

На правах рукописи



Мансур Губран Али Мохаммед

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И
ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ОТЖИГА СОРТОВЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственной технической университету» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

Научный руководитель: Марголис Борис Иосифович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «ТвГТУ»

Официальные оппоненты: Шпрехер Дмитрий Маркович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Лопатин Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» Новомосковского института (филиала) ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир

Защита состоится «17» декабря 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: 170026, г. Тверь, Наб. Аф. Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан « » ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



С.М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Стекло является самым широко применяемым материалом в быту, строительстве, на транспорте благодаря своим уникальным качествам: прозрачности, твердости, химической устойчивости, относительной дешевизне производства. Стекольная промышленность является одной из базовых отраслей экономики и играет важную роль в формировании макроэкономических показателей России. Ее особенностями являются высокие показатели капиталоемкости, материалоемкости, энергоемкости производств. Поэтому чрезвычайно актуальным является повышение производительности технологического процесса производства стекла, в частности, одной из наиболее энергоемких его стадий – отжига.

Технологический процесс производства стекла состоит из следующих основных стадий: приготовление шихты, варка стекломассы, формование, отжиг стеклоизделий, контроль качества, упаковка и доставка изделий потребителю. Необходимой стадией процесса производства сортовых стеклоизделий является отжиг в печах, а одной из важнейших составляющих в себестоимости – энергетические затраты на процесс отжига.

Под отжигом стекла понимают процесс медленного охлаждения стекла с целью устранения или уменьшения остаточных напряжений. Режим отжига должен обеспечивать такие величину и распределение напряжений в стекле, которые гарантировали бы его заданное качество. В настоящее время на действующем оборудовании часто реализованы режимы отжига, которые являются неэкономичными с точки зрения энергозатрат. Гораздо более эффективным является подход, связанный с разработкой режимов отжига для стекол с заданными химическим составом, геометрической формой и размерами. Перенастройка режима при изменении ассортимента делает возможным решение научной задачи, имеющей важное народно-хозяйственное значение: нахождения оптимального режима отжига, обеспечивающего заданный уровень остаточных напряжений.

Большой вклад в изучение проблемы и решение задач по расчету режимов отжига внесли Адамс и Вильямсон, на их классических трудах базируется большинство существующих приближенных моделей отжига стеклоизделий. Мазуриным О.В. и Лалыкиным Н.В. на основе релаксационно-кинетической теории стеклования Тула А.К. и Нарайанасвами О.С. разработана методика построения моделей технологического процесса отжига листового стекла, позволяющая рассчитывать режимы отжига и снижать остаточные напряжения в листовом стекле. К настоящему времени сформировался мощный математический аппарат по расчету режимов отжига, относящийся к стеклу простейшей геометрической формы – листовому, причем обычно для решения симметричной задачи. При переходе к стеклоизделиям с более сложной геометрической формой расчет значительно усложняется. При моделировании процесса и оптимизации режимов отжига сортовых стеклоизделий более эффективные результаты дали модели В.Г. Рубанова, А.В. Маматова, А.Г.

Филатова, Б.И. Марголиса, А.А. Кузенко, Т.И. Тихомировой. Данная диссертация, являясь развитием вышеуказанных работ, в отличие от них содержит подходы к построению и реализации автоматизированной системы для расчета режимов отжига стеклоизделий цилиндрической формы. В работе учитывается специфика технологического процесса отжига сортовых стеклоизделий: зависимость свойств стекла от температуры, несимметричность условий конвективно-радиационного теплообмена, необходимость расчетов в доотжиговый период и идентификации параметров теплообмена, экспериментальные дилатометрические и вязкостные температурные зависимости исследуемых стекол. Поэтому, разработка моделей, алгоритмических и программных средств, позволяющих повысить точность описания технологического процесса отжига сортового стекла и качество получаемой продукции, является актуальной научной задачей.

Цель работы заключается в повышении эффективности процесса отжига сортовых стеклоизделий за счет достижения оптимального по энергетическим затратам режима, обеспечивающего заданный уровень остаточных напряжений в стекле.

Для достижения цели исследования сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1. Обоснована структура автоматизированной системы для моделирования и оптимизации процесса отжига сортового стекла.

2. Определены температурные зависимости физико-химических свойств и релаксационных постоянных стекла при его отжиге.

3. Разработаны математические модели полей температур и напряжений в сортовых стеклоизделиях.

4. Разработана методика определения оптимального по остаточным напряжениям режима отжига сортового стекла.

5. Создан программный комплекс для автоматизированного расчета режимов отжига сортовых стеклоизделий.

6. Идентификация условий теплообмена, расчет полей температур, релаксации структуры и напряжений, оптимального по напряжениям режима отжига сортового стекла.

Объектом исследования являются стеклоизделия цилиндрической формы и процесс их отжига.

Предметом исследования являются модели температур и напряжений и алгоритмы выбора оптимального режима отжига сортового стекла.

Методы исследования. Для решения сформулированных в работе задач используются методы анализа систем управления, математической физики, теории теплообмена, теории температурных напряжений, математического моделирования, разработки программного обеспечения, теории алгоритмов, численной оптимизации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель температурного поля при отжиге сортовых стеклоизделий с использованием метода конечных элементов в среде

Matlab, учитывающая цилиндрическую форму изделий, сложные начальные и граничные условия, зависимость теплофизических свойств стекла от температуры, радиационный теплообмен между поверхностями изделия.

2. Разработана математическая модель релаксации структуры и двухмерного поля напряжений в сортовых стеклоизделиях, учитывающая температурные зависимости вязкости и удлинения для стекла заданного химического состава.

3. Произведена идентификация параметров конвективно-радиационного теплообмена сортового стекла для существующего температурно-временного режима до и в печи отжига.

4. Предложена методика расчета оптимального режима отжига сортового стекла, обеспечивающего заданный уровень остаточных напряжений в стеклоизделии.

5. Разработан программный комплекс в среде Matlab для моделирования и оптимизации режимов отжига сортовых стеклоизделий заданного химического состава и размеров.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в создании комплекса программ, позволяющего определить оптимальные настройки параметров регулирования технологического процесса отжига стеклоизделий сложной конфигурации с целью снижения затрат энергии и достижения заданного качества продукта. Комплекс реализован в среде математического программирования Matlab 7.15. Созданный комплекс «АСРЦ» позволяет моделировать поля температур и напряжений в стеклоизделиях цилиндрической формы. Разработанные модели расчета полей температур и напряжений можно распространить на более сложные формы стеклоизделия. Рассчитан оптимальный по остаточным напряжениям режим отжига сортового стекла на ОАО Спировский стеклозавод «Индустрия». Получен акт опытно-промышленных испытаний «АСРЦ» для Клинского АО «Медстекло». Разработанный комплекс используется в учебном процессе кафедры «Автоматизация технологических процессов» ТвГТУ при проведении занятий по дисциплине «Системы управления объектами с распределёнными параметрами».

