

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ БАРАБАННОГО ТИПА

Ю. В. Янюк, Е. А. Питухин

ПетрГУ, г. Петрозаводск

В промышленном производстве большое количество гранулированных материалов сушатся в сушильных установках барабанного типа. Подобные сушилки являются наиболее распространенным типом установок в промышленности. Они представляют собой цилиндрический барабан, обычно сконструированный из стальных пластинок, немного наклонный, обычно 0,3–5 м в диаметре, 5–90 м в длину и вращающийся. Частицы твердого материала поступают в верхнюю часть барабана и продвигаются по направлению к нижней части или выходу барабана. Одновременно в барабан подается горячий воздух, с помощью которого осуществляется сушка. Внутри барабана конструируется множество подъемных лопаток для перемешивания материала с тем, чтобы обеспечить его контакт с газом. Во время вращения барабана материал подбрасывается лопатками, поднимается до определенного расстояния по окружности барабана, а затем высыпается, проходя сквозь горячую воздушную завесу. Основная сушка происходит именно в тот момент, когда частицы твердого материала находятся в непосредственном контакте с сушащим воздухом.

Математическая модель сушильной установки барабанного типа представляет собой систему из четырех дифференциальных уравнений в частных производных, составленных относительно следующих переменных процесса сушки:

$X = f(t, l)$ – влажность материала (кг воды/кг сухого материала),

где t – время, с,

l – длина барабана, м.

$Y = f(t, l)$ – влажность сушащего воздуха (кг воды/кг сухого воздуха);

$T_m = f(t, l)$ – температура материала, К;

$T_g = f(t, l)$ – температура сушащего воздуха, К.

Для того чтобы получить решение этой системы процесс сушки в установке рассматривался на основе экспериментальных данных как процесс, состоящий из двух режимов – стационарного и нестационарного. Участок, на котором фактически скорость сушки не зависит от времени (стационарный режим), описывается в математической модели уравнениями с одной переменной (длиной барабана), что позволяет достаточно легко найти их решение. При нестационарном режиме, т. е. при зависимости скорости сушки от времени, уравнения решаются относительно следующей переменной (т. е. времени).

Вопрос об оптимизации управления рассматривается в данном случае с точки зрения, прежде всего, снижения энергозатрат. Для того чтобы иметь на выходе определенное значение содержания влаги в материале достаточно варьировать температуру и поток (расход) сушащего воздуха. То есть, максимально снижая, например, температуру газа, на выходе иметь удовлетворительно высушенный материал. Уменьшать температуру и расход газа, уменьшая тем самым затраты, можно лишь до определенного предела, критерием в данном случае служит влажность материала на выходе барабана.

В качестве целевых функций выбраны три следующие:

1. Энергетические затраты на сушку материала (передача тепла из газа в материал):

$$C_1 = (T_g in - T_g out) C_g V_g \rho_g S_V / Q_g ,$$

где C_g – удельная теплоемкость газа, Дж/Кг·К,

$T_g in$ – начальная температура сушащего воздуха, К,

$T_{g\ out}$ – конечная температура сушащего воздуха, К,

ρ_g – плотность сушащего воздуха, кг/м³,

S_V – площадь поперечного сечения барабана, м²,

V_g – осевая скорость сушащего воздуха, м/с,

Q_g – расход сушащего воздуха, кг/с.

2. Энергетические затраты на нагрев сушащего газа:

$$C_2 = (T_{g\ in} - T_{env}) C_g V_g \rho_g S_V / Q_g ,$$

где T_{env} – температура окружающей среды (293 К).

3. Энергетические затраты на нагрев материала и уменьшение влажности материала (передача тепла в материал):

$$C_3 = \frac{\rho_m S_V \frac{1}{10} V_m C_m (T_{m\ out} - T_{m\ in})}{Q_m} + \frac{X_{m\ in} - X_{m\ out}}{X_{m\ in} + 1} \lambda ,$$

где ρ_m – плотность материала, кг/м³,

V_m – осевая скорость материала, м/с,

$T_{m\ out}, T_{m\ in}$ – конечная и начальная температуры материала, К,

Q_m – максимально допустимая подача материала, кг/с,

$X_{m\ out}, X_{m\ in}$ – выходная и входная влажности материала, кг воды/кг сухого материала,

λ – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Эффективность режимов сушки можно определить по соотношению, которое в идеале должно стремиться к единице:

$$C_1 / C_2 \rightarrow 1.$$

При этом очевидно, что выполняется следующее неравенство:

$$C_2 \geq C_1 \geq C_3.$$

Иследуем в качестве примера поведение целевой функции C_1 .

Рассмотрим двухступенчатый процесс управления. Первая ступень регулируется скоростью вращения барабана, которая устанавливается в зависимости от начального значения влажности материала и требуемого (заданного) конечного содержания влаги. Вторая ступень управления регулирует расход сушащего воздуха и его начальную температуру. Вторая ступень обеспечивает более плавную регулировку выходной влажности.

Таким образом, в качестве управляющих параметров (параметров оптимизации) выбираются 3 параметра:

– V_m – скорость осевого перемещения материала (пропорциональна скорости вращения барабана);

– V_g – скорость сушащего воздуха (пропорциональна расходу);

– $T_{g\ in}$ – начальная температура сушащего воздуха.

Зафиксируем первую ступень регулирования, то есть зададим постоянную скорость вращения барабана, удовлетворяющую заданной и начальной влажности материала. Тогда управление осуществляется с помощью второй ступени. Результаты моделирования представлены на рисунке.

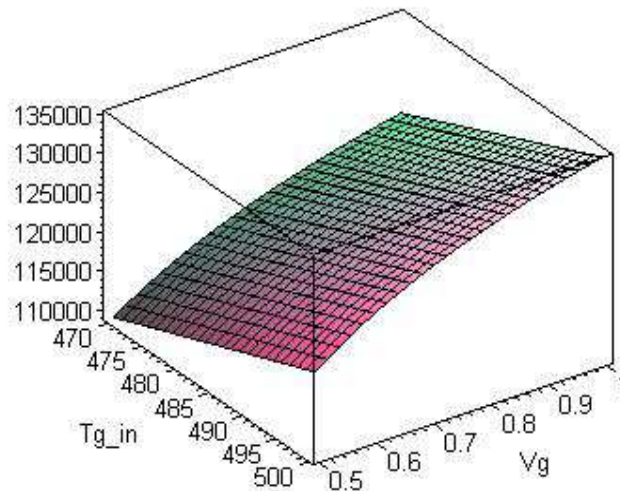


Рис. График целевой функции C_1

Как видно из рисунка, минимум целевой функции выходит на областные ограничения по переменным $T_g in$ и V_g . Таким образом, оптимальные параметры сушки будут выбираться из функционального ограничения по качеству сушки:

$$X_{m out} \leq X_{m cr},$$

где $X_{m cr}$ – заданный уровень содержания влаги в материале, необходимый заказчику.

Поведение целевых функций C_2 и C_3 аналогично поведению целевой функции C_1 , то есть они не имеют на рассматриваемом диапазоне изменения управляющих параметров локальных экстремумов.

Таким образом, оптимальные параметры будут находиться из решения краевой задачи по нахождению $X_{m out}(t)$, удовлетворяющим заданным ограничениям.