

УДК 666.189.212:532.5

С.Г.Иваницкий, М.Б.Штерн

Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА РАСПЛАВОВ ПРИ ФОРМОВАНИИ НЕПРЕРЫВНЫХ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН

В статье рассматривается возможность определения расхода расплава через фильеру по основным параметрам процесса. Показана необходимость учета коэффициента потери напора при внезапном сужении потока на входе в фильеру. Предложена формула расчета расхода расплава, учитывающая этот коэффициент. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных расхода для разных типов базальтов, температур формования, диаметров фильер, которое показало их качественную и количественную корреляцию в пределах погрешности. Это позволяет сделать вывод о применении данной формулы для расчета расхода различных типов силикатных расплавов при формовании непрерывных волокон из фильерных питателей.

Ключевые слова: *расход базальтового расплава, фильера, гидравлическое сопротивление, параметры процесса формования.*

Состояние проблемы

Базальтовые непрерывные волокна (ровинг) являются конструкционным материалом, из которого получают тканые и композиционные изделия, обладающие высокими показателями механических и химических свойств. Выбор и научное обоснование оптимальных технологических параметров в производстве непрерывных базальтовых волокон является актуальной и практически важной задачей. Производительность установки по производству базальтовых и других силикатных волокон определяется скоростью истечения нагретого до высокой температуры расплава из единичной фильеры питателя. При формовании непрерывных волокон заданного диаметра из определенного типа базальта величина массового расхода зависит от исходных режимных параметров – диаметра и длины фильеры, температуры расплава перед фильерой и уровня расплава над фильерой.

Характерной особенностью технологии получения волокон из базальтовых или других силикатных расплавов является то обстоятельство, что вследствие малой скорости течения жидкости в фильере (порядка 1 см/с) и высоких значений ее средней вязкости внутри фильеры (порядка 100 -200 дПа·с) течение расплава осуществляется в стоковом режиме при чрезвычайно низких значениях числа Рейнольдса ($Re \ll 1$).

При ламинарном истечении вязкой жидкости из цилиндрического канала с длиной L массовый расход рассчитывают с использованием известной классической формулы Пуазейля – Гагена, из которой следует, что

$$Q = \frac{\pi R_{\phi}^4 \cdot \rho \cdot (P_H - P_0)}{8L \cdot \mu} = \frac{\pi R_{\phi}^4 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot H}{8L \cdot \mu} \quad (1)$$

Здесь $P_H - P_0 = \rho g H$ - избыточное давление столба расплава над фильерой, обеспечивающее истечение под действием силы тяжести, а H - высота столба.

При использовании формулы (1) для оценки расхода расплава в производстве стеклянных или базальтовых волокон результаты теоретических расчетов существенно отличаются от данных, полученных в эксперименте. Это приводит к необходимости введения в каждом отдельном случае эмпирических поправок для согласования расчетных и опытных результатов [1,2].

Невозможность точного предсказания скорости истечения расплава из фильеры на основании формулы Пуазейля-Гагена в форме (1) объясняется следующим. Формула (1) была выведена в предположении, что падение давления $P_H - P_0 = \rho g H$ в канале длиной L обусловлено только потерей напора из-за трения потока о стенку. Таким образом, в формуле Пуазейля-Гагена учтено исключительно влияние путевого гидравлического

сопротивления [3]. Это допустимо для длинных каналов ($L/d \gg 10$), но не приемлемо для фильеры питателя, у которых длина L сравнима с диаметром d . Для таких коротких каналов следует принимать во внимание дополнительный вклад местных гидравлических сопротивлений. Применительно к процессу формирования волокон таким гидравлическим сопротивлением является внезапное сужение канала при переходе потока расплава из объема питателя в узкий канал фильеры [4].

В данной работе предлагается и обосновывается методика расчета расхода расплава при ламинарном течении в фильере с использованием формулы Пуазейля-Гагена с учетом внезапного сужения потока.

Обоснование методики расчета

Сравнение расчетных и опытных данных проводилось с использованием результатов экспериментов, проведенных в НИЛБВ ИПМ НАНУ. Экспериментальные исследования истечения расплава из фильеры в процессе формирования непрерывных волокон из базальтов различного типа проводились при различных значениях температуры расплава на входе в фильеру, гидростатического давления расплава и размеров фильеры.

Базальтовая порода, из которой получают волокно, обладает химическим и минералогическим составами, определяющими физические и реологические свойства расплава – прежде всего вязкость μ и плотность ρ . Формование волокон осуществляется в определенном температурном интервале, который зависит от типа базальта и размеров фильеры: внутреннего диаметра d_ϕ и длины L .

Для вывода формулы для расчета расхода расплава из фильеры рассмотрим процесс истечения расплава как высоковязкой жидкости из стеклоплавильного сосуда большого диаметра через узкий, короткий цилиндрический канал – фильеру, размещенную на дне сосуда, в атмосферу с давлением P_0 . Диаметр канала d_ϕ значительно меньше диаметра стеклоплавильного сосуда.

