

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Марголис Борис Иосифович

Тверь - 2021

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТЖИГА СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ	12
1.1. Технологический процесс производства сортовых стеклоизделий ...	12
1.2. Технологический процесс отжига сортовых стеклоизделий	18
1.3. Современные методы моделирования технологического процесса отжига стеклоизделий	24
1.4. Структура программного комплекса для моделирования процесса отжига стеклоизделий	28
1.5. Расчет свойств стекла по его химическому составу	35
1.6. Обработка данных дилатометрических измерений	37
1.7. Расчет температурной зависимости вязкости стекла по его химическому составу	39
1.8. Расчет постоянных структурной релаксации	44
1.9. Выводы	48
Глава 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СОРТОВЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЯХ ПРИ ИХ ОТЖИГЕ	49
2.1. Использование аналитических методов для моделирования температурных полей в цилиндрических изделиях	51
2.2. Численные методы расчета несимметричного конвективно- радиационного теплообмена в цилиндрических телах	52
2.3. Метод конечных элементов для расчета несимметричного конвективно- радиационного теплообмена в сортовых стеклоизделиях	56
2.4. Применение разработанных математических моделей температурного поля к процессу отжига сортовых стеклоизделий	65
2.5. Выводы	75

Глава 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛАКСАЦИИ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЙ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ОТЖИГА СОРТОВЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ	77
3.1. Математическая модель расчета релаксации структуры и поля напряжений в стеклоизделиях цилиндрической формы	78
3.2. Моделирование процесса отжига сортовых стеклоизделий	80
3.3. Методика расчета оптимального режима отжига сортовых стеклоизделий	84
3.4. Выводы	89
Глава 4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТЖИГА СОРТОВЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ	92
4.1. Технологический процесс отжига стеклоизделий как объект управления	92
4.2. Структура автоматизированной системы управления процессом отжига сортовых стеклоизделий	95
4.3. Реализация автоматизированной системы управления процессом отжига сортовых стеклоизделий	99
4.4. Выводы	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	109
ПРИЛОЖЕНИЕ	123

ВВЕДЕНИЕ

По технологическому профилю и особенностям организационной производственной деятельности стекольная промышленность относится к категории, связанной со строительством и производством исходных материалов для других видов промышленности. Процесс производства стекла состоит из следующих основных стадий: приготовление шихты, варка стекломассы, формование и отжиг стеклоизделий, контроль качества, упаковка и доставка изделий потребителю [1, 2, 21]. Стекло относится к универсальным и самым широко применимым материалам в самых различных сферах человеческой деятельности. В первую очередь, это строительство, где современная архитектура использует стеклоизделия в качестве прочного строительного материала после бетона, камня и металла, применяя их помимо остекления световых проемов и дверей в качестве художественного оформления различных интерьеров. Во-вторых, это медицинская и пищевая промышленность, где другие материалы являются неконкурентоспособными при создании технологических линий по производству или транспортировке медицинских препаратов и пищевых продуктов [3]. Потребность в сортовых стеклоизделиях (стакан, колба) с каждым годом растет. В технологическом процессе производства стекла одной из важных стадий является отжиг стеклоизделий, имеющих различные свойства, размеры, форму, который по энергоемкости стоит на втором месте после варки стекломассы. В печах отжига стеклоизделий часто установлены режимы с большим запасом и не являющиеся экономичными. Снижение времени (продолжительности) отжига выгодно с точки зрения энергетических затрат, но ведет к увеличению временных и остаточных напряжений в стеклоизделиях, что неблагоприятно сказывается на прочности изделий и может повлечь их разрушение. Увеличение времени отжига положительно сказывается на потребительских свойствах продукции, но ведет к росту энергозатрат и снижению

производительности [4, 5]. Поэтому учет требований к качеству сортовых стеклоизделий позволит снизить себестоимость выпускаемой продукции за счет выбора оптимального режима отжига.

Процесс отжига стекла состоит из стадий: нагрева изделия до температуры отжига; изотермической выдержки при температуре отжига, в конце которой температуры в изделии выравниваются, а временные напряжения полностью релаксируют; медленного охлаждения до нижней температуры отжига со скоростью, обеспечивающей заданный уровень остаточных напряжений; быстрого охлаждения от нижней температуры отжига до комнатной температуры, при котором временные напряжения не должны превысить предел прочности стекла с запасом [6-8, 21].

Режим отжига определяется свойствами, формой, размерами и технологией изготовления стеклоизделий. Параметры этапов отжига (начальная температура, скорость изменения температуры, продолжительность) определяются на основе закономерностей возникновения, распределения и релаксации напряжений в стеклоизделиях. В процессе производства сортовое стекло не сразу попадает в печь отжига, так как доставка его от формующей машины занимает некоторое время [9]. На входе в печь имеют место температурные градиенты по толщине и высоте изделия, неравновесное состояние стеклообразующего вещества [10]. Поэтому необходимо производить расчет релаксации структуры, полей температур и напряжений не только в печи отжига, но и в доотжиговой период (от формующей машины до печи).

Большой вклад в изучение проблемы и решение задач по расчету режимов отжига внесли Адамс и Вильямсон [13], на их классических трудах базируется большинство существующих приближенных моделей отжига стеклоизделий. Мазуриным О.В. и Лалыкиным Н.В. [5, 12] на основе релаксационно-кинетической теории стеклования Тула А.К. и Нарайанасвами О.С. [11] разработана методика построения моделей технологического

процесса отжига листового стекла, позволяющая рассчитывать режимы отжига и снижать остаточные напряжения в листовом стекле. К настоящему времени работами Р. Гардона, О.В. Мазурина, Н.В. Лалыкина, Р.З. Фридкина, А.И. Шутова, В.А. Кузнецова [5, 12, 14, 15, 16] сформирован мощный математический аппарат по расчету режимов отжига листового стекла, причем обычно для решения симметричной задачи. При переходе к стеклоизделиям с цилиндрической геометрической формой расчет значительно усложняется. При моделировании 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 [17-21, 146, 147]), ориентированные на расчет температур и напряжений в изделиях сложной формы (трубах, стеклоблоках, стаканах, бутылках).

Однако при производстве сортового стекла появляется ряд актуальных задач, связанных с отжигом стеклоизделий сложной конфигурации. Прежде всего, это разработка универсальных методик расчета оптимальных режимов термообработки сортовых стеклоизделий в автоматизированном диалоговом режиме. Для этого необходимо располагать динамическими моделями процесса отжига, позволяющими преодолеть основные математические трудности при решении краевых задач. После синтеза режимов термообработки стеклоизделий цилиндрической формы возникает задача их точной реализации, что требует наличия современных регулирующих устройств в системах автоматизации технологического процесса отжига [82].

Для управления процессом отжига сортового стекла необходимо моделировать поля температур и напряжений в процессе отжига, то есть воспроизводить тепловую историю стеклоизделия и закономерности релаксации напряжений в нем по химическому составу, геометрическим размерам изделия, скорости его движения, экспериментальной зависимости вязкости или относительного удлинения образца стекла от температуры (дилатометрической кривой). Разработка автоматизированной системы расчета

делает возможным решение задачи нахождения оптимального режима, обеспечивающего минимальные энергозатраты или требуемое качество изделий при отжиге.

При моделировании температурных полей в сортовых стеклоизделиях необходимо решать дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах. Большую роль для точного моделирования температурных распределений в изделиях играет корректный учет начальных и граничных условий, которые в большинстве стадий технологического процесса термообработки имеют сложный характер. Так, начальные условия обычно неравномерны, граничные условия соответствуют несимметричному конвективно-радиационному теплообмену поверхностей изделия с окружающей средой и ограждающими поверхностями (нагревательными элементами) технологического оборудования [22]. В большинстве работ вышеупомянутых авторов при моделировании распределений температур и напряжений в сортовых стеклоизделиях не учитывается несимметричность условий теплообмена для поверхностей цилиндрического изделия, зависимость теплофизических свойств стекла от температуры, радиационный теплоперенос, необходимость расчетов с момента формования до входа изделия в печь отжига. Недостатком также является то, что значения параметров конвективно-радиационного теплообмена обычно берутся из технологических соображений. В данной работе для проверки адекватности расчетов производится идентификация параметров теплообмена для обеспечения минимального рассогласования расчетных и экспериментальных температур [23].

При разработке моделей расчета полей температур в цилиндрических изделиях в отличие от работ [19-22], использующих явные численные схемы расчета, для повышения скорости и снижения трудоемкости разработки программного обеспечения был выбран метод конечных элементов (МКЭ) решения дифференциального уравнения теплопроводности в

пространственных цилиндрических координатах. В связи с этим использовалась среда математического программирования Matlab, имеющая решатель многомерных краевых задач методом конечных элементов *parabolic* [24-27]. Наличие в Matlab наряду с *parabolic* функции *fmincon* нелинейной оптимизации функции нескольких переменных с ограничениями типа неравенств и равенств позволяет эффективно использовать эту среду программирования для решения задач идентификации и оптимизации [31]. Кроме того, Matlab предоставляет возможность разработки графического интерфейса пользователя (GUI), визуализирующего работу автоматизированной системы расчета при вычислении температурно-временных зависимостей свойств стекла и решении вышеуказанных задач.

Для расчета структуры стеклообразующего вещества и напряжений в стекле широко применяются релаксационная модель Тула-Нарайанасвами [28, 29] и алгоритм Ленинградского института химии силикатов [30]. В данной работе в связи с использованием МКЭ для расчета температурного поля осуществляется переход от точек триангуляции выбранной геометрической области в *parabolic* [31] к двумерной сетке по радиусу и высоте изделия. Кроме того, производится разбиение стеклоизделия цилиндрической формы на несколько расчетных тел с учетом наличия в нем боковой и донной поверхностей. В результате методика расчета напряжений изменяется по сравнению с вышеуказанными алгоритмами.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности процесса отжига сортовых стеклоизделий за счет достижения режима, обеспечивающего заданный уровень остаточных напряжений в них.

На основе анализа технологического процесса отжига сортового стекла сформулированы следующие **задачи работы**:

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

2. Определение температурных зависимостей физико-химических свойств и релаксационных постоянных стекла при его отжиге.

3. Разработка математических моделей полей температур и напряжений в сортовых стеклоизделиях.

4. Разработка методики определения оптимального по остаточным напряжениям режима отжига сортового стекла.

5. Создание программного комплекса для автоматизированного расчета режимов отжига сортовых стеклоизделий.

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

Объектом исследования является 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 задач работы используются методы анализа систем управления, математической физики, теории теплообмена, теории температурных напряжений, математического моделирования, разработки программного обеспечения, теории алгоритмов, численной оптимизации функции одной и нескольких переменных.

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 позволяет моделировать поля температур и напряжений в стеклоизделиях цилиндрической формы. Рассчитан обеспечивающий заданные остаточные напряжения режим отжига сортового стекла на ОАО Спировский стеклозавод «Индустрия». Проведены опытно-промышленные испытания, демонстрирующие работоспособность комплекса для расчета режимов отжига на Клинском АО «Медстекло», что подтверждает приведенный в приложении к работе акт. Разработанный комплекс программ используется в учебном процессе кафедры «Автоматизация технологических процессов» ТвГТУ при проведении занятий по дисциплине «Системы управления объектами с распределёнными параметрами» в рамках магистерской подготовки студентов направления 27.04.04 «Управление в технических системах».

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.

Получено хорошее совпадение 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.

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.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТЖИГА СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

1.1 Технологический процесс производства сортовых стеклоизделий

Стекло – один из самых древних материалов, производство которых освоил человек. Еще задолго до того, как люди научились обрабатывать железо, уже изготавливались украшения из расплавленного песка. Стекло обладает хорошими термо- и звукоизоляционными свойствами, оно устойчиво к перепадам температур [102]. Стекло относится к универсальным материалам, получающее широкое применение в самых различных сферах человеческой деятельности. Из него создается огромное количество вещей, без которых нельзя представить современную жизнь: окна, посуда, декор, мебель, зеркала, вазы и множество других. Стекло – это переохлажденные жидкие минеральные расплавы кремнезема, сульфата натрия и других компонентов. Раньше стекло получали плавлением песка (кварца). При производстве стекла используются натуральные компоненты, которые могут быть запущены в повторную переработку и не оставляют отходов. Стекло находится в нескольких агрегатных состояниях на разных стадиях производства. Это аморфное тело, состоящее из соды, кварцевого песка, доломита, известняка и различных добавок. Оно получается методом расплава и в твердом состоянии теряет свойства кристаллического вещества [98].

Все сырьевые материалы, применяемые для варки стекла, в зависимости от их назначения можно разделить на основные и вспомогательные. К основным относятся материалы, с которыми в состав стекольной шихты вводятся для данного вида стекла кислотные и основные оксиды. Вспомогательные сырьевые материалы вводят в состав шихты для изменения тех или иных свойств стекломассы. К ним относятся вещества, создающие восстановительную или окислительную среду в шихте, расплаве, которые ускоряют стеклообразование и обесцвечивание стекломассы, а также окрашивают стекло [2, 8, 100].

За последние десять лет в производстве и потреблении листового и сортового стекла произошли существенные изменения. Изменилось само отношение к этому продукту. Если десять лет назад основным его назначением было остекление деревянных рам в жилищном строительстве и розничная продажа, то сейчас основная часть стекла [100] поступает на вторичную переработку, такую как нанесение покрытий, закалка, изготовление многослойных стекол и стеклопакетов. Листовое стекло стало базовым продуктом для производства конечной продукции. Хорошо известно, что низкая прочность является основным недостатком стекла. Для того чтобы повысить его стойкость к механическому воздействию, применяют специальные виды обработки: полировка, закалка, покрытие полимерными соединениями, комбинирование листов и отжиг [102].

Из стекла изготавливают различные изделия, которые классифицируют по различным признакам. По назначению изделия из стекла подразделяются на технические, строительные и бытовые. К техническому стеклу относятся оптическое, химико-лабораторное, медицинское, электротехническое, электродное, транспортное, приборное, защитное, тепло-, звуко- и электроизоляционное, светотехническое, кусковое, а также трубы, технические зеркала, фотостекло, стеклоткани и стеклопластики, фильтры, стеклоабразивы и различные стеклянные детали машин и установок. Это наиболее многочисленный класс изделий из стекла [2].

В класс строительного стекла входят изделия из стекла, используемые в строительстве: оконное, витринное, профильное, армированное, узорчатое, облицовочное, пеностекло, мозаика, стеклопакеты, стеклоблоки, витражи, архитектурные, различные строительные детали, строительные стеклопластики и декоративные отделочные стеклоткани.

Бытовое стекло – посудное и очковое, стеклотара, зеркала бытовые, эмали, глазури, украшения и имитации. К посудному стеклу относится сортовое стекло с художественной обработкой или без (стаканы, бокалы,

рюмки, вазы, графины, салатники, сахарницы, пудреницы, термосы). Именно эти изделия чаще всего шлифуют и полируют.

Основными производимыми типами стекла являются: листовое стекло, тарное, сортовое, стекловолокно и специальное стекло. В таблице 1.1 представлены основные подотрасли производства стекла.

Таблица 1.1

Подотрасли производства стекла

Подотрасль	Производимая продукция
Листовое стекло	Листовое, флоат-стекло для строительства
Тарное стекло	Стекланные бутылки, банки, флаконы
Сортовое стекло	Столовая посуда, стаканы, колбы
Стекловолокно	Непрерывное стекловолокно
Специальное стекло	Техническое, медицинское, химико-лабораторное

Сектор сортового стекла является одним из небольших секторов стекольной промышленности (приблизительно 4% от общего объёма производства) [2, 99]. Этот сектор охватывает изготовление стеклянной столовой посуды, сосудов для вина и напитков.

Изготовление сортового стекла получило очень широкое распространение по всей России, но в настоящее время многие заводы закрыты или работают на малой мощности; общий объём производимой продукции составляет приблизительно 0,5 млн. т. стеклоизделий в год. Сектор стеклянной посуды отличается большим разнообразием продукции и реализуемых технологических процессов. Производство сортового стекла является одним из наиболее диверсифицированных секторов в стекольной промышленности и охватывает широкий диапазон продукции, а также технологических процессов, начиная от сложных ручных операций по выпуску отдельных изделий из декоративного хрусталя и заканчивая большими объёмами продукции с использованием высокомеханизированных методов для производства недорогих потребительских товаров массового спроса. Большая

часть стеклянной посуды производится из натрий-кальций-силикатного стекла, имеющего состав, подобный составу тарного стекла, но более сложный, что обусловлено особыми требованиями к качеству продукции и более разнообразными процессами формования.

Технология производства стеклянных изделий представляет собой несколько последовательных процессов: подготовка сырья, составление шихты, варка стекломассы, формирование и отжиг изделий, контроль качества, упаковка, доставка изделий потребителю [1, 2].

Сырьевые материалы и привозной стеклобой, поступающие по железной дороге и автотранспортом, разгружаются на склад и в приемные бункера составного цеха. Подготовка сырья представляет собой очистку песка и других исходных компонентов от нежелательных примесей, дальнейшее измельчение и просеивание материалов. В составном цехе сырьевые материалы проходят соответствующую обработку, и по заданному рецепту готовится шихта на весовой линии. Составление шихты – это отвешивание компонентов в определенных пропорциях и их перемешивание с целью получения однородной массы. Сырье подается в расходные бункера весовой линии, происходит дозирование компонентов шихты весовыми дозаторами, смешивание компонентов шихты в смесителях, подготовка стеклобоя, смешивание стеклобоя с шихтой, хранение шихты со стеклобоем в бункере запаса.

Готовая смесь шихты и стеклобоя из составного цеха подается с помощью системы транспортеров в бункера загрузчиков шихты, откуда поступает в ванную стекловаренную печь. Варка стекломассы происходит в горшковых печах или ваннах при температурах от 1200 до 1550 °С. В течение этого процесса происходят достаточно сложные физико-химические реакции и взаимодействие различных компонентов шихты. Процесс варки стекла состоит из следующих стадий:

1. Зоны силикатобразования, в которой происходит плавление шихты и протекание реакций в твердом состоянии при температуре до 900°C.
2. Зоны стеклообразования, где шихта полностью расплавляется и происходят реакции в жидком состоянии при температуре до 1300°C.
3. Дегазации (температура до 1450°C).
4. Гомогенизации, заключающейся в конвективном перемешивании стекломассы при температуре до 1400° С.
5. Зон студки и выработки.

Сваренная стекломасса порциями, соответствующими массе вырабатываемых изделий, подается непосредственно из печи капельным питателем на стеклоформирующие машины ftL 1110-2-1. Отформованные сортовые стеклоизделия от стеклоформирующего автомата транспортером доставляются к печи отжига. С целью повышения эксплуатационной надежности стеклоизделий и улучшения их внешнего вида до печи отжига могут наноситься упрочняющие покрытия.

