

УДК 666.1.038

Г.М. Бартенев, докт.хим.наук,
В.А. Вознесенский, докт.
техн.наук, А.Ф. Ковальчук,
И.С. Любимов, канд.техн.наук,
А.И. Трушков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОТЖИГА ФЛОАТ-СТЕКЛА И ЕЕ ОПТИМИЗАЦИЯ

При отжиге в листовом стекле возникают остаточные напряжения. Торцевые напряжения образуются из-за перепада температуры по толщине отжигаемой ленты; нормальные -- из-за

наличия перепадов температур по площади ленты. При ликвидации температурных перепадов по ширине установки качество отжига целиком зависит от распределения температур по длине ленты или от температурной кривой отжига. В ряде работ [1,2] указывается на необходимость контроля отжига стекла с одновременным учетом торцевых напряжений, характеризующих правильность организации охлаждения ленты стекла по длине отжигательной установки, и нормальных, характеризующих правильность температурного режима по ширине ленты стекла. Измерение нормальных напряжений можно производить на непрерывной ленте стекла после полного ее охлаждения или же на листах, длина которых не меньше ширины ленты, так как при разрезании ленты на форматы нормальные напряжения уменьшаются (снимаются) [1]. Величина торцевых напряжений при разрезании листа стекла практически не меняется.

Если производственный контроль качества отжига стекла нужно вести одновременно и по торцевым и нормальным напряжениям, то лабораторные исследования целесообразнее проводить по торцевым напряжениям.

Известно, что степень закалки полностью достигает своего предельного значения, если линейные размеры образцов в 4 раза больше его толщины [3]. Поэтому (с учетом дополнительных исследований образцов при различной температуре отжига) в качестве параметра оптимизации процесса выбраны торцевые остаточные напряжения σ (МПа). Лабораторные исследования проведены на образцах размером $(3 \pm 1) \times 15 \times 50$ мм. Измерения выполнены на полуавтоматическом нагревательном полярископе-поляриметре [4]; эксперименты проведены по semifакторному плану Бокса-Бенкина [5], состоящему из 62 опытов.

В модели учитывалось семь основных факторов, влияющих на качество отжига: толщина стекла ($X_1 = 3 \pm 1$ мм), высшая температура обжига ($T_{BO} = X_4 = 525 \pm 75^\circ\text{C}$) и низшая ($T_{HO} = X_5 = 375 \pm 75^\circ\text{C}$) температуры обжига, а также временные интервалы процесса — охлаждение от температуры выработки стекла T_B до T_{BO} ($\tau_{BB} = X_7 = 5 \pm 2$ мин), выдержка при верхней температуре отжига ($\tau_B = X_2 = 3 \pm 3$ мин), охлаждение от T_{BO} до T_{HO} ($\tau_{BH} = X_3 = 8 \pm 5$ мин) и охлаждение от T_{HO} до конечной температуры стекла $T_K = 150^\circ\text{C}$ ($\tau_{HK} = X_6 = 4,5 \pm 3,5$ мин). По методике, изложен-

ной в [5], получена конечная адекватная ($\alpha = 0,05$) модель со всеми значимыми ($\alpha = 0,10$) коэффициентами

$$\hat{y}_1 = 10 \cdot \sigma = 4,45 + 3,80x_1 - 0,81x_2 - 2,21x_3 + 0,71x_4 - 0,33x_5 - 0,54x_6 - 0,43x_7 + 1,50x_3^2 + 3,96x_4^2 - 0,76x_5^2 + 0,51x_7^2 - 0,60x_1x_3 + 0,59x_2x_3 - 4,30x_3x_4 + 0,71x_3x_5 - 1,14x_4x_5. \quad (1)$$

