

The article analyses melt hydrodynamics sprayed by centrifugal method. It may be useful for understanding computer controlled spray process.

В. В. ОВЧИННИКОВ, ПО «ММЗ»,  
А. П. ЛАСКОВНЕВ, А. Т. ВОЛОЧКО,  
Ж. Е. МАКАРОВА, ФТИ НАН БЕЛАРУСИ

## ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ РАСПЛАВА

УДК 621.762

Получение частиц заданного гранулометрического состава — главная задача для разработчиков и эксплуатационников диспергирующих устройств распылительных металлургических комплексов. Одно из устройств для распыления жидкого металла представлено на рис. 1. Оно содержит два независимых привода 1, 2, соединенных зубчатой передачей 3 и 4 с распыляющими дисками 6 и 7, снабженными огнеупорными вставками 8 и 9. Зубчатые колеса фиксируются гайками 10. Передающий механизм находится в стакане 11, закрытом крышкой 12, которая имеет отверстие для заливки металла. Распыляющий узел установлен в подшипниках 13, а нижний узел распыления — на цилиндрической опоре 14, в которую входит труба 15 с регулировочными винтами 16, обеспечивающими регулировку необходимого зазора между дисками распыления ( $\delta=2h$ ). Получаемый порошок накапливается в пространстве между опорой 14, боковой стенкой 17 и днищем 18.

Металл из металлоприемника (не показан) поступает в нижний диск, где под действием центробежных сил растекается в виде пленки по щели между двумя дисками, установленными с заранее заданным зазором. При этом стабилизируются гидродинамические условия распыления. Получившаяся пленка дробится на мельчайшие капли и кристаллизуется в полете, превращаясь в порошок.

Рассмотрим основные гидродинамические закономерности течения расплава через дозирующее устройство между верхним и нижним распыляющим диском.

Движение расплава через дозирующее устройство можно принимать как продавливание жидкости через щель сдвигающимися перпендикулярно к течению плоскопараллельными стенками, высота которой  $2h$  (рис. 2) во много раз меньше, чем длина.

Задача по продавливанию жидкости между скользящими плоскопараллельными стенками была поставлена уже в 1959 г. [1], а количественная оценка обсуждаемого вопроса была дана в [2, 3]. Условившись, что расплавленный металл принимаем как ньютоновскую жидкость [4, 5], для описания такой же ситуации можно использовать уравнение Навье—Стокса, которое в прямоугольной системе координат примет вид [6]

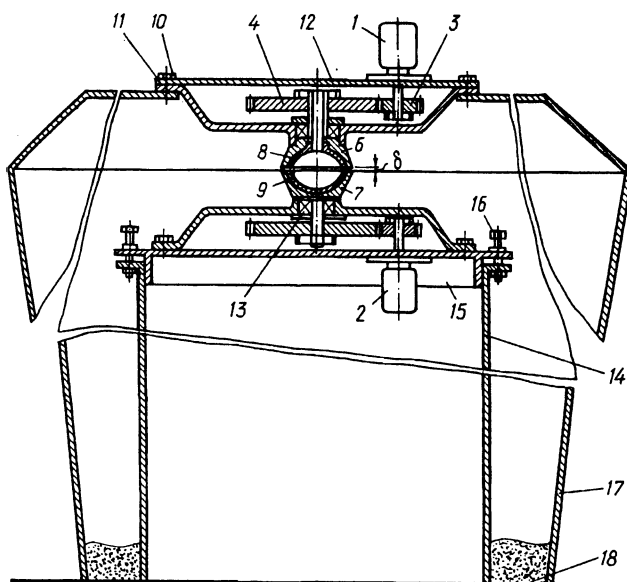


Рис. 1. Схема установки центробежного распыления металла с возможностью регулирования размера фракции порошка

