествующий дроблению. Было установлено, что различие в механизмах дробления зависит от того, происходит ли дробление при уменьшающихся или увеличивающихся относительных скоростях.

В настоящей работе в качестве метода исследования была применена высокоскоростная макроинсъемка поведения одиночных капель различных жидкостей в скруббере Вентури со сменными конфузорами длиной 0,05, 0,07, 0,12, 0,24, 0,335, 0,7 м, обеспечивающими различное время взаимодействия капли с газовым потоком.

Физические свойства испытанных жидкостей и результаты опытов по дроблению капель в конфузоре длиной 0,12 м представлены в таблице, где каждое критическое значение относительной скорости и числа Вебера является средней величиной, вычисленной по результатам трех последовательных опытов.

Из таблицы видно, что при дроблении капель в условиях как увеличивающихся, так и уменьшающихся относительных скоростей в скруббере Вентури величина критического числа Вебера W_* зависит лишь от вязкости жидкости. Возрастание W_* с увеличением вязкости жидкости обусловлено возрастанием сил внутреннего трения, которые препятствуют деформации капли. Поэтому для достижения критической деформации капли более вязкой жидкости требуется повышенное значение аэродинамического напора потока, проявляющееся в увеличении относительной скорости и числа Вебера.

В [5, 6] показано, что при дроблении капель в условиях мгновенного воздействия газового потока критическое число Вебера зависит от вязкостного комплекса

$$\Gamma = \eta^2 (d \sigma \rho)^{-1}$$

где η и ρ^0 — динамическая вязкость и плотность жидкости.

Из графика (фиг. 1) видно, что зависимость W_* от вязкостного комплекса при дроблении капель в условиях как увеличивающихся (кривая 1), так и уменьшающихся (кривая 2) относительных скоростей можно разбить на три участка. На первом участке ($\Gamma < 0,015$) силы внутреннего трения настолько малы, что они не играют

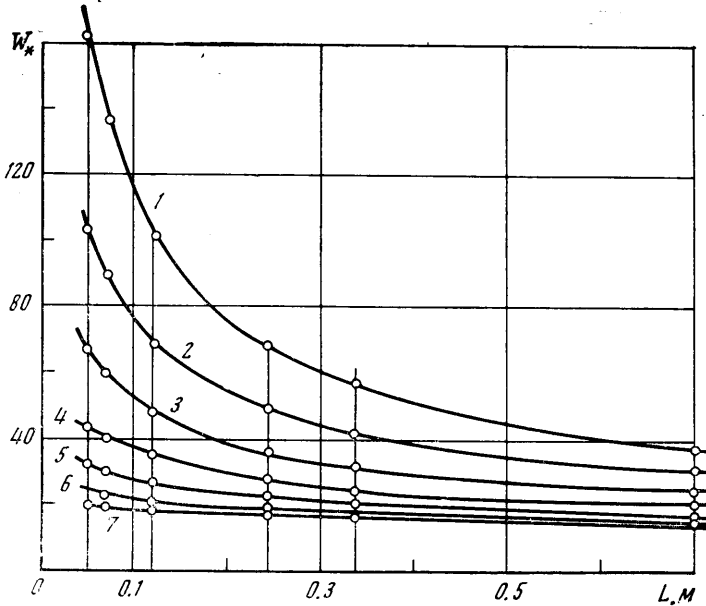
**Физические свойства жидкостей и критическое значение
относительных скоростей и чисел Вебера**

