

Этому значению μ соответствует $y_{\infty} = 1 - m$, или разложение до третьих степеней y соответствует предположению о цилиндричности внутренней полости течения, ибо $y = 1 - m\delta^2$.

На фиг. 3 приведено сравнение (4.4) и (4.6) с экспериментальными данными, заимствованными в [2]. Здесь кривая 1 — из формулы (4.4), кривая 2 — из формулы (4.6), кривая 3 проведена по экспериментальным точкам. Напомним, что (4.6) получено в предположении $r_0 = r_{\infty}$.

Поступила 25 I 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. А б р а м о в и ч Г. Н. Прикладная газовая динамика. Изд-во ТТЛ, 1950.
2. Г о л ь д ш т и к М. А., Л е о н т ь е в А. К., П а л е е в И. И. Аэродинамика вихревой камеры. Теплоэнергетика, 1961, № 2.
3. М о и с е е в Н. Н. Асимптотические методы типа узких полос. Сб. «Некоторые проблемы математики и механики». Изд-во АН СССР, 1961.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА СТРУИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, ОБТЕКАЕМОЙ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Г. Ф. Тобольский (Магнитогорск)

Задача о распаде цилиндрической струи вязкой жидкости, поперечно обтекаемой потоком другой жидкости, имеет как самостоятельное, так и прикладное значение при анализе механизма образования штапельного силикатного волокна (стеклянной и минеральной ваты). Теоретическое исследование указанной задачи для идеальной жидкости дано в работе [1], в которой используется метод малых возмущений и рассматривается развитие тангенциальных волн, приводящих к расщеплению струи на продольные жидкие нити, а также вычисляются критические значения числа Вебера для нейтральных колебаний, соответствующие границе устойчивости.

Представляло интерес провести экспериментальные исследования распада струи вязкой жидкости и найти количественную зависимость диаметра возникающих нитей от свойств жидкости и параметров поперечно обтекаемого потока.

Эксперименты проводились с расплавами винсоловой смолы (абетиновой кислоты $H_{19}C_{29}COOH$) и доменных шлаков. В расплавленном состоянии их можно отнести к ньютоновским жидкостям, свойства которых (вязкость μ , поверхностное натяжение σ , плотность ρ_2) зависят от температуры.

Использование расплавов вместо обычных ньютоновских жидкостей позволило судить о характере распада струи непосредственно по образующимся в результате распада частицам.

Расчеты показали, что после распада струи основное количество образующихся частиц расплава охлаждается до твердого состояния за время порядка от 10^{-4} до 10^{-5} сек, при этом фиксируется их форма.

Поэтому, определив форму и размеры частиц в зависимости от свойств расплава и параметров поперечно обтекаемого потока, можно не только качественно, но и количественно представить характер распада струи вязкой жидкости.

Плотность расплава винсоловой смолы в среднем в 2,5 раза меньше плотности шлакового расплава, поверхностное натяжение меньше в 10—13 раз, вискозиметрические характеристики аналогичны. Расплав требуемой температуры получался в лабораторных электропечах. Температура расплава контролировалась платино-платинородиевыми и медь-константановыми термопарами с точностью до $1^\circ C$. Требуемый диаметр струи расплава достигался за счет изменения диаметра фильер и вязкости (температуры) расплава. Диаметр струй расплава винсоловой смолы менялся в пределах $(0,6 - 2) \cdot 10^{-3}$ м, шлакового расплава — $(2-8) \cdot 10^{-3}$ м. Вязкость расплава в момент встречи с поперечно обтекаемым потоком воздуха изменялась от 0,008 до $0,7 \text{ кг сек/м}^2$. Поток воздуха создавался при помощи цилиндрических сопел диаметром $3 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $3 \cdot 10^{-2}$ м, подсоединенных к компрессору. Избыточное давление воздуха в ресивере менялось от $2 \cdot 10^3$ до $4,5 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2$, что соответствовало изменению расчетной скорости на срезе сопла в пределах 400—506 м/сек.

В отдельных опытах избыточное давление достигало $15 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$. Расчетная скорость потока на срезе сопла в этом случае достигала 587 м/сек.

Опыты проводились по следующей методике.

Струя расплава заданной вязкости (температуры) и диаметра, вытекающая из фильеры в дне сосуда с высоты $(50-100) \cdot 10^{-3}$ м, встречалась на расстоянии $(7-15) \cdot 10^{-3}$ м от среза сопла со свободным горизонтальным потоком воздуха. При таком

расстоянии от среза сопла струя расплава встречалась с потоком воздуха в средней трети начального участка потока и в любом случае попадала в ядро постоянных скоростей. Скорости падения струй расплава были малы (до 0.5 м/сек) по сравнению со скоростью потока и не учитывались.

