

Бажанова О. И., инженер,  
Богданов В. С., д-р техн. наук, проф.,  
Шаптала В. Г., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ЦЕМЕНТНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

olga\_ryn@mail.ru

В аналитическом виде приведены выражения для определения мощности тепловых потоков, поступающих в мельницу, параметров аспирационного воздуха на выходе из мельницы, определения мощности теплопотерь, влагосодержания и расхода аспирационного воздуха.

**Ключевые слова:** газоматериальные потоки, аспирационный воздух, температурно-влажностный режим, влагосодержание, теплопотери.

Из-за низкого коэффициента полезного действия шаровых барабанных мельниц 85 – 90% расходуемой ими мощности преобразуется в теплоту [1]. В результате этого температура цемента может подняться до 180°C, что приводит к снижению эффективности потока из-за интенсивной агрегации частиц и их налипания на рабочие поверхности, а также к дегидратации двуводного гипса, которая начинается с температуры 115 °С. Таким образом, перегрев цемента приводит не только к снижению производительности мельниц, но и к ухудшению качества цемента. Охлаждение мельниц путем их аспирации и с помощью распыления дополнительного количества влаги может сопровождаться повышенным пылеуносом и закрублением зернового состава готового продукта, а также конденсацией водяных паров, приводящей к запариванию мельниц и выходу их из строя. Для обеспечения оптимального температурного режима работы мельниц и предотвращения отмеченных выше негативных явлений необходим анализ происходящих в мельницах тепломассообменных процессов на основе их математической модели. В первом приближении моделирование тепло-

физических свойств цементных мельниц можно выполнить на основе уравнений материального и теплового баланса.

Проходящие через мельницу газоматериальные потоки будем характеризовать их массовыми расходами, кг/с, а тепловые потоки – их мощностью, кВт.

Предположим, что в мельницу подается трехкомпонентная шихта (клинкер, гипс, шлак) в количестве  $G$ , кг/с. Содержание (массовые доли) компонентов  $b_k, b_r, b_{ш}$ , их температуры  $t_k, t_r, t_{ш}$  °С и влажности  $w_k, w_r, w_{ш}$  – заданы. В мельницу засасывается воздух в количестве  $G_{в1}$ , кг/с с заданной температурой  $t_{в1}$  и относительной влажностью  $\phi_1$ . В мельнице распыляется некоторое количество охлаждающей воды с расходом  $G_{ов}$ , кг/с и температурой  $t_{ов}$ , °С. Мельницу заполняет готовый продукт в количестве  $G_{ц}$ , кг/с с температурой  $t_{ц}$ , °С и аспирационный воздух в количестве  $G_a$ , кг/с с той же температурой  $t_{ц}$ , °С, влагосодержанием  $d_a$ , кг/кг.

Запишем уравнение материального баланса для:

-сухого материала:

$$G(b_k(1-w_k) + b_r(1-w_r) + b_{ш}(1-w_{ш})) = G_{ц}(1-w_{ц}), \quad (1)$$

где  $w_{ц} \approx 0,3\%$  - остаточная влажность цемента;

-сухого воздуха:

$$\frac{G_{в1}}{1+d_{в1}} = \frac{G_a}{1+d_a}, \quad (2)$$

-влаги:

$$G(b_k w_k + b_r w_r + b_{ш} w_{ш}) + \frac{G_{в1} d_{в1}}{1+d_{в1}} + G_{ов} = \frac{d_a G_a}{1+d_a}, \quad (3)$$

где  $d_{в1}$  – влагосодержание воздуха, поступающего в мельницу;

$d_a$  – влагосодержание аспирационного воздуха, покидающего мельницу.

