УДК 669.2/8

Г.В.КОНОВАЛОВ
Металлургический факультет, аспирант кафедры
металлургии цветных металлов

ОСОБЕННОСТЬ МАССООБМЕНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ДУТЬЕВЫХ СТРУЙ

Одной из главных особенностей металлургических агрегатов, основанных на продувке сульфидного материала, является способ подачи дутья. Существуют два принципиальных способа подачи дутья: погруженное и непогруженное. Первый способ характеризуется высокими тепловыми нагрузками на фурменный пояс, поэтому применение технического кислорода невозможно или требует интенсивного охлаждения, что связано с повышенными потерями тепла во внешнюю среду. Непогруженная подача дутья свободна в выборе дутья и ограничена по производительности лишь предельным количеством дутья. При использовании аппарата струйного вращения конструкция радиально-осевых фурм позволяет увеличить предельное количество дутья в 6-10 раз.

Для кругового движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрическом сосуде, возникающего в результате воздействия распределенных по свободной поверхности касательных напряжений, получено аналитическое решение уравнения Навье – Стокса.

Математическая модель позволяет определить оптимальные параметры процесса и конструктивные особенности аппаратуры для интенсификации массообменных процессов.

One of the main peculiarities of metallurgical units employing blasting of sulphide material is the way of blast delivery. There exist two principal ways of blast delivery: submerged and non-submerged. The first way is characterised by high thermal stresses on the tuyere belt, that is why use of industrial oxygen is either impossible or requires intensive cooling, the latter leading to increased loss of heat in external environment. Non-submerged blasting is not restricted in blast-air choice and is limited in productivity only by maximum volume of blasting. In application of jet rotating devices radial-axial tuyere design enables a 6-10 time increase of blasting volume.

Analytical solution of the Navie – Stocks equation was found for circulatory movement of viscous incompressible liquid in cylindrical vessel resulting from shearing stresses dispersed over the free surface.

The mathematical model enables determination of optimum parameters of the process and design peculiarities of the units to intensify mass-transfer processes.

Одной из главных особенностей металлургических агрегатов, основанных на продувке сульфидного материала, является способ подачи дутья. Существуют два принципиальных способа подачи дутья: погруженное и непогруженное. Первый связан с высокими тепловыми нагрузками на фурменный пояс, поэтому применение технического кислорода невозможно или требует интенсивного охлаждения, как в случае печи Ванюкова, что связано с повышенными потерями тепла во внешнюю среду. Непогруженная подача дутья свободна в выборе дутья и ограничена по производительности лишь предельным количеством дутья. В аппарате струйного вращение использование конструкции радиально-осевых фурм позволяет увеличить предельное количество дутья в 6-10 раз.

Для кругового движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрическом сосуде, возникающего в результате воздействия распределенных по свободной поверхности касательных напряжений, получено аналитическое решение уравнения Навье – Стокса, которое в безразмерных переменных имеет вид

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2},$$

где пространственные координаты r и z отнесены к радиусу сосуда R, время t – к $\rho R^2/\mu$, скорость v – к $M_0/(\mu R^2)$ (здесь M_0 – момент относительно оси симметрии, создаваемый распределенными по свободной поверхности касательными напряжениями;

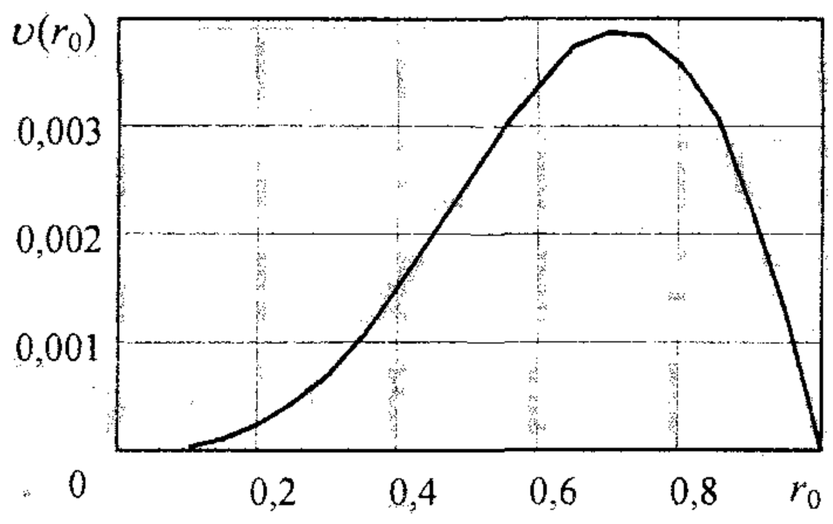


Рис.1. Зависимость скорости вращения вязкой жидкости от радиуса приложения касательных напряжений при определенных геометрических параметрах