Основные положения и результаты работы, выносимые на защиту:

1. Структура автоматизированной системы для моделирования и оптимизации процесса отжига сортового стекла.

2. Математическая модель температурного поля в сортовых стеклоизделиях, учитывающая несимметричность условий конвективно-радиационного теплообмена, неравномерность начального температурного распределения, цилиндрическую геометрическую форму, взаимный радиационный теплообмен.

3. Математическая модель поля напряжений в сортовых стеклоизделиях при их отжиге, отличающаяся разбиением изделия на расчетные тела и решением двухмерной задачи.

4. Методика определения оптимального режима отжига стеклоизделий, позволяющего получить заданные остаточные напряжения в стекле.

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяется корректностью использования при описании полей температур и напряжений дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с неравномерным начальным температурным распределением и несимметричными граничными условиями конвективно-радиационного теплообмена и релаксационных моделей стеклования.

Сравнение результатов расчета полей температур и напряжений по предложенным в работе моделям с экспериментальными данными в цехах отжига сортовой посуды ОАО Спировского стеклозавода «Индустрия» и АО «Медстекло» Клинского стекольного завода позволяет сделать вывод об их хорошем совпадении.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на III-й всероссийской научно-практической конференции «Саморазвивающаяся среда технического университета» (г. Тверь, 2018 г.), научно-практической конференции «Направления развития российской науки: теоретические исследования и экспериментальные разработки» (г. Тверь, 2019 г.), Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-32 (г. Санкт-Петербург, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 3 публикации в ведущих журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 1 публикация, индексируемая в системе научного цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 151 наименования. Работа изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 11 таблиц, приложение с актом опытно-промышленных испытаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулированы цель работы, научные задачи исследования, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе «Технологический процесс и программные средства моделирования отжига стеклоизделий» по данным литературных источников проведен обзор основных стадий технологического процесса производства стеклоизделий, видов стекол. Рассмотрен технологический процесс отжига сортового стекла и его этапы. Приведены технические характеристики печи, использующейся для отжига сортового стекла, химический состав и геометрические размеры, кривая отжига сортового стекла на ООО «Спировский стекольный завод».

Проанализированы современные методы моделирования технологического процесса отжига стеклоизделий, определены недостатки в существующих подходах к моделированию и оптимизации процесса и режима

отжига сортового стекла. В результате анализа технологического процесса отжига как объекта управления выделены группы параметров, позволяющие сформулировать задачу оптимизации режима отжига по уровню остаточных напряжений в стеклоизделии. Определена структура программного комплекса (автоматизированной системы) для расчета режимов отжига стеклоизделий цилиндрической формы. Сформулированы задачи исследования, из которых в данной главе решаются следующие: расчет свойств стекла по его химическому составу, обработка данных дилатометрических измерений, расчет температурной зависимости вязкости и постоянных структурной релаксации.

Для моделирования полей температур и напряжений в стеклоизделиях необходимо уметь рассчитывать значения теплофизических (коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость C) и механических (модуль Юнга E , коэффициент Пуассона μ , фотоупругая постоянная B , прочности на растяжение и сжатие P_p, P_c) свойств стекла по химическому составу при любой температуре. Свойства стекла при температуре 0°C находятся по известным аддитивным зависимостям по процентным содержаниям окислов:

$$Q(\lambda, C, \mu, P_p, P_c, B) = \sum_{i=1}^{N_{ox}} Q_i P_i, \quad (1)$$

где Q – рассчитываемое свойство; Q_i – аддитивные коэффициенты для расчета свойства; P_i – содержания окислов (масс.%); N_{ox} – число окислов.

Расчет плотности ρ , модуля Юнга E , линейного коэффициента температурного расширения (КТР) α производится по методу Аппена. Температурные зависимости этих свойств и коэффициента температуропроводности a находятся по известным формулам:

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_0 \cdot (1 + 0,0009T); C = C_0 \cdot (1 + 0,00039T); B = B_0 \cdot (1 + 0,0002T); \\ \rho = \frac{\rho_0}{1 + 3\alpha T}; a = \frac{\lambda}{\rho C}; Q_T = Q_0 \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{N_{ox}} a_{T_i} P_i \right); \mu = \frac{E}{2G} - 1, \end{cases} \quad (2)$$

где Q_0 – значение свойства при 0°C ($\text{H}/\text{м}^2$); Q_T – рассчитанное значение свойства (E, G); a_{T_i} – парциальный коэффициент i -го окисла.

При обработке данных дилатометрических измерений рассчитываются значения коэффициента температурного расширения стекла $\alpha_i, i = \overline{1, m}$ численным дифференцированием удлинений экспериментальной дилатометрической кривой. Расчет вязкости в работе предложено производить по химическому составу, используя методы Гельгофа и Охотина. Температурная зависимость вязкости находится по выражению:

$$\lg \eta = \left[A + B / (T_f - T_0) \right] \cdot T_f / T - \lg \eta_0 \cdot [T_f / T - 1], \quad (3)$$

где A, B, T_0 – постоянные Фулчера-Таммана для равновесной области ($T_f = T$); η – вязкость стеклообразующего вещества при температуре T (К).

Методика определения релаксационных постоянных основана на описании релаксационного процесса функцией Кольрауша:

$$M_s = \exp\left[(-t/\tau_k)^b\right], \quad (4)$$

где τ_k, b – время релаксации и показатель степени дробной экспоненты. Находятся три постоянные: $\lg K_s = \lg \eta - \lg \tau_k$ – модуль перехода от вязкости к времени структурной релаксации, b и $\lg \tau_0$ – результат экстраполяции температурной зависимости вязкости к бесконечной температуре.

Оптимальные значения $\lg K_s, b, \lg \tau_0$ должны обеспечивать минимум среднеквадратичного отклонения рассчитанных значений удлинений ($\Delta l/l$) от экспериментальных удлинений образца. Расчетное значение относительного удлинения определяется по формуле:

$$\Delta l/l = (T_f - T_H) \cdot \alpha_l + (T - T_f) \cdot \alpha_g, \quad (5)$$

где T_H – температура начала расчета (°C); α_l, α_g – коэффициенты температурного расширения соответственно для равновесного и изоструктурного состояний стеклообразующего вещества (1/град).

Поиск значений релаксационных постоянных стекла осуществляется с помощью стандартного метода Matlab *fmincon* многомерного поиска минимума функции нескольких переменных. От полученных оптимальных значений $\lg K_s, b$ можно перейти к набору постоянных $\lg K_n, n = \overline{1, N_r}$ по формуле

$$\lg K_n = \lg K_s - \lg(\tau_n/\tau_k), \quad (6)$$

где значения $\lg(\tau_n/\tau_k)$ при заданных b и весах g_n при описании релаксационного процесса суммой экспонент $M_s = \sum_{n=1}^{N_r} g_n \exp(-t/\tau_n)$ известны.