Из уравнений (1)-(3) выразим производительность мельницы по готовому продукту:

$$d_{в1} = 0,621 \frac{\phi_1 P_{нп}(t_{в1})}{P_r - \phi_1 P_{нп}(t_{в1})}, \quad (4)$$

$$G_{\text{в1}} = \frac{G(b_{\text{к}}(1-w_{\text{к}}) + b_{\text{г}}(1-w_{\text{г}}) + b_{\text{ш}}(1-w_{\text{ш}}))}{1-w_{\text{ц}}}, \quad (5)$$

а также параметры аспирационного воздуха на выходе из мельницы:

$$d_{\text{а}} = \frac{(1+d_{\text{в1}})G_{\text{ел}} + (1+d_{\text{в1}})G_{\text{ое}} + d_{\text{в1}}G_{\text{ел}}}{G_{\text{в1}}}, \quad (6)$$

$$G_{\text{а}} = \frac{1+d_{\text{а}}}{1+d_{\text{в1}}} G_{\text{в1}}, \quad (7)$$

где  $G_{\text{в1}} = G(b_{\text{к}}w_{\text{к}} + b_{\text{г}}w_{\text{г}} + b_{\text{ш}}w_{\text{ш}})$  – масса влаги, вносимой в мельницу вместе с шихтой за 1 с.

Температуру цемента и аспирационного воздуха на выходе из мельницы можно найти из уравнения теплового баланса, отражающего ра-

$$q_{\text{с1}} = G(b_{\text{к}}(1-w_{\text{к}})C_{\text{к}}t_{\text{к}} + b_{\text{г}}(1-w_{\text{г}})C_{\text{г}}t_{\text{г}} + b_{\text{ш}}(1-w_{\text{ш}})C_{\text{ш}}t_{\text{ш}}). \quad (8)$$

Теплота, вносимая вместе с влагой шихты и охлаждающей водой, учитывается ниже в п.3 – расходной части теплового баланса.

$$q_{\text{в1}} = \frac{G_{\text{в1}}}{1+d_{\text{в1}}} (C_{\text{в}}t_{\text{в1}} + (r + C_{\text{пар}}t_{\text{в1}})d_{\text{в1}}), \quad (9)$$

где  $C_{\text{в}} = 1,009$  кДж / (кг·°С) – удельная теплоемкость сухого воздуха;  $C_{\text{пар}} = 1,8$  кДж / (кг·°С) – удельная теплоемкость водяного пара;  $r = 2256$  кДж/кг – удельная теплота парообразования.

$$q_{\text{мт}} = 0,8N_{\text{потр}} = 58D_{\text{п}}^{2,5}L_{\text{п}}\varphi(0,9-\varphi)\psi, \quad (10)$$

где  $D_{\text{п}} = (0,94 \div 0,95) D$  – полезный диаметр барабана мельницы,  $L_{\text{п}}$  – полезная длина барабана,  $\varphi$  – степень заполнения мельницы мелющими телами,  $\psi$  – относительная скорость вращения мельницы.

Теплота, вносимая в мельницу и выделяющаяся внутри нее, расходуется следующим образом:

1. Уносится вместе с цементом и находящейся в нем остаточной влагой:

$$q_{\text{ц}} = G_{\text{ц}}((1-w_{\text{ц}})C_{\text{ц}}t_{\text{ц}} + 100w_{\text{ц}}C_{\text{вл}}), \quad (11)$$

где  $C_{\text{вл}} = 4,19$  кДж / (кг·°С) – удельная теплоемкость воды.

$$\begin{aligned} q_{\text{вл2}} = & G(b_{\text{к}}w_{\text{к}}(C_{\text{вл}}(100-t_{\text{к}}) + r + C_{\text{пар}}(t_{\text{ц}}-100)) + \\ & + b_{\text{г}}w_{\text{г}}(C_{\text{вл}}(100-t_{\text{г}}) + r + C_{\text{пар}}(t_{\text{ц}}-100)) + \\ & + b_{\text{ш}}w_{\text{ш}}(C_{\text{вл}}(100-t_{\text{ш}}) + r + C_{\text{пар}}(t_{\text{ц}}-100)) + \\ & + G_{\text{ов}}(C_{\text{вл}}(100-t_{\text{ов}}) + r + C_{\text{пар}}(t_{\text{ц}}-100)). \end{aligned} \quad (13)$$