Стекла относятся к полупрозрачным материалам, перенос тепловой энергии в которых осуществляется по двум механизмам: кондуктивному (перенос энергии только при контакте микрочастиц) и радиационному (испускание и поглощение атомами тела лучистой энергии) [12]. Теплообмен на поверхности стеклоизделий зависит от температурного поля стеклоизделий, а интенсивность взаимодействия с окружающей его средой определяется коэффициентом теплоотдачи, который зависит от интенсивности циркуляции газа у поверхности [100, 147].

В процессе охлаждения после формования стекло становится хрупким при температуре 550-570 °С. При охлаждении оно может разрушаться из-за значительных термоупругих напряжений, неравномерного остывания поверхностных и внутренних слоев. Термоупругие напряжения в стекле могут быть временными, исчезающими при выравнивании температуры изделия, и остаточными, сохраняющимися в стекле при относительно быстром переходе

его из пластического состояния в хрупкое [15,16]. Чем меньше толщина изделий и скорость их охлаждения в период такого перехода, тем меньше остаточные напряжения.

Поэтому следующей стадией технологического процесса производства стеклоизделий является их отжиг – дополнительная термическая обработка изделий в печах отжига, необходимая для уменьшения остаточных напряжений в стекле. Рассчитанный режим отжига должен обеспечить снятие внутренних напряжений до значений, гарантирующих сохранность изделий в процессе дальнейшей обработки и эксплуатации.

После отжига и нанесения защитных покрытий стеклоизделия подвергаются визуальному и автоматическому контролю, измерению геометрических параметров, испытаниям на давление, термостойкость, качество отжига. При изготовлении сортового стекла на стаканах не допускаются прилипы стекла, сквозные посечки, сколы, острые швы, инородные включения, имеющие вокруг себя трещины и посечки, пузыри, шлиры и свили, резко выраженные и сопровождаемые внутренними напряжениями. Толщина стенок и дна изделия регламентируются соответствующим ГОСТ 24980.

Основным параметром, определяющим качество отжига, является величина остаточных напряжений в изделии, которая определяется с помощью оптического полярископа-поляриметра ПКС-250М [101]. Удельная разность хода лучей при контроле отжига не должна быть более 100 нм/см. При проверке стеклоизделия на качество отжига не допускаются в поле зрения полярископа цвета: оранжевый, светло-желтый, желтый, белый, голубовато-зеленый, зеленый, желто-зеленый.

Годные изделия упаковывают в паллеты и отправляют на склад готовой продукции или непосредственно транспортными средствами потребителю. Схема технологического процесса производства сортового стекла на ООО «Спировский стекольный завод» изображена на рис. 1.1.

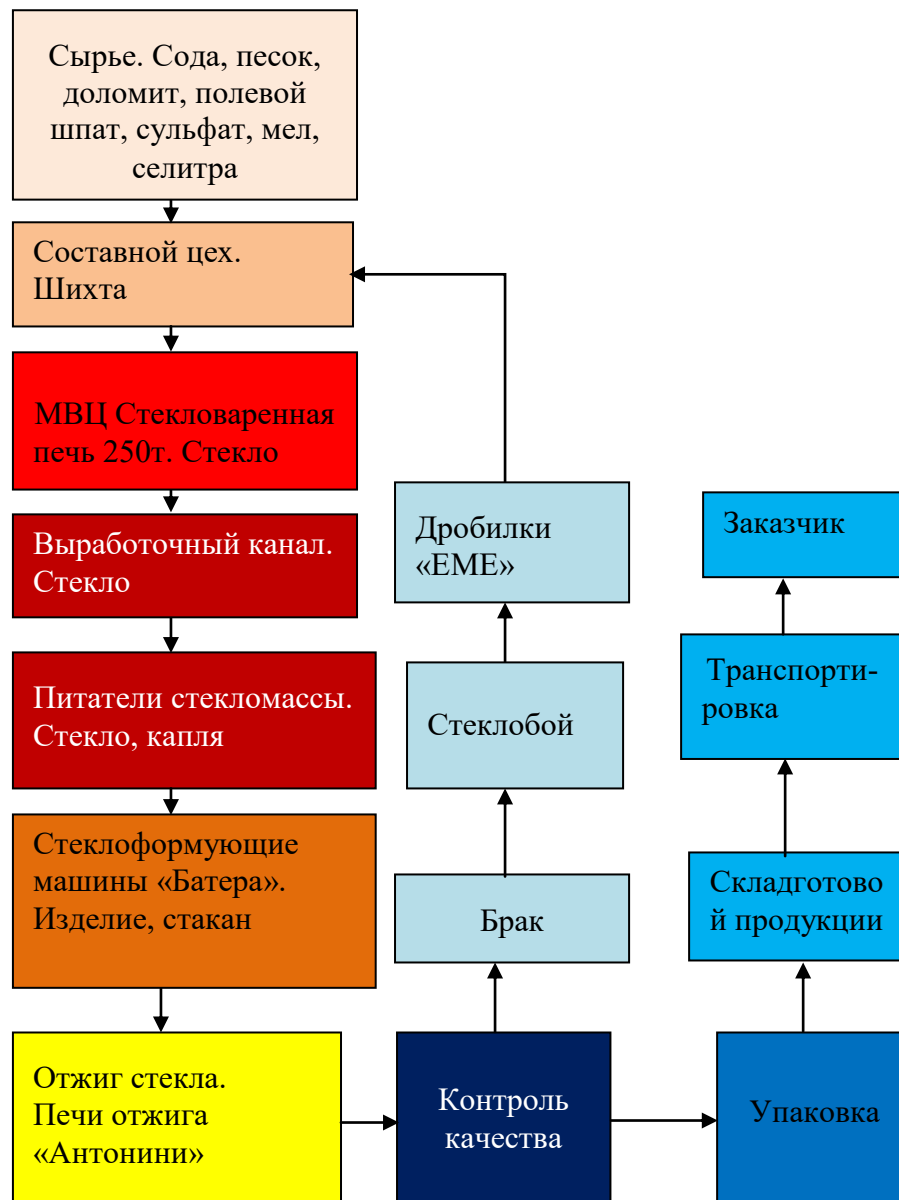


Рис.1.1. Схема технологического процесса производства сортового стекла

1.2. Технологический процесс отжига сортовых стеклоизделий

Как было отмечено в разделе 1.1, после формования в стекле при охлаждении могут возникнуть значительные временные термоупругие напряжения, превосходящие предел прочности стекла на растяжение. Неравномерное остывание поверхностных и внутренних слоев также может привести к значительным остаточным напряжениям, в результате чего готовое изделие может разрушиться даже от слабого механического воздействия или

незначительного перепада температур. Поэтому необходимой и основной стадией процесса производства стеклоизделий является их отжиг в печах, позволяющий произвести контролируемое нагревание и охлаждение и уменьшить величину внутренних временных и остаточных напряжений [15].

Под отжигом стекла понимают процесс медленного охлаждения стекла с целью устранения или уменьшения остаточных напряжений. При этом происходит восстановление кристаллической решетки, повышается однородность обрабатываемого состава, облегчается последующая механическая обработка. Процесс осуществляется в печи с контролируемой температурой. Отжиг стекла имеет большое значение для его долговечности и является завершающей технологической операцией, поэтому брак на этой стадии наиболее ощутим для производителя, так как теряется практически готовая продукция.

Процесс отжига стеклоизделий происходит в печах [6, 12] и заключается в теплообмене стеклоизделий с окружающей газовой средой. Конструктивно печь состоит из нескольких зон, отделенных друг от друга специальными перегородками из огнеупорных материалов, из варочного бассейна, протока, выработочного бассейна, горелок, регенераторов и систем: дымоудаления, отопления, вентиляции охлаждения бассейна и воздухоподачи на горение топлива. Для увеличения рентабельности между соседними отделами предусмотрены отверстия, благодаря которым можно регулировать подачу горячего газа между зонами. Холодный воздух для отжига поступает по приточной вентиляции. Нагревательные элементы устанавливаются над конвейером и под ним. Это позволяет наиболее эффективно передавать тепло стекольной продукции.

Печь для отжига стекла, в зависимости от источника энергии, может быть газовой, электрической и комбинированной (газоэлектрической). В газовой печи для поднятия температуры сжигают твердое или газообразное топливо. Им может служить любое горючее, но чаще всего используют

природный газ. Главным преимуществом электрической печи отжига стеклоизделий является высокий коэффициент полезного действия, который может достигать 50%. В таких печах присутствуют нагревательные элементы, питающиеся от электросети. В комбинированных печах используются оба описанных выше источника тепла.

Печи отличаются размерами, мощностью и возможностью управления процессом термообработки согласно заданным условиям, обеспечивая необходимый прогрев, выдержку и режим остывания производимых стеклоизделий. С точки зрения теории теплопереноса в газовых печах присутствует принудительная конвекция и радиационный теплообмен между поверхностями изделия и печи отжига. В электрических печах обычно имеет место естественный конвективный теплообмен и теплообмен излучением между нагревательными элементами и изделием.

Для установления режима отжига стеклоизделий определяют температурный интервал, в котором могут возникнуть или исчезнуть остаточные напряжения. Этот интервал характеризуется двумя критическими температурами отжига: верхней и нижней. Верхняя температура отжига теоретически соответствует границе хрупкого состояния стекла, и, следовательно, ее можно определить по кривой теплового расширения, по которой находят физико-химические параметры стекла данного химического состава. Практически из-за возможной деформации изделия температуру отжига в печах устанавливают на 20-30 °С ниже верхней температуры отжига. При верхней температуре отжига 90 % напряжений релаксирует за 5 минут, а при нижней температуре отжига – за 500 минут [21, 22, 146].

Процесс отжига стекла в печах состоит из четырех этапов [12]. На первом этапе в зависимости от особенностей формования и доотжигового периода происходит либо нагрев, либо охлаждение до температуры отжига. Температура отжига приблизительно соответствует вязкости 10^{12} Па·с, и

стекло еще слишком твердое для деформаций, но достаточно мягкое для снятия (релаксации) напряжений в течение нескольких минут.

На втором этапе происходит выдержка при температуре отжига, при которой температура всех слоев стекла становится одинаковой. Время выдержки, необходимое на проведения этого этапа, варьируется в зависимости от типа стекла и его максимальной толщины. В ходе этапа выдержки почти все временные напряжения в изделии релаксируют. Температура отжига для разных составов стекла может изменяться от 520 до 600 °С.

Третий этап – зона ответственного (медленного) охлаждения от температуры отжига до нижней температуры отжига, соответствующей вязкости $10^{14,5}$ Па·с. Нижняя температура отжига зависит от состава, свойств и структуры стекла, находясь в диапазоне от 380 до 480 °С. Небольшая скорость охлаждения до нее не допускает возникновения новых остаточных напряжений, превышающих заданные.

На четвертом этапе изделие быстро охлаждают до комнатной температуры со скоростью, ограниченной лишь прочностью стекла. Известно, что прочность стекла на растяжение приблизительно на порядок ниже его прочности на сжатие. Поэтому на этапе быстрого охлаждения скорость охлаждения не должна вызывать временные напряжения, превышающие пределы прочности стекла на растяжение и сжатие с многократным запасом. Величина остаточных напряжений на этом этапе практически не изменяется.

После отжига материал может быть нарезан по размеру, пробурен или отполирован. Температура, скорость охлаждения и продолжительность каждого этапа зависят от вида изделия, его конфигурации, химического состава. Поэтому для каждого ассортимента стекольной продукции устанавливается свой режим отжига, который необходимо рекомендовать (при проектировании) или рассчитать (при моделировании).

В настоящее время научные разработки, направленные на интенсификацию процесса отжига за счет сочетания конвективного и

радиационного теплообмена, реже находят реальное воплощение в виде промышленного теплотехнического оборудования, поэтому для отжига стеклоизделий в промышленности чаще применяются конвейерные печи непрерывного действия с конвективным способом организации теплообмена [102, 146]. На ООО «Спировский стекольный завод» в цехе отжига сортовых изделий применяется конвейерная печь "Antonini", оборудованная системами газового отопления и регуляции вентиляционных потоков. Печь делится на 10 зон, из которых 7 являются регулируемыи. В каждой зоне ведётся строгий температурный контроль и автоматическое поддержание заданного режима, т.е. выдерживается кривая отжига. Основные технические характеристики печи отжига приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Характеристики печи отжига «L07W 300|40|25»

№ п.п.	Наименование показателей	Величина
1.	Производительность печи отжига, т/сут	30-60
2.	Длина печи, м	24
3.	Длина регулируемой части, м	16,8
4.	Длина нерегулируемой части, м	7,2
5.	Высота (полезная) конвейера, м	0,4
6.	Ширина ленты печи, м	2,6
7.	Скорость конвейера, м/мин	0,27
8.	Расстояние между изделиями, см	12
9.	Расстояние между рядами изделий, см	5
10.	Мощность, кВт	100
11.	Расход топлива, ккал/час	420

В каждой зоне отжига температура контролируется и регулируется при помощи автоматической системы, состоящей из термопары, цифровых регуляторов, которые контролируют горелки и охлаждающие клапана. Регулятор, управляющий всеми элементами воздействия (горелки, вентиляторы, заслонки) приводит температуру в зоне к значению уставки согласно режимной карте отжига. Необходимое повышение идет за счёт сжигания газа в специализированных горелках и снижения подачи в печь внешнего воздуха (работа заслонок, вытяжного вентилятора). Все контуры регулирования температуры связаны между собой, и процесс идёт в автоматическом режиме.

Химический состав и геометрические размеры сортового стекла, отжигаемого на Спировском стеклозаводе «Индустрия», представлены в таблицах 1.3 и 1.4 соответственно, а его кривая отжига приведена на рис. 1.2.

Таблица 1.3

Химический состав сортового стекла

Окислы	Массовое содержание, %
SiO ₂	72,8
Al ₂ O ₃	1,3
Na ₂ O	13,3
CaO	9,0
MgO	3,0
Fe ₂ O ₃	0,1
SO ₃	0,5

Таблица 1.4

Геометрические размеры стакана

Наружный диаметр, м	0,072
Внутренний диаметр, м	0.066
Высота, м	0,108
Толщина доньшка, м	0,006

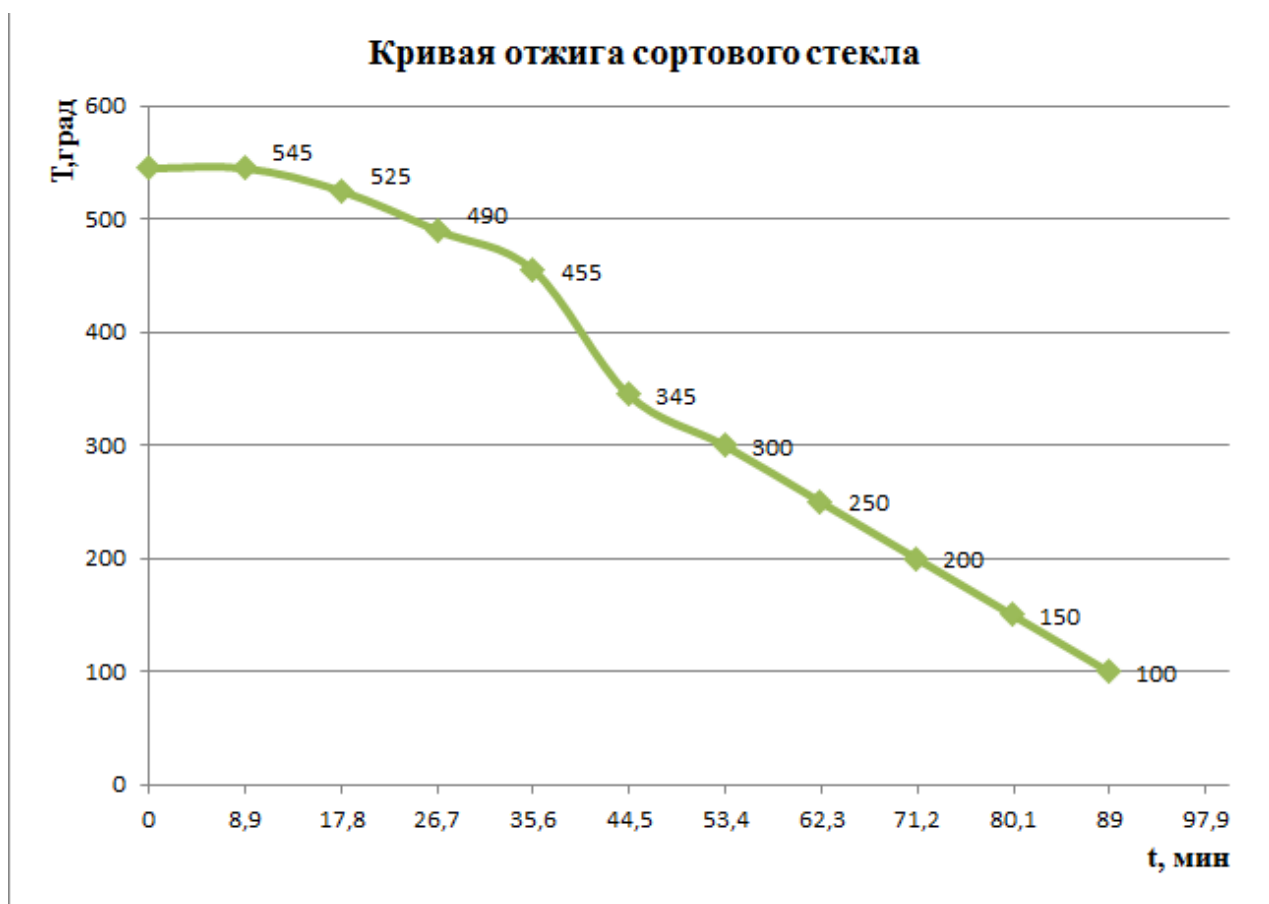


Рис. 1.2. Кривая отжига сортового стекла

1.3. Современные методы моделирования технологического процесса отжига стеклоизделий

Большой вклад в изучение проблемы и решение задач данного типа внесли Адамс и Вильямсон [13], на их трудах базируется большинство существующих моделей отжига стеклоизделий. Однако разработанная ими модель не позволяет описывать динамику полей напряжений, поскольку представляет собой систему алгебраических уравнений, связывающих максимальные механические напряжения, скорость охлаждения и толщину изделия [103, 146]. После них появились исследования Б.Е. Гейтвуда и В.Л. Индембома [104, 105]. В их работах была учтена связь между полем температур и напряжениями. Это дало возможность анализа динамики полей напряжений, однако с помощью этой модели не удалось получить остаточные напряжения, по которым определяют качество изделия.