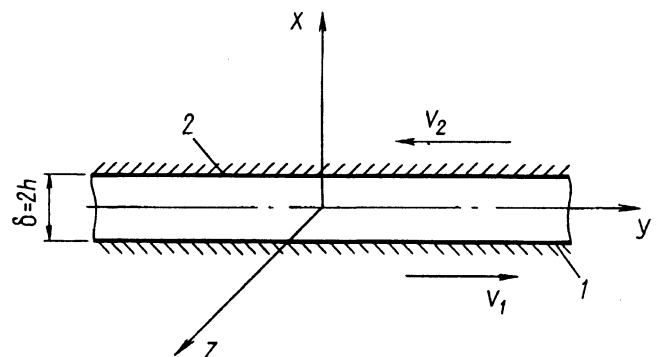


Рис. 2. Расчетная схема для движения жидкого металла между двумя дисками: 1 — нижняя стенка; 2 — верхняя стенка щели

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} v \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x} v \frac{\partial v_x}{\partial x}, \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} v \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} v \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} v \frac{\partial v_z}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1)$$

При добавлении к данным уравнениям уравнения неразрывности [6]

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \frac{\partial (\vartheta v_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\vartheta v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\vartheta v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

получаем систему четырех дифференциальных уравнений с четырьмя неизвестными  $v_x, v_y, v_z, P$ , где  $v_x, v_y, v_z$  — проекции вектора скорости на оси координат  $x, y, z$ ;  $P$  — давление в потоке;  $v$  — кинематический коэффициент вязкости;  $\vartheta$  — плотность жидкости.

Согласно [6], изменением плотности капельной жидкости можно пренебречь, тогда уравнение неразрывности может быть преобразовано

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Гидродинамические процессы, происходящие внутри устройства, принимать во внимание не будем, рассматривая их как подготовительные для продавливания расплава через щель. Следовательно, в силу предварительного подогрева распыляющего устройства, малой ширины щели, применения достаточно большого перегрева расплава для получения высоких скоростей течения, по данным [2], изменениями температуры расплава в самой щели можно пренебречь, рассматривая процесс как изотермический. Исходная система уравнений приобретает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial P}{\partial x} + v \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial P}{\partial y} + v \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial P}{\partial z} + v \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для решения уравнений движение расплава предполагаем установившимся, т.е. распределение скоростей в пространстве, заполненном жидкостью, с течением времени не меняется [6]. Выполняя условия [3], движение расплава считаем ламинарным, т.е. плоскопараллельным.

В данном случае при вращении распыляющих дисков, образующих щель, необходимо принимать во внимание действие центробежных сил, поэтому проецируем векторы сил, действующих на частицу жидкости единичной массы с двух вращающихся форм, и учитываем в уравнениях (4). К градиенту движения, входящему в уравнение (4), прибавится еще один член, выражающий влияние центробежной силы на характер течения. Для непродолжительной по ширине щели величину радиуса при учете центробежных сил определяем как средний радиус  $r_{cp}$ :

$$r_{cp} = (r_1 - r_2) / 2, \quad (5)$$

где  $r_1, r_2$  — соответственно внешний и внутренний радиусы щели (рис. 3).

Для вывода закономерностей течения потока жидкого металла используем систему координат рис. 2. С учетом сказанного выше имеем  $v_x=0$ ,  $v_y$  и  $v_z$  зависят только от  $x$ , давление везде постоянно, значит:

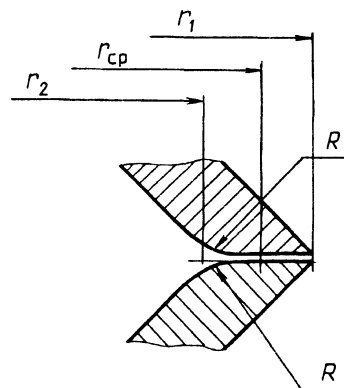


Рис. 3. Схема для расчета радиусов щели, формирующей пленку расплава

$$\begin{aligned}
 0 &= -\frac{1}{\vartheta} \frac{\partial P}{\partial x}, \\
 0 &= \nu \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2}, \\
 0 &= r_{\text{ср}}(\omega_1^2 + \omega_2^2)\vartheta + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2}, \\
 0 &= \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial c_z}{\partial z},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — скорости вращения соответствующих половин устройства. Тогда для нахождения скорости  $v_z$  из (6) имеем

