

технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2(259). – С. 107–114. DOI 10.52065/2520-2669-2022-259-2-107-114

2. Ланкин, Р.И., Францкевич В.С. Влияние геометрических параметров опорно-распределительных решеток на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной шаровой насадкой / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2. – С. 108–112. DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112.

3. Ланкин Р.И., Францкевич В.С., Шаповалов Ю.П. Гидродинамика в аппаратах с подвижной насадкой // Нефтехимия-2021: материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке / Минск (22–24 нояб. 2021 г.).– Минск: БГТУ, 2021. – С. 228–231.

4. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. професс.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов / Минск (31 янв. – 12 февр. 2022 г.) – Минск: БГТУ, 2022. – С. 148–151.

5. Балабеков О.С., Волненко А.А. Расчет и конструирование тепло-массообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулируемой насадкой. – Шимкент: GOLDYES, 2015. – 184 с.

УДК 621.926

**Пыкавая О.А., Боровский Д.Н.**

(Белорусский государственный технологический университет)

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ  
И МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗАГРУЗКИ  
И ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРЫ**

Для сверх тонкого помола рационально применять машины, в которых мелющие тела воздействуют на материал с высокой частотой, например, вибрационные мельницы [1].

Вибрационная мельница обычно представляет собой камеру, заполненную загрузкой, состоящей из обрабатываемого материала, среды и специальных обрабатывающих тел (шаров, цилиндров, стержней, валков, труб и т.п.). Загрузке сообщается посредством периодического вибрационного движения камеры или расположенных в ней

специальных поверхностей. В результате возникают относительные движения частиц загрузки, и в зонах их контакта при соударении создаются высокие механические напряжения, приводящие к изменению структуры твердых частиц, а также среды, заполняющей пространство между ними.

Основными технологическими параметрами, характеризующими рабочий процесс вибрационных мельниц, являются потребляемая мощность пропорциональная диссипации энергии в загрузке, производительность, т.е. выход продукта в единице времени, эффективность, которую оценивают по выходу продукта на единицу затраченной энергии, а также интенсивность, характеризующая величину средних напряжений в материале и представляющая собой отношение мощности к объему загрузки материала и частоте колебаний.

Перечисленные технологические параметры процесса определяются геометрическими и механическими характеристиками загрузки (размеры тел, скорость движения частиц, частота соударения и др.).

Вибрирующие поверхности камеры сообщают движение периферийным частицам загрузки, которые, соударяясь, передают его более отдаленным слоям и т.д. Таким образом, по загрузке распространяется волна. В процессе распространения направленного колебательного движения его интенсивность уменьшается по мере удаления от колеблющейся поверхности. Это связано с возникновением хаотического движения частиц вследствие не центральности их соударений, а также с рассеиванием механической энергии при каждом соударении. При колебательном движении относительная скорость частиц мала, вследствие чего количество энергии, переходящее в тепло, сравнительно невелико; относительная скорость частиц при хаотическом движении значительно выше, поэтому основная часть кинетической энергии рассеивается в процессе соударения частиц при хаотическом движении.

Скорость колебательного движения определяется параметрами движения камеры. Обычно камера взаимодействует с загрузкой в течение большей части периода движения, поэтому частота колебательного движения совпадает с частотой движения камеры.

Скорость хаотического движения частиц представляет собой случайную величину, направление которой равновероятно; мгновенное распределение частиц по скорости ассиметрично (типа распределения Максвелла), при этом вероятное значение скорости близко к скорости колебательного движения [2]. Распределение частиц по скорости нестационарно вследствие диссипации энергии при их соударении.

В момент соударения частиц загрузки в результате действия инерционных сил в них возникает напряженное состояние. Величина инерционной силы существенно зависит от степени неупругости соударения.

Средние напряжения, возникающие в слое материала, защемленного при соударении тел, определяется по формуле:

$$\sigma_{M_{ст}} = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{E_T f_T}}{f^2} \tilde{a} c = K_3 \frac{\sqrt{E_T \rho_T}}{f^2} c \quad (1)$$

где  $E_T$  – модуль упругости тел, Па;  $\rho_T$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;  $\tilde{a}$  – отношение скорости звука в среде, ограниченной половиной толщины слоя материала и толщиной (диаметром) тела  $a_{прив}$ , к скорости звука в теле  $a_T$ ;  $c$  – средняя относительная скорость частиц, м/с;  $f$  – коэффициент трения между телами и материалом.

При  $c = 1$  м/с,  $E_T = 10^5$  МПа,  $\rho_T = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $f = 0,3$ , принимая  $\tilde{a} = 1$ , получим  $\sigma_{M_{ст}} = 2 \cdot 10^3$  МПа.

Напряжения на площади контакта равны средним напряжениям в слое. Предельная относительная скорость тел, при которой происходит их разрушение, определяется на основе формулы:

$$c_{T_{max}} = \frac{\sigma_{ст}}{\frac{2}{3} \frac{\rho_T}{f^2}} a_T \tilde{a} \quad (2)$$

где  $\sigma_{ст}$  – предел прочности материала тел.

С увеличением количества материала, у которого обычно  $E_{M_{ст}} < E_T$  значения  $a_T$  уменьшается, а следовательно, предельная скорость возрастает.