Абсолютные величины коэффициентов в (1) показывают, что время выдержки при T_{BO} (x_2), время охлаждения стекла от T_{HO} до T_K (x_6) и время предварительного охлаждения от T_B до T_{BO} (x_7) в области варьирования факторов оказывают малое влияние на качество отжига стекла. Действительно, из (1) можно выделить квазитрехфакторную модель

$$W_{2,6,7} = -(0,81 - 0,59x_3)x_2 - 0,56x_6 - 0,43x_7 + 0,51x_7^2, \quad (2)$$

которая имеет [6] минимум (а это необходимо для уменьшения σ) при $x_2 = x_6 = +1$ и $x_7 = +0,422$. Изменение в отдельности каждого из этих факторов от 0 до ± 1 приводит к вариации σ не более чем на 0,095 МПа, а их совместное изменение -- дает $\Delta\sigma$ не более чем 0,240 МПа. При этом стабилизация факторов x_2, x_6 и x_7 на нижнем уровне дает значительное сокращение общей продолжительности режима отжига (на 16 мин по сравнению со стабилизацией на оптимальных x_i), а некоторое увеличение σ может быть компенсировано регулированием четырех остальных факторов. Подстановка $x_2 = x_6 = x_7 = -1$ в (1) дает новую модель

$$\hat{y}_2 = 6,74 + 3,80x_1 - 2,80x_3 + 0,71x_4 - 0,33x_5 + 1,5x_3^2 + 3,96x_4^2 - 0,76x_5^2 - 0,60x_1x_3 - 4,30x_3x_4 + 0,71x_3x_5 - 1,14x_4x_5. \quad (3)$$

Поиск оптимальных (минимальных по продолжительности) режимов отжига далее производился отдельно для каждой из рассматриваемых толщин стекла. Поэтому в модель (3) подставлено фиксированное значение $x_1 = \pm 1$ и $x_1 = 0$, и для каждой толщины стекла (3,4 и 5 мм) получены три новые математические модели. Например, для стекла толщиной 3 мм

$$\hat{y}_3 = 2,94 - 2,20x_3 + 0,71x_4 - 0,33x_5 + 1,50x_3^2 + 3,96x_4^2 - 0,76x_5^2 - 4,30x_3x_4 + 0,71x_3x_5 - 1,14x_4x_5. \quad (4)$$

В модели (4) необходимо минимизировать время охлаждения от высшей температуры отжига до низшей (x_3), которое в явном виде выражается через x_4 и x_5 для фиксированных остаточных напряжений, как

$$x_3 = 0,73 + 1,43x_4 - 0,24x_5 - \sqrt{0,67\hat{y}_3 - 1,42 - 0,59x_4^2 + 0,56x_5^2 + 1,63x_4 - 0,13x_5 + 0,08x_4x_5}. \quad (5)$$

Таким образом, задача сводится к поиску при заданном \hat{y}_3 таких значений x_4 и x_5 , которые обеспечивают минимум x_3 . Условиями экстремума являются $\delta x_3 / \delta x_4 = 0$ и $\delta x_3 / \delta x_5 = 0$.

Знаки коэффициентов при x_4^2 и x_5^2 в выражении (5) свидетельствуют о том, что $\frac{\delta x_3}{\delta x_4} = 0$ является необходимым условием минимума, а $\frac{\delta x_3}{\delta x_5} = 0$ - максимума. Поэтому наименьшее значение x_3 следует искать при условиях $\frac{\Delta x_3}{\Delta x_4} = 0$, но $x_5 = \pm 1$ [6].

На основании уравнения (5) и $\frac{\delta x_3}{\delta x_5} = 0$ получено:

$$y_4 = 2,6 + 1,14x_4^2 - 0,83x_5^2 - 3,14x_4 + 0,24x_5 - 0,15x_4x_5. \quad (6)$$

Подставив в уравнение (6) поочередно предельные возможные значения $x_5 = 1$ и $x_5 = -1$ и выразив в каждом случае x_4 через y_4 , можно найти два соотношения между x_4 и параметром y_4 . Из этих соотношений для ряда возможных в пределах плана величин y_4 определено значение x_4 . По формуле (5) получены минимально возможные продолжительности охлаждения x_3 .

Анализ результатов расчетов, проведенных для $x_5 = \pm 1$, показал, что для одной и той же заданной величины y_4 минимальные значения x_3 получаются при $x_5 = +1$, т.е. оптимум T_n находится на границе факторного пространства. Но это ука-

зывает и на то, что оптимальное значение $T_{НО}$ может быть и более высоким, чем 450°C ($x_5 = +1$). Однако для установления возможности нахождения параметров за границами факторного пространства необходимо проводить дополнительные экспериментальные исследования.