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} = -\frac{1}{\mu} r_{\text{ср}}(\omega_1^2 + \omega_2^2)\vartheta. \tag{7}$$

Общее решение уравнения (7) имеет вид

$$v_z = -\frac{r_{\text{ср}}}{2\nu}(\omega_1^2 + \omega_2^2)x^2 + C_1x + C_2.$$

Для определения  $C_1$  и  $C_2$  учитываем граничные условия, вытекающие из условий прилипания (7), т. е. на неподвижных твердых поверхностях дисков скорости жидких частиц равны нулю, а на движущихся совпадают по величине и направлению со скоростями соответствующих точек поверхности:  $x=\pm h$ ,  $v_z=0$ .

Тогда  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = \frac{r_{\text{ср}}}{2\nu}(\omega_1^2 + \omega_2^2)h^2$ , значит,

$$v_z = \frac{1}{2\nu} r_{\text{ср}}(\omega_1^2 + \omega_2^2)(h^2 - x^2),$$

или

$$v_z = \frac{1}{2\nu} r_{\text{ср}} h^2 (\omega_1^2 + \omega_2^2) \left(1 - \frac{x^2}{h^2}\right). \tag{8}$$

Рассчитаем проекцию вектора скорости на ось  $y$ . Из (6) имеем

$$\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} = 0.$$

Общее решение этого уравнения:  $v_y = C_1x + C_2$ .

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ , находим из граничных условий, которые можно составлять для различных режимов движения стенок щели. Основой для этого является условие прилипания. Скорость  $v_y$ , обусловленная движением нижнего диска, получается, если останавливать верхнюю форму, что в граничных условиях выражается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 x=h, \quad v_y=0, \\
 x=-h, \quad v_y=v_1.
 \end{aligned}$$

Тогда

$$C_1 = -\frac{v_1}{2h} \text{ и } C_2 = \frac{v_1}{2},$$

что дает выражение для скорости

$$v_{y1} = \frac{1}{2} v_1 \left(1 - \frac{x}{h}\right), \text{ или } v_{y1} = \frac{1}{2} \omega_1 r_{\text{ср}} \left(1 - \frac{x}{h}\right). \tag{9}$$

Скорость  $v_{y2}$ , обусловленная движением верхней формы, получается, если останавливать нижнюю форму:

$$\begin{aligned}
 x=h, \quad v_y=v_2, \\
 x=-h, \quad v_y=0.
 \end{aligned}$$

Тогда

$$C_1 = \frac{v_2}{2h} \text{ и } C_2 = \frac{v_2}{2}.$$

Следовательно, для  $v_{y2}$  получаем:

$$v_{y_2} = \frac{1}{2} v_2 \left(1 + \frac{x}{h}\right) \quad \text{или} \quad v_{y_2} = \frac{1}{2} \omega_2 r_{\text{cp}} \left(1 + \frac{x}{h}\right). \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) можно получить, учитывая условия движения одновременно обоих дисков в граничных условиях при определении постоянных интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\begin{aligned} x=h, \quad v_y=v_2, \\ x=-h, \quad v_y=v_1. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} C_1 = \frac{v_2 - v_1}{2h} \quad \text{и} \quad C_2 = v_1 + \frac{v_2 - v_1}{2}, \\ v_y = \frac{v_2 - v_1}{2} \left(1 + \frac{x}{h}\right) + v_1. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение (11) с помощью простых преобразований приобретает вид

$$v_{y_1 y_2} = \frac{1}{2} v_1 \left(1 - \frac{x}{h}\right) + \frac{1}{2} v_2 \left(1 + \frac{x}{h}\right). \quad (12)$$