Род жидкости	$d \cdot 10^3, \text{ м}$	$\rho^0 \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	$\sigma \cdot 10^3, \text{ н/м}^2$	$\eta \cdot 10^3, \text{ н} \cdot \text{сек/м}$	$u-u^0, \text{ м/сек}$	W_*
Дробление в условиях увеличивающихся относительных скоростей						
Ртуть	3.38	13.600	475.00	1.5	49.20	20.50
5%-ный раствор этило- вого спирта	2.16	0.986	62.30	1.2	22.00	20.00
То же	3.38	0.986	62.30	1.2	17.55	19.85
»	4.76	0.986	62.30	1.2	15.10	20.75
96%-ный раствор этило- вого спирта	2.18	0.800	23.35	1.6	13.51	20.35
То же	3.38	0.800	23.35	1.6	10.70	19.65
»	4.78	0.800	23.35	1.6	9.75	20.85
Тетрабромэтан	2.00	2.970	49.60	12.0	20.80	20.75
»	3.38	2.970	49.60	12.0	15.63	20.00
»	4.64	2.970	49.60	12.0	13.35	19.75
Этиленгликоль	2.24	1.110	46.10	13.2	18.55	19.85
»	3.38	1.110	46.10	13.2	15.30	20.35
»	4.82	1.110	46.10	13.2	13.00	20.85
75%-ный раствор гли- церина	2.21	1.190	63.80	35.6	22.60	21.00
То же	3.38	1.190	63.80	35.6	17.85	20.85
»	4.83	1.190	63.80	35.6	15.20	20.15
Раствор глицерина						
79.2%-ный	3.38	1.210	63.50	57.0	18.30	21.25
84.0%-ный	3.38	1.220	63.20	100.0	19.30	23.75
87.5%-ный	3.38	1.226	63.00	160.0	19.80	25.00
90.0%-ный	3.38	1.231	62.80	235.0	21.70	30.15
92.0%-ный	3.38	1.235	62.65	327.0	22.90	33.75
94.3%-ный	3.38	1.240	62.50	480.0	25.70	42.50
96.1%-ный	3.38	1.243	62.45	670.0	27.90	50.25
97.1%-ный	3.38	1.246	62.40	835.0	29.45	56.00
98.1%-ный	3.38	1.250	62.35	1020.0	33.80	70.15
99.1%-ный	2.26	1.256	62.30	1220.0	48.00	99.65
»	3.38	1.256	62.30	1220.0	35.60	81.50
»	5.00	1.256	62.30	1220.0	26.60	67.50

Дробление в условиях уменьшающихся относительных скоростей

Ртуть	3.38	13.600	475.00	1.5	42.80	15.50
5%-ный раствор этило- вого спирта	3.38	0.986	62.30	1.2	15.30	15.00
96%-ный раствор этило- вого спирта	3.38	0.800	23.35	1.6	9.30	14.85
Тетрабромэтан	3.38	2.970	49.60	12.0	13.70	15.15
Этиленгликоль	3.38	1.110	46.10	13.2	13.00	14.65
Раствор глицерина						
75%-ный	3.38	1.190	63.80	35.6	15.90	15.85
79.2%-ный	3.38	1.210	63.50	57.0	16.00	16.25
84%-ный	3.38	1.220	63.20	100.0	16.45	17.15
87.5%-ный	3.38	1.226	63.00	160.0	16.70	17.75
90%-ный	3.38	1.231	62.80	235.0	17.75	20.15
92.0%-ный	3.38	1.235	62.65	327.0	18.50	22.00
94.3%-ный	3.38	1.240	62.50	480.0	21.20	28.85
96.1%-ный	3.38	1.243	62.45	670.0	24.60	39.00
97.1%-ный	3.38	1.246	62.40	835.0	25.60	42.25
98.1%-ный	3.38	1.250	62.35	1020.0	27.50	48.85
99.1%-ный	3.38	1.256	62.30	1220.0	29.60	56.50

значительной роли в стабилизации капли по сравнению с силами поверхностного натяжения. Поэтому число W_* практически не зависит от вязкостного комплекса. На втором участке ($0.015 < \Gamma < 0.5$) начинает сказываться роль сил внутреннего трения в стабилизации капли жидкости. Зависимость числа W_* от вязкостного комплекса на этом участке при дроблении в условиях увеличивающихся относительных скоростей описывается уравнением $W_* = 36.5 \Gamma^{0.14}$, при условиях перевода заключительной стадии деформации в диффузорную часть — уравнением $W_* = 25 \Gamma^{0.11}$. На третьем



Фиг. 2

участке ($\Gamma > 0.5$), когда роль сил внутреннего трения весьма существенна, зависимость W_* от вязкостного комплекса выражается уравнениями $W_* = 43 \Gamma^{0.4}$ и $W_* = 30.5 \Gamma^{0.34}$ соответственно при дроблении в условиях увеличивающихся и уменьшающихся относительных скоростей.

В испытанном диапазоне изменения физических свойств жидкостей число W_* при дроблении капель в условиях увеличивающихся относительных скоростей в среднем на 40% больше, чем в условиях уменьшающихся относительных скоростей.

Результаты исследований по влиянию времени контакта фаз на дробление капель показали, что характер зависимости критического числа Вебера от вязкостного комплекса для всех испытанных конфузоров аналогичен приведенному на фиг. 1, разница лишь в абсолютных значениях.