Продемонстрирована работа программного комплекса в среде Matlab для решения вспомогательных задач на примере сортового стекла, производимого в цехе отжига Спировского стеклозавода «Индустрия». Приведены экранные формы с значениями свойств и релаксационных постоянных, необходимых для дальнейшего расчета релаксации структуры и напряжений в сортовых стеклоизделиях при их термообработке.

Во **второй главе** «Разработка математических моделей температурного поля в сортовых стеклоизделиях при их отжиге» рассмотрены методы моделирования температурных полей в цилиндрических изделиях. Показаны недостатки использования аналитических методов и метода конечных интегральных преобразований для моделирования отжига стеклоизделий сложной геометрической формы, связанные с необходимостью учета радиационного теплопереноса и несимметричностью условий теплообмена. Обоснована разработка численных моделей для расчета несимметричного конвективно-радиационного теплообмена в цилиндрических телах.

Моделирование температурных полей в сортовых стеклоизделиях (стакан, колба) при сложных граничных условиях сводится к решению дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\partial t(r, \tau) / \partial \tau = a \cdot \left[\partial^2 t(r, \tau) / \partial r^2 + 1/r \cdot \partial t(r, \tau) / \partial r \right], \quad (7)$$

где $t(r, \tau)$ – температура в радиальной координате r в момент времени τ ($^{\circ}\text{C}$).

В разделе 2.2 рассмотрены численные методы расчета несимметричного конвективно-радиационного теплообмена в цилиндрических телах. Предложена явная конечно-разностная схема, для которой частные производные в уравнении (7) по времени и координате заменяются на их численные аналоги. Формулы для расчета температурного распределения во внутренних точках полого цилиндрического тела будут выглядеть следующим образом:

$$t_{i+1}(j) = t_i(j) + a\Delta\tau / (\Delta r)^2 \cdot \{ [t_i(j-1) - 2t_i(j) + t_i(j+1)] + [t_{i+1}(j) - t_i(j)] / j \}, \quad (8)$$

где $i = \overline{0, m}$ – номер временной точки расчета; $j = \overline{1, N-1}$ – номер точки по толщине; $\Delta\tau$ – шаг по времени; $\Delta r = (R_2 - R_1) / N$ – толщина слоя; R_1, R_2 – радиусы внутренней и внешней поверхностей полого цилиндра.

Для поверхностей изделия при расчете температур также учитываются тепловые потоки при конвективном и радиационном теплообмене:

$$\begin{cases} t_{i+1}(0) = t_i(0) + a\Delta\tau \cdot \left[(t_i(1) - t_i(0)) / \Delta r \cdot (2/\Delta r + 1/R_1) + Q_{C_i}(R_1) + Q_{R_i}(R_1) \right]; \\ t_{i+1}(N) = t_i(N) + a\Delta\tau \cdot \left[(t_i(N-1) - t_i(N)) / \Delta r \cdot (2/\Delta r + 1/R_2) + Q_{C_i}(R_2) + Q_{R_i}(R_2) \right], \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} Q_{C_i}(R_1) = 2\alpha_1 [t_{c1}(\tau) - t_i(0)] / (\lambda\Delta r); \quad Q_{C_i}(R_2) = 2\alpha_2 [t_{c2}(\tau) - t_i(N)] / (\lambda\Delta r); \\ Q_{R_i}(R_1) = 2\varepsilon_{s1}\sigma [T_{H1}^4(\tau) - T_i^4(0)] / (\lambda\Delta r); \quad Q_{R_i}(R_2) = 2\varepsilon_{s2}\sigma [T_{H2}^4(\tau) - T_i^4(N)] / (\lambda\Delta r), \end{cases} \quad (10)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты конвективной теплоотдачи для внутренней и внешней поверхностей изделия ($\text{Вт}/(\text{м}^2\text{град})$); $t_{c1}(\tau), t_{c2}(\tau)$ – температуры среды внутри и снаружи ($^{\circ}\text{C}$); $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}$ – приведенные степени черноты верхней и нижней ограждающих поверхностей технологического оборудования; $T_{H1}(\tau), T_{H2}(\tau)$ – температуры ограждающих поверхностей над, под изделием (K).

Для проверки модели температурного поля (8)-(10) был произведен расчет конвективно-радиационного охлаждения полого бесконечного цилиндра при следующих значениях параметров: $a=0,2$ ($\text{см}^2/\text{мин}$); $\lambda=0,00838$ ($\text{Вт}/(\text{см}\cdot\text{град})$); $R_1=0,3$ (см); $R_2=0,6$ (см); $\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{s2}=0,91$; $N=14$; $m=4000$; $\alpha_1=\alpha_2=0,001256$ ($\text{Вт}/\text{см}^2\text{град}$); $t_0(j)=707$ ($^{\circ}\text{C}$); $t_{c1}=t_{c2}=27$ ($^{\circ}\text{C}$); $t_{H1}=t_{H2}=27$ ($^{\circ}\text{C}$); $\Delta\tau=0,03$ (с). Разница результатов расчета с значениями температур поверхностей и середины изделия, полученными в различные моменты времени аналитическими методами, не превышает 1°C . Расчет температурного поля в неограниченном полом цилиндре с помощью стандартной функции *pdepe* среды программирования Matlab дает такие же по точности результаты.

Для учета конечных размеров стеклоизделий цилиндрической формы произведен переход от одномерного температурного поля по толщине изделия к двумерному распределению, учитывающему градиенты температуры по высоте изделия. Подходом к решению задач теплообмена для конечномерных тел является применение метода конечных элементов (МКЭ).

Использована функция Matlab *parabolic* – решатель методом конечных элементов параболического дифференциального уравнения в частных производных $d \frac{\partial u(r, z, \tau)}{\partial \tau} - \nabla \cdot (c \nabla u(r, z, \tau)) + a_1 u(r, z, \tau) = f$, которое для случая осесимметричной температурной задачи в цилиндрической системе координат запишется следующим образом:

$$d \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial \tau} - c \cdot \left[\frac{\partial^2 t(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 t(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right] + a_1 t(r, z, \tau) = f, \quad (11)$$

где z – координата по высоте изделия; $d = \lambda/a$, $c = \lambda$ – коэффициенты при производных; $a_1 = 0$, $f=0$ – отсутствующие множитель при температуре и внешний тепловой поток.