4. Рассеивается через поверхность мельницы в окружающую воздушную среду:

$$q_{\text{м}} = \alpha_{\text{ц}}F_{\text{ц}}(t_{\text{ср}} - t_{\text{в1}}) + \alpha_{\text{д}}F_{\text{д}}(t_{\text{д1}} - t_0) + \alpha_{\text{д}}F_{\text{д}}(t_{\text{ср}} - t_{\text{в1}}), \quad (14)$$

где  $F_{\text{ц}} = \pi DL$  – площадь цилиндрической части мельницы;  $F_{\text{д}} = \pi(D^2 - D_{\text{п}}^2)/4$  – площади днищ (торцов) мельницы,  $D_{\text{п}}$  – диаметр цапф;  $\alpha_{\text{ц}}$ ,  $\alpha_{\text{д}}$  – коэффициенты теплоотдачи от цилиндрической части мельницы и от ее днищ;

венство прихода и расхода теплоты для мельницы в целом.

Приведем выражения для мощности тепловых потоков, поступающих в мельницу:

1. Теплота, поступающая в мельницу вместе с сухой частью шихты:

2. Теплота, поступающая вместе с всасываемым в мельницу влажным воздухом:

3. Теплота, выделяющаяся в результате работы мелющих тел, считается (с некоторым запасом) [1,2], что 80% потребляемой мельницей мощности переходит в теплоту:

Уносится вместе с приточной частью аспирационного воздуха (без учета пара, образовавшегося внутри мельницы). Температуру аспирационного воздуха, покидающего мельницу, считаем равной температуре цемента  $t_{\text{ц}}$ :

$$q_{\text{в2}} = \frac{G_{\text{в1}}}{1+d_{\text{в1}}} (C_{\text{в}}t_{\text{ц}} + d_{\text{в1}}(r + C_{\text{пар}}t_{\text{ц}})). \quad (12)$$

3. Расходуется на нагрев и испарение влаги шихты и охлаждающей воды, а также на нагрев образовавшегося при этом пара:

$t_{\text{ср}}$  – средняя температура цилиндрической поверхности мельницы;  $t_{\text{д1}}$  – средняя температура входного днища;  $t_{\text{в1}}$  – температура окружающего воздуха.

Определение мощности теплотерь через поверхность мельницы по формуле (14) пред-

ставляет собой сложную задачу, так как воздушные течения, обтекающие нагретый вращающийся барабан, чрезвычайно сложны и мало изучены, распределение температуры поверхности барабана также носит сложный характер, поэтому коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{ц}$  и  $\alpha_{д}$  до настоящего времени теоретически не обоснованы, а существуют лишь их эмпирические оценки.

Так, в первом приближении, коэффициент теплоотдачи гладкой поверхности движущемуся со скоростью  $U$ , м/с потоку воздуха определяется формулой [3]:

$$\alpha = 5,6 + 4U, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (15)$$

$$q_{с1} + q_{вл1} + q_{в1} + q_{мг} = q_{ц} + q_{в2} + q_{вл2} + q_{м} \quad (18)$$

Решая уравнение (18) относительно температуры цемента, получим:

$$t_{ц} = \frac{N}{I}, ^\circ\text{C} \quad (19)$$

где

$$N = A_1 + B_1 t_k + C_1 G_{в1} + D_1 G_{ов}, \text{ кВт} \quad (20)$$

$$I = A_2 + C_2 G_{в1} + C_{пар} G_{ов}, \text{ кВт}/^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} A_1 = & N_{потр} + G[b_r(1-w_r)C_r t_r + b_{ш}(1-w_{ш})C_{ш} t_{ш} - \\ & - (b_k w_k + b_r w_r + b_{ш} w_{ш})(100(C_{вл} - C_{пар}) + r) + \\ & + (b_r w_r t_r + b_{ш} w_{ш} t_{ш})C_{вл}] - \\ & - 100G_{ц} w_{ц} C_{вл} + 0,007 F t_{в1}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$B_1 = G_{вк} [(1-w_k)C_k + w_k C_{вл}],$$

