

УДК 66.047 + 66.069.83

М.Н. Гамрекели

Гамрекели Михаил Николаевич родился в 1940 г., окончил в 1963 г. лесомеханический факультет Уральского государственного лесотехнического института, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры охраны труда Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет около 100 научных работ в областях исследований тепломассообмена в дисперсных средах, энергосбережения в процессах и аппаратах химической технологии, переработки промышленных отходов.



ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВОК РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ

Предложены методики выбора значений начальной температуры сушильного воздуха и его расхода, при которых обеспечиваются максимальная производительность установок распылительной сушки и минимальные энергозатраты.

Ключевые слова: распылительная сушка, лигносульфанаты, кормовые дрожжи, производительность, сушильный воздух, максимальные температура и расход, минимальные энергозатраты.

Во многих отраслях промышленности широко применяют распылительную сушку для получения из растворов и суспензий сухих дисперсных продуктов. На целлюлозно-бумажных комбинатах этот способ используют в производстве лигносульфанатов и кормовых дрожжей. Минимизация удельных энергетических затрат и потерь продукта может быть обеспечена при максимально высокой производительности установки распылительной сушки, которая достигается за счет применения предельно высоких значений начальной температуры сушильного воздуха и его расхода. Однако в научной литературе отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору этих параметров.

Выбор предельных значений производительности сушилки по испаренной влаге и начальной температуры сушильного воздуха

Известно, что наибольшая производительность установок для получения сухих дисперсных продуктов из растворов может быть получена при двухстадийном процессе. Первую стадию осуществляют в распылительной сушилке [5]. Подсушивание продукта на 2-й стадии происходит в таких устройствах, в которых обеспечено достаточно длительное время пребывания продуктов, так как этот процесс протекает в периоде падающей скорости сушки.

Анализ кинетики распылительной сушки показывает, что производительность по испаренной влаге значительно возрастает при уменьшении температуры сушильного воздуха на выходе из камеры $t_{\text{вых}}$, что соответствует более высокой влажности продукта. При одностадийном процессе максимально возможная влажность продукта на выходе из сушильной камеры

B'_p не должна превышать значения, предусмотренного стандартом. При двухстадийном процессе влажность продукта после распылительной сушки (1-я стадия) должна быть максимально высокой, но соответствовать такому состоянию продукта, при котором он сохраняет сыпучесть и может без затруднений перемещаться по технологически линиям.

На основании исследований процесса распылительной сушки различных продуктов нами установлено, что фактическая влажность продукта при рабочем режиме сушки составляет 82 ... 87 % (в среднем 85 %) от влажности, которая равновесна температуре $t_{\text{вых}}$, что свидетельствует о недостаточном пребывании в камере. При расчетах процесса сушки это обстоятельство может быть учтено коэффициентом достижимости равновесной влажности $k_p = 0,85$.

Используя зависимость равновесного состояния фаз при сушке

$$\lg B_p = A \varphi_{\text{вл}} + \lg (B + C t_{\text{вых}}), \quad (1)$$

задавая $B_p = k_p B'_p$ и температуру на выходе из камеры $t_{\text{вых}}$, определяют соответствующую относительную влажность $\varphi_{\text{вл}}$ отработанного сушильного воздуха.

Здесь A, B, C – опытные коэффициенты.

При известных значениях $t_{\text{вых}}$ и $\varphi_{\text{вл}}$ по $i-d$ диаграмме влажного воздуха находят его конечное абсолютное влагосодержание $d_{\text{вл.к}}$.

При заданном расходе сушильного воздуха $m_{\text{в}}$ определяют предельную максимальную производительность по испаренной влаге сушильной камеры:

$$W_{\text{max}} = (d_{\text{вл.к}} - d_{\text{вл.н}}) m_{\text{в}}, \quad (2)$$

где $d_{\text{вл.к}}, d_{\text{вл.н}}$ – конечное и начальное влагосодержание.