Дальнейшим шагом в решении проблемы стала разработанная Тулом и Нарайанасвами релаксационно-кинетическая теория стеклования [28-30, 106]. С помощью предложенных моделей появилась возможность расчета разнообразных режимов термообработки стекол [107, 108], имеющих различные свойства и параметры теплообмена [109-112]. Мазуриным О.В. и Лалыкиным Н.В. на основе релаксационно-кинетической теории стеклования разработана методика построения моделей [30, 113] технологического процесса отжига листового стекла, позволяющая рассчитывать режимы отжига [5, 87, 114, 147]. Данную модель успешно использовали при расчетах процессов формования [9, 115, 116], отжига [117-119], закалки [120-124] стеклоизделий, напряженного состояния металлизированного стекла [116], спаев стекла с металлами [34]. После этого появился целый ряд работ, расширяющих возможности расчета режимов охлаждения листового стекла при различных условиях теплообмена [5, 87, 125-131].

Таким образом, большинство моделей процесса отжига относятся к простейшей геометрической форме стекла – листовому, причем обычно для решения симметричной задачи. При переходе к стеклоизделиям с более сложной геометрической формой расчет чрезвычайно усложняется до полной его невозможности в связи с непредсказуемостью точностных и однопорядковых размеров изделий, их распределения в печи отжига [132, 133, 147]. В то же время появились исследования по отжигу тарного стекла и стеклоблоков [134, 135], которые больше носили инженерный характер, поскольку опирались не на аналитические методы оптимизации (вариационное исчисление [135], динамическое программирование Беллмана [136], принцип максимума Понтрягина [137]). Кроме того, математическая модель отжига не удовлетворяла по форме условиям постановки задачи оптимизации указанными методами [146]. Появились попытки разработки алгоритмов расчета температурного поля и напряжений для относительно простого случая стеклянной трубы из расплава [19, 138, 139], для стеклоблоков [117, 140, 141],

однако в этих алгоритмах не учитываются краевые эффекты стеклоизделий (преломление и отражение).

Для математического описания технологического процесса отжига полых изделий существует множество подходов [19-22, 142-145]. Основным недостатком моделей, предложенных в работах [142, 144], является то, что они построены для симметрично охлаждаемой стеклянной пластины такой же полутолщины, как толщина стенки полого изделия, и предлагается методика расчета эквивалентной толщины стеклоизделия. Такие модели не могут быть использованы для решения задачи выбора режимов отжига, снижающих энергозатраты, так как обладают низкой точностью и не учитывают теплообмен между внутренней воздушной полостью и стенками, влияние геометрической формы изделия на характер полей температур и напряжений, тепловое взаимодействия между изделиями, установленными на транспортной сетке печи отжига [146]. Попытки устранения этих недостатков появились в работах В.Г. Рубанова, А.Г. Филатова [19, 20]. Исследования были продолжены в работах Б.И. Марголиса [21, 22], А.А. Кузенко [146], Т.И. Тихомировой [147], развитием которых является данная диссертация.

Решение задачи в данной работе рассматривается с применением методов системного анализа, позволяющих учесть основные особенности моделирования технологического процесса отжига сортовых стеклоизделий:

- 1) Различный химический состав стекла, влияющий на его теплофизические, механические, оптические, вязкостные и релаксационные свойства.
- 2) Геометрическую форму и размеры отжигаемых стеклоизделий.
- 3) Необходимость расчета параметров теплового режима изделий на этапах формования и до печи отжига для корректного определения временных напряжений, начиная с равновесного состояния стеклообразующего вещества.

4) Необходимость идентификации параметров конвективно-радиационного теплообмена изделия [76] в зависимости от источника энергии печи отжига (газовая, электрическая, комбинированная).

Итак, в отличие от предшествующих работ учитываются 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. Кроме того, в предложенной работе все расчеты сведены в единый программный комплекс – автоматизированную систему расчета отжига стеклоизделий цилиндрической формы «АСРЦ».

1.4. Структура программного комплекса для моделирования процесса отжига стеклоизделий

Во введении была отмечена основная практическая цель данной научной работы: создание комплекса программ, позволяющего для стекла, имеющего заданный химический состав, геометрическую форму и размеры, рассчитать и реализовать оптимальный с точки зрения энергозатрат или качества стеклоизделия режим отжига. В связи с рассмотренными во введении недостатками существующих моделей важнейшей частью работы является разработка математических моделей расчета полей температур и напряжений в сортовых стеклоизделиях.

Рассмотрим проблему создания программного комплекса с точки зрения системного анализа. Методы системного анализа применяются с целью принятия решений в процессе исследования, разработки и создания сложных систем в условиях наличия большого количества информации различной природы [32]. Системный анализ рассматривает изучаемое понятие как систему – совокупность элементов, связанных друг с другом и образующих определенную целостность, причем система обладает свойствами, которые отсутствуют у отдельных составляющих ее частей [33]. С учетом того, что было сказано ранее, разрабатываемый программный комплекс целесообразно назвать **автоматизированной системой расчета режимов отжига стеклоизделий цилиндрической формы «АСРЦ»**.

При этом необходимо отметить, что наиболее важным из принципов системного подхода является принцип модульного построения, заключающийся в выделении в системе групп элементов, описываемых только своими входами и выходами и обладающих определенной целостностью (модулей), и рассмотрении системы как совокупности этих модулей. Деление системы на модули – удобный и распространенный прием, позволяющий рассматривать в принципе сколь угодно сложные системы, так как характеризуя группу элементов только их входами и выходами, мы получаем

возможность оперировать этой частью системы, не вникая, как связаны и взаимодействуют между собой ее элементы [10, 21]. Для определения структуры «АСРЦ» используем принцип модульного построения.

Для моделирования полей температур как аналитическими, так и численными методами необходимо знание таких теплофизических свойств стекла, как коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a , для нахождения которого обычно используется формула $a = \lambda/\rho C$, так что понадобятся значения плотности ρ и удельной теплоемкости C стекла, без которых невозможно также решение задачи с учетом радиационного теплопереноса [82].

Для моделирования полей напряжений нужно иметь значения таких механических свойств стекла, как модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ , а также фотоупругой постоянной (постоянной Брюстера или оптического коэффициента напряжений) B для перехода от измерения напряжений в стандартной размерности СИ (Н/м^2) к принятой в стекольной промышленности (нм/см) [34-36].

Итак, очевидно, что для моделирования полей температур и напряжений в стеклоизделиях необходимо уметь рассчитывать значения вышеуказанных теплофизических, механических и оптических свойств стекла при любой температуре. Наиболее удобно определять значения этих свойств по химическому составу стекла, так как он всегда известен, а необходимые процентные содержания окислов поддерживаются при подготовке шихты на стекольном производстве с высокой точностью [21, 82].

В связи с этим первые два модуля системы должны быть следующими:

А. Ввод химического состава стекла.

В. Расчет свойств стекла.

Как уже было отмечено во введении к диссертации, автором предполагается разработка математических моделей расчета полей температур и напряжений для стеклоизделий цилиндрической формы, поэтому

обязательной составляющей системы расчета режимов отжига стеклоизделий должен быть модуль ввода геометрической формы и размеров стеклоизделия:

С. Ввод геометрических размеров стеклоизделия.

Для цилиндрического стакана или колбы необходимыми геометрическими размерами являются высота H , толщина доньшка H_2 , внутренний R_1 и наружный R_2 радиусы.

Для расчета температурно-временных изменений свойств стекла при его термообработке (релаксации структуры стеклообразующего вещества) и последующего расчета напряжений необходимо иметь экспериментальную температурную зависимость хотя бы одного свойства стекла (относительного удлинения или вязкости образца) [82]. Исходя из производственных реалий, следует отметить, что практически на каждом стекольном заводе имеется dilatометр – прибор для снятия dilatометрической кривой (зависимости относительного удлинения образца от температуры), а вискозиметры имеются лишь в научно-исследовательских институтах и организациях. В связи с этим автор работы принял решение осуществлять обработку экспериментальных данных dilatометрических исследований, а расчет вязкости произвести по химическому составу, используя известные из литературы методы Гельгофа и Охотина [21, 37]. Это привело к выделению еще двух модулей системы:

Д. Обработка данных dilatометрических измерений.

Е. Расчет вязкости стекла.

Модуль **Д** позволяет рассчитать мгновенные значения коэффициента температурного расширения (КТР) α_i для любой температуры, а использование относительных удлинений $(\Delta l/l)_{e_i}$ и точек температурной зависимости вязкости $\lg \eta_j$ позволяет определить необходимые для расчета релаксации структуры стекла постоянные: $A, B, T_0; \lg \eta_0, B_A; \lg K_s, b, \lg \tau_0,$

смысл и методика определения которых изложены ниже, в разделе 1.5. Соответствующий модуль будет называться:

Ф. Расчет постоянных структурной релаксации.

Разрабатываемые модели расчета температурных полей в стеклоизделиях можно разделить на две основные группы: “непрозрачные”, не учитывающие радиационного теплопереноса внутри стекла и считающие, что весь радиационный теплообмен происходит на поверхности стеклоизделия; “полупрозрачные”, учитывающие перераспределение тепла для внутренних точек за счет радиационного теплообмена. В связи с более сложным видом “полупрозрачных” моделей и тем, что напряжения для них получаются меньше в связи меньшими температурными градиентами, для цилиндрических тел, имеющих к тому же несколько расчетных поверхностей, рационально использовать “непрозрачные” модели.

После разработки любой математической модели всегда возникает задача проверки ее на адекватность. Для модели расчета температурного поля в стекле это означает возможность определения с ее помощью параметров конвективно-радиационного теплообмена (коэффициентов конвективной теплоотдачи α_1, α_2 и приведенных степеней черноты $\varepsilon_{s_1}, \varepsilon_{s_2}$) путем сравнения экспериментальных и расчетных значений температур точек стеклоизделия (обычно внешних) и уменьшения рассогласования между ними до заданной величины. Оценка адекватности математического моделирования полей температур в стеклоизделиях подробно рассмотрена в работе [23]. Необходимо найти такие значения параметров теплообмена, которые обеспечивают совпадение рассчитанных по предложенным в работе моделям температурного поля значений температур поверхностных точек стеклоизделия с их экспериментальными значениями с некоторой точностью. Воспроизведение с заданной точностью изменения температур поверхностных точек стеклоизделия позволяет адекватно описать температурное распределение и внутри стекла. В связи с различием условий теплообмена при нахождении

стеклоизделия на участке от формующей машины до печи отжига (доотжиговый период) и в ней (период отжига) идентификация должна быть разделена на два модуля:

Г. Доотжиговый период.

Н. Период отжига.

В каждом из этих модулей производится идентификация условий теплообмена и расчет полей температур и напряжений. Для работы этих модулей при расчете отжига сортовых стеклоизделий нужно знать скорости движения транспортирующей ленты до V_f и в печи отжига V_{art} , число зон отжига N_{an} и значения температур уставок термпар по зонам отжига $T_{C_1}, T_{C_2}, T_{H_1}, T_{H_2}$. В печах отжига может иметь место только конвективный, только радиационный или смешанный конвективно-радиационный теплообмен. Конвективный теплообмен с стеклоизделием осуществляется обычно путем передачи или отбора тепла движущимся воздухом, а радиационный теплообмен – путем лучеиспускания от вмонтированных в свод и под печи отжига нагревательных элементов. В связи с этим различают конвективную, радиационную, конвективно-радиационную печи отжига [38-40].

Использующий главную теоретическую часть работы (главы 2, 3) модуль:

И. Расчет полей температур и напряжений в стекле для существующего режима отжига.

Последний модуль системы, реализующий практическую цель работы:

Ж. Расчет оптимального режима отжига.

С учетом вышесказанного для нахождения оптимального с точки зрения заданного качества стеклоизделия режима отжига **задача оптимизации** может быть **формально поставлена** в виде:

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

т.е. необходимо обеспечить минимальное отклонение остаточных напряжений в изделии σ_r от заданного допуска σ_{giv} при ограничении на температуру

окончания нагрева стеклоизделия (температуру отжига) T_{an} на интервале от T_B до T_H . Здесь T_B , T_H – нижняя и верхняя границы интервала отжига; σ_{giv} – заданный уровень остаточных напряжений в стеклоизделии, диктуемый технологическими соображениями (70-100 нм/см для сортового стекла [1, 12, 34]); $|\sigma_r| = \max \{ |\sigma_\infty(j, i, k)|, j = \overline{1, N_j}; i = \overline{0, N}; k = \overline{0, N} \}$ – максимальные по модулю остаточные напряжения в изделии, где j, i, k – номера соответственно поверхностей расчета, точек расчета по горизонтали и вертикали; N_j – число поверхностей расчета; N – число слоев расчета.

Очевидно, что остаточные напряжения в точках изделия являются сложной функцией, зависящей от химического состава и свойств стекла, размеров стеклоизделия, характеристик печи отжига, dilatометрических, вязкостных и релаксационных свойств, температурного поля [21]:

$\sigma_r = F(Q_P; Q_T; Q_G; Q_F; Q_f; Q_O; Q_V; Q_R; Q_{TTR}; Q_{\alpha\epsilon}; T_1(j, i, k), l = \overline{0, \infty}; T_{an})$.
 Здесь: $Q_P(P_i, i = \overline{1, N_{ox}})$ – содержания окислов в стекле (масс.%), N_{ox} – число окислов; $Q_T(\lambda, C, a, \alpha; \rho, E, \mu, P_p, P_c; B)$ – теплофизические, механические и оптические свойства стекла при температуре T ; $Q_G(H, H_2, R_1, R_2)$ – геометрические размеры стеклоизделия (стакана, колбы); $Q_F(L_F, V_F, H_F, N_{an})$ – основные характеристики печи отжига (длина, ширина, высота, число зон отжига); $Q_f(T_f, V_f, L_f, tl_iden, tl_bot)$ – технологические характеристики стеклоизделий в доотжиговый период (температура формования, скорость и длина транспортера на участке до печи отжига, экспериментальные температуры середины наружной боковой и внутренней донной поверхностей изделия на входе в печь); $Q_O(V_{art}, N_{art}, d_{art})$ – технологические характеристики стеклоизделий в период отжига (скорость движения, количество изделий по ширине печи и

расстояние между ними); $Q_V \left((\Delta l/l)_{e_i}, \alpha_i, i = \overline{1, m}; \lg \eta_j, T_j, j = \overline{1, m_B} \right)$ – экспериментальные значения относительного удлинения образца и мгновенные значения КТР; логарифмы вязкости стекла и соответствующие им температуры; $Q_R (A, B, T_0; \lg \eta_0, B_A; \lg K_s, b, \lg \tau_0)$ – релаксационные постоянные; $Q_{TTR} (T_{C_{1i}}, T_{C_{2i}}, T_{H_{1i}}, T_{H_{2i}}, i = \overline{1, N_{an}})$ – температуры среды внутри и снаружи цилиндрического изделия, температуры нижней и верхней ограждающей поверхностей (нагревателей под и над стеклоизделием) по зонам отжига; $Q_{\alpha\varepsilon} (\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, \varepsilon_{s_{1i}}, \varepsilon_{s_{2i}}, i = \overline{1, N_{an}})$ – параметры теплообмена по зонам отжига (коэффициенты конвективного теплообмена и приведенные степени черноты); $T_l(j, i, k), j = \overline{1, N_j}; i = \overline{0, N}; k = \overline{0, N}; l = \overline{0, \infty}$ – поля температур.

Таким образом, применение принципа модульного построения позволяет абстрагироваться от излишней детализации при сохранении основных особенностей системы. С теоретической точки зрения это означает, что необходимо осуществить **декомпозицию рассматриваемой проблемы определения оптимального режима отжига на ряд следующих задач:**

- I. Расчет свойств стекла по его химическому составу.
- II. Обработка дилатометрических исследований.
- III. Расчет температурной зависимости вязкости.
- IV. Расчет постоянных структурной релаксации.
- V. Разработка математических моделей расчета полей температур и напряжений в стеклоизделиях цилиндрической формы.
- VI. Определение оптимального режима отжига [151].

При решении задач I-IV рассмотрены взятые из литературы методы, адаптированные автором диссертации для применения их в рамках рассмотренного программного комплекса. При решении задач V, VI использованы методы математической физики, теории радиационного теплообмена, теории температурных напряжений, оптимизации.

1.5. Расчет свойств стекла по его химическому составу

При моделировании полей температур и напряжений в стеклоизделия одной из важных предварительных задач является вычисление теплофизических, механических и оптических свойств стекла. Расчет коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости C , коэффициента Пуассона μ , прочностей на растяжение P_p и сжатие P_c , фотоупругой постоянной B стекла при температуре 0°C наиболее просто можно осуществить по аддитивному методу [37, 41, 42]:

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{ox}} Q_i P_i, \quad (1.1)$$

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, обеспечивающему высокую точность вычисления этих свойств в широких интервалах изменения составов силикатных стекол [37]. По методу Аппена проводится анализ не всей системы в целом, а отдельных ее компонентов. При этом метод базируется на расчете парциальных молярных величин, как это широко осуществляется в расчетах химической термодинамики. Аппен предложил две формы расчетных уравнений: одну для расчета плотности стекла и другую для расчета всех остальных свойств. Уравнение для расчета плотности имеет вид:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ox}} P_i}{\sum_{i=1}^{N_{ox}} n_i \cdot \bar{V}_i}, \quad (1.2)$$

где $n_i = P_i/M_i$ – содержание в стекле компонента, выраженное в числе молей; M_i – молекулярный вес окисла; \bar{V}_i – приближенно-усредненная парциальная величина мольного объема i -го компонента стекла [43– 47].

Остальные величины вычисляются по формуле:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ox}} n_i \cdot \bar{Q}_i}{\sum_{i=1}^{N_{ox}} n_i}, \quad (1.3)$$

где \bar{Q}_i – приближенно-усредненные парциальные величины свойства компонента; Q – рассчитываемое свойство (E , α , n).

При оптимизации режимов отжига стеклоизделий необходимо знание значений вышеуказанных теплофизических, механических и оптических свойств при различных температурах стекла в периоды его формования и отжига. Температурные зависимости свойств взяты из литературы [6,34, 46-48] и выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_0 \cdot (1 + 0,0009T); C = C_0 \cdot (1 + 0,00039T); V = V_0 \cdot (1 + 0,0002T); \\ \rho = \frac{\rho_0}{1 + 3\alpha T}; a = \frac{\lambda}{\rho C}; \mu = \frac{E}{2G} - 1; Q_T = Q_0 \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{N_{ox}} a_{T_i} P_i \right), \end{cases} \quad (1.4)$$

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 [21].

Считается, что значения показателя преломления n , прочностей на растяжение P_p и сжатие P_c стекла зависят от температуры незначительно.

Результаты расчета свойств сортового стекла, производимого в цехе отжига Спировского стеклозавода «Индустрия», по его химическому составу показаны на рис. 1.3.