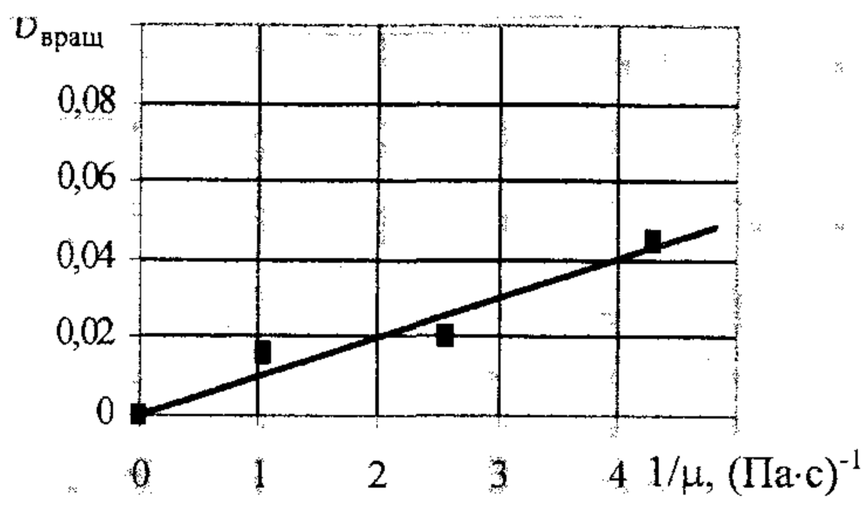


Рис.2. График зависимости $\upsilon_{вращ} = f(1/\mu)$

ρ и μ – плотность жидкости и динамическая вязкость соответственно).

Начальные условия для уравнения приняты в виде $\upsilon = 0$ при $t = 0$, а краевые условия $\upsilon = 0$ при $r = 0$, $r = 1$ при $z = 0$.

Условия непрерывности касательных напряжений на свободной поверхности при $z = h$:

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial z} = T(r),$$

где $h = H/R$, H – высота слоя жидкости; $T(r)$ – касательное напряжение, отнесенное к M_0/R^3.

В результате решения уравнения получено распределение скоростей в установившемся течении:

$$\upsilon_{уст}(r,z) = -2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{q_k}{J_0(\beta_k)\beta_k}\frac{\mathrm{sh}(\beta_k z)}{\mathrm{ch}(\beta_k h)}J_1(\beta_k, r),$$

где q_k – касательное напряжение на свободной поверхности; J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода; $\beta_к$ – нуль функции Бесселя.

Размерная скорость

$$\upsilon = -\frac{2M_0}{\mu R^2}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{q_k}{J_0(\beta_k)\beta_k}\frac{\mathrm{sh}(\beta_k z)}{\mathrm{ch}(\beta_k h)}J_1(\beta_k, r).$$

Если касательное напряжение на свободной поверхности сосредоточено в узком кольце радиусом $R_0 = r_0 R$ и толщиной $\delta \ll R$, то

$$q_k = \frac{1}{2\pi}r_0 J_1(\beta_k r_0).$$

Тогда

$$\upsilon = -\frac{M_0 R_0}{\pi\mu R^3}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{J_1(\beta_k, r_0)}{J_0(\beta_k)\beta_k}\frac{\mathrm{sh}(\beta_k z)}{\mathrm{ch}(\beta_k h)}J_1(\beta_k, r).$$

Нули функции $J_1(z)$ могут быть приближенно вычислены по формуле $\beta_k = \beta_1 + (k-1)\pi$, где $\beta_1 = 3{,}832$; $\beta_k = (4k + 1)\pi/4$ при $k > 3$.

Математическая модель позволяет определить оптимальные параметры и конструктивные особенности агрегата, обеспечивающие интенсификацию массообменных процессов (рис.1).

Математическое описание подтверждается экспериментальными данными, полученными на физической модели с жидкостями различной плотности и вязкости. В эксперименте исследовалась скорость вращения жидкости в зависимости от давления истечения, кинематической вязкости и плотности жидкости, угла наклона дутьевых струй к плоскости ванны. Установлено, что скорость вращения жидкости в цилиндрическом сосуде под действием тангенсальных дутьевых струй максимальна при угле наклона их к поверхности ванны 65°. Кроме того, изучена зависимость скорости вращения от динамической вязкости жидкости (рис.2) и от давления истечения.

Научный руководитель профессор, д.т.н. *Л.М.Шалыгин*