Запишем уравнение Бернулли для входного и выходного сечений канала фильеры. При сокращении параметра P_0 в обеих частях уравнение сводится к виду

$$\rho g H = \frac{\rho v^2}{2} + \zeta_{ex} \frac{\rho v^2}{2} + \frac{\lambda L}{d_\phi} \frac{\rho v^2}{2} = \left(1 + \zeta_{ex} + \frac{\lambda L}{d_\phi} \right) \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

где ζ_{ex} – коэффициент потери напора при внезапном сужении потока при переходе жидкости из широкого сосуда в узкий канал; λ – коэффициент Дарси, характеризующий потери напора вследствие трения о стенку канала. [3].

При ламинарном течении жидкости для малых значений числа Рейнольдса коэффициент Дарси оценивается по формуле [4]

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

В гидродинамике коэффициенты потери напора на местных сопротивлениях при малых значениях чисел Рейнольдса изучены недостаточно. Установлено, что для ламинарного потока в этом случае коэффициент потери напора при внезапном сужении потока ζ_{ex} может быть представлен в виде [4]

$$\zeta_{ex} = \frac{A}{Re} \quad (4)$$

Подставляя значения λ и ζ_{ex} и учитывая, что $A/Re \gg 1$ и $64/Re \gg 1$, уравнение (2) сводится к виду

$$\rho g H = \left(\frac{A}{Re} + \frac{64}{Re} \frac{L}{d_\phi} \right) \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

Учитывая, что $Re = \rho d_\phi v / \mu$ и подставляя радиус фильеры $R_\phi = d_\phi / 2$, получим выражение для средней скорости истечения расплава через фильеру

$$v = \frac{4\rho \cdot g \cdot H \cdot R_{\phi}^2}{(A \cdot R_{\phi} + 32L) \cdot \mu} \quad (6)$$

Учитывая, что массовый расход расплава через фильеру определяется как $Q = \rho \cdot v \cdot S_{\phi} = \pi R_{\phi}^2 \cdot \rho \cdot v$, запишем формулу для расхода расплава в фильере

$$Q = \frac{4\pi \cdot R_{\phi}^4 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot H}{(A \cdot R_{\phi} + 32 \cdot L) \cdot \mu} \quad (7)$$

Анализ полученных результатов и их экспериментальная верификация

Полученная формула описывает расход жидкости в коротких каналах при малых числах Рейнольдса, когда гидравлическое сопротивление внезапного сужения потока сравнимо по величине с сопротивлением трения жидкости о стенки канала. Данные экспериментов по определению потери напора при внезапном сужении потока ζ_{ex} позволяют оценить значения A при $Re \ll 0,01$, и считать, что $A = 300$ [2]. Здесь $\mu = \mu(T_0)$, где T_0 - температура на входе в фильеру, которую принимают за температуру формования.

Проведены исследования по определению расхода расчетным методом по формуле (7) для расплавов со сравнительно низкой вязкостью (базальт Берестовецкого месторождения) и высокой вязкостью (андезито-базальт Подгорнянского месторождения).

Температурные зависимости вязкости μ и плотности ρ для исследуемых расплавов определялись нами с использованием стандартных экспериментальных методов [5].

На лабораторной установке были проведены экспериментальные исследования по определению расхода этих расплавов базальтов при формировании непрерывных волокон. Истечение расплава происходит из однофильерного питателя, представляющего собой цилиндрический сосуд с врезанной в дно фильерой. Он размещается в электропечи, где поддерживается заданная температура. В процессе получения волокон значение этой температуры может изменяться в пределах температурного интервала формования, характерного для данного типа базальта и размера фильеры. Измерения расхода проводились при различных исходных значениях температуры расплава в печи, уровня расплава и диаметра фильеры при постоянной ее длине $L = 3$ мм. Для высоковязкого андезито-базальта Подгорнянского месторождения использовались фильеры с внутренним диаметром 1,8 мм и 2,2 мм. Для базальта Берестовецкого месторождения использовались фильеры с внутренним диаметром 1,8 мм. Расход расплава определялся по массе волокна, наработанного за фиксированный период времени.

На рис.1 приведены экспериментальные и расчетные данные по зависимости расхода от уровня H для расплава базальта Берестовецкого месторождения при разных температурах формования.

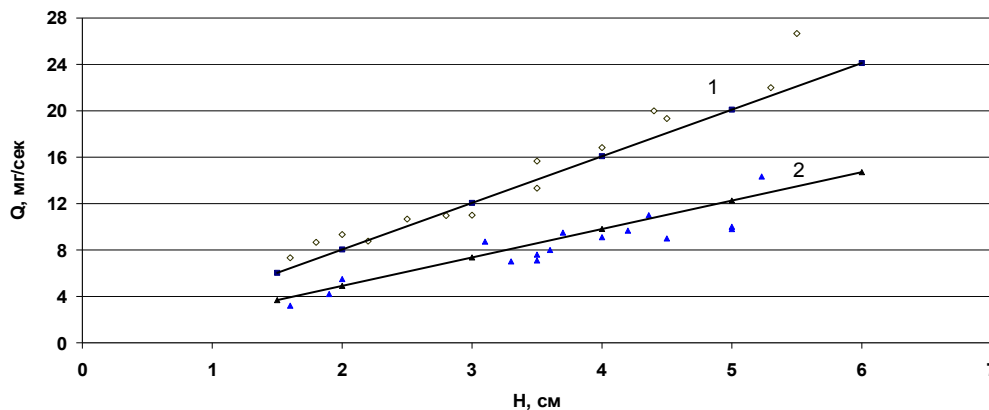


Рис.1. Зависимость дебита расплава базальта Берестовецкого месторождения от уровня при: 1- $T_0 = 1440$ °C, 2- $T_0 = 1400$ °C, $d_{\phi} = 1,8$ мм, Сплошные линии – расчетные значения, точки – экспериментальные значения.