Свойства стекла		Прочитать
Теплопроводность	0.9024	Вт/м*град
Теплоемкость	828.4	Дж/кг*град
Температуропроводность*Е6	0.4351	кв. м/сек
К Т Р*Е7	88.96	1/град
Плотность	2503.62	кг/куб.м
Модуль Юнга *Е-10	6.936	Н/кв.м
Кoeffициент Пуассона	0.2162	
Прочность на растяжение*Е-6	85.39	Н/кв.м
Прочность на сжатие*Е-6	1008.0	Н/кв.м
Показатель преломления	1.512	
Фотоупругая постоянная*Е12	2.43	кв. м/Н

Ввод химического состава	
<input type="radio"/> Все окислы <input checked="" type="radio"/> Состав	
Окисел	Содержание
SiO2	72.8
Al2O3	1.3
Na2O	13.3
CaO	9
MgO	3
Fe2O3	0.1
SO3	0.5
Сумма	100

Рис.1.3. Массовые содержания окислов и значения свойств при 0°C

1.6. Обработка данных дилатометрических измерений

При моделировании полей температур и напряжений в стеклоизделиях одной из важных задач является расчет постоянных структурной релаксации [49]. Вычисление постоянных структурной релаксации осуществляется по точкам рассчитанной температурой зависимости вязкости и экспериментальной дилатометрической кривой, которая получается при нагреве образца стекла изделия. Экспериментальные данные дилатометрических измерений необходимы для расчета мгновенных значений коэффициента температурного расширения (КТР) при любой температуре и определения постоянных структурной релаксации. Дилатометрическая кривая представляет собой зависимость относительного удлинения стеклянного образца от температуры. Практически на каждом стекольном заводе и в научно-исследовательском институте имеются дилатометры, позволяющие получить эту зависимость при нагреве образца от комнатной температуры до температуры начала вязкой деформации $T_{н.д.}$ [50].

В работе [10] предлагается следующая методика обработки экспериментальной дилатометрической кривой. После задания $T_{н.д.}$ весь температурный интервал от 20°C до температуры, равной $T_{н.д.} - 10^{\circ}\text{C}$, делится на подинтервалы в 5, 10 и 20°C и включает 44 температурные точки. В температурной области, которая прилегает к $T_{н.д.}$, шаг между точками температуры для более точного определения релаксационных постоянных взят равным 5°C ; в области, прилегающей к $20^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$; в середине температурного интервала – 10°C . В каждой из выбранных температурных точек вводится значение относительного удлинения образца $(\Delta l/l)$, снятое с экспериментально полученной дилатометрической кривой. После этого производится математическая обработка введенных данных следующим образом. Введенные значения T_i и $(\Delta l/l)_{e_i}$ для всех температурных точек

$i=\overline{1,m}$ (здесь $m=44$) определяют эмпирическую функцию $(\Delta l/l)_e = f(T)$, дифференцирование которой позволяет определить мгновенные значения КТР $\alpha_i, i=\overline{1,m}$ в выбранных точках температуры. Для дифференцирования эмпирической функции используются формулы (1.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \left[-21(\Delta l/l)_{e_1} + 13(\Delta l/l)_{e_2} + 17(\Delta l/l)_{e_3} - 9(\Delta l/l)_{e_4} \right] / (20h_1); \\ \alpha_2 = \left[-11(\Delta l/l)_{e_1} + 3(\Delta l/l)_{e_2} + 7(\Delta l/l)_{e_3} + (\Delta l/l)_{e_4} \right] / (20h_1); \\ \alpha_i = \left[-2(\Delta l/l)_{e_{(i-2)}} - (\Delta l/l)_{e_{(i-1)}} + (\Delta l/l)_{e_{(i+1)}} + 2(\Delta l/l)_{e_{(i+2)}} \right] / (10h_j), i=\overline{3,m-2}; \\ \alpha_{m-1} = \left[-11(\Delta l/l)_{e_m} + 3(\Delta l/l)_{e_{(m-1)}} + 7(\Delta l/l)_{e_{(m-2)}} + (\Delta l/l)_{e_{(m-3)}} \right] / (20h_3); \\ \alpha_m = \left[-21(\Delta l/l)_{e_m} + 13(\Delta l/l)_{e_{(m-1)}} + 17(\Delta l/l)_{e_{(m-2)}} - 9(\Delta l/l)_{e_{(m-3)}} \right] / (20h_3), \end{array} \right. (1.5)$$

где $h_j = 20, 10, 5$ °C, $j=\overline{1,3}$ – температурный шаг между точками, который зависит от разбиения температурного интервала [10, 21].

Экспериментальные данные дилатометрических измерений для сортового стекла на Спировском стекольном заводе «Индустрия» и результаты их обработки (КТР) представлены на рис. 1.4.

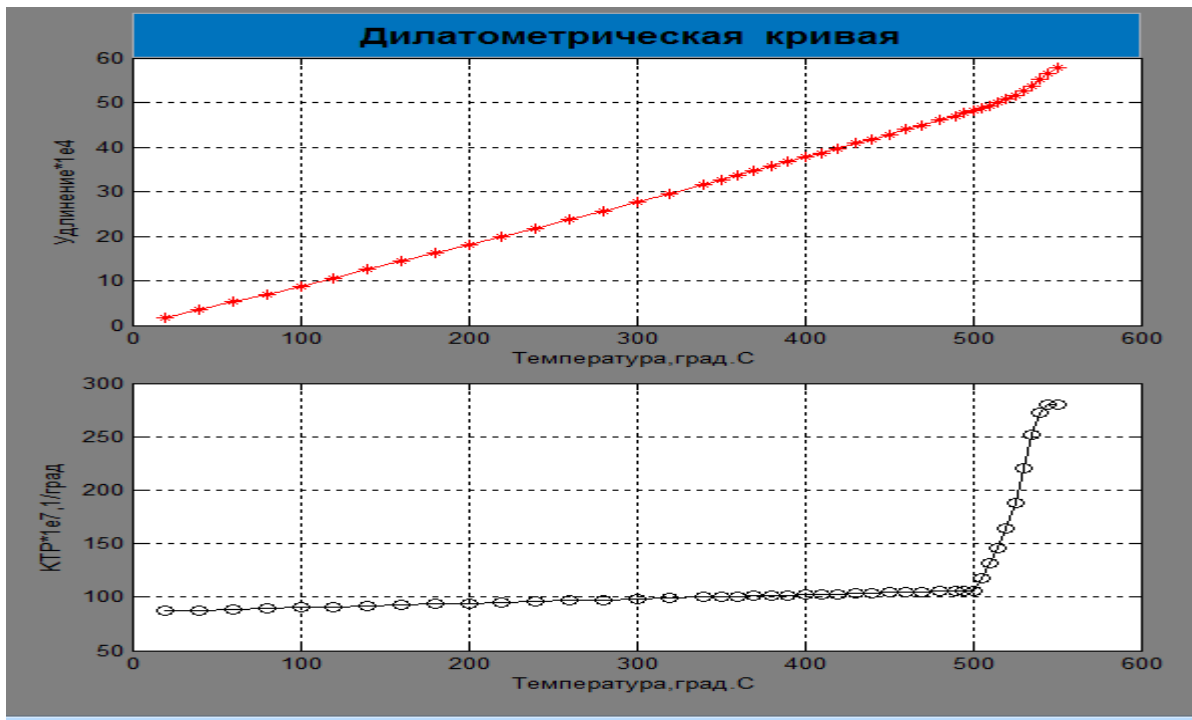


Рис.1.4. Результаты обработки дилатометрической кривой

1.7. Расчет температурной зависимости вязкости стекла по его химическому составу

При разработке и проектировании стекол за основу берется ведущее физико-химическое свойство или комплекс свойств, которыми должен обладать проектируемый материал. При этом учитывается влияние каждого компонента на лидирующее свойство. Под вязкостью понимается свойство тел оказывать сопротивление сдвигу их слоев относительно друг друга. Это сопротивление, возникающее при относительном движении двух соприкасающихся слоев, пропорционально их площади и градиенту скорости вдоль оси, перпендикулярной к направлению движения [51].

Следует отметить, что для стекольной технологии важны не только свойства твердого стекла, но и свойства расплава, из которого оно получено. Наиболее важным для технологии свойством стеклообразующего расплава является вязкость. Именно она определяет температурно-временные режимы большинства стадий производственного процесса: варки, формования, отжига, закалки стеклоизделий и др. Все современные технологии (и лабораторные и производственные) ориентируются на значения температур и продолжительность операций, которые соответствуют определенным величинам вязкости. Поэтому знание вязкости исключительно важно для правильного выбора технологических режимов [42].

В области температур, близких к температуре стеклования, применяют различные методы, использующие деформацию образцов правильной геометрической формы. Вязкость – важнейшее свойство силикатных расплавов, определяющее основные технологические процессы получения стекла на его основе. Количественные зависимости вязкости от температуры и состава широко используются практически во всем температурном интервале технологии стекла [52]. Наиболее важной характеристикой стекломассы является температурный интервал выработки. В некоторых случаях неблагоприятные температурные зависимости вынуждают технологов

корректировать условия выработки изделий. Очевидно, без знания зависимости вязкости стекла от его состава и температуры практически невозможно проектирование технологии изделий на основе таких стекол.

Расчеты остаточных и временных напряжений, возникающих при отжиге и закалке стекла, также базируются в соответствии с релаксационной теорией стеклования на точном знании температурной зависимости вязкости стекол. При этом температурная зависимость вязкости стеклообразующих веществ имеет первостепенное значение при описании процесса структурной релаксации в стеклах. При больших значениях вязкости (низких температурах) релаксация структуры и напряжений в стеклоизделии практически не имеет места (изоструктурное состояние стеклообразующего вещества), при малых значениях вязкости (высоких температурах) возникающие вследствие температурного градиента по толщине изделия временные напряжения полностью релаксируют (равновесное состояние стеклообразующего вещества), в интервале стеклования наблюдается частичная релаксация возникающих напряжений [53, 54]. Для оценки качества отжига стеклоизделия, определяемого величиной остаточных напряжений в нем, наибольший интерес представляет вязкость стекла при температуре его выдержки.

Экспериментальное определение вязкости – трудоемкий и дорогостоящий процесс, требующий специального оборудования и навыков. Зачастую такое оборудование на предприятиях отсутствует или находится в единственном экземпляре. В то же время, в литературе накоплен обширный экспериментальный материал по вязкости различных систем, который нуждается в систематизации [55, 56]. Использование расчетных методов определения вязкости при проектировании стекол с заранее заданными технологическими характеристиками позволит значительно снизить метод проб и ошибок и уменьшить объем экспериментов. Температурная зависимость вязкости, экспериментальные и полученные в результате их

обработки расчетные данные по дилатометрической кривой используются при вычислении постоянных структурной релаксации. Анализ литературы показал, что существует несколько методов расчета вязкости стекол по их химическому составу [37, 41]. Наиболее известны методы Гельгофа и Охотина, позволяющие рассчитывать температуры, соответствующие заданным уровням.

Расчет вязкости стекол, предложенный Гельгофом и Томасом, основан на допущении, что влияние, оказываемое на вязкость (эталонного) стекла замещением 1 масс.% SiO_2 в его составе 1 масс.% какого-либо другого окисла, зависит только от содержания данного окисла в стекле и не зависит от других окислов. Метод замещения Гельгофа и Томаса рассчитывает не саму вязкость стекла, а ту температуру, которая будет соответствовать вязкости стекла. Следовательно, для расчета нужно знать состав "эталонного" стекла и температуру, при которой вязкость равна одному из заданных уровней $\lg \eta_j, j=\overline{1,4}$. Авторы метода производили исследования температурной зависимости вязкости для значений $\lg \eta_j = 2; 3; 7,6; 12$ (Па·с). При расчете вязкости силикатных стекол наиболее удобно в качестве "эталонного" выбрать стекло, имеющее состав: 72,5 SiO_2 ; 1,5 Al_2O_3 ; 15 Na_2O ; 8 CaO ; 3 MgO ("эталонные" содержания окислов P_{E_i} в масс.%) и температуры $T_{E_j} = 1197; 1030; 684; 544$ °С, соответствующие вышеприведенным значениям уровней вязкости $\lg \eta_j$ [41]. Таблица температурных добавок по Гельгофу и Томасу содержит значения изменений температур ΔT_{ji} по j -му уровню вязкости для i -го окисла ($\text{B}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}, \text{CaO}, \text{BaO}, \text{MgO}, \text{PbO}, \text{ZnO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$) при увеличении содержания окислов P_i по сравнению с "эталонными" P_{E_i} на 1 масс.%. Формула метода для вычисления температур, соответствующих вязкостям $\lg \eta_j$, выглядит следующим образом:

$$T_j = T_{E_j} + \sum_{i=1}^{N_{ox}} (P_i - P_{E_i}) \cdot \Delta T_{ji}, j = \overline{1,4}. \quad (1.6)$$

При расчете температурной зависимости вязкости по методу Охотина температуры, соответствующие заданным уровням вязкости, определяются по формуле:

$$T = A \cdot P_{Na_2O} + B \cdot (P'_{MgO} + P_{CaO}) + C \cdot P_{Al_2O_3} + D + E \cdot (P_{MgO} - P'_{MgO}), \quad (1.7)$$

где $P_{Al_2O_3}$, P_{Na_2O} , P_{CaO} , P_{MgO} – содержания указанных окислов в стекле;

$P'_{MgO} = 3$ (масс.%) – средняя величина содержания MgO; A, B, C, D, E – константы Охотина [37, 41]. Расчет температурной зависимости вязкости по методу дает удовлетворительные результаты только для пятикомпонентной системы стекол (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , CaO , MgO), причем Na_2O должно быть 12-16 вес.%, MgO и Al_2O_3 по 0-5%, CaO – 5-12%.

Метод Охотина дает точные результаты лишь при содержаниях компонентов в стекле, укладывающихся в довольно жесткие границы. Для стекол, содержания окислов в которых не укладываются в ограничения метода Охотина, температурная зависимость вязкости должна быть рассчитана по методу Гельгофа.

Следует отметить, что точки температурной зависимости вязкости стекла в равновесном состоянии могут быть получены также экспериментально с помощью вискозиметра. Однако, как уже отмечалось выше, ориентация была сделана на заводы стекольной промышленности страны, на большинстве из которых приборы для снятия экспериментальных зависимостей вязкости от температуры отсутствуют.

Зависимость вязкости стекол от температуры имеет весьма сложный характер. На рис. 1.5 показан общий вид этой зависимости в координатах $\lg \eta$ от $1/T$ в широком интервале температур. Внимание большинства исследователей сосредоточено на описании зависимости $\lg \eta$ от $1/T$ в области, где эта зависимость имеет существенное отклонение от линейности.

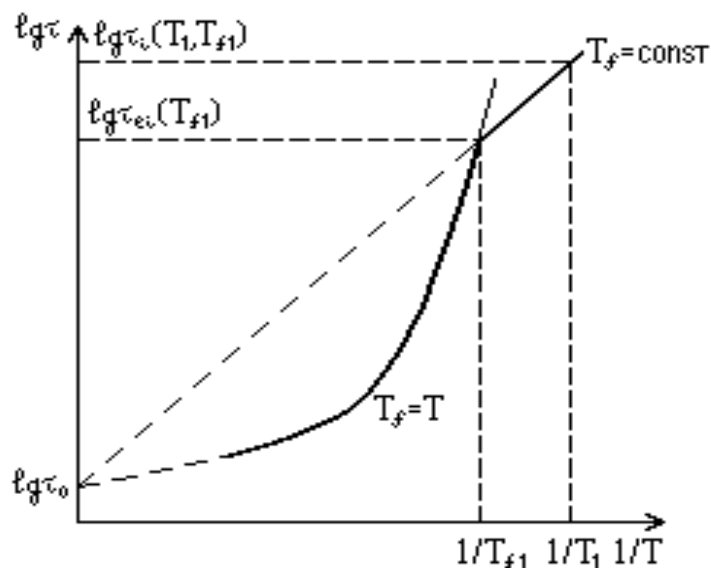


Рис.1.5. Типичная зависимость вязкости стекла от температуры

Как упоминалось выше, в этой области температур стеклообразующая система представляет собой переохлажденную жидкость и существует в метастабильном состоянии. Ниже температуры стеклования система находится в неравновесном состоянии и является тем, что принято называть стеклом. Для описания температурной зависимости вязкости стеклообразующего вещества в равновесном состоянии, при котором структурная температура вещества T_f равна величине его фактической температуры T , широко используется уравнение Фулчера-Таммана:

$$\lg \eta = A + B/[T - T_0], \quad (1.8)$$

где A, B, T_0 – постоянные Фулчера-Таммана; η – вязкость стеклообразующего вещества при температуре T (К).

Значения релаксационных постоянных A, B, T_0 легко найти по характерным точкам рассчитанной температурной зависимости вязкости или методом наименьших квадратов [49, 57]. Для сортового стекла, производимого в цехе отжига Спировского стеклозавода «Индустрия», результаты вычислений вязкости в автоматизированной системе расчета режимов отжига стеклоизделий цилиндрической формы «АСРЦ» представлены на рис. 1.6.

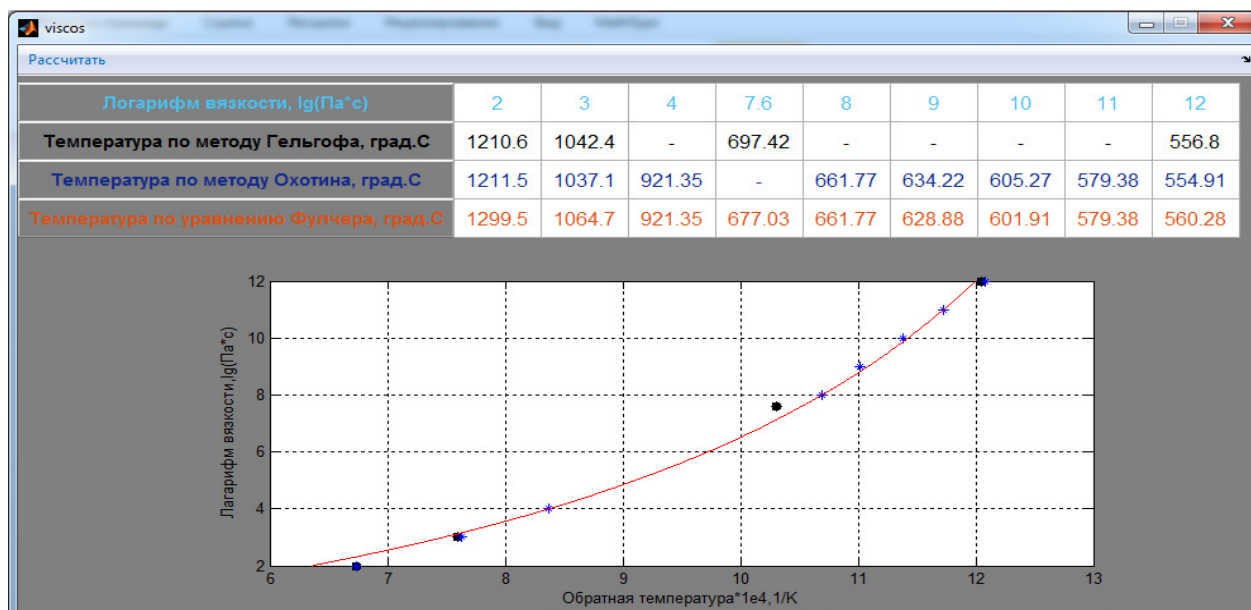


Рис. 1.6. Расчет точек температурной зависимости вязкости стекла

1.8. Расчет постоянных структурной релаксации

Существует большое количество эмпирических закономерностей, описывающих температурную зависимость вязкости в интервале стеклования и изоструктурной области. Среди наиболее используемых можно выделить уравнения Уотертона, Дженкеля и Аррениуса [30, 41].