При соударениях частиц их скорость уменьшается из-за рассеивания механической энергии вследствие их деформации и разрушения, что учитывает коэффициент рассеивания энергии:

$$K_4 = 1 - \left( \frac{c_1}{c_0} \right) \approx \eta_0 + \frac{(1-i)\mu_{V_M}(1-\mu_T)}{18\sqrt{2}\mu_{V_T_{перд.}} \cdot \mu_T (1-\mu_{V_T_{перд.}}) \cdot \mu_T \cdot E_{мсл}} \quad (3)$$

где  $c_0, c_1$  – скорость частиц (тел) до и после удара;  $\mu_0$  – коэффициент рассеивания энергии при соударениях крупных частиц (тел).

Частота соударения одного тела с окружающим его телами находится по формуле:

$$\omega_T^{(1)} = \frac{c}{\lambda_T} = \frac{6\sqrt{2}\mu_{V_T_{перд.}} \cdot \mu_T \cdot c}{(1-\mu_T)(1-\mu_{V_T_{перд.}})d_T} \quad (4)$$

Частота соударений тел в единице объема определяется:

$$\omega_{TV}^{(1)} = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{c}{d_T^4 \beta_T} \frac{\mu_{V_T_{перд.}} \cdot \mu_T}{(1-\mu_T)(1-\mu_{M.пр.})} \quad (5)$$

Хаотическое движение частиц загрузки при вибрировании приводит к возникновению динамического давления на неподвижную поверхность вследствие соударения частиц со стенкой:

$$P_g = (1 + k_T) m_T c \omega_{TS} = 8 \frac{\mu_T \rho_T c^2}{(1 - \mu_T)(1 - \mu_{M_{np}})} \quad (6)$$

где  $k_T \cong \sqrt{1 - k_T}$  – коэффициент восстановления скорости при соударении тел;  $m_T$  – масса тела;  $\omega_{TS}$  – частота соударений тел с единицей поверхности стенки.

$$B = \frac{1}{6} (1 + k_T) \frac{\mu_T \rho_T c^2}{(1 - \mu_{M_{np}})} \quad (7)$$

Уравнение (6) связывает скорость частиц  $c$  из объемной концентрации. В зависимости от конструкции камеры и режима работы могут быть реализованы различные зависимости между концентрацией и давлением [3]:

а) загрузка свободно расширяется в поле массовых сил (например, силы тяжести). В этом случае динамическое давление равно массе столба загрузки и не зависит от частиц:

$$P_g = g \rho_T \mu_{V_T \text{непрд.}} H_{CT} = g \rho_T \mu_{V_T \text{непрд.}} \mu_T H \quad (8)$$

Зависимость концентрации от скорости определяется:

$$\mu_T = \frac{\frac{B c^2}{\mu_{V_T \text{непрд.}} H_{CT}}}{1 - \frac{B c^2}{\mu_{V_T \text{непрд.}} H_{CT}}} \quad (9)$$

Зависимость частоты соударений от скорости:

$$\omega_{TV}^{(1)} = \frac{1}{\lambda_T} \left( \frac{\mu_{V_T \text{непрд.}} H_{CT}}{B c^2} + c \right) \quad (10)$$

имеет минимум при

$$c_{\min} = \sqrt{\frac{\mu_{V_T \text{непрд.}} H_{CT}}{B}} \quad (11)$$

Значения  $c_{\min}$  различны в зависимости от высоты столба загрузки  $H_{CT}$ .

б) расширение загрузки ограничено объемом камеры. Условие перехода к этому режиму:

$$\mu_{VT} = \mu_{VTK} \equiv \frac{V_T}{V_K} \quad (12)$$

где  $\mu_{VTK}$  – объёмная концентрация тел  $V_T$ , отнесенная к объёму камеры  $V_K$ .

Если загрузка состоит из тел и материала, скорость хаотического движения частиц материала в первом приближении может быть принята равной скорости тел; динамическим давлением, создаваемым материалом, можно пренебречь.

Диссипация энергии в загрузке определяется по формуле:

$$N = K_4 \frac{mc^2}{2} \varpi_{T_V}^{(1)}(c) \quad (13)$$

С увеличением концентрации материала при неизменной концентрации тел  $k_4$  увеличивается, а средняя скорость тел уменьшается. Вследствие этого при определенной концентрации материала мощность, поглощаемая загрузкой, достигает максимума.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ходаков, Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. – М.: Наука, 1972. – 278 с.
2. Мякишев, К.Г. Вибрационная мельница-активатор механохимических реакций / К.Г. Мякишев, В.В. Волков. – Новосибирск: ИНХ, 1989. – 42 с.
3. Аввакумов, Е.Г. Механические методы активации химических процессов / Е.Г. Аввакумов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 304 с.

УДК 621.565.942/944

Сухоцкий А.Б.

(Белорусский государственный технологический университет)

### **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

В нефтегазовой промышленности нашли применение теплообменные аппараты (ТА) пластинчатого типа [1], представляющие собой пакет гофрированных пластин, между которыми, чередуясь, движутся теплоносители. К важнейшим конструктивным особенностям, влияющим на интенсивность теплообмена, относится профиль пластины. Для потребителей теплотехнического оборудования наличие разнообразных сложных форм и размеров поверхности теплообмена в пластинчатых