По линии постоянного теплосодержания при заданных значениях начальной $d_{\text{вл.н}}$ и конечной $d_{\text{вл.к}}$ абсолютной влажности сушильного воздуха находят предельное значение начальной температуры воздуха на входе камеры $t_{\text{вх}}$. С учетом теплопотерь D через стенку камеры (в процентах от полезных затрат тепла на процесс сушки в камере) необходимое значение начальной температуры составит

$$t'_{\text{вх}} = t_{\text{вх}} + 0,01 D(t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}). \quad (3)$$

В качестве базового режима рассмотрен процесс распылительной сушки на отечественной установке РСУ-1000, предназначенной для сушки различных типов продуктов, с проектной производительностью по испаренной влаге $W = 1030$ кг/ч при начальной температуре сушильного воздуха $t'_{\text{вх}} = 177$ °С и его расходе $m_0 = 34\,545$ кг/ч.

Для промышленного производства сухих лигносульфанатов и кормовых дрожжей выполнены оценочные расчеты максимально достижимых значений начальной температуры воздуха и соответствующей производительности по испаренной влаге при сохранении проектного расхода сушильного воздуха. Расчеты проведены по известному [6] уравнению равно-

весного состояния, связывающего температуру сушильного воздуха на выходе из сушильной камеры, его влажность и влажность подвергаемого сушке продукта (молоко). Уравнение было получено для идентичных условий (температура и расход сушильного воздуха, дисперсность распыливания) процесса сушки лигносульфанатов и дрожжей:

$$\lg B_p = 0,01445 \varphi_{\text{вл}} + \lg (1,423 + 0,0543 t_{\text{вых}}). \quad (4)$$

Сыпучесть таких продуктов может сохраняться при их достаточно высокой влажности (8 ... 10 %) после 1-й стадии сушки. Так, в условиях распылительной сушки на 1-й стадии ($B'_p = 8,2 \%$, $t_{\text{вых}} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$, $k_p = 0,85$ и $D = 10 \%$), предельные значения параметров процесса составляют: $t'_{\text{вх}} = 265 \text{ }^\circ\text{C}$ и $W_{\text{max}} = 2110 \text{ кг/ч}$. При заданной температуре воздуха на выходе из сушильной камеры $t_{\text{вых}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и сохранении других начальных условий максимально предельные значения начальной температуры сушильного воздуха и производительности по испаренной влаге увеличатся и соответственно составят $t'_{\text{вх}} = 295 \text{ }^\circ\text{C}$ и $W_{\text{max}} = 2473 \text{ кг/ч}$.

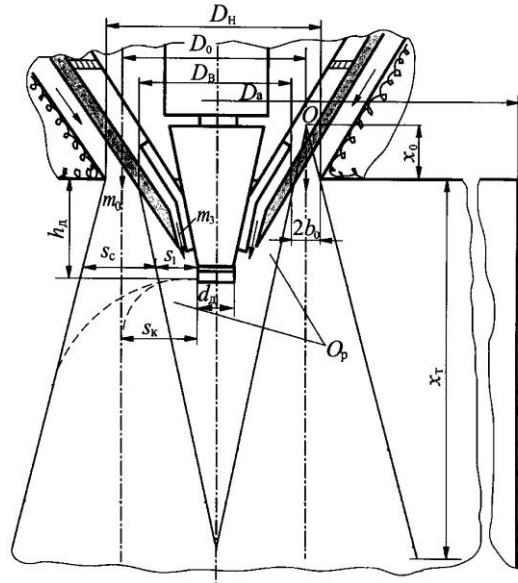
В рассмотренных примерах принято, что подсушка продукта (2-я стадия) до стандартной влажности (3 ... 6 %) производится глубоко осушенным воздухом в виброаппарате, в котором можно обеспечить длительное и регулируемое время пребывания.

Расчет предельного расхода сушильного воздуха

Производительность сушильной камеры может быть значительно увеличена за счет подачи большего количества сушильного воздуха.

Этого можно достичь, изменяя размеры кольцевой щели для подачи сушильного воздуха и его начальную скорость. Схема воздухораспределительного устройства приведена на рисунке.