Существенным недостатком всех эмпирических зависимостей является отсутствие в их основе микроскопической модели. Это обстоятельство не позволяет судить о природе процесса вязкого течения, что очень важно, когда вязкость выступает в качестве индикатора явлений, происходящих в стекле вследствие какого-либо внешнего воздействия или структурных изменений в системе. Известные варианты теоретического описания зависимостей вязкости от температуры сводятся к двум моделям – модели, основанной на концепции свободного объема, и активационной [30].

Времена структурной релаксации определяют реальные скорости процессов, происходящих при отжиге и варке стекла (например, скорость выхода пузырей из стекломассы на поверхность) и других. Однако нахождение характеристических времен этих процессов (обратных скоростям) чрезвычайно сложно из-за экспериментальных и теоретических трудностей.

Некоторые авторы считают, что время релаксации, определяющее скорость процессов отжига, равно вязкости, деленной на модуль сдвига [54]. Несмотря на приближенный характер этого и подобных соотношений, они пригодны для практических оценок. Поскольку модуль сдвига при переходе от твердого состояния к стеклообразному уменьшается всего на несколько процентов, а при переходе к состоянию маловязкой жидкости не более, чем вдвое, можно с достаточной надежностью для практических целей судить об изменении скоростей соответствующих процессов по температурной зависимости вязкости.

Конкретизируем и уточним значения релаксационных постоянных стекла, так как без них невозможен корректный расчет изменения температурно-временных свойств и напряжений при отжиге стекла. К постоянным структурной релаксации, кроме постоянных Фулчера-Таммана в уравнении (1.8), относятся следующие:

1. $\lg \eta_0, B_A$ – постоянные в уравнении Аррениуса, описывающем температурную зависимость вязкости стеклообразующего вещества в изоструктурном состоянии ($T_f = \text{const}$): $\lg \eta = \lg \eta_0 + B_A/T$; (1.9)

2. Модуль перехода от вязкости η к времени релаксации по n -му релаксационному процессу при равновесной структуре τ_{l_n} ($N_r = 5$ – число релаксационных процессов): $\lg K_n = \lg \eta - \lg \tau_{l_n}$, $n = \overline{1, N_r}$; (1.10)

3. $\lg \tau_0$ – результат экстраполяции температурной зависимости времени релаксации в изоструктурных условиях, аппроксимированной уравнением Аррениуса (1.9), к $1/T \rightarrow 0$ (см. рис.1.3).

Постоянная в уравнении Аррениуса B_A с достаточной точностью определяется по уравнению [56-58]: $B_A = 19 \cdot [T_0 + B/(13 - A)]$. (1.11)

Из рис.1.2 следует, что $\lg \tau_n = \lg \tau_{l_n} \cdot T_f/T - \lg \tau_0 \cdot [T_f/T - 1]$. (1.12)

Аналогично (1.12) с учетом (1.8), (1.10) получим [59]:

$$\lg \eta = \left[A + B / (T_f - T_0) \right] \cdot T_f / T - \lg \eta_0 \cdot [T_f / T - 1]. \quad (1.13)$$

$$\text{Сравнивая (1.13) с (1.9), имеем: } \lg \eta_0 = A + B / (T_f - T_0) - B_A / T_f. \quad (1.14)$$

Вычисление постоянных для расчета структурной релаксации в работе предложено осуществлять по точкам рассчитанной температурной зависимости вязкости и экспериментальной дилатометрической кривой, полученной при нагреве образца стекла со скоростью 3 °С/мин. При описании релаксационного процесса удобно перейти от суммы экспонент к функции

$$\text{Кольрауша [30, 49, 58]: } M_s = \sum_{n=1}^{N_f} g_n \exp[-t/\tau_n] = \exp\left[(-t/\tau_k)^b\right]. \quad (1.15)$$

При этом число неизвестных постоянных сокращается до трех: модуль перехода от вязкости к времени релаксации $\lg K_s = \lg \eta - \lg \tau_k$; показатель степени дробной экспоненты b ; результат экстраполяции температурной зависимости времени релаксации в изоструктурных условиях к бесконечно большой температуре $\lg \tau_0$ [49].

Задача заключается в нахождении значений $\lg K_s$, b и $\lg \tau_0$, которые обеспечивают наименьшее среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений удлинений $\Delta l/l$ от экспериментальных $(\Delta l/l)_e$. Относительное удлинение образца определяется по формуле:

$$\Delta l/l = (T_f - T_H) \cdot \alpha_1 + (T - T_f) \cdot \alpha_g, \quad (1.16)$$

где T_H – температура начала расчета (°С); α_1 , α_g – коэффициенты температурного расширения соответственно для равновесного и изоструктурного состояний стеклообразующего вещества (1/град).

Сопоставление влияний отклонений от оптимальных значений каждой из вышеуказанных релаксационных постоянных (при сохранении значений других постоянных неизменными) на величину среднеквадратичного отклонения расчетных данных от экспериментальных показывает, что особенно высокой чувствительностью метод определения постоянных

обладает по отношению к величине $\lg K_s$ [30]. Соответственно эта величина по заданной экспериментальной дилатометрической кривой определяется с наиболее высокой точностью. Отклонения значений $\lg \tau_0$ от оптимума оказывают на среднеквадратичное отклонение наименьшее влияние, поэтому и точность определения этой величины невелика [21]. Поиск значений релаксационных постоянных стекла осуществляется с помощью стандартного метода Matlab *fmincon* многомерного поиска минимума функции нескольких переменных [23, 26]. Результаты расчета релаксационных постоянных и последовательные шаги их поиска показаны на рис.1.7.

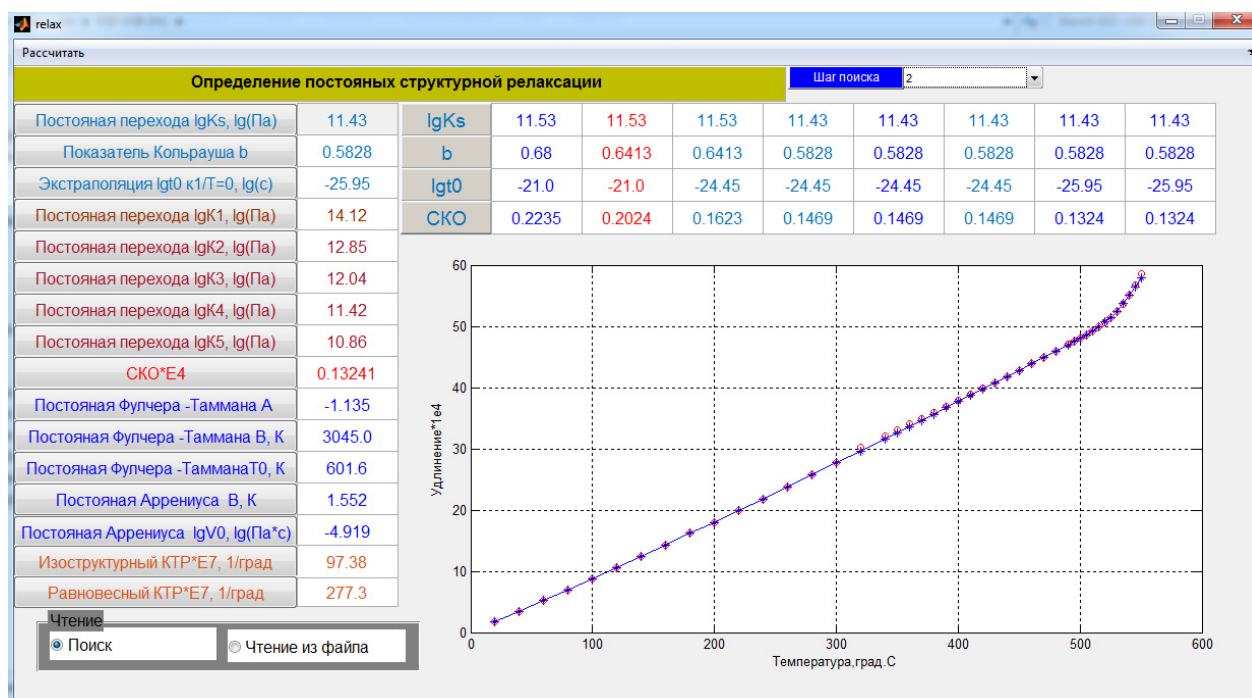


Рис.1.7. Результаты расчета релаксационных постоянных стекла

После определения оптимальных значений $\lg K_s$, b и $\lg \tau_0$ осуществляется переход к набору постоянных $\lg K_n, n = \overline{1, N_r}$ и $\lg \tau_0$, более удобному для машинных вычислений, по формуле:

$$\lg K_n = \lg K_s - \lg(\tau_n / \tau_k), \quad (1.17)$$

где значения $\lg(\tau_n / \tau_k)$ при заданных g_n и b известны [30].

1.9. Выводы

В главе 1 диссертации определена структура программного комплекса (автоматизированной системы) для расчета режимов отжига стеклоизделий цилиндрической формы. Произведена постановка задачи оптимизации режима отжига по уровню остаточных напряжений в стеклоизделии.

Показано, что перед разработкой математических моделей расчета полей температур и напряжений в стеклоизделиях цилиндрической формы необходимо решение задач, связанных с расчетом свойств и релаксационных постоянных стекла.

В главе 1 автором решены следующие задачи:

1. Рассмотрены методы расчета теплофизических, механических, оптических и вязкостных свойств стекла при комнатной температуре и определения их температурных зависимостей по химическому составу стекла.

2. Предложена методика математической обработки экспериментальной дилатометрической кривой для получения температурной зависимости мгновенного коэффициента температурного расширения стекла.

3. Решена задача определения релаксационных постоянных стекла, обеспечивающих минимальное среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений относительных удлинений стеклянного образца от экспериментальных значений с дилатометрической кривой.

Продемонстрирована работа модулей автоматизированной системы в среде Matlab 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.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СОРТОВЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЯХ ПРИ ИХ ОТЖИГЕ

Стекла относятся к полупрозрачным материалам, перенос тепловой энергии в которых происходит с помощью кондуктивного и радиационного механизмов. Кондуктивный перенос энергии осуществляется при энергетическом взаимодействии между соседними атомами тела, радиационный – с помощью испускания и поглощения атомами лучистой энергии. К тому же, имеют место конвективный теплообмен между поверхностью стекла и окружающей средой и радиационный теплообмен между слоями стекла и ограждающими поверхностями [12, 21, 22].

Радиационный теплоперенос для внутренних точек полупрозрачного тела сложно учесть даже для плоской формы стеклоизделия, хотя эта задача решена в работах [14, 21]. Для изделий цилиндрической формы это сделать сложнее из-за наличия нескольких тел и поверхностей теплообмена, в результате чего модель температурного поля становится громоздкой. Кроме того, напряжения в случае расчета по этой "полупрозрачной" модели меньше, чем в случае, когда считают, что радиационный теплообмен происходит только с поверхностными точками изделия, из-за меньших температурных градиентов. В связи с этим в работе рассмотрены так называемые "непрозрачные" модели температурного поля, учитывающие однако взаимный теплообмен излучением внутренних поверхностей полого цилиндрического тела между собой и с ограждающими поверхностями печи отжига.

При решении задач теплопроводности существует несколько методов: аналитический, графический, экспериментальный и численный. Экспериментальным методом пользуются, когда остальные методы не дают результатов. Его применяют для определения теплофизических свойств. Для решения задач теплопроводности в твердых телах сложной формы

используются аналитические и численные методы. В свою очередь, аналитические методы подразделяются на точные и приближенные. Точные методы позволяют выразить решение дифференциальных уравнений через элементарные функции (в аналитическом виде). Приближенными называются методы, в которых решение получается как предел некоторой последовательности, члены которой выражаются через элементарные функции [148]. Численные методы не позволяют найти точное решение дифференциальных уравнений в аналитической форме [60-64]. С их помощью получается таблица приближенных (иногда точных) значений искомого решения в некоторых точках рассматриваемой области решения, именуемых сеткой. В силу этого численные методы называют иначе разностными методами или методами сеток.

Численные методы применимы к широким классам дифференциальных уравнений и всем типам краевых задач для них. В настоящее время в связи с постоянным повышением быстродействия компьютеров эти методы стали одним из основных способов решения конкретных практических задач вычислительной математики. Однако следует отметить, что численные методы можно применять только к хорошо обусловленным дифференциальным задачам. Другими словами, к задачам, в которых малые изменения в начальных данных приводят к малым изменениям в решении задачи. Решения возможны при известных краевых условиях, включающих начальное распределение температур в теле и граничные условия на поверхности тела, которые могут быть заданы одним из трех способов: температурой поверхности, тепловым потоком и коэффициентом теплоотдачи [60]. Аналитическое решение задач нестационарной теплопроводности методом разделения переменных, преобразования Лапласа предпочтительнее других методов при неравномерном начальном распределении температуры в теле [148] и в тех случаях, когда нет необходимости в расчетах для очень малых времен от начала процесса.

2.1. Использование аналитических методов для моделирования температурных полей в цилиндрических изделиях

При математическом моделировании температурных полей в стеклоизделиях важную роль играет учет их геометрической формы. Наиболее развиты аналитические модели температурных полей для изделий плоской формы [12, 22]. Для изделий цилиндрической формы часть авторов [12] предлагает приводить сложное изделие к плоской форме за счет введения характерного или эффективного размера. Однако в этом случае точность расчетов снижается, и не учитывается реальная геометрия тел цилиндрической формы [31].

Достоинство аналитических методов заключается в том, что решение получается в форме, позволяющей рассчитать температурное распределение в любой точке и в любой момент времени. В то же время, аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах при сложных граничных условиях наталкивается на значительные трудности, связанные с необходимостью учета радиационного теплопереноса и несимметричностью условий теплообмена [65-68].

Дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах при отсутствии внутренних источников теплоты выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left[\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad (2.1)$$

где $t(r, \tau)$ – значение температуры в координате по радиусу r в момент времени τ (°C); a – коэффициент температуропроводности материала (m^2/c) [60].

В связи с тем, что в аналитическом решении уравнения (2.1) и характеристическом уравнении даже для случая одного полого или сплошного цилиндрического тела присутствуют сложные комбинации Бесселевых функций, результат удается получить только для несимметричного

конвективного теплообмена. Для учета радиационного теплообмена можно использовать метод конечных интегральных преобразований [22, 63], но в этом случае модель уже становится смешанного аналитически-численного типа. В то же время, недостатки, связанные с необходимостью учета нескольких поверхностей расчета для сортовых стеклоизделий и радиационного теплообмена между ними, не преодолеваются. В связи с этим большинство авторов при решении этих задач уже переходят к численным моделям температурного поля [69-74]. Численные методы расчета температурного поля в стеклоизделиях цилиндрической формы позволяют преодолеть трудности моделирования, связанные с сложной геометрической формой [22].

2.2. Численные методы расчета несимметричного конвективно-радиационного теплообмена в цилиндрических телах

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности (2.1) наиболее просто использовать метод конечных разностей. Идея метода конечных разностей известна давно, с соответствующих трудов Эйлера. В настоящее время, с появлением быстродействующих компьютеров, этот метод стал удобным для практического использования и является одним из наиболее эффективных при решении различных задач математической физики. Сущность метода заключается в том, что вместо дифференциального уравнения используется алгебраическое, в котором бесконечно малые величины времени, толщины, температуры заменяются их малыми конечными изменениями. Расчет температурного распределения в любой момент времени численными методами получается на основе его знания в предыдущий момент времени, т.е. итерационным способом [75].

Для компьютерных расчетов стеклоизделия разбивается на некоторое число слоев N . Общее время тепловой обработки стеклоизделия также делится на временные шаги. Предполагается, что температуры в граничных точках

слоев в данный момент времени сохраняются неизменными и скачкообразно изменяются при переходе к следующему временному шагу [22].

Большую роль для точного моделирования температурных распределений в изделиях играет корректный учет начальных и граничных условий, которые в большинстве стадий технологического процесса отжига имеют сложный характер. Так, начальные условия обычно неравномерны, граничные условия соответствуют несимметричному конвективно-радиационному теплообмену поверхностей изделия с окружающей средой и ограждающими поверхностями (нагревательными элементами) технологического оборудования [5, 23]. В этом случае наиболее удобно использовать численные конечно-разностные методы, для которых частные производные в уравнении (2.1) по времени, координате 2-го и 1-го порядка заменяются на их численные аналоги $[t_{i+1}(j) - t_i(j)]/\Delta\tau$, $[t_i(j-1) - 2t_i(j) + t_i(j+1)]/(\Delta r)^2$ и $[t_i(j+1) - t_i(j)]/\Delta r$. Здесь $i = \overline{0, m}$ – номер временной точки расчета; $j = \overline{0, N}$ – 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. Тогда формулы для расчета температурного распределения во внутренних точках полого цилиндрического тела будут выглядеть следующим образом [31]:

$$t_{i+1}(j) = t_i(j) + a\Delta\tau/(\Delta r)^2 \cdot \{[t_i(j-1) - 2t_i(j) + t_i(j+1)] + [t_{i+1}(j) - t_i(j)]/j\}, j = \overline{1, N-1}. \quad (2.2)$$

При расчете конвективного теплообмена необходимо приравнять тепловые потоки на поверхности, например $r = R_1$, в соответствии с законами Фурье $q(R_1, \tau) = -\lambda \cdot \partial t(R_1, \tau)/\partial r$ и Ньютона $q(R_1, \tau) = \alpha_1 [t(R_1, \tau) - t_{c1}(\tau)]$ [64]. Градиент $\partial t(R_1, \tau)/\partial r = \alpha_1 [t_{c1}(\tau) - t(R_1, \tau)]/\lambda$, производные 2-го порядка $Q_{c1}(R_1) = \partial^2 t(R_1, \tau)/\partial r^2 = 2\alpha_1 [t_{c1}(\tau) - t_i(0)]/(\lambda\Delta r)$ на внутренней $r = R_1$ и внешней $r = R_2$ поверхностях: $Q_{c2}(R_2) = \partial^2 t(R_2, \tau)/\partial r^2 = 2\alpha_2 [t_{c2}(\tau) - t_i(N)]/(\lambda\Delta r)$, (2.3) где α_1, α_2 – коэффициенты конвективной теплоотдачи для внутренней и

внешней поверхностей изделия (Вт/(м²град)); $t_{c1}(\tau), t_{c2}(\tau)$ – температуры среды внутри и снаружи (°C); λ – коэффициент теплопроводности материала (Вт/(м·град)) [31].