Выражение (12) соответствует сложению скоростей  $v_{y_1}$  и  $v_{y_2}$  при движении дисков в одну сторону. В случае встречного движения скорости движения вычитаются, что приводит

$$v_{y_1 y_2} = \frac{1}{2} v_2 \left(1 + \frac{x}{h}\right) - \frac{1}{2} v_1 \left(1 - \frac{x}{h}\right). \quad (13)$$

Выражение (13) совпадает с (11), если изменить знак скорости  $v_1$  и разложить уравнение по скоростям. С учетом того, что  $v = \omega r$ , окончательно имеем

$$v_{y_1 y_2} = \frac{1}{2} \omega_1 r_{\text{cp}} \left(1 - \frac{x}{h}\right) + \frac{1}{2} \omega_2 r_{\text{cp}} \left(1 + \frac{x}{h}\right), \quad (14)$$

$$v_{y_1 y_2} = \frac{1}{2} \omega_2 r_{\text{cp}} \left(1 + \frac{x}{h}\right) - \frac{1}{2} \omega_1 r_{\text{cp}} \left(1 - \frac{x}{h}\right), \quad (15)$$

где знак "+" выражает одинаковые направления движения, а знак "-" — встречное движение.

Сложив полученную скорость  $v_z$  с соответствующей скоростью  $v_y$ , можно найти результирующую скорость течения из щели для различных случаев работы устройства. Наибольший интерес представляют следующие случаи.

I. Двигается нижний диск, верхний неподвижен. Применяя для расчета  $v_z$ , выражение (8) примет вид

$$\begin{aligned} v_z = \frac{1}{2v} r_{\text{cp}} h^2 \omega_1^2 \left(1 - \frac{x^2}{h^2}\right), \\ v_{y_1 y_2} = \frac{1}{2} \omega_1 r_{\text{cp}} \left(1 - \frac{x}{h}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Для результирующей скорости

$$v_{zy_1} = \sqrt{v_z^2 + v_{y_1}^2}. \quad (17)$$

Иллюстрацией этого выражения является рис. 4, где показано сложение эпюры скоростей.

Подставляя в (17) значения скоростей из (9) и (16), получаем

$$v_{zy_1} = \frac{1}{2} \frac{r_{\text{cp}}}{h} \omega_1 (h-x) \sqrt{\frac{\omega^2 h^2}{v^2} (x+h)^2 + 1}. \quad (18)$$

II. Двигается верхний диск, нижний неподвижен (рис. 5). В данном случае скорость потока рассчитывается так же как, в случае I, с учетом того, что результирующая скорость потока обозначается  $v_{z_2}$ :

$$v_{zy_2} = \sqrt{v_z^2 + v_{y_2}^2}. \quad (19)$$

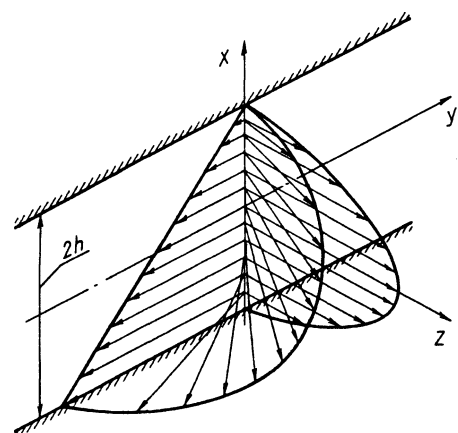


Рис. 4. Сложение скоростей в случае движения только нижней стенки щели

Подставив (8) и (10) в (19), получим

$$v_{z_2} = \frac{1}{2} \frac{r_{cp}}{h} \omega_2 (x+h) \sqrt{\frac{\omega_2^2 h^2}{v^2} (x-h)^2 + 1}. \quad (20)$$