$$C_1 = \frac{(C_v + d_{в1} C_{пар}) t_{в1}}{1 + d_{в1}},$$

$$D_1 = C_{вл} (100 - t_{ов}) + 100 C_{пар} - r,$$

$$A_2 = G_{ц} (1 - w_{ц}) C_{ц} + U_{вл} C_{пар} + 0,007 F,$$

$$C_2 = C_1 / t_{в1}.$$

С учетом формул (20) выражение для температуры цемента (19) принимает вид:

$$t_{ц} = \frac{A_1 + B_1 t_k + C_1 G_{в1} + D_1 G_{ов}}{A_2 + C_2 G_{в1} + C_{пар} G_{ов}}. \quad (22)$$

Выражение (22) представляет собой уравнение, связывающее между собой все основные режимные параметры цементной мельницы,

$$G_{ов} = \frac{A_1 + B_1 t_k - A_2 t_{ц} + (C_1 - C_2 t_{ц}) G_{в1}}{C_{пар} t_{ц} - D_1}. \quad (23)$$

Требуемого охлаждения внутримельничного объема и цемента можно добиться при различных соотношениях интенсивности аспирации  $G_{в1}$  и расхода охлаждающей воды  $G_{ов}$ . Однако величины этих параметров не могут задаваться произвольно без учета существующих ограничений. Нормальной считается интенсивность аспирации 0,2 кг/кг цемента. Увеличение интен-

В работах [4, 5] мощность теплоотдачи барабана мельницы в окружающее пространство определяется по следующей эмпирической формуле:

$$q_m = 600F, \text{ ккал/ч}, \quad (16)$$

где  $F$  – полная поверхность барабана мельницы.

Объединяя подходы, представленные формулами (14) и (16) и учитывая соотношение (15) в настоящей работе для расчета мощности теплопотерь через поверхность мельницы предлагается соотношение:

$$q_m = 0,007 F (t_{ц} - t_{в1}), \text{ кВт}. \quad (17)$$

Уравнение теплового баланса мельницы имеет вид:

каждый из которых может быть выражен через остальные. Например, зависимость расхода охлаждающей воды от требуемой температуры цемента, температуры клинкера, расхода аспирационного воздуха и других параметров, имеет вид:

сивности аспирации сопровождается возрастанием пылеуноса, поэтому среднерасходная скорость аспирационного воздуха в мельнице ограничивается найденным опытным путем значением  $U_a < 0,7$  м/с, что для мельницы размером 4x13,5 м соответствует ограничению  $G_{в1} < 6,7$  кг/с. С другой стороны, снижение расхода аспирационного воздуха потребует увеличения ко-

личества охлаждающей воды, что приведет к росту влагосодержания аспирационного воздуха, которое для устойчивой работы пылеулавливающих аппаратов по опыту их эксплуатации не должны превышать значения  $d_a = 0,26$  кг/кг сухого воздуха. Такому влагосодержанию соответствует точка росы, равная  $t_p \approx 70$  °С. Чтобы температура аспирационного воздуха при прохождении аспирационного тракта в результате подсосов и охлаждения не опустилась ниже  $t_p$ , он должен иметь достаточный перегрев. В

соответствии с технологическими нормами принимается  $t_{ц} = 120$  °С.