При расчете радиационного теплообмена с учетом закона Стефана-Больцмана по аналогии с (2.3) вторые производные на поверхностях $r = R_1$ и $r = R_2$ находятся по выражениям:

$$\begin{cases} Q_{R_1}(R_1) = 2\varepsilon_{s1}\sigma [T_{H1}^4(\tau) - T_i^4(0)] / (\lambda\Delta r); \\ Q_{R_1}(R_2) = 2\varepsilon_{s2}\sigma [T_{H2}^4(\tau) - T_i^4(N)] / (\lambda\Delta r), \end{cases} \quad (2.4)$$

где $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}$ – приведенные степени черноты верхней и нижней ограждающих поверхностей технологического оборудования; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ (Вт/(м²К⁴)) – постоянная Стефана-Больцмана; $T_{H1}(\tau), T_{H2}(\tau)$ – температуры ограждающих поверхностей над и под изделием (К) [31].

С учетом передачи тепла точкам поверхностей изделия от внутренних соседних точек за счет теплопроводности получим окончательные выражения для расчета температур поверхностей цилиндрического тела в виде [31]:

$$\begin{cases} t_{i+1}(0) = t_i(0) + a\Delta\tau \cdot [(t_i(1) - t_i(0)) / \Delta r \cdot (2/\Delta r + 1/R_1) + Q_{C_i}(R_1) + Q_{R_i}(R_1)]; \\ t_{i+1}(N) = t_i(N) + a\Delta\tau \cdot [(t_i(N-1) - t_i(N)) / \Delta r \cdot (2/\Delta r + 1/R_2) + Q_{C_i}(R_2) + Q_{R_i}(R_2)]. \end{cases} \quad (2.5)$$

Для проверки модели температурного поля (2.2)-(2.5) был произведен расчет конвективно-радиационного охлаждения полого бесконечного цилиндра при следующих значениях параметров: $a = 0,2$ (см²/мин); $\lambda = 0,00838$ (Вт/(см·град)); $R_1 = 0,3$ (см); $R_2 = 0,6$ (см); $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2} = 0,91$; $N = 14$; $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,001256$ (Вт/см²град); $t_0(j) = 707$ (°C); $t_{c1} = t_{c2} = 27$ (°C); $t_{H1} = t_{H2} = 27$ (°C); $\Delta\tau = 0,03$ (с) [31]. Результаты расчета температур в цилиндрическом теле приведены в таблице 2.1.

Решение поставленной задачи также может быть получено с помощью стандартной функции *pdepe* среды программирования Matlab [24, 25], синтаксис которой выглядит следующим образом:

sol = pdepe(m, pdeif, pdebeg, pdebound, xmesh, tspan).

Распределение температур в точках по толщине неограниченного полого цилиндра при симметричном конвективно-радиационном охлаждении

Время расчета	0	6	10	20	30	60	120	∞
Внутренняя	707,0	619,6	584,2	511,8	456,4	344,8	226,8	27,0
Средняя $t(N/2)$	707,0	648,7	608,8	529,7	470,2	352,6	230,5	27,0
Внешняя $t(N)$	707,0	609,6	574,6	504,4	450,5	341,4	225,1	27,0

Для использования *pdepe* необходимо корректное задание трех функций: типа дифференциального уравнения *pdedif*, начальных условий *pdebeg* и граничных условий *pdebound*. Решаемое дифференциальное уравнение в *pdepe* описывается видом:

$$c(x, \tau, t, \partial t / \partial x) \frac{\partial t}{\partial \tau} = x^{-m} \cdot \frac{\partial}{\partial x} [x^m f(x, \tau, t, \partial t / \partial x)] + s(x, \tau, t, \partial t / \partial x), \quad (2.6)$$

где $m=0$ – константа формы, равная 0,1,2 соответственно для пластины, цилиндра, шара; $c(x, \tau, t, \partial t / \partial x) = 1/a$ – коэффициент при $\partial t / \partial \tau$ в формуле (2.1); $f(x, \tau, t, \partial t / \partial x) = \partial t / \partial x$; $s(x, \tau, t, \partial t / \partial x) = 0$ – отсутствующий член с источником излучения [31].

Граничные условия в *pdepe* описываются выражением для $x = R_1$ на внутренней и $x = R_2$ на внешней поверхностях полого цилиндра:

$$p(x, \tau, t) + q(x, \tau) \cdot f(x, \tau, t, \partial t / \partial x) = 0, \quad (2.7)$$

где $q(R_1, \tau) = q(R_2, \tau) = 1$ – коэффициенты при градиентах $\partial t(R_1, \tau) / \partial x$ и $\partial t(R_2, \tau) / \partial x$; $p(R_1, \tau, t) = \alpha_1 [t_{c1}(\tau) - t(R_1, \tau)] / \lambda + \varepsilon_{s1} \sigma [T_{H1}^4(\tau) - T^4(R_1, \tau)] / \lambda$; $p(R_2, \tau, t) = -\alpha_2 [t_{c2}(\tau) - t(R_2, \tau)] / \lambda - \varepsilon_{s2} \sigma [T_{H2}^4(\tau) - T^4(R_2, \tau)] / \lambda$ – формулы для градиентов на поверхностях полого цилиндрического тела при несимметричном конвективно-радиационном теплообмене [31].

Результаты расчета температурного поля в неограниченном полом цилиндре с использованием стандартных функций Matlab приведены в

таблице 2.2 и на рис.2.1. Разница с результатами, полученными с помощью конечно-разностных соотношений (2.2)-(2.5), не превышает 1°C [31].

Таблица 2.2

Распределение температур в неограниченном полем цилиндре при симметричном конвективно-радиационном охлаждении в среде Matlab

Время расчета	0	6	10	20	30	60	120	∞
Внутренняя	707,0	620,7	585,4	512,9	457,4	345,6	227,3	27,0
Средняя $t(N/2)$	707,0	649,2	609,4	530,3	470,8	353,2	230,9	27,0
Внешняя $t(N)$	707,0	608,3	573,5	503,8	450,2	341,4	225,2	27,0

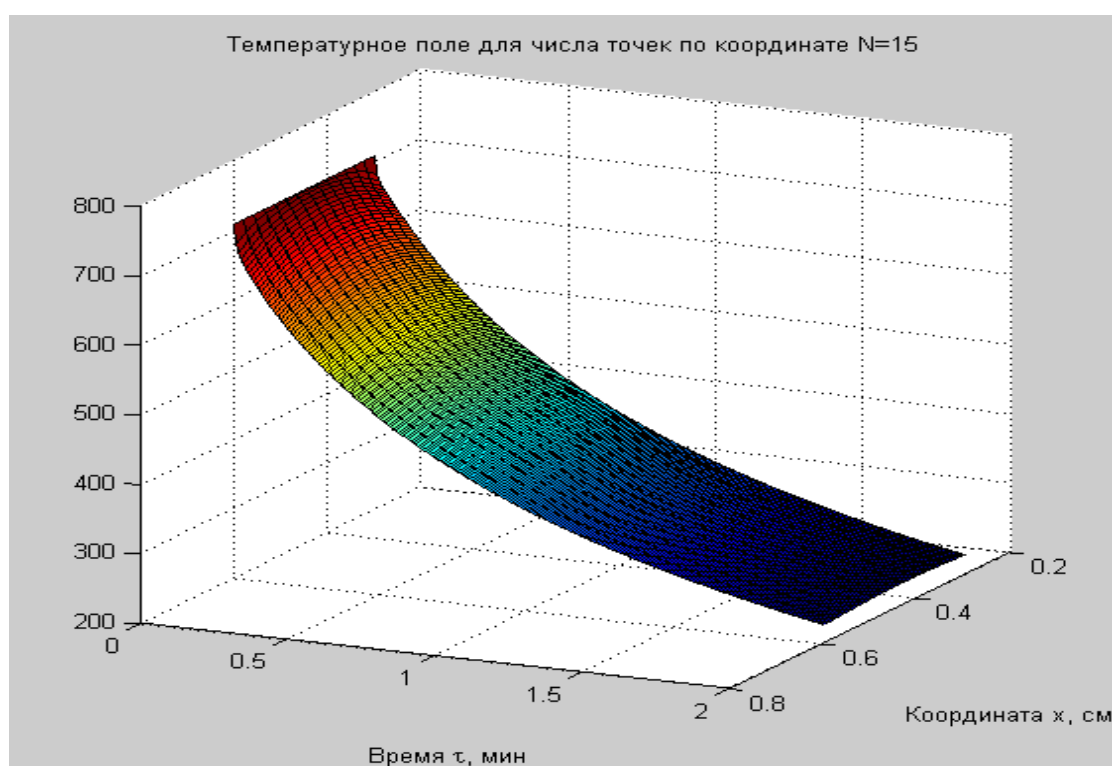


Рис.2.1. Температурное поле в неограниченном полем цилиндре

2.3. Метод конечных элементов для расчета несимметричного конвективно-радиационного теплообмена в сортовых стеклоизделиях

Для повышения точности моделирования процесса отжига необходимо учитывать конечные размеры стеклоизделий цилиндрической формы, в связи с чем возникает задача перехода от одномерного температурного поля по толщине изделия к двумерному распределению, учитывающему градиенты

температуры по высоте изделия [31]. Очевидным подходом к решению задач теплообмена для конечномерных тел является переход от метода конечных разностей к методу конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов – это численная процедура решения задач, сформулированных в виде дифференциального уравнения или вариационного принципа. Термины МКЭ в действительности определяют широкий спектр вычислительных технологий в соответствии с некоторыми общими свойствами [150]. Процесс конечно-элементного анализа включает следующую последовательность шагов:

1. Дискретизация области: построение сетки, задание свойств (материала) элементов. Область, на которой решается задача, аппроксимируется (покрывается) непересекающимися подобластями простого типа, которые называются конечными элементами (КЭ). Множество элементов, на которые разбита область, называется конечно-элементной сеткой. Вершины КЭ называются узлами. Узлы предназначены для описания геометрии элемента и для задания компонент решения (неизвестная величина задается в узлах). Узлы могут быть внешними и внутренними. Внешние узлы лежат на границе КЭ и используются для соединения элементов друг с другом. Также узлы могут располагаться между угловыми узлами. КЭ может иметь и внутренние узлы, обеспечивая более точное описание искомых функций [150].

2. Выбор аппроксимирующих (базисных) функций. Чаще всего базисные функции выбираются в виде полиномов. Поэтому пространство, на котором ищется решение, является пространством кусочно-полиномиальных функций. Базисные функции могут иметь различный порядок: линейный, квадратичный, кубический и т.д.

3. Формирование системы линейных алгебраических уравнений с учетом вкладов от элементов и узлов, введение граничных условий в систему уравнений.

4. Решение системы уравнений.

5. Определение расчетных величин в элементах [150].

Метод конечных элементов сложнее метода конечных разностей при реализации. У МКЭ, однако, есть ряд преимуществ, проявляющихся на реальных задачах: форма обрабатываемой области может быть произвольной, а сетка – более редкой в тех местах, где особая точность не нужна.

Долгое время широкому распространению МКЭ мешало отсутствие алгоритмов автоматического разбиения области на «почти равносторонние» треугольники. После применения алгоритмов, основанных на триангуляции Делоне, удалось создать полностью автоматические конечно-элементные схемы расчетов.

В пакете Matlab имеется набор инструментов для решения дифференциального уравнения теплопроводности в пространственных цилиндрических координатах, в частности, функция *parabolic* [25, 26]. *parabolic* – решатель многомерных краевых задач методом конечных элементов [27] 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:

$$d \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial \tau} - c \cdot \left[\frac{\partial^2 t(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 t(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right] + a_1 t(r, z, \tau) = f, \quad (2.8)$$

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 [31].

Рассмотрим сначала использование МКЭ в Matlab при решении температурной задачи для полого цилиндрического тела. При применении функции *parabolic* необходимо произвести триангуляцию выбранной геометрической области с помощью функции *initmesh*. Обращение к этой функции в Matlab выглядит следующим образом: $[p, e, tr] = \text{initmesh}(g, 'Hmax', hmax)$,

где $g = \text{decs}g([3 \ 4 \ -H/2 \ H/2 \ H/2 \ -H/2 \ R1 \ R1 \ R2 \ R2]')$ – описание геометрической области полого цилиндрического тела в прямоугольной системе координат; $hmax$ – 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 граничных элементов, содержащая номера начальных и конечных узлов этих элементов и номера граничных сегментов, которым они принадлежат; tr – матрица треугольных конечных элементов, содержащая номера входящих в них вершин (узлов) [31].

Визуальное изображение разбиения цилиндрической области на треугольные элементы, полученное с помощью функции *pdeplot(p,e,t)*, показано на рис.2.2. Обращение к решателю *parabolic* имеет синтаксис: $uv = \text{parabolic}(u0, \text{tauv}, b, p, e, tr, c, a1, f, d)$, где uv – температурное поле в моменты времени tauv , для которых вычисляется решение уравнения (2.8); $u0$ – узловое распределение температуры в начальный момент времени $\tau = 0$; $b = @\text{boundaryFileHolParabolic}$ – имя функции, вычисляющей матрицы описания граничных условий [31].

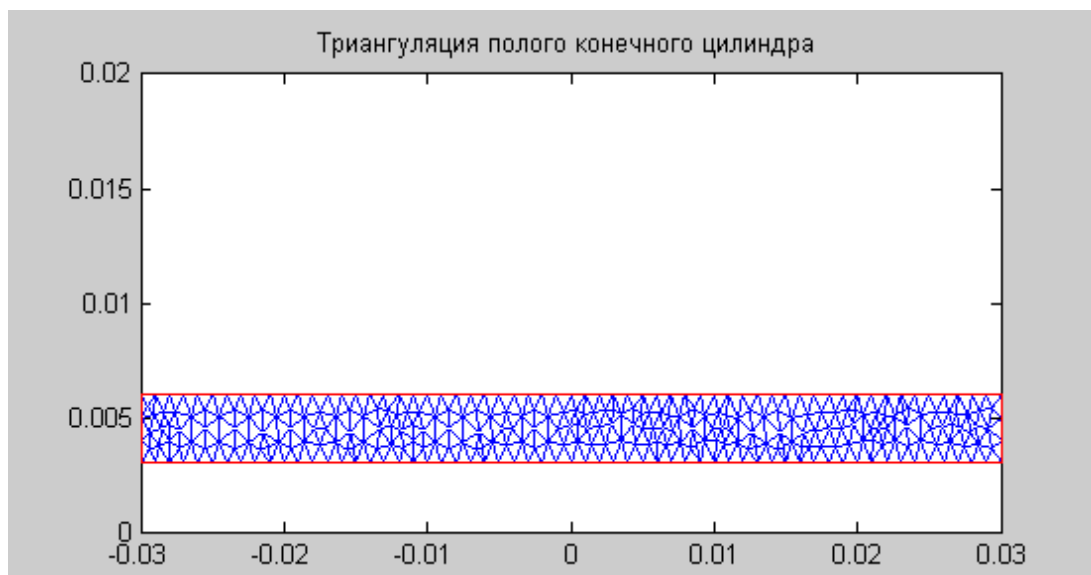


Рис.2.2. Триангуляция полой конечной цилиндрической области

Граничные условия, при которых осуществляется решение задач параболического типа, могут быть 1-го (Дирихле) и 3-го (Неймана) рода и

описываются уравнениями $hu = r$ и $n \cdot (c\nabla u) + qu = g$ соответственно. Для рассматриваемой задачи конвективно-радиационного теплообмена граничные условия 1-го рода отсутствуют, поэтому коэффициенты $h = r = 0$.

Граничные условия 3-го рода Неймана для температурной задачи:

$$-\lambda \cdot \partial t(r, \tau) / \partial r + q \cdot t(r, \tau) = g. \quad (2.9)$$

В то же время для конвективно-радиационного теплообмена на поверхностях цилиндрического тела (например, внутренней) по законам Ньютона и Стефана-Больцмана [20, 64]:

$$-\lambda \cdot \partial T(R_1, \tau) / \partial r = \alpha_1 [T_{cl}(\tau) - T(R_1, \tau)] + \varepsilon_{s1} \sigma [T_{H1}^4(\tau) - T^4(R_1, \tau)]. \quad (2.10)$$

В связи с этим, с учетом перехода к абсолютным температурам, коэффициенты q, g в уравнении (2.9) для внутренней цилиндрической поверхности записываются в виде: $q = \alpha_1 T(R_1, \tau) + \varepsilon_{s1} \sigma T^4(R_1, \tau)$; $g = \alpha_1 T_{cl}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma T_{H1}^4(\tau)$. Результаты расчета двумерного температурного поля в полом конечном цилиндрическом теле можно наглядно визуализировать с помощью функции Matlab *pdeplot*. Температурное поле в момент времени $\tau = 2$ мин показано на рис.2.3 [31].

