

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АСПИРАЦИЯ ЦЕМЕНТНЫХ МЕЛЬНИЦ

olga_ryn@mail.ru

В аналитическом виде приведены выражения, описывающие изменение объемного расхода аспирационного воздуха в результате изменения давления и температуры при его движении по аспирационному тракту, а также для определения плотности и влагосодержания аспирационного воздуха.

Ключевые слова: аспирация, аспирационный воздух, пылесодержание, влагосодержание, мельница.

Аспирационный воздух в цементной мельнице всегда содержит определенное количество пыли и водяного пара. Содержание пыли в аспирационном воздухе характеризуется ее концентрацией C , кг/м³ (г/м³), равной массе всех частиц, содержащихся в 1 м³ аспирационного воздуха, а также ее объемной концентрацией β , м³/м³, равной суммарному объему всех частиц, находящихся в 1 м³ аспирационного воздуха. Эти концентрации связаны между собой соотношением:

$$C = \beta \rho_T, \quad (1)$$

где ρ_T – плотность материала частиц, кг/м³.

Массу частиц пыли, приходящуюся на 1 кг сухого воздуха, будем называть пылесодержанием $d_{\text{п}}$, кг/кг аспирационного воздуха:

$$d_{\text{п}} = \frac{C}{\rho_{\text{св}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{св}}$ – плотность сухого воздуха.

Плотность запыленного аспирационного воздуха равна:

$$\rho_{\text{аз}} = \rho_a \left(1 - \frac{C}{\rho_T} \right) + C, \quad (3)$$

где ρ_a – плотность чистого аспирационного воздуха.

Поскольку в условиях аспирации $C \ll \rho_T$, то

$$\rho_{\text{аз}} \cong \rho_a + C. \quad (4)$$

Чистый (без пыли) аспирационный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара, свойства которых при нормальных условиях ($P_0 = 101325$ Па, $T_0 = 273$ К, $t_0 = 0$ °С) приведены в таблице 1 [1, 2].

Сухой воздух и водяной пар занимают один и тот же объем и имеют одинаковую температуру, но находятся под различными парциальными давлениями $P_{\text{св}}$ и $P_{\text{п}}$. Давление аспирационного воздуха равно сумме этих давлений:

$$P_a = P_{\text{св}} + P_{\text{п}}. \quad (5)$$

Таблица 1

Свойства сухого воздуха и водяного пара при нормальных условиях

Составляющие аспирационного воздуха	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Вязкость, Па·с
Сухой воздух	1,293	1,005	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Водяной пар	0,804	1,8	10^{-5}

Сухой воздух и пар с достаточной для инженерных расчетов точностью подчиняются уравнению состояния идеальных газов:

$$P_{\text{св}} V = \frac{m_{\text{св}}}{M_{\text{св}}} R_m T, \quad (6)$$

$$P_{\text{п}} V = \frac{m_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} R_m T, \quad (7)$$

где V – объем, занимаемый аспирационным воздухом и его составляющими, м³; $m_{\text{св}}$, $m_{\text{п}}$ – массы сухого воздуха и пара, кг; $M_{\text{св}} = 29$ кг/кмоль, $M_{\text{п}} = 18$ кг/кмоль – их молярные массы; $R_m = 8314$ кг/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная; $T = 273 + t$ – абсолютная температура, К; t – температура по шкале Цельсия, °С.

Из уравнения (6) и (7) вытекают соотношения для плотностей сухого воздуха и пара:

$$\rho_{\text{св}} = \frac{m_{\text{св}}}{V} = \frac{P_{\text{св}} M_{\text{св}}}{R_m T}, \quad (8)$$

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{V} = \frac{P_{\text{п}} M_{\text{п}}}{R_m T}. \quad (9)$$

Сложив уравнения (6) и (7), получим:

$$P_a V = \frac{m_a}{M_a} R_m T, \quad (10)$$

где $m_a = m_{\text{св}} + m_{\text{п}}$ – масса аспирационного воздуха, M_a – его условная молярная масса:

$$M_a = \frac{m_a}{\frac{m_{cb}}{M_{cb}} + \frac{m_{п}}{M_{п}}} = \frac{(1+d)M_{п}M_{cb}}{M_{п} + d \cdot M_{cb}} = \frac{18(1+d)}{0,621+d}, \quad (11)$$

где $d = m_{п} / m_{cb}$ – влагосодержание аспирационного воздуха, кг/кг, то есть масса пара, кг, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха.

$$\rho_a = \frac{m_a}{V} = \frac{P_a M_{п} M_{cb} (1+d)}{R_m T (M_{п} + d \cdot M_{cb})} = \rho_{cb} \frac{1+d}{1+dM_{cb}/M_{п}}. \quad (12)$$

Из уравнения (10) следует, что аспирационный воздух можно рассматривать как условно однородный газ с молярной массой M_a , плотность которого согласно формуле (6) меньше плотности сухого воздуха.