Граничные условия 3-го рода Неймана для температурной задачи:

$$-\lambda \cdot \partial t(r, \tau) / \partial r + q \cdot t(r, \tau) = g. \quad (12)$$

В то же время для конвективно-радиационного теплообмена на внутренней поверхности цилиндрического тела по законам Ньютона и Стефана-Больцмана:

$$-\lambda \cdot \partial T(R_1, \tau) / \partial r = \alpha_1 [T_{cl}(\tau) - T(R_1, \tau)] + \varepsilon_{s1} \sigma [T_{H1}^4(\tau) - T^4(R_1, \tau)]. \quad (13)$$

В связи с этим, с учетом перехода к абсолютным температурам, коэффициенты q , g в уравнении (12) для внутренней цилиндрической поверхности выглядят: $q = \alpha_1 T(R_1, \tau) + \varepsilon_{s1} \sigma T^4(R_1, \tau)$; $g = \alpha_1 T_{cl}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma T_{H1}^4(\tau)$. Выражения q , g для наружной цилиндрической поверхности записываются аналогично.

Для решения поставленной задачи с использованием *parabolic* необходимо произвести триангуляцию выбранной геометрической области с помощью функции: $[p, e, t] = \text{initmesh}(g, 'Hmax', hmax)$, где $hmax$ – максимальный размер граничного элемента. Функция *initmesh* формирует выходные параметры: p – массив горизонтальных (по высоте) и вертикальных (по радиусу) координат узлов конечно-элементной сетки; e – матрица, содержащая номера начальных, конечных узлов граничных элементов и граничных сегментов, которым они принадлежат; t – матрица треугольных конечных элементов, содержащая номера входящих в них вершин (узлов). Для сортового цилиндрического изделия описание занимаемой геометрической области в прямоугольной системе координат выглядит следующим образом:

$$\text{reg1} = [3 \ 4 \ Hb \ H \ H \ Hb \ R1 \ R1 \ R2 \ R2]'; \text{reg2} = [3 \ 4 \ 0 \ Hb \ Hb \ 0 \ 0 \ 0 \ R2 \ R2]'; \\ \text{reg} = [\text{reg1} \ \text{reg2}]; g = \text{decs}(reg).$$

Визуальное изображение разбиения цилиндрической области на треугольные элементы, полученное с помощью функции *pdeplot(p,e,t)*, для отжигаемого на Спировском стеклозаводе "Индустрия" цилиндрического стакана показано на рис.1.

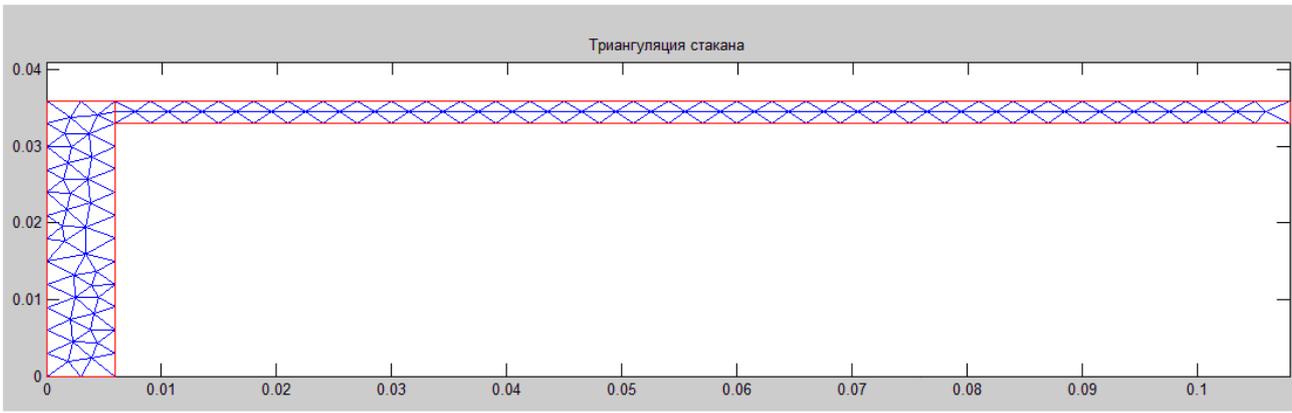


Рис.1. Триангуляция цилиндрического стакана

Для решения задачи моделирования температурного поля в цилиндрическом изделии с помощью *parabolic* используется файл граничных условий $b=boundaryFileHolParabolic1(p, e, umy, 0)$, где umy – температурное распределение в предыдущий момент времени. Код функции граничных условий приведен в диссертации.

Для повышения точности расчета температурного поля учитывается взаимный радиационный теплообмен поверхностей изделия и печи между собой. Требуется введение угловых коэффициентов излучения (УКИ), характеризующих доли излучения, попадающих с элементов внутренних донной и боковой поверхностей друг на друга и на ограждающие поверхности печи отжига. Обозначим УКИ через F_{didj} , где i, j – номера излучающей и поглощающей (1 – боковая, 2 – донная, 3 – торцевая) поверхностей.

Вычисление УКИ производится с использованием алгебраического метода, учитывающего форму, размеры и взаимное расположение элементов поверхностей. Корректируются коэффициенты $g = \alpha_1 T_{cl}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma T_{H1}^4(\tau)$ в уравнении (12). Для k -го бокового и i -го кольцевого элементов внутренних цилиндрической и донной поверхностей коэффициенты запишутся в виде:

$$\begin{aligned}
 g(k) &= \alpha_1 T_{cl}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma \left[F_{d13}(k) T_{H1}^4(\tau) + \sum_{i=1}^{N_H} F_{d1d1}(k, i) T_{1i}^4(\tau) + \sum_{i=1}^{N_R} F_{d1d2}(k, i) T_{2i}^4(\tau) \right]; \\
 g(i) &= \alpha_1 T_{cl}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma \left[F_{d23}(i) T_{H1}^4(\tau) + \sum_{k=1}^{N_H} F_{d2d1}(i, k) T_{1k}^4(\tau) \right],
 \end{aligned} \tag{14}$$

где $N_H = (H - H_b) / \Delta h$; $N_R = R_1 / \Delta h$ – количество слоев по высоте и радиусу; $T_{1k}^4(\tau)$, $T_{2i}^4(\tau)$ – четвертые степени абсолютных температур k -го бокового и i -го донного элементов, получаемых усреднением температур их граничных точек.

С учетом разработанной модели температурного поля в сортовых стеклоизделиях в разделе 2.4 работы рассмотрено решение задачи идентификации параметров конвективно-радиационного теплообмена стакана до и в печи отжига. Определение этих параметров до печи отжига необходимо, так как начальной точкой расчета релаксации структуры и напряжений должно быть равновесное состояние стеклообразующего вещества.

Выбор параметров теплообмена определяется преобладающими механизмами внешнего теплопереноса, которые зависят от типа печи отжига (конвективная, радиационная, конвективно-радиационная). До печи отжига идентифицируются приведенные степени черноты при радиационном теплообмене стакана с нижней (ϵ_{s1}) и верхней (ϵ_{s2}) ограждающими поверхностями, а конвективный теплообмен считается естественным. В конвективной печи отжига рассматриваются равные степени черноты $\epsilon_{s1} = \epsilon_{s2}$, а идентифицируются коэффициенты теплоотдачи при естественном для внутренних (α_1) и искусственном для наружных (α_2) поверхностей стеклоизделия конвективном теплообмене. Параметры при идентификации условий теплообмена стакана в печи и температурный режим отжига на Спировском стеклозаводе "Индустрия" показаны на рис.2 и 3 соответственно.

