

2. Х а ч а т р я н С.С., А р у н я н ц Г.Г. Автоматизация проектирования химических производств. - М.: Химия, 1984. - 208 с.
3. С т а т ю х а Г.А. Автоматизированное проектирование химико-технологических систем. - К.: Вища школа, 1989. - 400 с.
4. К а ф а р о в В.В., В е т о х и н В.Н. Основы автоматизированного проектирования химических производств. - М.: Наука, 1987. - 624 с.

УДК 661.1.038

А.В. Маматов
ОГРАНИЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ СТЕКЛА ПРИ ЗАКАЛКЕ

Для обеспечения высокого качества закаленного листового стекла и предотвращения разрушения стеклоизделий при термообработке и охлаждении необходимо, чтобы продолжительность термообработки была минимальной, температурные градиенты по толщине листа имели минимальное значение, конечное распределение температур точно соответствовало закалочной температуре [1].

Наличие столь разнообразных конфликтующих требований, предъявляемых к динамическим режимам нагрева стекла и к рабочим режимам теплотехнологической установки привело к тому, что до настоящего времени не сложилось единого подхода к решению задачи оптимизации процесса термообработки стекла, хотя она неоднократно рассматривалась многими авторами [2-4] и ее решения в различных постановках позволили выработать ряд практических рекомендаций, направленных на улучшение характеристик процесса нагрева. Имеющиеся резервы повышения эффективности процесса термообработки стекла при закалке, разработанные математические модели сложного теплообмена в стеклянной пластине [5-7] обуславливают актуальность постановки решения задачи оптимизации процесса термообработки стекла в промышленных закалочных печах по обобщенному критерию эффективности с учетом требований, предъявляемых к динамическим

режимам нагрева стекла и к рабочим режимам теплотехнологической установки.

Одновременное выполнение указанных выше конфликтующих требований невозможно, однако с учетом физических свойств конкретного типа стеклоизделий эти требования могут быть учтены в виде ограничений, что позволяет разрешить существующее между ними противоречие. Ограничения, определяемые требованиями обеспечения заданного качества продукции, будем называть технологическими.

Требование минимизации времени нагрева стекла может быть учтено в виде ограничения путем задания максимальной продолжительности термообработки, при которой величина пластической деформации стеклоизделий под действием собственного веса при температурах, близких к закалочным, остается в допустимых пределах:

$$t_n \leq t_{\max} \quad (1)$$

где t_n - время нагрева стекла, t_{\max} - максимальная продолжительность термообработки.

Требование минимизации температурных градиентов также может быть учтено в виде ограничения. Зная механические свойства стекла, можно указать такое максимальное значение градиента температуры по толщине листа, при котором обеспечивается необходимая равномерность закалки и не происходит разрушения стеклоизделия. Таким образом, ограничение температурных градиентов можно записать в следующем виде:

$$\max_{0 \leq z \leq d} \left[\left| \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right| \right] \leq \varepsilon_{\max} \quad (2)$$

где $T(z, t)$ - температура в точке, расположенной на расстоянии z от нижней поверхности листа в момент времени t ; d - толщина листа; ε_{\max} - максимально допустимое значение градиента температуры по толщине листа.

Во избежание разрушения стеклоизделия на стадии охлаждения из-за недогрева стекла температура всех слоев листа в конце нагрева должна быть не ниже минимальной закалочной температуры, определяемой заданной интенсивностью охлаждения. Так как

срединные слои в процессе нагрева являются наиболее холодными, то ограничение на конечное распределение температур целесообразно сформулировать следующим образом:

$$T\left(\frac{d}{2} - t_n\right) \geq T_k \quad (3)$$

где T_k - минимальная закалочная температура, при которой не происходит разрушение стеклоизделий на стадии охлаждения с заданной интенсивностью.

Наряду с технологическими ограничениями, обусловленными свойствами обрабатываемых изделий, при решении задач оптимизации процесса термообработки необходимо также учитывать ограничения, определяемые эксплуатационными характеристиками теплотехнологической установки, которые будем называть эксплуатационными.

Основными эксплуатационными ограничениями для многосекционной закалочной печи являются рабочий диапазон температур нагревательной секции и скоростей перемещения транспортера. Температура источников тепла в нагревательной секции сверху может быть ограничена максимальной подводимой мощностью, однако чаще всего это ограничение бывает обусловлено жаростойкостью внутреннего оборудования печи:

$$T_n(y) \geq T_{\max}, \quad 0 \leq y_1 \leq y_m \quad (4)$$

где y - продольная координата печи; y_1 - расстояние от начала печи до выхода из i -й секции; m - число секций в печи; T_{\max} - максимально допустимая температура источников тепла в печи. Снизу температура в нагревательной секции ограничена температурой окружающей среды:

$$T_n(y) \leq T_0, \quad 0 \leq y_1 \leq y_m \quad (5)$$

где T_0 - температура окружающей среды.

Рабочий диапазон скоростей транспортирования можно задать в виде неравенства

$$\frac{y_m}{t_{\max}} \leq v \leq v_{\max} \quad (6)$$

где v_{\max} - максимальная скорость транспортера.

В силу особенностей конструкции нагревательных секций, направленных на снижение теплового взаимодействия с окружающей средой

и друг с другом, в установившемся режиме поле температур внутри секции выравнивается так, что температуры источников тепла можно положить неизменными:

$$T_{\text{н}}(y) = T_{\text{н}}(y_1), \quad y_{1-1} \leq y \leq y_1, \quad i = 1, m \quad (7)$$

Учет конфликтующих требований, предъявляемых к динамическим режимам нагрева стекла и рабочим режимам закалочной печи в виде технологических и эксплуатационных ограничений, позволяет формулировать разрешимые задачи оптимизации процесса термообработки стекла при закалке.

Список литературы

1. Ш у т о в А.И. Проблемы закалки тонкого стекла // Стекло и керамика. - 1993.- №4. - С. 8-9.
2. Ш а б а н о в А.Г., Ч у р и к о в В.Д., М а р к о в В.П. Оптимальные параметры нагрева листового стекла в закалочных печах // Стекло и керамика. - 1970.- №6. - С. 12-15.
3. П у х л и к О.И., Б о г у с л а в с к и й И.А., Ф р и д к и н Р.З., Х а л и з е в а О.Н. Расчет оптимальных режимов нагрева стекла при закалке // Стекло и керамика. - 1972.- №2. - С. 14-17.
4. Ш у т о в А.И. Интенсификация нагрева стекла при закалке // Физико-химические основы и научно-технический прогресс в технологии стекла и стеклокристаллических материалов с использованием вторичного сырья.- М., 1987. - С. 133-137. (Сб. науч. тр./ МИСИ, БТИСМ).
5. Gardon R. Calculations of Temperature Distributions in Glass Plates // J. Amer. Ceram. Soc., 1958. v. 45, №6 - pp. 733-736.
6. Ф р и д к и н Р.З., М а з у р и н О.В. Алгоритм расчета температурного поля в стеклянной пластине при ее нагреве и охлаждении // Физика и химия стекла.- 1979.- Т. 5. №6.- С. 733-737.
7. Ф р и д к и н Р.З., М а з у р и н О.В., Ш а г и н я н А.А. и др. Усовершенствованный алгоритм расчета температурного поля, возникающего в стеклянной пластине при ее нагреве и охлаждении // Физика и химия стекла.- 1982.- Т. 8. №6.- С. 747-749.