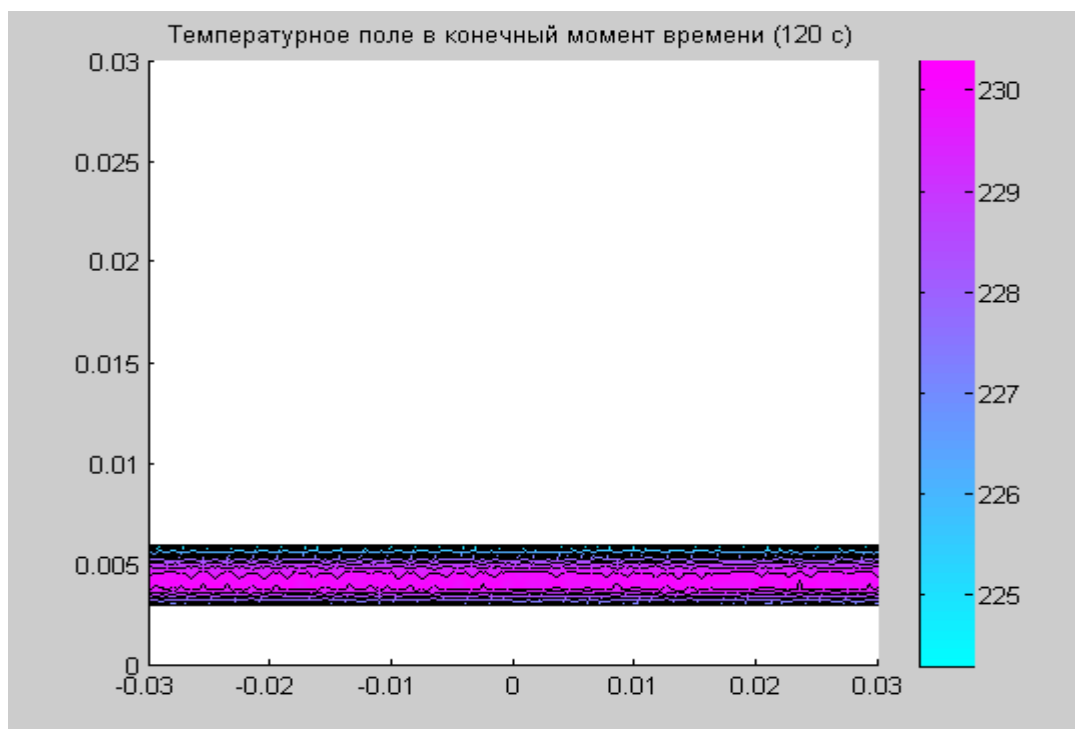


Рис.2.3. Температурное поле в полом цилиндре в конечный момент времени

Из рис.2.3 видно отличное совпадение температурного распределения с результатами, полученными конечно-разностными методами и с помощью функции *pdepe*. Применим разработанные методы к решению задач моделирования температурного поля в сортовых стеклоизделиях цилиндрической формы (стакан, колба), имеющих кроме боковой еще и донную поверхность [31].

Обязательными данными для расчета режимов отжига сортовых стеклоизделий являются их геометрические размеры: высота, толщина доннышка, внутренний и наружный радиусы. Рассмотрим постановку задачи моделирования температурного поля в этом случае [31]. Сортовое изделие имеет следующие геометрические размеры: внутренний радиус R_1 , наружный радиус R_2 , высоту H , толщину доннышка H_2 (рис. 2.4) [22].

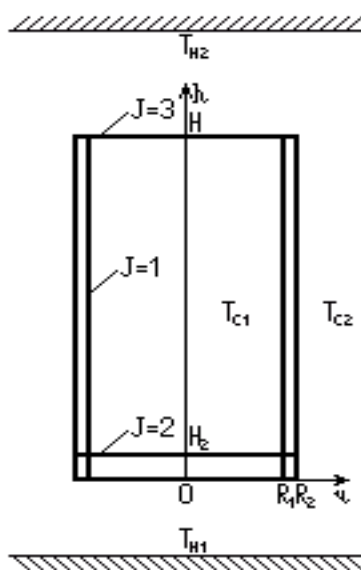


Рис. 2.4. Геометрические размеры, температуры и поверхности стакана при несимметричном конвективно-радиационном теплообмене

В начальный момент времени стакан помещается в среду с температурами T_{c1} внутри и T_{c2} снаружи него. Между ограничивающими поверхностями стакана и окружающей средой происходит несимметричный конвективный теплообмен по закону Ньютона с коэффициентами теплообмена α_1 и α_2 соответственно на внутренней и наружной поверхностях стакана

(Вт/м²град). Кроме того, под и над стаканом имеются нагреватели (ограждающие поверхности) с температурами соответственно $T_{н1}$ и $T_{н2}$. Между внешними точками стакана и нагревателями осуществляется радиационный теплообмен по закону Стефана-Больцмана с приведенными степенями черноты ε_{s1} и ε_{s2} соответственно для нижней и верхней ограждающей поверхностей. Требуется найти распределение температуры в точках стакана в любой момент времени без учета полупрозрачности стекла и многократного отражения излучения от внутренних поверхностей стакана [22].

Для решения поставленной задачи с использованием *parabolic* необходимо произвести триангуляцию выбранной геометрической области с помощью функции *initmesh*. Для цилиндрического тела с полой боковой и сплошной донной поверхностями описание занимаемой геометрической области в прямоугольной системе координат выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{reg1} &= [3 \ 4 \ Hb \ H \ H \ Hb \ R1 \ R1 \ R2 \ R2]'; \\ \text{reg2} &= [3 \ 4 \ 0 \ Hb \ Hb \ 0 \ 0 \ 0 \ R2 \ R2]'; \\ \text{reg} &= [\text{reg1} \ \text{reg2}]; \ g = \text{decsg}(\text{reg}) \ [76]. \end{aligned}$$

Визуальное изображение разбиения цилиндрической области стакана на треугольные элементы, полученное с помощью функции *pdeplot(p,e,t)*, показано на рис.2.5 [76].

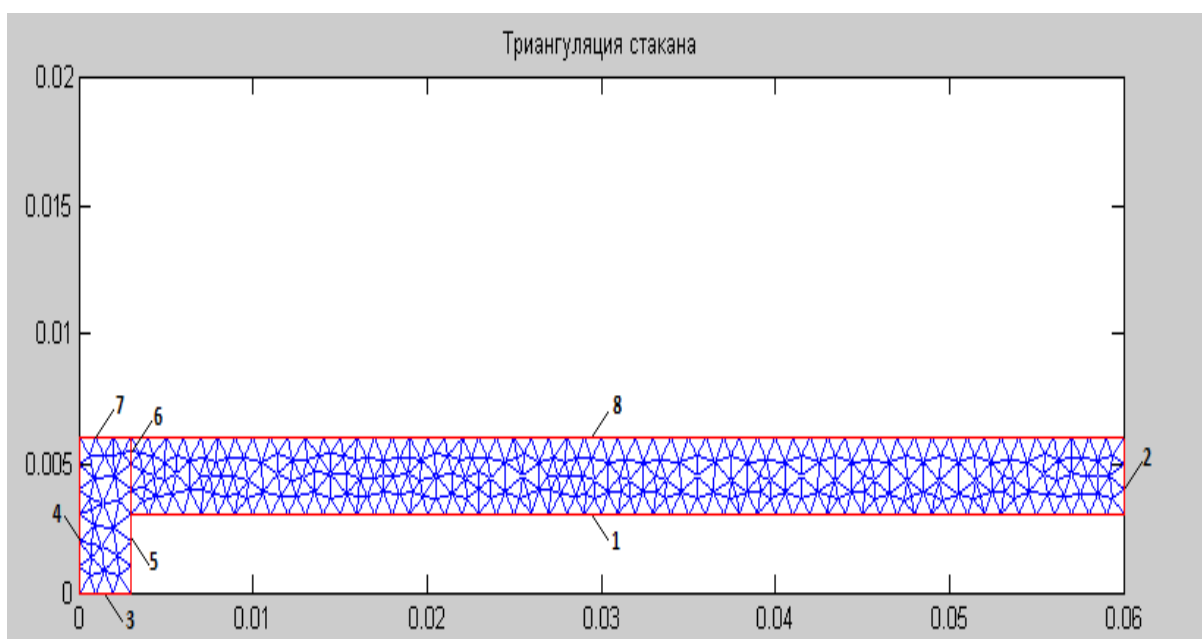


Рис.2.5. Триангуляция цилиндрического стакана

На этом же рисунке показаны номера граничных поверхностей геометрической области цилиндрического тела. Они пронумерованы следующим образом: 1 – внутренняя боковая; 2 – торцевая; 4 – внешняя донная; 5 – внутренняя донная; 7 – наружная донная; 8 – наружная боковая. Обозначения 3 и 6 не являются физическими границами тела и соответствуют внутренним точкам донной поверхности на оси стакана и точкам на пересечении донной и боковой поверхностей [76]. Для решения задачи моделирования температурного поля в цилиндрическом стакане, как отмечено ранее и в работе [31], используем функцию Matlab *parabolic* с измененным файлом граничных условий $b=boundaryFileHolParabolic1(p, e, umy, 0)$, где *umy* – температурное распределение в предыдущий момент времени [76]. Код функции граничных условий приведен на рис.2.6.

```
function [ q, g, h, r ] = boundaryFileHolParabolic1( p, e, u, time )
global alfa2 Tc2 es2 Tn2 sig umy alfa1 Tc1 es1 Tn1
N = 1; ne = size(e,2); q = zeros(N^2, ne); g = zeros(N, ne);
h = zeros(N^2, 2*ne); r = zeros(N, 2*ne);
xy1 = p(:,e(1,:)); xy2 = p(:,e(2,:));
xyMidEdge = (xy1+xy2)/2; y = xyMidEdge(2,i);
T1 = umy(e(1,:)); T2 = umy(e(2,:)); TMidEdge = (T1+T2)/2;
for i=1:ne
    switch(e(5,i))
        case {1, 5} % внутренние боковая и донная поверхности
            q(1,i) = (alfa1+es1*sig*TMidEdge(i)^3)*y;
            g(1,i) = (alfa1*Tc1+es1*sig*Tn1^4)*y;
        case {2}% торцевая поверхность
            q(1,i) = (alfa2+es1*sig*TMidEdge(i)^3)*y(i);
            g(1,i) = (alfa2*Tc2+es1*sig*Tn1^4)*y(i);
        case {7, 8}% торцевая, наружные донная и боковая поверхности
            q(1,i) = (alfa2+0.5*(es1+es2)*sig*TMidEdge(i)^3)*y(i);
            g(1,i) = (alfa2*Tc2+0.5*sig*(es2*Tn2^4+es1*Tn1^4))*y(i);
        case 4% внешняя донная поверхность
            q(1,i) = (alfa2+es2*sig*TMidEdge^3)*y;
            g(1,i) = (alfa2*Tc2+es2*sig*Tn2^4)*y;
    end
end
```

Рис.2.6. Текст функции граничных условий несимметричного конвективно-радиационного теплообмена цилиндрического стакана

Результаты расчета двухмерного температурного поля в стакане в конечный момент времени для рассмотренного в разделе 2.2 примера приведены на рис.2.7, полученном с помощью функции Matlab *pdeplot*.

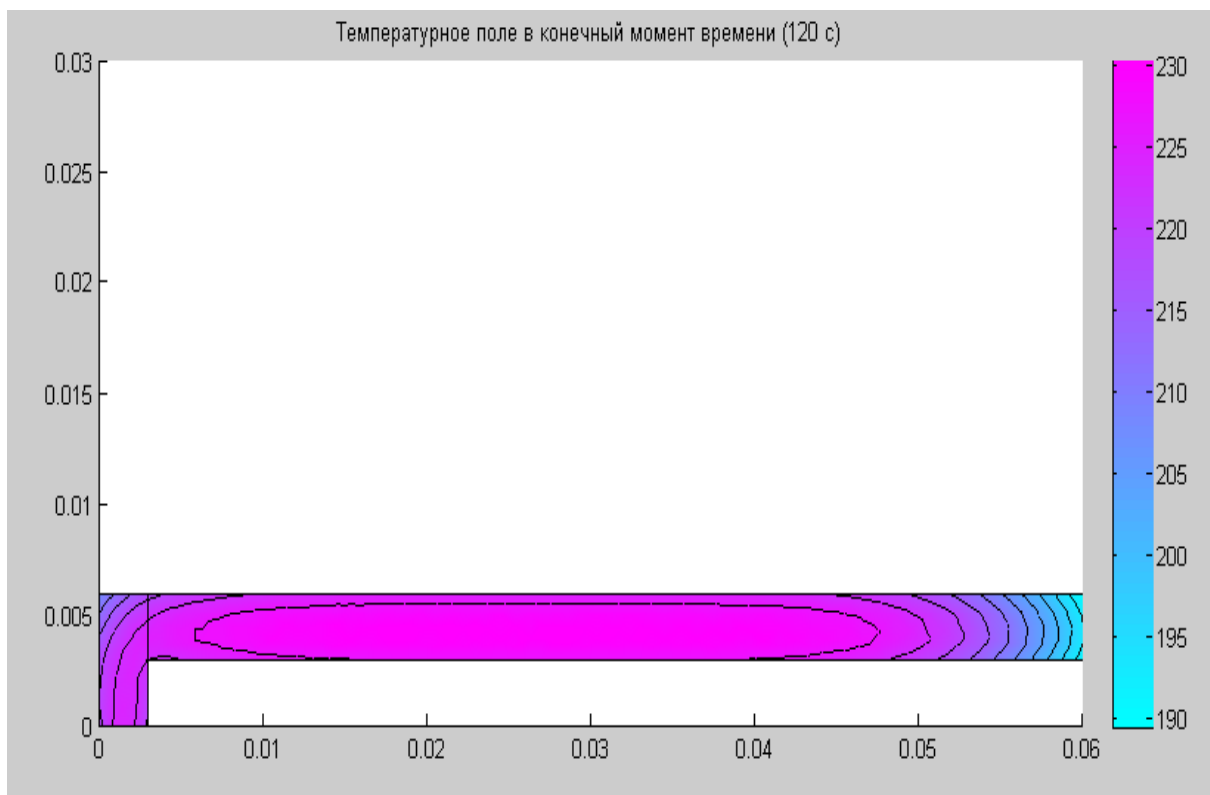


Рис.2.7. Температурное поле в сортовом стеклоизделии (стакане)

По сравнению с приведенными для полого бесконечного цилиндра результатами основное отличие заключается в наличии градиента температур по высоте изделия, наиболее сильно выраженное в верхней части боковой поверхности [76]. Это связано с конвективно-радиационным охлаждением с торцевой поверхности стакана. Таким образом, разработанные методы можно успешно использовать для решения задач моделирования температурных полей в сортовых стеклоизделиях цилиндрической формы [76].

2.4. Применение разработанных математических моделей температурного поля к процессу отжига сортовых стеклоизделий

При описании процесса отжига сортового стекла после создания математической модели температурного поля возникает необходимость проверки совпадения результатов расчетов с экспериментально измеренными температурами характерных точек изделия (для стакана это обычно температуры средних точек наружной боковой и внутренней донной поверхностей) [76]. Тепловая история стеклоизделия начинается с процесса формования, после окончания которого стекло не сразу попадает в печь отжига, так как его доставка занимает некоторое время [9, 21]. В связи с недостаточно высокой температурой на входе в печь и неравномерным температурным распределением в боковой и донной поверхностях сортовых стеклоизделий возникает необходимость их нагрева до температуры отжига.

После выхода из формующей машины охлаждение изделия до печи отжига происходит в несимметричных условиях, так как снизу оно контактирует с другими стаканами, а сверху – с окружающей воздушной средой. В связи с этим на входе в печь отжига в изделии имеют место несимметричные распределения температур и напряжений и неравновесное состояние стеклообразующего вещества [21]. В то же время, известные алгоритмы расчета релаксации структуры и поля напряжений в стекле [28-30] строятся на допущении, что в начальный момент расчета стекло находится в равновесном состоянии, а напряжения в его слоях отсутствуют. Таким образом, анализ условий технологического процесса отжига сортового стекла на входе в печь показывает несоблюдение вышеуказанного допущения. На основании этого можно сделать вывод, что расчет полей температур и напряжений должен производиться, начиная с доотжигового периода.

Для проверки адекватности математической модели температурного поля в сортовых изделиях необходимо решить задачу идентификации параметров конвективного (коэффициенты теплоотдачи для внутренней и

внешней поверхностей изделия (α_1, α_2 (Вт/(м²град))) и (или) радиационного (степени черноты верхней и нижней ограждающих поверхностей технологического оборудования $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}$) теплообмена [23]. Вычисления необходимо начинать сразу же после окончания этапа формования стеклоизделия, так как только в этот момент стекло находится в равновесном состоянии. Выбор определяемых параметров зависит от типа оборудования в соответствии с преобладающими механизмами внешнего теплопереноса и соответствующим типом печи (конвективная, радиационная, конвективно-радиационная) [2, 76].

При расчете необходимо учитывать изменяющиеся начальные и граничные условия на каждом из этапов температурно-временного режима (ТВР) до печи и при перемещении изделия в следующую зону печи отжига [27, 64]. Функция для моделирования температурного поля в цилиндрических изделиях имеет вид: $THol=CilinderHolParabolic1(\tau, c, d, f, apar, p, e, tmesh, b)$, в которую как глобальные переменные передаются величины a_1, a_2, a_3, a_4 (°C) и b_1, b_2, b_3, b_4 (°C/мин) – начальные температуры и скорости изменения температур среды внутри и снаружи изделия и ограждающих поверхностей (печи) под и над транспортирующей лентой для каждого из этапов ТВР [76]. Все температуры в программе выражены в градусах Кельвина для удобства записи радиационных тепловых потоков в файле граничных условий.

При идентификации условий теплообмена необходимо наличие целевой функции, определяющей отклонение рассчитанных по модели температур характерных точек стакана от их экспериментальных значений. Для периода отжига в качестве характерной точки используется середина наружной боковой поверхности стакана с температурой tl_iden . Для доотжигового периода к ней добавляется середина внутренней донной поверхности, имеющая температуру tl_bot [76]. Результаты идентификации условий конвективно-радиационного теплообмена стакана до печи отжига приведены на рис.2.8.

Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена стакана до печи отжига								
Температура среды внутри изделия, град.С	800	700	600	500	500	400	500	450
Температура среды снаружи изделия, град.С	300	300	300	300	300	300	500	400
Температура верхней ограждающей поверхности, град.С	200	200	200	200	200	200	250	250
Температура нижней ограждающей поверхности, град.С	400	400	400	400	400	400	450	450
Расчетная температура боковой поверхности, град.С	794.1	739.6	694.6	656.4	623.4	570.3	552.8	518.0
Расчетная температура донной поверхности, град.С	876.7	833.7	791.4	753.3	720.2	664.2	641.9	599.1
Время от формующей машины, мин	0.14	0.29	0.43	0.57	0.71	1.0	1.1	1.5
Коэффициент конвективной теплоотдачи от наружных поверхностей, Вт/(кв.м*град)								10.57
Приведенная степень черноты для нижней ограждающей поверхности								0.9
Коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренних поверхностей, Вт/(кв.м*град)								10.57
Приведенная степень черноты для верхней ограждающей поверхности								0.6498
Экспериментальная температура наружной боковой поверхности изделия на входе в печь отжига, град.С								520
Экспериментальная температура внутренней донной поверхности изделия на входе в печь отжига, град.С								600
<input type="radio"/> Идентификация параметров теплообмена								

Рис. 2.8. Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена стакана до печи отжига

Исходные данные для решения задачи идентификации, описывающие условия в печи отжига сортового стекла на Спировском стеклозаводе "Индустрия", приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные по зонам печи отжига

Зона отжига	Координата печи, м	Температура среды $a_1 = a_2$, °С	Температура печи $a_3 = a_4$, °С	Температура поверхности tl_{iden} , °С
1	2,4	545	540	545
2	4,8	525	520	526
3	7,2	490	480	491
4	9,6	455	425	456
5	12,0	345	325	346
6	14,4	300	280	302
7	16,8	250	230	251
8	19,2	200	180	201
9	21,6	150	130	151
10	24,0	100	80	101

Скорость движения изделия в печи составляет $V = 0,27$ (м/мин), поэтому по данным таблицы 2.3 можно рассчитать время нахождения в зоне отжига и скорости изменения температур среды и печи на каждом этапе температурно-временного режима [76].