Рис.2 демонстрирует хорошее совпадение рассчитанных температур середины боковой поверхностей изделия и их экспериментальных значений при идентифицированных параметрах теплообмена на этапах температурно-временного режима в печи отжига. На рис.3 показано температурное поле по толщине боковой стенки изделия в ходе процесса его отжига.

Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена стакана в печи отжига										
Температура среды, град С	545	525	490	455	345	300	250	200	150	100
Температуры ограждающих поверхностей, град С	545	525	490	455	345	300	250	200	150	100
Расчетная температура боковой поверхности изделия, град С	545.0	526.0	492.0	457.0	346.0	304.0	251.0	201.0	151.0	101.0
Время, мин	8.89	17.8	26.7	35.6	44.4	53.3	62.2	71.1	80.0	88.9
Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(кв.м*град)	103.0	103.0	102.0	100.0	969.0	91.1	472.0	470.0	469.0	465.0
Приведенная степень черноты верхней поверхности	0.8	0.8	0.8	0.8	0.801	0.8	0.8	0.8	0.799	0.799
Экспериментальная температура боковой поверхности, град С	545.0	526.0	491.0	456.0	346.0	302.0	251.0	201.0	151.0	101.0
Приведенная степень черноты нижней поверхности	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.799	0.801	0.8	0.799

Рис.2. Идентификация условий теплообмена стакана в печи отжига

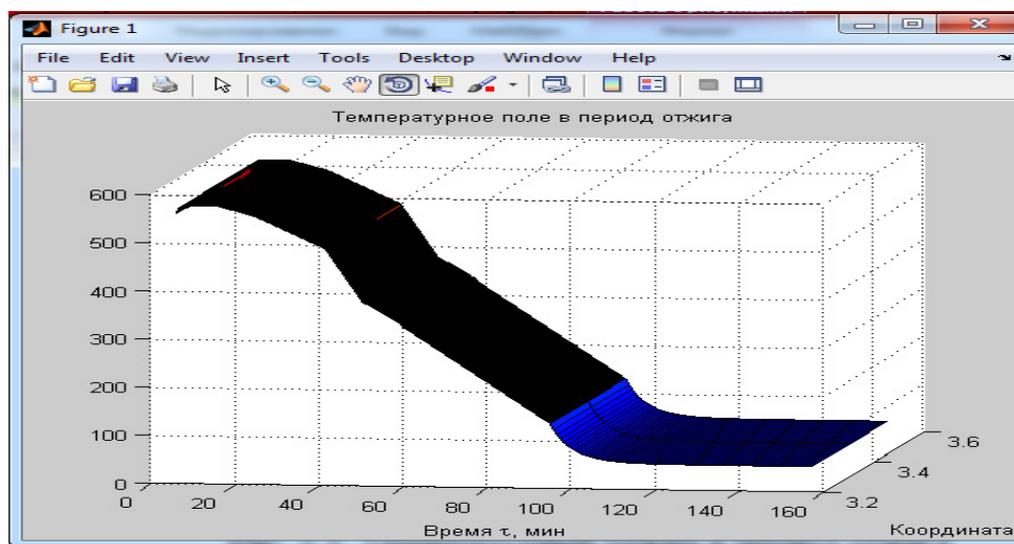


Рис. 3. Температурный режим в стакане в период отжига

В третьей главе «Разработка математических моделей релаксации структуры и напряжений и методики расчета оптимального режима отжига сортовых стеклоизделий» рассмотрены математические модели температурно-временных зависимостей свойств стекла и полей напряжений в сортовых стеклоизделиях. Предложенная в работе математическая модель релаксации структуры и поля напряжений основана на алгоритме Ленинградского института химии силикатов, но учитывает разбиение стеклоизделия на несколько расчетных тел и двухмерность задачи.

Логарифм времени структурной релаксации $\lg \tau_l(n, j, i, k)$, структурная температура $T_{fl}(j, i, k)$, логарифм вязкости $\lg \eta_l(j, i, k)$ и дилатометрическая длина слоя $L_{dl}(j, i, k)$ рассчитываются по уравнениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lg \tau_l(n, j, i, k) = \lg \eta_{l-1}(j, i, k) - \lg K_n \cdot T_{f(l-1)}(j, i, k) / T_{l-1}(j, i, k); \\ T_{fl}(j, i, k) = \sum_{n=1}^{N_r} g_n \cdot [\Delta T_{fl}(n, j, i, k) + T_l(j, i, k)]; \\ \lg \eta_l(j, i, k) = \left[A + \frac{B}{T_{fl}(j, i, k) - T_0} \right] \cdot \frac{T_{fl}(j, i, k)}{T_l(j, i, k)} - \lg \eta_0 \cdot \left[\frac{T_{fl}(j, i, k)}{T_l(j, i, k)} - 1 \right]; \\ L_{dl}(j, i, k) = [T_{fl}(j, i, k) - T_0(j, i, k)] \cdot \alpha_l + [T_l(j, i, k) - T_{fl}(j, i, k)] \cdot \alpha_g, \end{array} \right. \quad (15)$$

где $j = \overline{1, N_j}$ – номер поверхности расчета ($N_j = 2$; $j = 1, 2$ – боковая и донная поверхности стакана; $i = \overline{0, N_{R_j}}$ – номер точки по радиусу, $N_{R_1} = 2(R_2 - R_1) / \Delta h$; $N_{R_2} = R_2 / \Delta h$; $k = \overline{0, N_{H_j}}$ – номер точки по высоте, $N_{H_1} = N_H = (H - H_b) / \Delta h$; $N_{H_2} = 2H_b / \Delta h$; $m = 1, 2$ – горизонтальное и вертикальное направления.