На рис.2 приведенные экспериментальные данные по зависимости расхода от уровня H для расплава андезито-базальта Подгорнянского месторождения и фильер диаметром 1,8 мм при разных температурах формования.

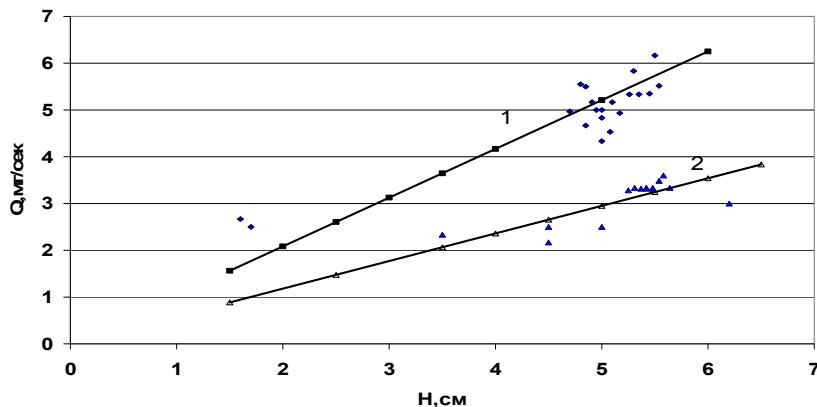


Рис.2. Зависимость дебита расплава андезито-базальта Подгорнянского месторождения от уровня при: 1- $T_0=1450$ °C, 2- $T_0=1400$ °C, $d_\phi=1,8$ мм, точки — экспериментальные значения; сплошные линии - расчетные значения.

На рис.3 приведенные экспериментальные и расчетные данные по зависимости расхода от температуры формования при постоянном уровне для расплавов базальта Берестовецкого месторождения и андезито-базальта Подгорнянского месторождения.

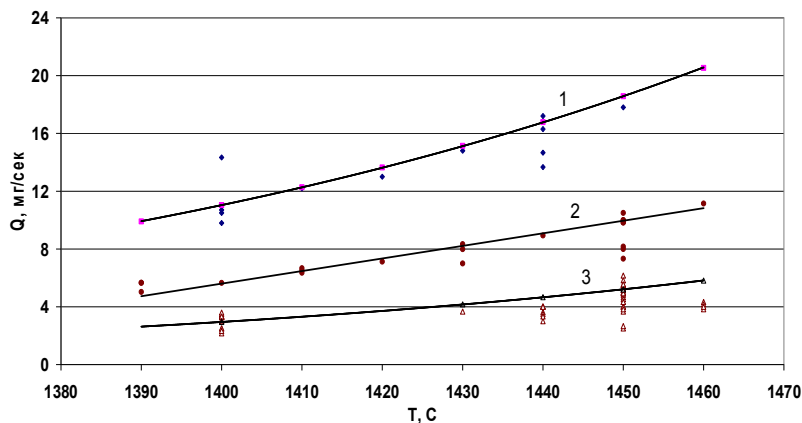


Рис. 3. Зависимость расхода расплавов от температуры формования 1 - базальт Берестовецкого месторождения $d_\phi=1,8$ мм; 2- андезито-базальт Подгорнянского месторождения $d_\phi=2,2$ мм ; 3- андезито-базальт Подгорнянского месторождения $d_\phi=1,8$ мм при $H = 5 \pm 0,5$ см; точки — экспериментальные значения; сплошные линии - расчетные значения.

Из рисунков видно, что экспериментальные точки хорошо коррелируют с расчетными значениями и уравнение (7) можно использовать для оценки расхода расплава при получении непрерывных волокон как силикатных (базальтовых и стеклянных) так и химических, получаемых при аналогичных условиях истечения из фильерных питателей.

1. Производство стеклянных волокон и тканей / Под ред. М.Д. Ходаковского.- М.: Химия, 1973. – 312 с.
2. Тобольский Г.Ф. Минеральная вата и изделия из нее. Теория и технология производства. - Челябинск: Южно-Уральское кн. изд., 1968.- 235 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.-М.: Наука, 1987. - 840 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. - 558 с.
5. Акустическая спектроскопия расплавов горных пород.(Препринт)/Горбачев Г.Ф., Сперкач В.С., Сергеев В.П., Чувашов Ю.Н.- Киев.- ИПМ НАНУ, 1993.- 66 с.