Преобразовав уравнение (7), получим соотношение:

$$\frac{P_{п}}{P_{cb}} = \frac{m_{п}}{m_{cb}} \cdot \frac{M_{cb}}{M_{п}} = 1,61d, \quad (13)$$

из которого следуют формулы для вычисления давлений сухого воздуха и пара, а также влагосодержания аспирационного воздуха:

$$P_{cb} = \frac{1}{1+1,61d} P_a, \quad (14)$$

$$P_{п} = \frac{1,61d}{1+1,61d} P_a, \quad (15)$$

$$d = 0,621 \frac{P_{п}}{P_a - P_{п}}. \quad (16)$$

Из уравнения состояния аспирационного воздуха (10) можно получить соотношение, описывающее изменение его объемного расхода в результате изменения давления и температуры при движении аспирационного воздуха по аспирационному тракту:

$$Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{P_{a1}}{P_{a2}}.$$

В частности, приведение фактического объемного расхода аспирационного воздуха Q к нормальным условиям выполняется по формуле:

$$Q_0 = Q \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0}.$$

Содержание водяного пара в аспирационном воздухе может быть также охарактеризовано его влажностью – абсолютной и относительной. Масса водяного пара, содержащаяся в 1 м^3 влажного воздуха, называется его абсолютной влажностью f_a , кг/м³ или г/м³. Абсолютная влажность и влагосодержание аспирационного воздуха связаны между собой соотношением:

$$f_a = \rho_{cb} \frac{d}{1+dM_{cb}/M_{п}} = \frac{\rho_{cb} d}{1+1,61d}. \quad (17)$$

Из уравнения (10) следует соотношение для плотности влажного аспирационного воздуха (без пыли):

Для каждой температуры абсолютная влажность воздуха не может превышать некоторого максимального значения f_{max} . Отношение абсолютной влажности воздуха к максимально возможной называется относительной влажностью φ :

$$\varphi = \frac{f_a}{f_{max}}. \quad (18)$$

Относительная влажность воздуха равна также отношению парциального давления водяного пара к его наибольшему для данной температуры значению – давлению насыщенного водяного пара:

$$\varphi = \frac{P_{п}}{P_{пп}}. \quad (19)$$

При любой влажности аспирационного воздуха существует температура, при которой имеющегося количества водяного пара становится достаточно для полного насыщения воздуха влагой. Такая температура называется точкой росы. При ее достижении начинается конденсация влаги в первую очередь на стенках аппаратов и воздухопроводов и на частицах пыли.

Давление насыщенного водяного пара зависит только от его температуры. Его значения, найденные экспериментально, приводятся в специальных таблицах. Для аппроксимации табличных данных предложен ряд формул, среди которых высокой точностью выделяется зависимость М.И. Фильнея [2]:

$$P_{пп} = 10^{(657,5 + 10,245t)/(236+t)}, \text{ Па}. \quad (20)$$

Давление водяного пара в аспирационном воздухе может быть найдено с помощью формулы (16):

$$P_{п} = \frac{P_a d}{0,621+d}. \quad (21)$$

Соотношения (11) – (13) связывают между собой все основные характеристики тепловлажного состояния аспирационного воздуха: температуру, давление, влагосодержание и относительную влажность. Из этих соотношений выводятся условия предотвращения конденсации водяных паров в аспирационном воздухе.

$$P_{\Pi} = \frac{P_a d_a}{0,621 + d_a} < P_{\text{нп}} = 10^{(657,5+10,245t_a)/(236+t_a)} \quad (22)$$

$$t_a > t_p = \frac{236 \lg \frac{P_a d_a}{(0,621 + d_a) \varphi_p} - 657,5}{10,245 - \lg \frac{P_a d_a}{(0,621 + d_a) \varphi_p}}, \quad (23)$$

где d_a , t_a – влагосодержание и температуры аспирационного воздуха, t_a – точка росы, $\varphi_p = 0,95$ – предельная относительная влажность, при которой начинается конденсация водяных паров в запыленном аспирационном воздухе.