Основные соотношения, положенные в основу алгоритма расчета напряжений в сортовых стеклоизделиях, выглядят следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{fl}(m, j, i, k) = L_{dl}(j, i, k) - R_{l-1}(m, j, i, k); \\ L_{rl}(1, j, i) = \sum_{k=0}^N L_{fl}(1, j, i, k) / (N + 1); L_{rl}(2, j, k) = \sum_{i=0}^N L_{fl}(2, j, i, k) / (N + 1); \\ \Delta \sigma_l(m, j, i, k) = \left[(L_{dl}(j, i, k) - L_{rl}(m, j, i)) - (L_{dl(l-1)}(j, i, k) - L_{rl(l-1)}(m, j, i)) \right] \cdot \frac{E}{1 - \mu}; \\ R_l(m, j, i, k) = R_{l-1}(m, j, i, k) + (1 - \mu) / E \cdot \Delta \sigma_{rl}(m, j, i, k); \\ \sigma'_l(m, n, j, i, k) = \sigma_{l-1}(m, n, j, i, k) + g_n \Delta \sigma_l(m, j, i, k); \\ \Delta \sigma_{rl}(m, n, j, i, k) = \sigma'_l(m, n, j, i, k) \cdot [1 - \exp(-\Delta \tau_r / \tau_l(n, j, i, k))]; \\ \Delta \sigma_{rl}(m, j, i, k) = \sum_{n=1}^{N_r} \Delta \sigma_{rl}(m, n, j, i, k); \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\begin{cases} \sigma_l(m, j, i, k) = [L_{r_l}(m, j, i) - L_{fl}(m, j, i, k)] \cdot E / (1 - \mu); \\ \sigma_l(m, n, j, i, k) = \sigma'_l(m, n, j, i, k) \cdot \exp(-\Delta \tau_r / \tau_l(n, j, i, k)). \end{cases} \quad (17)$$

Переход от рассчитанных в l -й момент времени значений температур в точках триангуляции к температурам в узлах пространственной сетки (15) $T_l(j, i, k), j = \overline{1, N_j}; i = \overline{0, N_{R_j}}; k = \overline{0, N_{H_j}}$ происходит усреднением температур двух ближайших к узлу сетки точек триангуляции. В формулах (16), (17): $L_{fl}(m, j, i, k)$ – свободный размер слоя; $R_l(m, j, i, k)$ – изменение свободной длины слоя за счет релаксации в нем напряжений за l шагов по времени; $\Delta \sigma_{r_l}(m, n, j, i, k), \Delta \sigma_{n_l}(m, j, i, k)$ – отрелаксировавшие в течение l -го временного напряжения по n -му релаксационному процессу и суммарные напряжения; $r_l(n, j, i, k) = \lg \Delta \tau_r - \lg \tau_l(n, j, i, k)$ – показатель релаксации; $L_{r_l}(1, j, i), L_{r_l}(2, j, k)$ – фактические линейные размеры слоев в горизонтальном и вертикальном направлениях; $\Delta \sigma_l(m, j, i, k)$ – вновь возникшие на шаге l напряжения; $\sigma_l(m, n, j, i, k), \sigma_l(m, j, i, k)$ – напряжения на l -м временном шаге в m -м направлении по n -му процессу. Отдельно находятся горизонтальные и вертикальные напряжения в стеклоизделии, а расчет интегральных напряжений осуществляется по формуле: $\sigma_l(j, i, k) = \sqrt{\sigma_l^2(1, j, i, k) + \sigma_l^2(2, j, i, k)}$. (18)

С использованием предложенной релаксационной модели (15)-(18) определяются временные и остаточные напряжения в сортовых стеклоизделиях в течение доотжигового периода и периода отжига. В работе произведен расчет значений напряжений для изделий, отжигаемых на Спировском стеклозаводе "Индустрия". Полученные значения остаточных напряжений характерных точек донной и боковой поверхностей изделия хорошо согласуются с их экспериментальными значениями. Рассчитанные с помощью программы распределения временных и остаточных напряжений по высоте и радиусу изделия на входе в печь и в конце отжига приведены в диссертации.

В главе также разработана методика нахождения оптимального режима отжига сортовых стеклоизделий, обеспечивающего минимальное отклонение максимальных остаточных напряжений в изделии от заданного на них допуска, учитывающая ограничение на температуру окончания нагрева стекла. Критерий оптимальности и ограничения оптимизационной задачи имеют вид:

$$J = |\sigma_r - \sigma_{giv}| \rightarrow \min, T_B \leq T_{an} \leq T_H, \quad (19)$$

где T_{an} – температура окончания нагрева стеклоизделия; T_B, T_H – нижняя и верхняя границы интервала отжига.

Формулу для расчета остаточных напряжений можно записать в виде:

$$\sigma_r = C \cdot \int_{T_B}^{T_H} W(T)R(T) dT, \quad (20)$$

где $W(T) = d/dT [dT_f/dT]$ – весовая функция; $R(T) = A / [\Delta t \sqrt{W(T)}]$ – оптимальные скорости охлаждения; Δt – время охлаждения; $A = \int_{T_B}^{T_H} \sqrt{W(T)} dT$.

Для поиска минимума критерия оптимальности используется метод золотого сечения. За 5-7 шагов метод сходится к оптимальной T_{an}^* , обеспечивающей минимальное отклонение рассчитанных остаточных напряжений в характерной точке изделия от заданного значения. Для реализации оптимального режима в печи для каждой зоны отжига определяется средняя скорость охлаждения и конечная температура среды, которая является оптимальной уставкой регулятора. Полученный оптимальный режим отжига обеспечивает необходимые кривую изменения температуры поверхности изделия и остаточные напряжения, а его реализация в печи производится с помощью локальных систем управления температурным режимом.

Оптимальный по уровню остаточных напряжений $\sigma_{giv} = 50$ нм/см режим отжига стаканов, рассчитанный автоматизированной системой «АСРЦ», приведен на рис.4. Поля остаточных напряжений по высоте и радиусу изделия при предлагаемом режиме показаны на рис.5.

Для достижения заданного уровня остаточных напряжений и лучшей релаксации напряжений требуется увеличение температуры отжига с 545°C до 548°C. Несмотря на незначительное увеличение скорости охлаждения в 2-й, 3-й и 4-й зонах максимальные остаточные напряжения уменьшаются с 71,8 нм/см до 54,6 нм/см. Использование в качестве регулируемой 5-й зоны позволяет пропорционально уменьшить скорости охлаждения в предыдущих зонах и получить меньшее значение $\sigma_r = 52,7$ нм/см (режим *Оптимум+* на рис.4).