Начальная скорость истечения кольцевой струи w_0 зависит от расхода теплоносителя m_0 и размеров кольцевой щели для его подачи:



Устройство для подачи сушильного воздуха в распылительной камере (d_d – диаметр распыляющего диска; D_a – диаметр сушильной камеры; h_d – вылет диска относительно потолка камеры; H_a – высота камеры; m_0 – расход сушильного воздуха; m_3 – расход холодной воздушной струи, защищающей диск от нагрева; O – полюс струи теплоносителя; O_p – внутренняя область рассеяния струи теплоносителя; S_1 – путь капли от диска до входа в струю; S_k – путь капли до оси кольцевой струи)

$$w_0 = \frac{4m_0}{\pi \rho_{г0} (D_n^2 - D_b^2)}, \quad (5)$$

где $\rho_{г0}$ – плотность газа на срезе щели воздухораспределительного аппарата;

D_n, D_b – наружный и внутренний диаметр кольцевой щели для подачи теплоносителя.

На основе теории турбулентных струй [1] получено выражение, которое функционально связывает время пребывания частиц продукта $\tau_{ч.т.}$, начальную скорость истечения w_0 , расход струи теплоносителя (сушильный воздух) m_0 и размеры щели воздухораспределительного устройства:

$$\frac{\tau_{ч.т.} x_T m_0 \sqrt{\frac{\rho_{г0}}{\rho_{г.т.}}}}{1,25 \sqrt{\frac{a_c}{b_0} \left(x_T + x_0 \right)^{1,5} \rho_{г0} (D_n^2 - D_b^2)}} = x_T + (\pm \tau_{ч.т.} w_{вит}), \quad (6)$$

где $\rho_{г.т}$ – плотность газа в текущем сечении воздухораспределительного аппарата.

Знак «плюс» перед $\tau_{ч.т}$ в правой части выражения (6) относится к процессу с нисходящей струей теплоносителя, «минус» – с восходящей.

В общем случае переход от базового режима к режиму с увеличенным расходом воздуха осуществляют в следующем порядке.

1) В координатах x_t и B_p по кинетической кривой сушки заданного продукта, полученной для базового режима действующей установки, определяют расстояние x_t , соответствующее достижению определенного значения влажности продукта B_p (при одностадийной распылительной сушке это стандартная влажность). В двухстадийном процессе задают влажность, при которой продукт приобретает сыпучесть и не прилипает к стенкам камеры. При расчете процесса для нового вида продукта предварительно проводят опытную сушку на лабораторной или промышленной установке. Используя значения влажности продукта, полученные при пробоотборе в нескольких точках по высоте камеры, строят участок кинетической кривой, соответствующий скорости сушки на 2-й стадии.

2) По формуле (6) рассчитывают $\tau_{ч.т}$, соответствующее значению x_t .

3) Находят путь торможения s_t капель максимального размера, пользуясь методикой пошагового расчета и зависимостями [4].

4) Определяют средний диаметр начальной струи D_0 , b_0 и диаметры кольцевой щели D_b и D_n из условий, что капля не вылетает за пределы струи теплоносителя:

$$b_0 \geq \frac{s_k - s_l - 2h_d \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}}{2}; \quad (7)$$

$$D_0 \geq 2 \left(s_k - h_d \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2} + \frac{d_d}{2} - b_0 \right). \quad (8)$$

Полученное значение D_0 при заданном времени пребывания $\tau_n = \tau_{ч.т}$ должно соответствовать следующему условию:

$$D_0 \geq \sqrt{\frac{m_\phi \tau_n}{0,525 \rho_{г0} \left(H_a + \frac{b_0}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}} \right)}} - 2 \left(H_a + \frac{b_0}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}} \right) \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}. \quad (9)$$

5) Если в результате расчета по п. 2 установлено, что $x_t < H_a$, то расчеты по п. 4 выполняют при значении полного времени пребывания в камере τ_n , найденном для базового режима:

$$\tau_n = \tau_{ч.т} + \frac{H_a - x_t}{\bar{w}_r}, \quad (10)$$

где $\bar{w}_r = \frac{4\bar{m}}{\bar{\rho}_r \pi D_a^2}$ – средняя по сечению камеры скорость газа;