На фиг. 2 построен график зависимости W_* от длины конфуззора (L), где в качестве постоянного параметра принято значение вязкостного комплекса. Кривым 1–7 соответствуют значения $\Gamma = 8.24, 3.94, 1.715, 0.408, 0.0981, 0.0125, 0.00335$.

Видно, что с увеличением длины конфуззора, а следовательно, и времени контакта фаз происходит уменьшение W_* для всех испытанных жидкостей. В этом случае процесс разрушения капли жидкости все более приближается к квазистационарному, когда уменьшающаяся интенсивность нарастания аэродинамических сил потока приводит к уменьшению величины тензора скорости деформации, а следовательно, и пропорциональной ей величины сил инерции и внутреннего трения при движении жидкости в капле.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных, проведенная методом «наименьших квадратов», позволила получить эмпирическую зависимость критического числа Вебера от определяющих параметров

$$W_* = 17.5 \Gamma^m L^{-0.38 \Gamma^{-0.18}}$$

$$\Gamma < 1, m = 0.0323; \quad \Gamma > 1, m = 0.256$$

При дроблении капель в условиях уменьшающихся относительных скоростей имеет место первый механизм дробления — выдувание капли в «сумку». При дроблении

капель в условиях увеличивающихся относительных скоростей имеют место два механизма дробления: для капель вязких жидкостей ($\Gamma > 0.005$) — по-прежнему первый, для капель маловязких жидкостей ($\Gamma < 0.005$) — второй — выдувание капли в «панаму». Критическое значение вязкостного комплекса ($\Gamma_* = 0.005$) является переходной величиной между двумя устойчивыми механизмами дробления в конфузоре длиной 0.12 м. Причина этого в следующем. При достижении критической стадии деформации в конфузоре капля, находящаяся в динамическом равновесии с обтекающим ее газовым потоком, при резком возрастании динамического напора стремится приобрести такую форму, которая бы скомпенсировала это воздействие. Капля маловязкой жидкости приобретает форму «панамы», которая уменьшает коэффициент сопротивления. В капле же более вязкой жидкости большие силы внутреннего трения препятствуют такой форме компенсации возрастающего динамического напора. Поэтому дробление ее происходит только по первому механизму.

С увеличением длины конфузора критическое значение вязкостного комплекса, определяющее картину выдувания капли в условиях увеличивающихся относительных скоростей, увеличивается и функциональная зависимость этого влияния выражается уравнением $\Gamma_* = 0.03 L^{0.84}$. Обусловлено это тем, что с увеличением времени контакта фаз величина сил инерции и внутреннего трения, препятствующих вышеупомянутой компенсации воздействия возрастающих аэродинамических сил потока на каплю путем принятия последней формы с меньшим коэффициентом лобового сопротивления, меньше.

Поступила 25 VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вольнский М. С.* О дроблении капель в потоке воздуха. Докл. АН СССР, 1948, т. 62, № 3.
2. *Hinze J. O.* Critical speeds and sizes of liquid globules. Appl. Sci. Res., 1948, vol. 1, No. 4.
3. *Lane W. R.* Shatter of drops in streams of air. Ind. Engng Chem., 1951, vol. 43, No. 6.
4. *Бухман С. В.* Экспериментальное исследование распада капель. Вестн. АН КазССР, 1954, № 11.
5. *Hinze J. O.* Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion process. Amer. Inst. Chem. Engng Journal, 1955, vol. 1, No. 3.
6. *Isshiki N.* Theoretical and experimental study of atomization of liquid drop in high speed gas stream. Rept. Transp. Techn. Res. Inst., 1959, No. 35.
7. *Югай Ф. С., Волгин Б. П.* Качественная картина движения жидкости в ускоряющемся газовом потоке. Инж.-физ. ж., 1965, т. 9, № 6.
8. *Корсунюв Ю. А., Тишин А. П.* Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях чисел Рейнольдса. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 2.

УДК 621.43.011

К РАСЧЕТУ ТРАЕКТОРИИ ПЛОСКОЙ СВОБОДНОЙ СТРУИ

И. ЛЕОПОЛЬД

(Карлмаркштат, ГДР)

Предлагается метод расчета траектории плоской струи несжимаемой жидкости, подвергающейся воздействию двух потоков, направленных под разными углами к первоначальному направлению струи.

Рассмотрим струю жидкости плотности ρ_0 , вытекающую со скоростью W_0 из отверстия шириной b_0 , к которой притекают два потока со скоростями W_{11} , W_{12} и плотностями ρ_1 , ρ_2 соответственно (фиг. 1). Введем криволинейную систему коор-