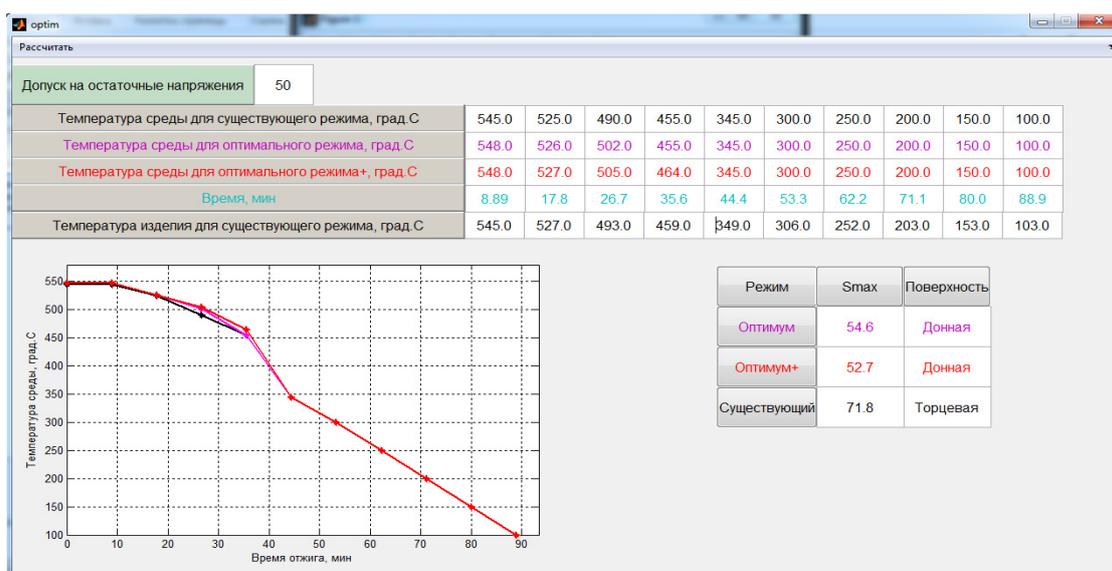


Рис.4. Оптимальный режим отжига сортового стекла

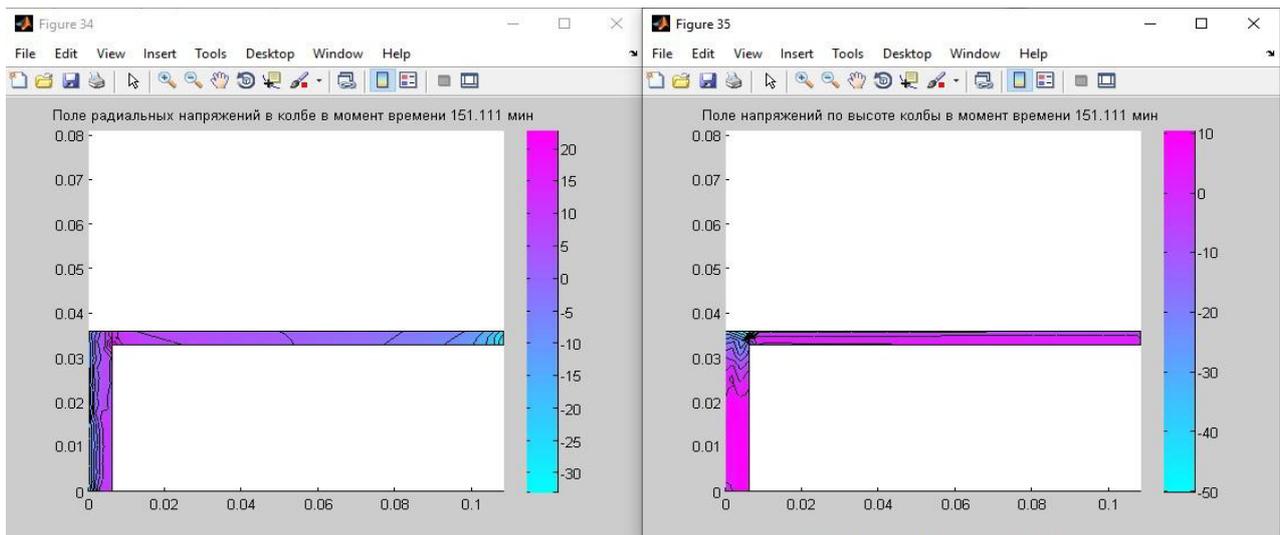


Рис.5. Поля напряжений по высоте и радиальной координате цилиндрического изделия в конце отжига

В четвертой главе «Автоматизированная система управления процессом отжига сортовых стеклоизделий» рассмотрен технологический процесс отжига стеклоизделий как объект управления. Для процесса отжига сортовых стеклоизделий выделены векторы входных и выходных переменных, возмущающих и управляющих воздействий. Разработана структура автоматизированной системы управления отжигом сортовых стеклоизделий, проанализированы основные параметры и подсистемы их измерения и расчета. Структурная схема объекта управления приведена на рис.6. Введены следующие обозначения:

- входные переменные Q_p – химический состав стекла; Q_f – технологические характеристики стеклоизделий в доотжиговой период (температура в конце формования T_f , скорость движения V_f , расстояние до печи L_f , экспериментальные температуры характерных точек на входе в печь); Q_o – технологические характеристики стеклоизделий в период отжига (скорость V_{art} в печи, количество изделий по ширине N_{art} , расстояние между ними d_{art});
- выходные переменные $T_l(j,i,k)$, $l = \overline{0,\infty}$ – температурное поле в стеклоизделии в ходе процесса отжига; $\sigma_\infty(j,i,k)$ – остаточные напряжения;
- переменные состояния Q_H – тип печи отжига по характеру теплообмена в ней (конвективная, радиационная, конвективно-радиационная); Q_E – технологические характеристики оборудования; Q_F – характеристики печи (длина L_F , ширина B_F , высота H_F , число зон отжига N_{an});
- возмущающие воздействия ΔQ_p – изменение химического состава стекла; ΔQ_G – изменение геометрических размеров; ΔQ_f – изменение технологических параметров стеклоизделий в доотжиговой период; ΔQ_o – изменение скорости транспортировки изделия в печи отжига;