\bar{m} – среднеарифметический расход воздуха от значений на краях участка второй скорости сушки, определяемых при x_r и $x_r = H_a$,

$$m_{\phi,т} = \frac{0,33 w_0 \rho_{г,т} \left[D_0 + 2 \left(x_r + \frac{b_0}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}} \right) \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2} \right]^2}{\sqrt{\frac{a_c}{b_0} \left(x_r + \frac{b_0}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}} \right)}} \sqrt{\frac{\rho_{г0}}{\rho_{гт}}}. \quad (11)$$

Здесь $m_{\phi,т}$ – текущий расход факела.

Для камер установки РСУ-1000 определены новые размеры щели воздухораспределительного аппарата: $D_b = 0,91$ м, $D_n = 1,23$ м. Соответствующее им значение предельного расхода воздуха $m_0 = 86\,525$ кг/ч при сохранении расчетного времени пребывания для базового режима $\tau_n = 2,5$ с. Время пребывания было определено по разработанной методике [2]. При этом производительность по испаренной влаге только за счет увеличения расхода сушильного воздуха в соответствии с тепловым балансом увеличивается от 1030 до 2580 кг/ч.

Таким образом, несмотря на увеличение расхода сушильного воздуха в 2,5 раза, при изменении размеров воздухораспределительного аппарата соблюдается основное условие, определяющее полноту сушки, – сохраняется достаточной продолжительностью пребывания частиц в факеле. Расчеты показали, что в зоне активного испарения в непосредственной близости от распыливающего диска при диспергировании жидкости процессы теплообмена протекают очень интенсивно [3]. Кроме того, межфазный теплообмен интенсифицируется также за счет более высокой относительной скорости капель в потоке теплоносителя из-за возросшей почти в 2 раза (до 55 м/с) начальной скорости истечения газа через щель распределительного устройства и на значительно большей длине участка ускорения капель (см. рисунок).

Выполненный в данной работе анализ всех факторов интенсификации теплообмена показал, что при переходе на двухстадийную сушку с повышением начальной температуры сушильного воздуха и его расхода до предельно высоких значений при тех же размерах камеры может быть многократно увеличена производительность установки (в 5–7 раз) по сравнению с базовым вариантом. При этом возникает технически достаточно сложная проблема – создать компактный центробежный распылитель с очень боль-

шой производительностью по исходной жидкости до 20 000 ... 35 000 кг/ч и обеспечить ее равномерное распределение в сушильном газе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй [Текст] / Г.Н. Абрамович [и др.]. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
2. *Гамрекели, М.Н.* Исследование причин циркуляции, расчет времени пребывания частиц и траекторий течений в камерах распылительной сушки [Текст] / М.Н. Гамрекели // Химико-лесной комплекс – проблемы и решения: докл. на Всероссийской науч.-практ. конф., 9-11 апр. 2001 г. – Красноярск: СибГТУ, 2001. – Т. 1. – С. 240–244.
3. *Гамрекели, М.Н.* Факторы ограничения и интенсификации тепломассообмена в зоне активного испарения распылительных сушильных камер [Текст] / М.Н. Гамрекели // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ: Первая междунар. науч.-практ. конф. – М., 2002. – Т. 4. – С. 172–176.
4. *Ильяшенко, С.М.* Теория и расчет прямоточных камер сгорания [Текст] / С.М. Ильяшенко, А.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1964. – 306 с.
5. *Липатов, Н.Н.* Сухое молоко [Текст] / Н.Н. Липатов, В.Д. Харитонов. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 263 с.
6. *Парашук, С.В.* Технология молока и молочных продуктов [Текст] / С.В. Парашук [и др.]. – М.: Пищепромиздат, 1949. – 630 с.

M.N. Gamrekely

Productivity Limiting Values of Spray Drying Units

Methods of selecting values for drying air initial temperature and its discharge are offered ensuring maximal productivity of spray drying units and minimal power inputs.