Аналогичные расчеты проведены и для других толщин стекла.

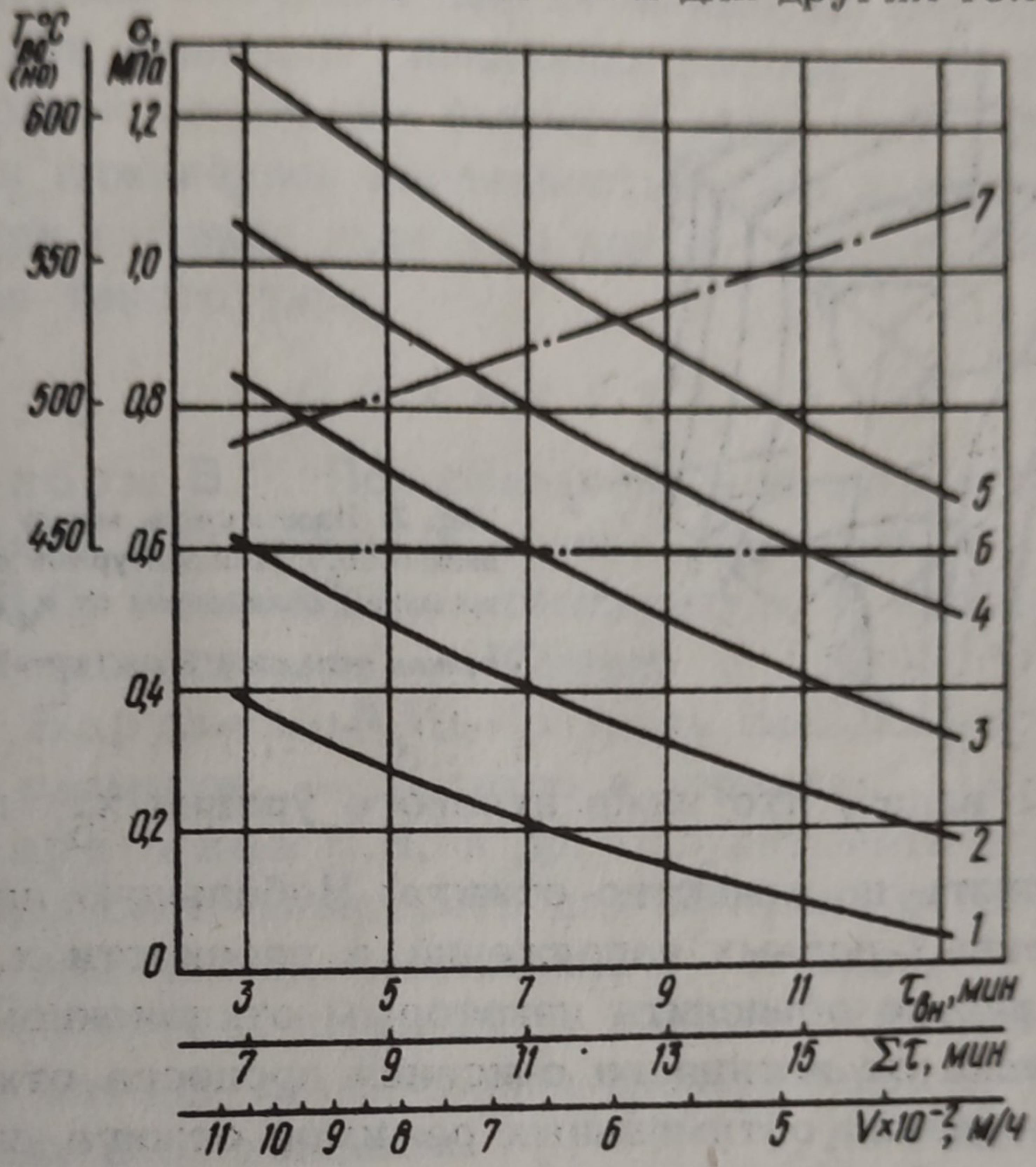


Рис. 1. Номограмма для определения оптимальных режимов отжига: 1—5 — толщина стекла, равная соответственно 3; 3,5; 4; 4,5; 5 мм; 6—7 — нижняя и верхняя температуры отжига.