Встречаясь с потоком воздуха, струя расплава дробилась, и возникающие частицы отбрасывались потоком в камеру осаждения. В связи с резким охлаждением образующиеся в результате дробления частицы расплава затвердевали во взвешенном состоянии.

О характере распада струй жидкости поперечно обтекаемых потоком воздуха судить по форме и размерам частиц.

В зависимости от свойств расплава и скорости воздушного потока в результате дробления струи образовывались волокна (нити) и неволокнистые включения в виде шариков, гантелей, слезок, торов, чешуек и частиц неправильной формы.

Диаметр образовавшихся нитей (волокон) определялся при помощи микроскопа при 300-кратном увеличении. Средний диаметр нитей определялся как среднеарифметический из 100 измерений. Такая методика определения среднего диаметра нитей была принята из следующих соображений. В работах [2,3] и других имеются экспериментальные данные о среднем диаметре волокон ваты, полученной раздувом струй силикатного расплава воздухом или паром. При этом средний диаметр волокон в этих работах определялся как среднеарифметический из 100 замеров в соответствии с указаниями ГОСТ'a 4640-61 «Вата минеральная». Для возможности сравнения наших данных с данными других работ и использовалась эта методика. Максимальное отклонение диаметра нитей от среднего значения в наших опытах достигало 400—500% (отличалось в четыре-пять раз), однако диаметр подавляющего количества нитей (не менее 80%) отклонялся от среднего не более чем на +30%. Количество неволокнистых включений определялось в процентах от веса пробы путем их отсева от волокон. Размеры неволокнистых включений определялись просевом сквозь набор сит и под микроскопом.

Судя по форме и размерам частиц, наблюдаются три вида распада струй вязкой жидкости: 1) распыл струи — распад на мелкие капли и чешуйки, 2) распад на продольные жидкие нити (волокна), 3) распад на крупные частицы неправильной формы (хрупкое разрушение) или отсутствие распада (устойчивость струи). При этом характер распада струи жидкости зависит от отношения между диаметрами струи потока d и жидкости d_2 и расстояния от среза сопла до точки встречи струи с потоком воздуха. Опыты показали, что при увеличении d/d_2 свыше определенной величины это отношение практически не влияет на характер распада струи жидкости. Оказалось, что в общем случае соотношение диаметров струй потока и жидкости может быть выражено через весовое отношение расхода воздуха к расходу расплава. При этом, если $G_1/G_2 \geq 1.3$, то характер распада струи жидкости не зависит от этого отношения (здесь G_1 и G_2 — весовое отношение расхода воздуха и жидкости). Приведенные ниже результаты исследований удовлетворяют этому условию.

Расстояние струи жидкости от среза сопла, как показали опыты, оказывает заметное влияние на характер распада лишь в том случае, если это расстояние превышает две трети длины начального участка потока. С увеличением расстояния струи жидкости до среза сопла уменьшается образование нитей, и струя преимущественно распадается на капли.

Как отмечалось выше, в наших опытах струя расплава подавалась в среднюю треть начального участка потока.

В результате обработки экспериментальных данных получено следующее уравнение, описывающее распад струи вязкой жидкости поперечно обтекаемой потоком воздуха:

$$W = \frac{16.65 \cdot 10^3 d_2}{\sigma} + \frac{2\pi \cdot 10^{-3} d_2}{\sqrt{\sigma^3}} \frac{d_2}{d^2} [1 + 2.2 (\lg 100\mu)^{1.7}] \quad \left(W = \frac{\rho_1 v_1^2 d_2}{\sigma} \right) \quad (1)$$

Здесь W — критерий Вебера, ρ_1 — плотность воздуха, v_1 — расчетная скорость воздуха на срезе сопла, d_2 — диаметр струи жидкости, σ — поверхностное натяжение жидкости, d^2 — диаметр образующихся жидких нитей (волокон), μ — динамическая вязкость жидкости, $E = 10^{-6}$ — энергия, необходимая для образования новой поверхности; все величины в кг, м, сек.

Как и при распаде капли в потоке газа [4], для струи вязкой жидкости, поперечно обтекаемой потоком воздуха, существуют критические режимы, определяющие характер ее распада. При

$$\frac{d_2}{d^2} = \frac{(\sigma W - 16.65 \cdot 10^3 d_2) \sqrt{\sigma}}{2\pi \cdot 10^{-3} [1 + 2.2 (\lg 100\mu)^{1.7}]} \geq 10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \left(\frac{2\pi\sigma}{E} \right)^{1/2} \quad (2)$$

происходит распыл струи.