Формулы (5) - (7), (19) - (23) определяют температурно-влажностный режим цементной мельницы в наиболее общем виде. Частные случаи расчета рассмотрим на конкретном примере мельницы размером 4x13,5 м, работающей в открытом цикле. Потребляемая мощность равна  $N_{пот} = 2920$  кВт, площадь поверхности корпуса мельницы равна:

$$F = 3,14 \cdot 4 \cdot 13,5 + 2 \cdot 3,14(16 - 16/16)/4 = 193,1 \text{ м}^2.$$

Производительность мельницы  $G = 84$  т/ч = 23,3 кг/с. Состав шихты:  $b_k = 0,8$ ,  $b_r = 0,05$ ,  $b_{ш} = 0,15$ . Влажность шихты:  $w_k = 0$ ,  $w_r = 0,1$ ,  $w_{ш} = 0,05$ . Остаточная влажность цемента  $w_{ц} = 0,03$ . Температура компонентов шихты: температура клинкера задается при расчете,  $t_r = t_{ш} = 25$  °С. Параметры всасываемого в мельницу воздуха:  $t_{в1} = 25$  °С,  $\phi_1 = 40\% = 0,4$ . Температура охлаждающей воды  $t_{ов} = 20$  °С. Атмосферное (барометрическое) давление  $P_0 = 760$  мм.рт.ст. = 101325 Па. Удельные теплоемкости компонентов шихты:  $C_k = 0,84$ ,  $C_r = 1,13$ ,  $C_{ш} = 0,75$ ,  $C_{ц} = 0,8$  кДж/(кг·°С).

Расчет температурно-влажностного режима мельницы выполним в следующей последовательности:

1. Давление насыщенного водяного пара для температуры всасываемого в мельницу воздуха  $t_{в1}$  находим по формуле  $P_{нп} = 10^{(657,5 + 10,245t)/(236+t)}$ , Па. По формуле (4) находим влагосодержание всасываемого воздуха:

$$P_{нп} = 10^{(657,5 + 10,245 \cdot 25)/(236+25)}, \text{ Па},$$

$$d_{в1} = \frac{0,621 \cdot 0,4 \cdot 3166}{101325 - 0,4 \cdot 3166} = 0,008 \text{ кг/кг с.в.}$$

2. По формуле (5) находим производительность мельницы по сухому цементу:

$$G_{ц} = \frac{23,3(0,8 + 0,05 \cdot 0,9 + 0,15 \cdot 0,95)}{0,997} = 23,08 \text{ кг/с.}$$

3. Уравнения для определения параметров аспирационного воздуха на выходе из мельницы (6) и (7) принимают вид:

$$d_a = \frac{G_{в1} = 0,29 \text{ кг/с}}{0,294 + 1,008 \cdot G_{ов}} + 0,08 = 0,008, \text{ кг/кг с.в.} \quad (24)$$

4. Подставив в формулы (20) и (21) значения заданных параметров, найдем вспомогательные величины:

$$A_1 = 2320,7; \quad B_1 = 15,7; \quad C_1 = 25,38$$

$$t_{ц} = \frac{2320,7 + 15,7 \cdot t_k + 25,38 \cdot G_{в1} - 1740,8 \cdot G_{ов}}{20,28 + 1,02 \cdot G_{в1} + 1,8G_{ов}}, \quad (25)$$

$$G_{ов} = \frac{2320,7 + 15,7t_k - 20,28t_{ц} + (25,38 - 1,02t_{ц})G_{в1}}{1,8t_{ц} + 1740,8}. \quad (26)$$

6. Предположим, что температура клинкера равна  $t_k = 80$  °С. Тогда, в отсутствии аспирации ( $G_{в1} = 0$ ) и дополнительного охлаждения ( $G_{ов} = 0$ ), по формуле (25) получим  $t_{ц} = 176,4$  °С, что недопустимо.