По результатам расчетов оптимальных значений x_3 и x_4 при $x_5 = +1$ построена номограмма (рис. 1) для стекла толщиной 3; 3,5; 4; 4,5 и 5 мм (кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно). По полученной номограмме для стекол толщиной от 3 до 5 мм и по допустимой величине σ находятся значения основных параметров режима отжига. На второй шкале абсцисс отложено суммарное время теплового режима (с учетом времени $\tau_{ВВ} = 3$ мин и $\tau_{НК} = 1$ мин). На третьей шкале абсцисс отложена возможная скорость выработки ленты стекла при длине лера отжига 122,4 м.

Наглядное представление о взаимосвязи основных параметров отжига можно получить путем графической интерпретации

модели (3). Например, на рис. 2 для стекла толщиной 3 мм ($x_1 = -1$) представлена взаимосвязь между x_3 , x_4 и x_5 в виде поверхностей равного отклика \hat{y}_4 . Их анализ для всех исследованных толщин стекла показывает, что оптимальные режимы отжига в пределах выбранных уровней варьирования находятся в плоскости $x_5 = +1$, т.е. именно при $T_{НО} = 450^\circ\text{C}$.

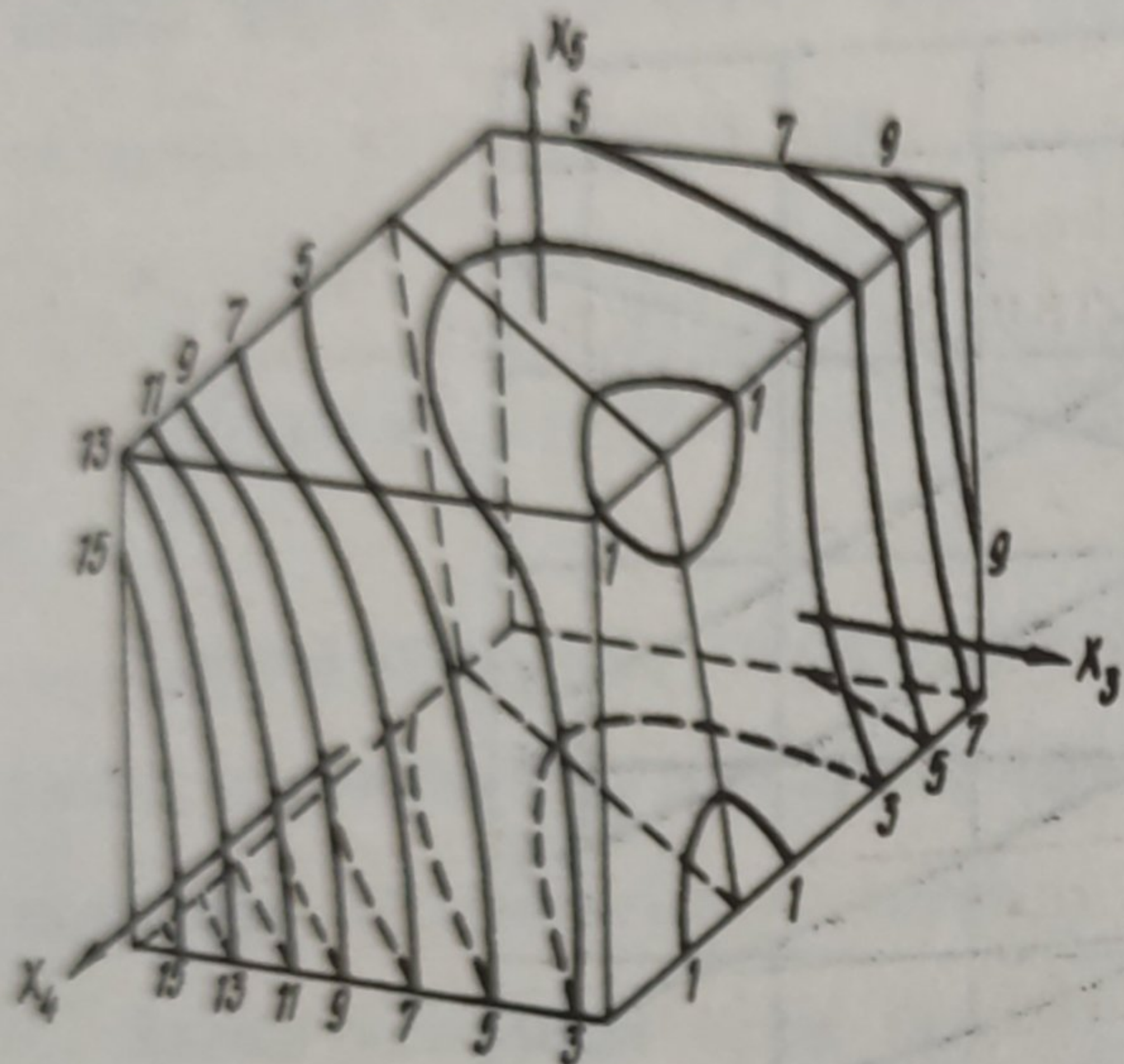


Рис. 2. Взаимосвязь между высшей (x_4), нижней (x_5) температурами отжига и временем охлаждения от x_4 до x_5 (x_3) для стекла толщиной 3 мм ($x_1 = -1$) при $x_2 = -1$; $x_6 = -1$; $x_7 = -1$.

Из рис. 2 видно, что ниже нулевого уровня x_5 практически перестает влиять на качество отжига. Небольшую аномалию в характере кривых равных напряжений в плоскости $x_3 = +1$ (ниже $x_5 = 0$) можно объяснить некоторым отклонением уравнения второго порядка от истинного описания процесса отжига.

Воспроизведение оптимальных режимов отжига для толщин стекла от 3 до 5 мм на полуавтоматическом нагревательном полярископе-поляриметре приводит к расхождению расчетных и экспериментальных значений напряжений не более чем на 10%, что не превышает относительной ошибки воспроизводимости экспериментов (12,3%). Анализ существующего на стеклозаводе им. А.М. Горького режима отжига по математической модели дал отклонения по σ также не более 10%.