При изменении d_2/d° в пределах

$$10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \left(\frac{2\pi\sigma^2}{E^2} \right)^{1/4} \leq \frac{d_2}{d^\circ} = \frac{(\sigma W - 16.65 \cdot 10^3 d_2) \sqrt{\sigma}}{2\pi \cdot 10^{-3} [1 + 2.2 (\lg 100\mu)^{1.7}]} \leq 10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \left(\frac{2\pi\sigma}{E} \right)^{1/2} \quad (3)$$

лежит переходная область от распыла струи к распаду на жидкие нити (волокна).

При изменении d_2/d° в пределах

$$10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \left(\frac{40\pi\sigma^{3/2}}{E} \right)^{1/3} \leq \frac{d_2}{d^\circ} \leq 10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \left(\frac{2\pi\sigma^2}{E^2} \right)^{1/4} \quad (4)$$

струя распадается преимущественно на жидкие нити, которые при изотермических условиях протекания процесса (т. е. когда вязкость жидкости до окончания процесса дробления остается постоянной и равной начальной вязкости) под действием капиллярных сил и возмущений потока, в свою очередь, дробятся на капли.

В пределах изменения d_2/d°

$$10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \left(\frac{20\pi\sigma}{E^{1/2}} \right)^{1/2} \leq \frac{d_2}{d^\circ} \leq 10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \left(\frac{40\pi\sigma^{3/2}}{E} \right)^{1/3} \quad (5)$$

находится переходная область от распада на жидкие нити к устойчивости струи или хрупкому разрушению. Устойчивость струи наблюдается при

$$d_2/d^\circ \geq 10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2) \sqrt{20\pi\sigma / E^{1/2}} \quad (6)$$

На фиг. 1 приведена зависимость характера распада струи шлакового расплава от W и μ (в $\mu\text{а}$) при $d_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $\sigma = 4.5 \cdot 10^{-2}$ кг/м.

На фиг. 2 эти же зависимости для струи расплава винсоловой смолы при $d_2 = 1.2 \cdot 10^{-3}$ м, $\sigma = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/м.

Знаком минус обозначена область распыла, а знаком плюс — область устойчивости струи жидкости. Каждой кривой на графиках соответствует определенный диаметр нитей (в микронах), на которые распадаются струи жидкости: кривым 1, 2, ..., 10 на фиг. 1 соответствуют диаметры 1.85, 2.0, 3.1, 4.0, 5.0, 8.0, 10, 15, 25, 61; на фиг. 2, соответственно, 5.63, 8, 10, 15, 20, 32, 50, 75, 100 и 200.

Кривые 0 — 1 удовлетворяют условию, описываемому неравенством (2). Левее этих кривых лежит область распыла струи. Между кривыми 0 — 1 и 0 — 3 (условие (3)) лежит область перехода от распыла к распаду струи на нити (волокна).

Между кривыми 0 — 3 и 0 — 7 (фиг. 1) или 0 — 6 (фиг. 2) (удовлетворяется неравенство (4)) находится область преимущественного распада струи на нити. Возникновение нитей в этой области протекает наиболее устойчиво.

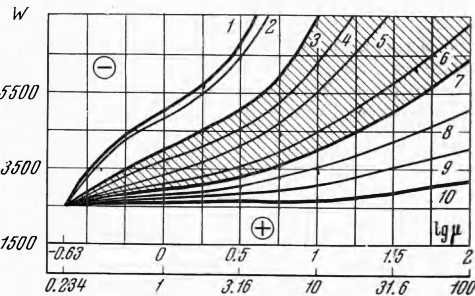
С уменьшением вязкости расплава (жидкости) зона области преимущественного возникновения нитей уменьшается, и при достижении вязкости $\mu = 2.34 \cdot 10^{-3}$ кг сек/м² область распада струи на нити исчезает. Это свидетельствует, что струи жидкости вязкостью, меньшей $2.34 \cdot 10^{-3}$ кг сек/м², поперечно обтекаемые потоком воздуха, распадаются на капли без возникновения жидких нитей, или время существования нитей меньше времени затвердевания используемых в опытах расплавов, и поэтому нами возникновение нитей не обнаружено.

Между кривыми 0 — 7 (фиг. 1) или 0 — 6 (фиг. 2) и 0 — 10 (удовлетворяется неравенство (5)) находится область перехода от распада струи на нити к устойчивости струи. В этой области образуются преимущественно толстые нити и крупные капли.

Ниже кривых 0 — 10 (условие, описываемое неравенством (6)) лежит область устойчивости струй вязкой жидкости.

Чтобы не затемнять графики (фиг. 1 и 2), на них не нанесены экспериментальные данные. Сравнение экспериментальных данных, полученных в результате проведения более 300 опытов, с расчетными по уравнению (1) при выполнении условий (3) — (5) показало, что максимальное отклонение не превышает $\pm 12\%$, что можно считать удовлетворительным совпадением.