Пылеудерживающие свойства аспирационного потока в значительной мере зависят от вязкости аспирационного воздуха, влияющей на скорость осаждения частиц пыли.

Коэффициент динамической вязкости аспирационного воздуха μ_a выражается через коэффициенты динамической вязкости составляющих и их относительные объемные доли:

$$\frac{\mu_a}{\mu_a} = \frac{a_{\text{св}} M_{\text{св}}}{\mu_{\text{св}}} + \frac{a_{\text{п}} M_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}}}, \quad (24)$$

где

$a_{\text{св}} = V_{\text{сво}} / (V_{\text{сво}} + V_{\text{по}})$, $a_{\text{п}} = V_{\text{по}} / (V_{\text{сво}} + V_{\text{по}})$, – объемные доли сухого воздуха и пара; $V_{\text{сво}}$, $V_{\text{по}}$ – их объемы при нормальных условиях [1, 6]. С помощью уравнений состояния (6) и (7) получим:

$$a_{\text{св}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{п}} + d \cdot M_{\text{св}}}, \quad a_{\text{п}} = \frac{d M_{\text{св}}}{M_{\text{п}} + d \cdot M_{\text{св}}}. \quad (25)$$

Подставив формулы (25) в соотношение (24) после преобразований получим:

$$\mu_a = \frac{(1+d)\mu_{\text{св}}\mu_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}} + d \cdot \mu_{\text{св}}}, \quad (26)$$

Поскольку $\mu_{\text{п}} < \mu_{\text{св}}$, как следует из формулы (26) $\mu_{\text{п}} < \mu_a < \mu_{\text{св}}$. При снижении влагосодержания ($d \rightarrow 0$) $\mu_a \rightarrow \mu_{\text{св}}$, если же доля выделенного пара увеличивается ($d \rightarrow \infty$), то $\mu_a \rightarrow \mu_{\text{п}}$.

Вязкость сухого воздуха и пара зависит от температуры [3,5]:

$$\mu_{\text{св}}(t) = \mu_{\text{сво}} \frac{397}{397+t} \left(1 + \frac{t}{273}\right)^{3/2}, \quad (27)$$

$$\mu_{\text{п}}(t) = \mu_{\text{по}} \frac{1234}{1234+t} \left(1 + \frac{t}{273}\right)^{3/2}, \quad (28)$$

где $\mu_{\text{сво}} = 1,75 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu_{\text{по}} = 10^{-5}$ Па·с – коэффициенты динамической вязкости сухого воздуха и пара при нормальных условиях. Подставив формулы (27) и (28) в (26) получим:

$$\mu_a = \mu_{\text{св}}(t) \frac{1+d}{1+0,563d \cdot \frac{1234+t}{397+t}}. \quad (29)$$

Анализ зависимости вязкости аспирационного воздуха от d и t показывает, что с ростом влагосодержания μ_a убывает, а с увеличением t – возрастает. Влияние одновременного роста влагосодержания и температуры в значительной мере компенсируют друг друга. Например, при $d = 0,28$, $t = 100^\circ\text{C}$ $\mu_a = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, что всего лишь на 8% больше коэффициента вязкости сухого воздуха при 20°C .

Теплоемкость аспирационного воздуха, как и содержание в нем влаги, удобно относить к единице массы сухого воздуха. В этом случае теплоемкость аспирационного воздуха равна количеству теплоты, необходимой для повышения температуры на 1 градус, количества аспирационного воздуха, содержащего 1 кг сухого чистого воздуха, а кроме него еще d кг водяного пара и $C / \rho_{\text{св}}$ кг пыли.

Поэтому

$$C_a = C_{\text{св}} + C_{\text{п}} d_{\text{п}} + \frac{C}{\rho_{\text{св}}} C_{\text{м}}, \quad (30)$$

где $C_{\text{м}}$ – усредненная теплоемкость измельчаемого материала.