III. Нижняя и верхняя чашки движутся в одну сторону. Результирующая скорость определяется следующим образом:

$$v_{z_2 y_2} = \sqrt{v_z^2 + v_{y_1 y_2}^2}. \quad (21)$$

Подставив в уравнение (21) выражение скорости из (8) и (14) и после некоторых простых преобразований, получим

$$v_{z_1 y_1} = \frac{1}{2} \frac{r_{cp}}{h} \sqrt{\frac{h^2}{v^2} (\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 (x^2 - h^2)^2 + \omega_1^2 (x-h)^2 - 2\omega_1 \omega_2 (x^2 - h^2) + \omega_2^2 (x+h)^2},$$

$$v_{z_1 y_2} = \frac{r_{cp}}{h} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \frac{h^2}{2v^2} (\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 (x^2 - h^2)^2 + \frac{1}{2} \omega_1^2 (x-h)^2 - \omega_1 \omega_2 (x^2 - h^2) + \frac{1}{2} \omega_1^2 (x+h)^2 \right]} \quad (22)$$

Эпюра скоростей будет иметь вид, показанный на рис. 6.

При вращении верхнего и нижнего дисков в одну сторону с одинаковой скоростью уравнение (22) примет вид

$$v_{z_1 y_1 \omega_1 = \omega_2} = r_{cp} \omega \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} (x^2 - h^2)^2 + 1}, \quad (23)$$

т. е. скорости потока распределены по параболическому закону.

IV. Нижний и верхний диски вращаются в разные стороны. Этот случай аналогичен случаю II. Скорости складываются, как показано на рис. 7:

$$v_{z_2 y_2} = \sqrt{v_z^2 + v_{y_1 y_2}^2}. \quad (24)$$

Подставляя в правую часть уравнения (24) выражения (8), (15), после преобразования получаем:

$$v_{z_1 y_1} = \frac{1}{2} \frac{r_{cp}}{h} \sqrt{\frac{h^2}{v^2} (\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 (x^2 - h^2)^2 + \omega_1^2 (x+h)^2 + 2\omega_1 \omega_2 (x^2 - h^2) + \omega_2^2 (x-h)^2},$$

$$v_{z_1 y_2} = \frac{r_{cp}}{h} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \frac{h^2}{2v^2} (\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 (x^2 - h^2)^2 + \frac{1}{2} \omega_1^2 (x-h)^2 - \omega_1 \omega_2 (x^2 - h^2) + \frac{1}{2} \omega_1^2 (x-h)^2 \right]}. \quad (25)$$

То же условие, но диски вращаются с одинаковыми скоростями  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ . Значит,

$$v_{z_1 y_1 \omega_1 = \omega_2} = \frac{r_{cp}}{h} \omega \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} \omega^2 (x^2 - h^2)^2 + x^2}. \quad (26)$$

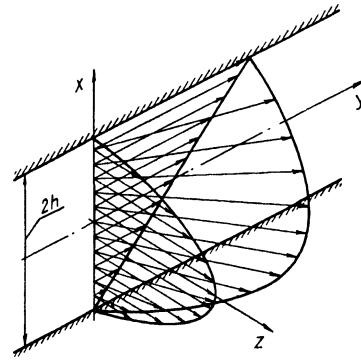


Рис. 5. Сложение скоростей в случае движения только верхней стенки щели

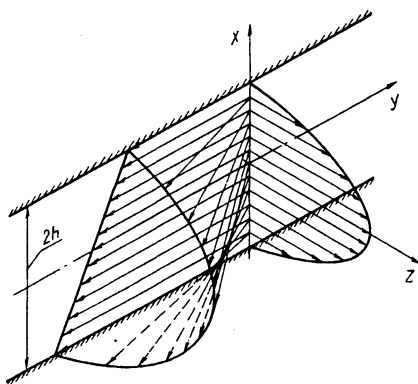


Рис. 6. Сложение скоростей в случае движения двух стенок щели в одном направлении