Условие (2) определяет минимальный диаметр жидких нитей (волокон), который может быть получен при распаде струи жидкости.



Фиг. 1

Минимальный диаметр нитей определяется неравенством

$$d_{\min}^{\circ} = \frac{2\pi \cdot 10^{-3} d_2 [1 + 2.2 (\lg 100\mu)^{1.7}]}{(\sigma W - 16.65 \cdot 10^3 d_0) \sqrt{\sigma}} \geq \frac{d_2}{10^3 (0.15 \cdot 10^{-3} + d_2)} \left(\frac{E}{2\pi\sigma} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Следовательно, средний минимальный диаметр образующихся нитей зависит только от диаметра струи и поверхностного натяжения жидкости. Расчеты по уравнению (7) дают хорошую сходимость с опытными данными по раздуву расплавов висоловой смолы и доменных шлаков (расхождение опытных данных с расчетными не превышает 8%). Многократные попытки получить нити с меньшим диаметром, чем это возможно из неравенства (7), за счет увеличения скорости потока или уменьшения вязкости жидкости приводили к распылу струи.

Средний диаметр нитей, на которые распадается струя жидкости, может быть определен по уравнению (1). Однако для практических расчетов при изготовлении штапельного минерального волокна пользоваться этим уравнением неудобно.

Так как скорость истечения потока из сопла зависит от давления, то с некоторым упрощением можно выразить зависимость диаметра нитей, на которые распадается струя, через давление. При выполнении условий (3) — (5) средний диаметр нитей может быть определен по уравнению

$$d^{\circ} = \frac{d_2}{0.15 \cdot 10^{-3} + d_2} \left[1 + 0.1 \left(\frac{G_2}{G_1} \right)^5 \right] \left(\frac{\mu E}{\sigma P} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Здесь P — избыточное давление воздуха, используемого для создания потока; остальные обозначения даны выше.

Из уравнения (8) видно, что при $G_1 / G_2 \geq 1.3$ диаметр нитей практически не зависит от этого соотношения. Сравнение между собой результатов, получаемых по уравнениям (1) и (8), показывает, что разница не превышает $\pm 5\%$. Эта разница получается за счет некоторых упрощений при преобразовании уравнения (1). При этом максимальное отклонение опытных данных от расчетных по уравнению (8) не превышает $\pm 17\%$.

Следует отметить, что расчет по уравнению (8) дает хорошее совпадение с опытными данными по раздуву силикатных расплавов воздухом или паром, приведенными в работах [2,3]. Расхождение между расчетными и опытными данными в этом случае также не превышает $\pm 17\%$.

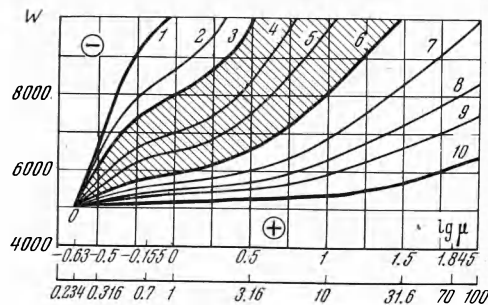
В уравнения (1) и (8) не входит плотность жидкости, хотя в наших исследованиях она изменялась в среднем в 2.5 раза. Это свидетельствует, что плотность жидкости при ее изменении примерно от 120 до 280 $\text{кг сек}^2/\text{м}^4$ не оказывает заметного влияния на распад струй жидкости, обтекаемых потоком воздуха.

Опыты показали, что большое влияние на характер распада струй жидкости оказывает скорость струи, с которой она встречается с потоком воздуха. При скорости струи жидкости, большей 1.5 — 2.0 м/сек , прекращается образование нитей, и струя распадается преимущественно на капли. Образование нитей при распаде струй жидкости подтверждается работами Генлейна, Вебера, Ли и Спенсера [5]. На фотографиях, приведенных в этих работах, отчетливо видны нити, возникающие при распаде струй жидкости.

Поступила 22 VI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин В. А., Бритнева Л. Н., Дидякин Ю. Ф., Ягодкин В. И. О дроблении струи жидкости, обтекаемой газовым потоком. ПМТФ, 1964, № 5.
2. Горяйнов К. Э. Технология минеральной ваты и изделий из нее. Госстройиздат, 1958.
3. Розовский В. С., Склизков Н. И., Шмидт Л. М. Технология изготовления минераловатных изделий повышенной жесткости. Строительные материалы, 1965, № 2.
4. Волынский М. С. О дроблении капель в потоке воздуха. Докл. АН СССР, 1948, т. 62, № 3.
5. Сб. «Двигатели внутреннего сгорания» (под ред. Васильева С. Н.), ОНТИ НКТП СССР, 1936.



Фиг. 2