Результирующая плотность аспирационного воздуха с учетом всех его составляющих равна:

$$\rho_{\text{аз}} = \rho_{\text{св}} \frac{1+d}{1+1,61d} + C, \quad (31)$$

где

$$\rho_{\text{сд}} = 0,0035 \frac{P_a}{273+t}. \quad (32)$$

Важной характеристикой воздушной среды цементной мельницы является распределение скорости аспирационного потока. Поле скоростей аспирационного воздуха исследовалось путем решения трехмерных уравнений Навье - Стокса с помощью пакета прикладных программ. Линии тока аспирационного воздуха приведены на рисунке 1, из которого следует, что поле скоростей аспирационного потока имеет очень сложный характер. На движение аспирационного потока вдоль оси барабана мельницы со скоростью 0,5-1 м/с существенное влияние оказывает вращение мельницы, создающее определенную закрутку аспирационного потока, а также обтекание мелющих тел, решеток и других внутримельничных устройств.

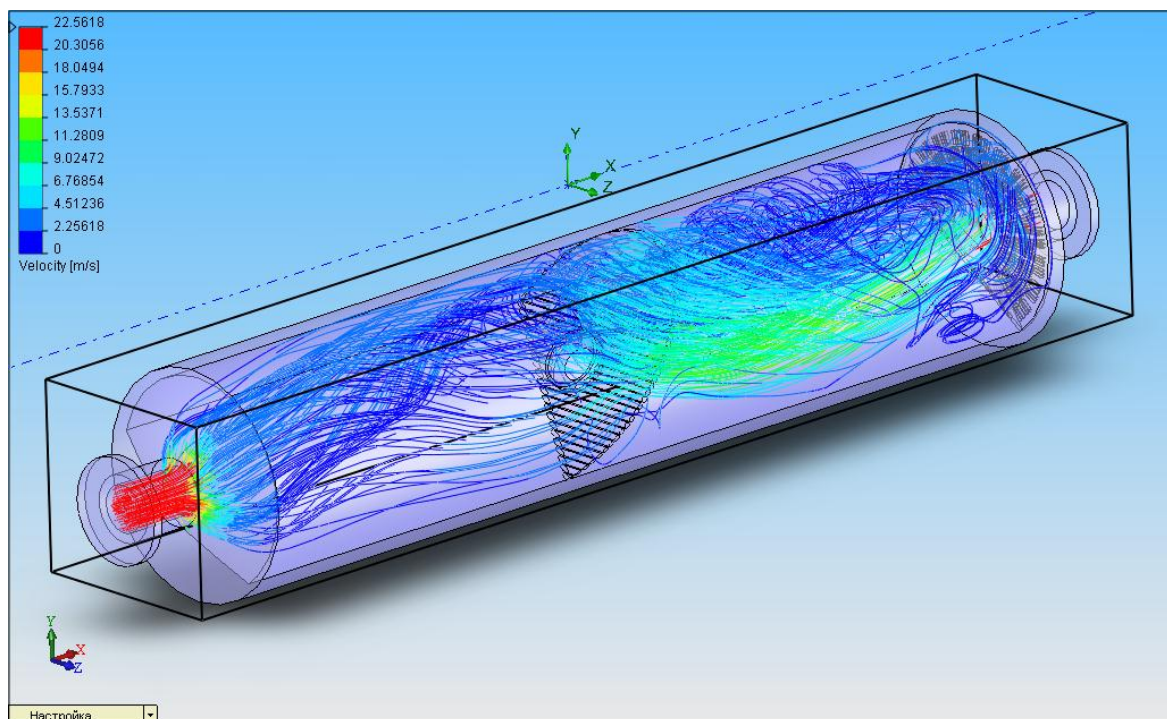


Рис. 1. Линии тока аспирационного воздуха

На это поступательно-вращательное движение аспирационного потока накладываются конвективные течения, вызываемые перепадами температуры. Столь сложное движение аспирационного воздуха приводит к интенсивному турбулентному перемешиванию взвешенной в нем пыли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика. / В.Н. Богословский // – М.: Высшая школа, 1992. - 415 с.
2. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. / А.В. Нестеренко // – М.: Высшая школа, 1971.– 460 с.
3. Углов, В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. / В.Н. Углов // М.: Химия, 1967.– 344 с.

4. Идельник, И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов. / И.Е. Идельник // – М.: Машиностроение, 1983. - 351с.

5. Биргер, М.И. Справочник по пыли- и золаулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков. Под общей ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983.–312 с.

6. Шаптала, В.Г. О математическом моделировании преобразования дисперсного состава материала в трубной шаровой мельнице / В.Г. Шаптала, В.В. Шаптала, Р.Р. Шарапов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей.– Белгород: БГТУ им. В.Г.Шухова, 2004.– С.193-198.