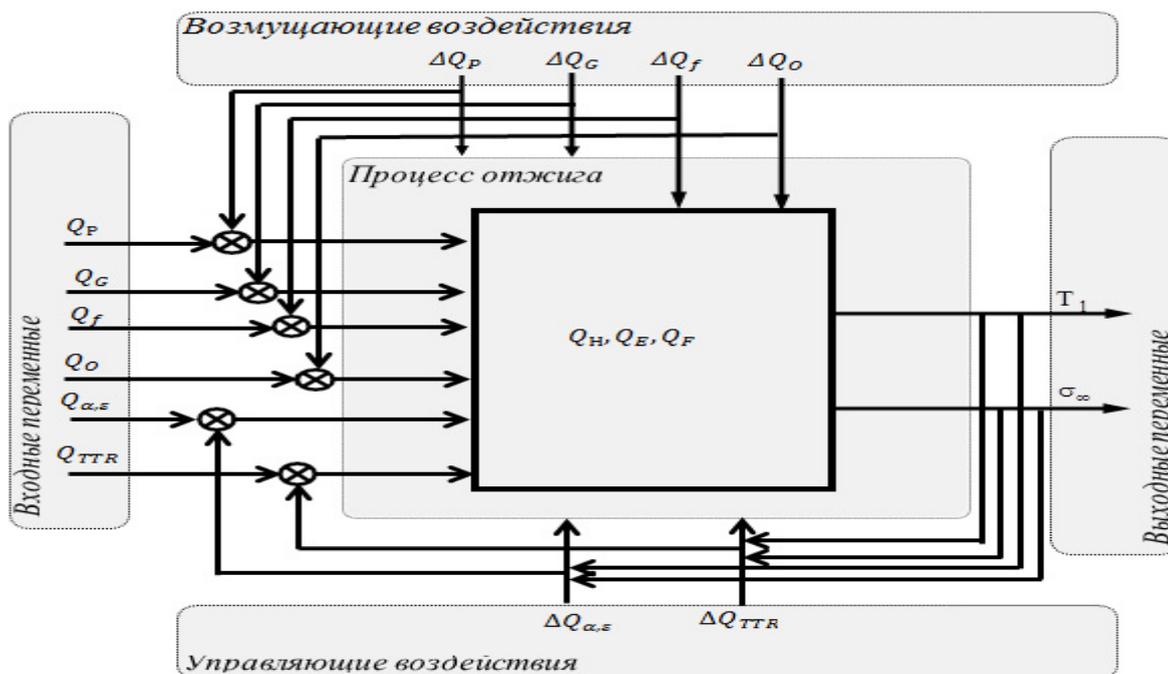


Рис. 6. Технологический процесс отжига стекла как объект управления

- управляющие воздействия ΔQ_{TTR} – температурно-временной режим (ТВР) в печи отжига; $\Delta Q_{\alpha\epsilon}$ – параметры теплообмена (коэффициенты конвективного α_1, α_2 и (или) радиационного теплообмена $\epsilon_{s_1}, \epsilon_{s_2}$).

В разделе 4.2 работы приведена структура автоматизированной системы управления процессом отжига сортовых стеклоизделий. Управляющим воздействием в технологическом процессе отжига являются уставки термопар в зонах печи. Их формирование производится программным комплексом «АСРЦ», содержащим разработанные в главах 1-3 работы модели для расчета свойств, температур и напряжений в стекле.

Подсистема расчета управляющего воздействия «АСРЦ» состоит из персонального компьютера, комплекса математических моделей, алгоритмических и программных средств, обеспечивающих расчет оптимального режима отжига и его коррекцию при текущих и планируемых возмущениях.

При существующих условиях отжига идентифицируются параметры конвективно-радиационного теплообмена в печи и моделируются поля температур и напряжений в стеклоизделии. Рассчитывается оптимальный по остаточным напряжениям температурно-временной режим и осуществляется его реализация в печи с помощью локальных систем управления. Если возмущения приводят к значительным отклонениям остаточных напряжений в изделии от их допустимого уровня σ_{giv} , то система в диалоговом режиме производит коррекцию оптимального ТВР в соответствии с изменяющимися условиями отжига.

В разделе 4.3 работы рассмотрена работа «АСРЦ» для цеха производства медицинского сортового стекла (колб) на Клинском стекольном заводе АО

«Медстекло». Рассчитаны температурно-временные зависимости свойств, температур и напряжений в сортовом стекле при его отжиге. Желаемый уровень остаточных напряжений в изделии $\sigma_{giv} = 50$ нм/см достигается за счет повышения температуры окончания нагрева с 600°C до 611°C , в результате чего лучше релаксируют напряжения на стадии медленного охлаждения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа технологического процесса производства стекла, современных методов моделирования отжига предложена структура автоматизированной системы для расчета режимов отжига стеклоизделий.

2. Решена задача моделирования физико-химических свойств и определения релаксационных постоянных стекла при его отжиге.

3. Разработана математическая модель температурного поля при отжиге стеклоизделий цилиндрической формы, учитывающая температурные зависимости теплофизических свойств стекла, несимметричные условия конвективно-радиационного теплообмена поверхностей изделия.

4. Предложен метод определения угловых коэффициентов излучения при радиационном теплообмене между внутренними поверхностями изделия.

5. Разработана математическая модель расчета релаксации структуры и напряжений в сортовых стеклоизделиях с учетом их цилиндрической формы.

6. Обоснована необходимость расчета релаксации структуры и напряжений на этапах окончания формования изделия и до печи отжига.

7. Разработана методика определения оптимального режима отжига сортового стекла, обеспечивающего заданный уровень остаточных напряжений.

8. На основе анализа процесса отжига как объекта управления предложена структура автоматизированной системы управления для расчета оптимальных уставок регуляторов по зонам печи, обеспечивающих необходимые кривую отжига и остаточные напряжения в изделии.

9. Создан автоматизированный программный комплекс для моделирования и оптимизации технологического процесса отжига сортовых стеклоизделий, имеющих заданные химический состав и размеры.

10. Произведены идентификация условий теплообмена, расчет полей температур, релаксации структуры и напряжений, оптимального режима отжига для сортовых стекол в производстве стаканов на Спировском стеклозаводе «Индустрия» и флаконов на Клинском стеклозаводе АО «Медстекло».

11. Показано хорошее совпадение рассчитанных температур, временных и остаточных напряжений характерных точек поверхностей изделий с их экспериментальными значениями в зонах печи отжига.

12. Продемонстрирована возможность применения разработанной автоматизированной системы для моделирования процессов и оптимизации режимов отжига для различных химического состава, размеров сортового стекла и характеристик печей отжига.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, и в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus:

1. Мансур, Г.А. Программа расчета настроек регуляторов методом расширенных частотных характеристик / Б.И. Марголис, Г.А. Мансур // Программные продукты и системы. 2018. №3. С. 636-639.

2. Мансур, Г.А. Программы моделирования температурных полей в изделиях цилиндрической формы / Б.И. Марголис, Г.А. Мансур // Программные продукты и системы. 2019. Т.32. №2. С. 313-317.

3. Мансур, Г.А. Программы моделирования и идентификации температурных полей в сортовых стеклоизделиях/Б.И. Марголис, Г.А. Мансур// Программные продукты и системы. 2020. Т.33. №1. С. 124-127.

4. Margolis B.I., Mansoor G.A. Engineering calculations of the glass annealing process // 2020 5th International Conference of Information Technologies in Engineering Education. Inforino 2020 – Proceedings. 5. 2020. С. 9111696. DOI 10.1109 / Inforino 48376.2020. 9111696.

Прочие статьи, доклады и тезисы докладов на конференциях:

5. Мансур, Г.А. Аппроксимация переходных характеристик объектов регулирования в среде Matlab / Б.И. Марголис, Г.А. Мансур // Сб. трудов III Всероссийской научно-практ. конф. «Саморазвивающаяся среда технического университета», 8-9 февраля 2018 г. Тверь, Ч.2. ТвГТУ. 2018. С.46–52.

6. Мансур, Г.А. Определение постоянных структурной релаксации при моделировании сортового стекла/ Б.И. Марголис, Г.А. Мансур, Е.А. Камолова// Сборник научных трудов «Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов», Ч.2. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 178-184.

7. Мансур, Г.А. Автоматизированная система моделирования процессов отжига сортового стекла / Б.И. Марголис, Г.А. Мансур // Сборник трудов XXXI международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-32». СПб.: СПбПУ, 2019. Т.8. С. 124-127.