Если использовать аспирацию нормальной интенсивности (0,2 кг/кг цемента или  $G_{в1} = 4,66$  кг/с), то без впрыскивания воды ( $G_{ов} = 0$ ) температура цемента понизится лишь до  $t_{ц} = 47,6$  °С.

$$D_1 = -1740,8; \quad A_2 = 20,28; \quad C_2 = 1,02$$

5. Подставив найденные значения коэффициентов в формулы (22) и (23), получим:

Для достижения нормативной температуры цемента  $t_{ц} = 120$  °С необходим расход аспирационного воздуха:

$$G_{в1} = \frac{2320,7 + 15,7t_k - 20,28t_{ц}}{1,02t_{ц} - 25,38} = 11,78 \text{ кг/с},$$

что в 2,5 раза превышает рекомендуемый расход. Скорость аспирационного воздуха в мельнице достигнет  $U_a = 1,24$  м/с, что приведет к

чрезмерному пылеуносу. В связи с этим необходимо использование охлаждающей воды в количестве, которое найдем по формуле (26):

$$G_{\text{ов}} = 0,35 \text{ кг/с} = 1271 \text{ кг/ч.}$$

При этом влагосодержание и расход аспирационного воздуха достигнут согласно формулам (24) следующих значений:  $d_a = 0,146 \text{ кг/кг}$  сухого воздуха,  $G_a = 5,3 \text{ кг/с}$ . Точку росы аспирационного воздуха на выходе из мельницы найдем по формуле:

$$t_a > t_p = \frac{236 \lg \frac{P_a d_a}{(0,621 + d_a) \varphi_p} - 657,5}{10,245 - \lg \frac{P_a d_a}{(0,621 + d_a) \varphi_p}} = 59 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Поскольку средняя температура аспирационного воздуха в мельнице

$$t_a^{\text{cp}} = \frac{t_{\text{вл}} + t_{\text{ц}}}{2} = 72,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

выше точки росы, то конденсации водяных паров в мельнице не будет.

7. Предположим далее, что температура клинкера, поступающего в мельницу, равна  $t_k = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Интенсивность аспирации и температуру цемента оставим на прежнем уровне  $G_{\text{вл}} = 4,66 \text{ кг/с}$ ,  $t_{\text{ц}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тогда расход охлаждающей воды согласно формулы (26) достигнет значения  $G_{\text{ов}} = 0,915 \text{ кг/с} = 3293,1 \text{ кг/ч}$ .

Влагосодержание и расход аспирационного воздуха найдем по формулам (24):  $d_a = 0,27$   $G_a = 5,87 \text{ кг/с}$ . Точка росы аспирационного воздуха при данном влагосодержании и его средней температуре  $t_a^{\text{cp}} = 72,5 \text{ }^\circ\text{C}$  равна  $t_p = 71 \text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. всего лишь на  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ниже  $t_a^{\text{cp}}$ . При таком температурно-влажностном режиме в мельнице возможна конденсация влаги, т.е. не вся распыляемая в мельнице вода будет испаряться. В результате этого может произойти запаривание мельницы и ее аварийная остановка.

Для предотвращения этой ситуации увеличим интенсивность аспирации до уровня  $G_{\text{вл}} = 6,67 \text{ кг/с}$  ( $U_a = 0,7 \text{ м/с}$ ). Тогда расход охлаждающей воды понизится до значения  $G_{\text{ов}} = 0,815 \text{ кг/с}$ , влагосодержание уменьшится до  $d_a = 0,175 \text{ кг/кг}$ , а точка росы понизится до  $t_p = 63,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , что исключает возможность конденсации. В результате, надежность работы мельницы, безусловно, повысится.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дуда, В. Цемент. / В. Дуда // – М.: Стройиздат, 1981. – 493с.
2. Булавин, И.А. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов. / Под. Ред. И.А. Булавина. // – М.: Стройиздат, 1982. - 343с.
3. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика. / В.Н. Богословский // – М.: Высшая школа, 1992. - 415 с.
4. Богданов, В.С. Механическое оборудование предприятий стройматериалов / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, В.З. Пироцкий, А.И. Морозов // – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1998. – 180 с.
5. Пироцкий, В.З. Цементные мельницы: технологическая оптимизация. / В.З. Пироцкий // – С.-Пб.: Изд-во Центра профессионального обновления, 1999.– 145 с.