Анализ зависимости термических напряжений от распределения температур по ширине и длине ленты стекла, исследование влияния краевого эффекта на торцевые напряжения показали: математико-статистическая модель, полученная для образцов малых размеров, может быть распространена на отжиг непрерывной ленты стекла в промышленности.

Выводы. Математическая теория эксперимента позволила при ограниченном объеме опытных работ (62 точки) получить semifакторное полиномиальное описание процесса от-

отжига флоат-стекла. На основе этой модели определены возможности форсирования режимов отжига по сравнению с существующими в 1,5–2 раза без увеличения остаточных напряжений в листовом стекле. Модель процесса может быть использована для корректировки режимов в существующих лерах, а также в АСУТП.

Предложенная методика поиска минимума расхода временно-го ресурса при заданных величинах выхода Y за счет оптимизации уровней остальных факторов отличается простотой, точностью и инженерной наглядностью, что позволяет рекомендовать ее при решении широкого круга рецептурно-технологических задач такого типа.

Л и т е р а т у р а

- 1 Инденбом В.Л. Поляризационно-оптическое исследование внутренних напряжений в стекле. Канд. дис. М., 1955. 2 .
- 2 Кононко В.П. Исследование температурных напряжений при отжиге листового стекла. — "Стекло и керамика", 1962, №7, с. 9–13.
- 3 Бартенев Г.М. Контроль закалки листового стекла больших размеров. — "Стекло и керамика", 1948, №11, с. 18–19.
- 4 Барабанов Н.Н. и др. Полуавтоматический нагревательный полярископ-поляриметр для контроля остаточных и временных термических напряжений в стеклах. — "Стекло и керамика", 1976, №9, с. 12–14.
- 5 Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М., 1974.
- 6 Ковальчук А.Ф. Исследование технологических решений при статистическом моделировании и оптимизации качества строительных материалов. Автореф. канд. дис. Одесса, 1976, с. 23.