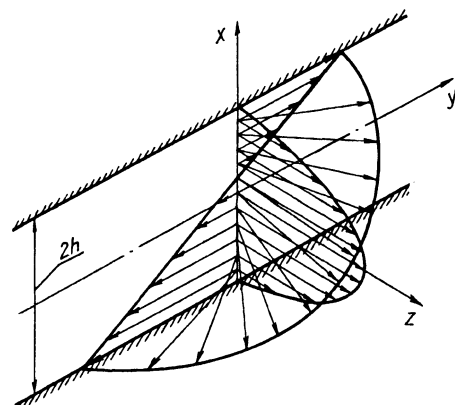


Рис. 7. Сложение скоростей в случае движения двух стенок щели во встречном направлении

Таким образом, составлена система дифференциальных уравнений, описывающих процесс течения жидкого металла при распылении его устройством, состоящим из двух дисков, имеющих независимый привод, работающим в изотермических условиях. Использование выведенных аналитических зависимостей при управлении технологическим процессом распыления расплава с помощью компьютера позволило повысить химическую однородность порошков, резко сузить интервал распределения частиц по размерам фракций, получать порошки одного уровня значений твердости при закалке из жидкого состояния.

#### Литература

1. Виноградов Г. В., Маманов А. А., Павлов В. П. Течение аномально-вязких систем при действии двух чистых сдвигов во взаимно перпендикулярных направлениях // Докл. АН СССР. 1959. Т. 127, № 2. С. 362—365.
2. Гуткин А. М. Продавливание вязкопластичной дисперсной массы между скользящими плоскопараллельными стенками // Коллоид. журн. 1961. Т. 23, № 1. С. 20—24.
3. Гуткин А. М. Течение вязкопластичной среды между вращающимися дисками // Докл. АН СССР. 1960. Т. 134, № 5. С. 1048—1050.
4. Рабинович Б. В. Введение в литейную гидравлику. М.: Машиностроение, 1966.
5. Рабинович Б. В. Предмет и задачи гидравлики расплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
6. Тарг С. М. Основные задачи теории ламинарных течений М.; Л.: ГИТТЛ, 1951.
7. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977.

## НОВЫЕ ПОСТУПЛЕНИЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ

### ЕВРОПЕЙСКИЕ СТАНДАРТЫ

1. EN 573-2-94. Алюминий и алюминиевые сплавы. Химический состав и форма полуфабрикатов. Часть 2. Система обозначения с помощью химических символов.
2. EN 601-95. Алюминий и алюминиевые сплавы. Отливки. Химический состав отливок, используемых в контакте с пищевыми продуктами.
3. EN 602-95. Алюминий и сплавы. Изделия деформируемые. Химический состав полуфабрикатов для изготовления изделий, используемых в контакте с пищевыми продуктами.
4. EN 288 1-92. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 1. Общие указания по сварке плавлением (с дополнением А1:1997).
5. EN 288-2-92. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 2. Требования к дуговой сварке (с дополнением А1:1997).
6. EN 288-392. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 3. Испытание на свариваемость при дуговой сварке сталей (с дополнением А1:1997).
7. EN 288-4-92. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 4. Испытание на свариваемость при дуговой сварке и алюминиевых сплавов (с дополнением А1:1997).
8. EN 288-5-94. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 5. Утверждение с использованием установленных расходуемых материалов для дуговой сварки.
9. EN 288-6-94. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 6. Утверждение на основании предшествующего опыта.
10. EN 288-7-94. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 7. Утверждение на основании стандартного сварочного процесса для дуговой сварки.
11. EN 288-8-94. Требования и утверждение способов сварки металлических материалов. Часть 8. Утверждение на основании испытаний опытных сварных образцов.

**Издания не продаются!**

**Ознакомиться с изданиями, а также заказать копии необходимых страниц,**

**можно по адресу:**

**г. Минск, пр. Машерова, 7,**

**читальный зал нормативно-технических документов, комн. 503,**

**тел. 226-65-04.**