До печи отжига идентифицируются приведенные степени черноты при радиационном теплообмене стакана с нижней и верхней ограждающими поверхностями, а конвективный теплообмен считается естественным. В печи отжига рассматриваются равные степени черноты $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s2}$ и естественный конвективный теплообмен для внутренних и искусственный конвективный теплообмен для наружных поверхностей стеклоизделия [21]. Данные таблицы 2.3 в среде Matlab удобно читать из файла Excel [76]. При расчетах используются температурные зависимости теплофизических параметров стекла α и λ от температуры (1.4), а их значения при 0°C приведены на рис.1.1. Они являются результатом работы модулей А и В «АСРЦ», формирующих модель вида *Состав-Свойства*.

Для идентификации параметров теплообмена в среде Matlab необходимо использовать функцию *fmincon*, позволяющую эффективно решать задачи нелинейной оптимизации функции нескольких переменных с ограничениями типа неравенств и равенств. Фрагмент основной программы с использованием функции *fmincon* и рассчитанное температурное распределение приведены в приложениях [76]. Вызов функции *fmincon* с используемыми параметрами для периода отжига выглядит следующим образом [77]:

```
[par,fval]=fmincon(@Iden1,par0,A,bneq,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,optset,tau).
```

Описание параметров функции *fmincon* приведено в таблице 2.4. Для установки значений входных и выходных аргументов применяется опция *optset=optimset('Display','iter','TolX',0.02,'MaxFunEvals',100)*.

Параметры при идентификации условий теплообмена стакана в печи отжига показаны на рис.2.9.

Описание используемых параметров функции *fmincon*

Выходные аргументы	<i>par</i>	значения параметров теплообмена в результате минимизации критерия
	<i>fval</i>	минимальное значение целевой функции
Входные аргументы	<i>Ide1</i>	целевая функция суммы отклонений экспериментальных и рассчитанных температур характерных точек
	<i>par0</i>	вектор начальных значений параметров
	<i>A, B, Aeq, Beq, lb, ub</i>	матрицы ограничений типа неравенства, равенства, нижние и верхние границы переменных
	<i>nonlcon</i>	функция нелинейных ограничений
	<i>optset</i>	параметры оптимизационных опций, используемых в <i>fmincon</i>
	<i>tau</i>	моменты времени при расчете температурного поля

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.2.9. Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена стакана в печи отжига

При моделировании технологического процесса отжига сортовых стеклоизделий для повышения точности расчета температурного поля необходимо учитывать взаимный радиационный теплообмен поверхностей изделия и печи между собой. В этом случае требуется введение так

называемых угловых коэффициентов излучения (УКИ), характеризующих части энергии излучения, попадающих с элементов внутренних донной и боковой поверхностей друг на друга и на ограждающие поверхности печи отжига. В вышеприведенных результатах идентификации условий теплообмена стакана до и в печи отжига на Спировском стекольном заводе "Индустрия" при расчете радиационного теплообмена учтены УКИ между поверхностями изделия. Рассмотрим более подробно решение этой задачи.

Под угловым коэффициентом излучения понимается величина, характеризующая долю энергии излучения, которая попадает с элементарной площадки одного тела на элементарную площадку другого тела по отношению к полному потоку, испускаемому элементарной площадкой первого тела. УКИ представляет собой геометрическую характеристику взаимного положения двух поверхностей в пространстве. Произведение углового коэффициента излучения на площадь соответствующей элементарной площадки носит название элементарной взаимной поверхности излучения [77-80].

Разбиение цилиндрического тела (стакана) на поверхности радиационного теплообмена и граничные поверхности геометрической области показано на рис. 2.4 и 2.5 соответственно. Введенные геометрические размеры цилиндрического стакана и результаты триангуляции в «АСРЦ» приведены на рис. 2.10, 2.11.

Геометрические размеры		
Наружный диаметр	7.2	см
Внутренний диаметр	6.6	см
Высота	10.8	см
Толщина доньшка	0.6	см

Рис.2.10. Геометрические размеры цилиндрического стакана, отжигаемого на Спировском стекольном заводе "Индустрия"

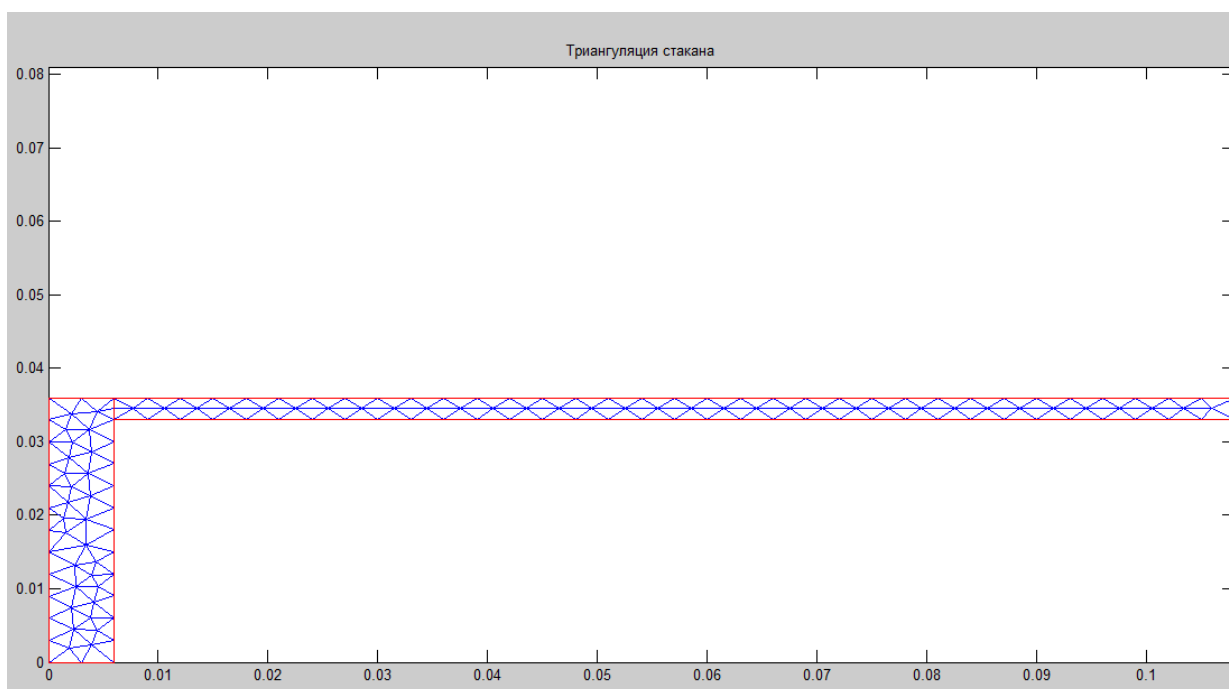


Рис.2.11. Триангуляция цилиндрического стакана, отжигаемого на Спировском стеклозаводе "Индустрия"

Наиболее сложным является учет взаимного радиационного теплообмена между внутренними донной и боковой поверхностями стакана [22]. Из рис. 2.4, 2.11 видно, что граничные боковая ($J=1$) и донная ($J=2$) поверхности разбиты с шагом $\Delta h = h_{\max}$. Поэтому при расчете УКИ внутренняя боковая поверхность разбивается на $N_H = (H - H_b) / \Delta h$ слоев по высоте, а внутренняя донная поверхность – на $N_R = R_1 / \Delta h$ слоев по радиусу.

Обозначим УКИ k -го слоя внутренней боковой поверхности на i -й слой внутренней донной поверхности через $F_{d1d2}(k, i)$, $k = \overline{1, N_H}$; $i = \overline{1, N_R}$, i -го донного элемента на k -й боковой элемент – $F_{d2d1}(k, i)$, k -го бокового и i -го донного элементов на торцевую поверхность соответственно через $F_{d13}(k)$ и $F_{d23}(i)$, боковых элементов на расстоянии Δh друг от друга – $F'_{d1d1}(k)$ [21, 81].

Расчеты базируются на формуле вычисления УКИ двух дисков радиусов r_1 и r_2 , находящихся на расстоянии h друг от друга [77]:

$$F_{r_1, r_2, h} = \left(x - \sqrt{x^2 - 4B^2C^2} \right) / (2B^2), \quad B = r_1/h; \quad C = r_2/h; \quad x = 1 + B^2 + C^2. \quad (2.11)$$

Найдем УКИ $F_{r_1, R_1, h} = F(i, k)$, $r_1 = i\Delta h$, $i = \overline{0, N_R}$; $h = k\Delta h$, $k = \overline{0, N_H}$ по формуле (2.11). Тогда с учетом площадей круга $dA_C(i) = \pi(i\Delta h)^2$, $i = \overline{0, N_R}$ и кольцевого донного элемента $dA_2(i) = dA_C(i) - dA_C(i-1)$, $i = \overline{1, N_R}$ УКИ i -го донного элемента на круг радиуса R_1 на расстоянии $k\Delta h$ от него находится из $F_{d2c}(i, k) = [F(i, k)dA_C(i) - F(i-1, k)dA_C(i-1)]/dA_2(i)$, $i = \overline{1, N_R}$; $k = \overline{0, N_H}$. (2.12)

Тогда УКИ i -го донного элемента на k -й боковой элемент равен

$$F_{d2d1}(i, k) = F_{d2c}(i, k-1) - F_{d2c}(i, k), \quad i = \overline{1, N_R}; \quad k = \overline{1, N_H}. \quad (2.13)$$

УКИ i -го донного элемента на боковую поверхность можно найти,

$$\text{просуммировав значения из (2.13)} \quad F_{d21}(i) = \sum_{k=1}^{N_H} F_{d2d1}(i, k), \quad i = \overline{1, N_R}. \quad (2.14)$$

Тогда УКИ i -го донного элемента на торцевую поверхность с учетом того, что сумма УКИ для любой поверхности замкнутой области равна единице [77],

$$\text{находится из выражения: } F_{d23}(i) = 1 - F_{d21}(i), \quad i = \overline{1, N_R}. \quad (2.15)$$

По соотношению взаимности [78] с учетом площади поверхности k -го бокового элемента $dA_1(k) = 2\pi R_1 \Delta h$ УКИ k -го бокового элемента на i -й донный

$$\text{элемент определяется из: } F_{d1d2}(k, i) = \frac{F_{d2d1}(i, k) \cdot dA_2(i)}{dA_1(k)}, \quad k = \overline{1, N_H}; \quad i = \overline{1, N_R}. \quad (2.16)$$

УКИ k -го бокового элемента на донную поверхность можно найти,

$$\text{просуммировав значения из (2.14)} \quad F_{d12}(k) = \sum_{i=1}^{N_R} F_{d1d2}(k, i), \quad k = \overline{1, N_H}. \quad (2.17)$$

С учетом симметричного расположения торцевой поверхности ($J=3$ на рис.2.4) с донной УКИ k -го бокового элемента на нее находится по формуле:

$$F_{d13}(k) = F_{d12}(N_H - k + 1), \quad k = \overline{1, N_H}. \quad (2.18)$$

УКИ боковых элементов на расстоянии $k\Delta h$ друг от друга можно найти

$$\text{из соотношений: } F'_{d1d1}(k) = \begin{cases} 1 - 2F_{d12}(1), & k=0; \\ F_{d12}(k) - F_{d12}(k+1), & k=\overline{1, N_H-1}. \end{cases} \quad (2.19)$$

Тогда УКИ боковых кольцевых элементов друг на друга рассчитываются с использованием (2.19): $F_{d1d1}(k,i) = F'_{d1d1}(|k-i|), k = \overline{1, N_H}; i = \overline{1, N_H}$. (2.20)

Полученные для геометрических размеров стакана на рис.2.10 значения УКИ в среде Matlab приведены в таблицах (2.5)-(2.7).

Таблица 2.5

Значения УКИ донной поверхности на боковую и торцевую $F_{d2d1}(i,k)$, $F_{d21}(i)$ и $F_{d23}(i)$ (k – номер бокового элемента; i – номер донного элемента)

Fd2d1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Fd21	Fd23
1	0.0083	0.0240	0.0375	0.0478	0.0547	0.0582	0.0590	0.0577	0.0550	0.0514	0.0474	0.0433	0.9053	0.0947
2	0.0085	0.0247	0.0385	0.0489	0.0555	0.0588	0.0593	0.0578	0.0549	0.0511	0.0471	0.0429	0.9056	0.0944
3	0.0091	0.0263	0.0407	0.0510	0.0573	0.0600	0.0599	0.0578	0.0545	0.0505	0.0463	0.0421	0.9061	0.0939
4	0.0102	0.0291	0.0442	0.0544	0.0599	0.0616	0.0605	0.0576	0.0538	0.0495	0.0451	0.0408	0.9069	0.0931
5	0.0118	0.0333	0.0495	0.0592	0.0633	0.0634	0.0609	0.0570	0.0525	0.0479	0.0433	0.0391	0.9079	0.0921
6	0.0145	0.0400	0.0572	0.0655	0.0672	0.0649	0.0607	0.0556	0.0505	0.0455	0.0409	0.0368	0.9092	0.0908
7	0.0191	0.0507	0.0680	0.0730	0.0707	0.0654	0.0591	0.0530	0.0473	0.0423	0.0378	0.0339	0.9107	0.0893
8	0.0279	0.0685	0.0826	0.0803	0.0722	0.0633	0.0554	0.0486	0.0429	0.0381	0.0340	0.0305	0.9124	0.0876
9	0.0474	0.0987	0.0983	0.0830	0.0684	0.0571	0.0487	0.0422	0.0371	0.0330	0.0295	0.0266	0.9143	0.0857
10	0.1041	0.1412	0.1012	0.0727	0.0560	0.0456	0.0388	0.0338	0.0301	0.0271	0.0245	0.0224	0.9164	0.0836
11	0.3164	0.1124	0.0599	0.0422	0.0341	0.0295	0.0265	0.0242	0.0223	0.0207	0.0193	0.0180	0.9186	0.0814
													F21=0.9128	F23=0.0872

Таблица 2.6

Значения УКИ боковой поверхности на донную и торцевую $F_{d1d2}(k,i)$, $F_{d12}(k)$ и $F_{d13}(k)$ (k – номер бокового элемента; i – номер донного элемента)

Fd1d2	1	2	3	Fd12	Fd13
1	3.7563e-04	0.0012	0.0021	0.4778	0.0245
2	0.0011	0.0034	0.0060	0.4354	0.0264
3	0.0017	0.0053	0.0092	0.3961	0.0283
4	0.0022	0.0067	0.0116	0.3598	0.0305
5	0.0025	0.0076	0.0130	0.3264	0.0329
6	0.0026	0.0080	0.0136	0.2958	0.0356
7	0.0027	0.0081	0.0136	0.2679	0.0384
8	0.0026	0.0079	0.0131	0.2424	0.0416
9	0.0025	0.0075	0.0124	0.2194	0.0452
10	0.0023	0.0070	0.0115	0.1985	0.0490
11	0.0022	0.0064	0.0105	0.1796	0.0533
12	0.0020	0.0059	0.0096	0.1626	0.0581
13	0.0018	0.0053	0.0087	0.1473	0.0634
14	0.0016	0.0048	0.0078	0.1335	0.0693
15	0.0015	0.0043	0.0070	0.1211	0.0758
16	0.0013	0.0039	0.0063	0.1100	0.0830
17	0.0012	0.0035	0.0057	0.1000	0.0911
18	0.0011	0.0031	0.0051	0.0911	0.1000
				F12=0.1477	F13=0.1477

Значения УКИ боковой поверхности на себя $F_{d1d1}(k,i)$
(k, i – номера боковых элементов)

Fd1d1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Fd11
1	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.0306	0.0279	0.0254	0.0231	0.0209	0.0189	0.0170	0.4977
2	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.0306	0.0279	0.0254	0.0231	0.0209	0.0189	0.5382
3	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.0306	0.0279	0.0254	0.0231	0.0209	0.5755
4	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.0306	0.0279	0.0254	0.0231	0.6097
5	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.0306	0.0279	0.0254	0.6407
6	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.0306	0.0279	0.6686
7	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.0306	0.6937
8	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.0334	0.7159
9	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.0363	0.7355
10	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.0393	0.7525
11	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.0424	0.7670
12	0.0170	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.0444	0.7793
13	0.0153	0.0170	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.0424	0.7893
14	0.0138	0.0153	0.0170	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.0393	0.7972
15	0.0124	0.0138	0.0153	0.0170	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.0363	0.8031
16	0.0111	0.0124	0.0138	0.0153	0.0170	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.0334	0.8070
17	0.0100	0.0111	0.0124	0.0138	0.0153	0.0170	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.0306	0.8089
18	0.0089	0.0100	0.0111	0.0124	0.0138	0.0153	0.0170	0.0189	0.0209	0.0231	0.0254	0.0279	0.8089

Таким образом, расчет температурного поля в цилиндрическом стакане при его несимметричном конвективно-радиационном теплообмене с окружающей средой и ограждающими поверхностями необходимо осуществлять с учетом выражений для УКИ (2.11)-(2.20). В этом случае коэффициенты $g = \alpha_1 T_{c1}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma T_{H1}^4(\tau)$ в уравнении (2.9) необходимо скорректировать следующим образом. Для k -го бокового элемента внутренней цилиндрической поверхности они запишутся в виде:

$$g(k) = \alpha_1 T_{c1}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma \left[F_{d13}(k) T_{H1}^4(\tau) + \sum_{i=1}^{N_H} F_{d1d1}(k,i) T_{1i}^4(\tau) + \sum_{i=1}^{N_R} F_{d1d2}(k,i) T_{2i}^4(\tau) \right]. \quad (2.21)$$

Для i -го элемента внутренней донной поверхности:

$$g(i) = \alpha_1 T_{c1}(\tau) + \varepsilon_{s1} \sigma \left[F_{d23}(i) T_{H1}^4(\tau) + \sum_{k=1}^{N_H} F_{d2d1}(i,k) T_{1k}^4(\tau) \right]. \quad (2.22)$$

Здесь $T_{1k}^4(\tau)$, $T_{2i}^4(\tau)$ – четвертые степени абсолютных температур k -го бокового и i -го донного элементов, которые находятся усреднением температур составляющих их точек.

2.5. Выводы

В главе 2 диссертации разработана математическая модель температурного поля при отжиге стеклоизделий цилиндрической формы, учитывающая зависимость теплофизических свойств стекла от температуры, несимметричные условия конвективно-радиационного теплообмена поверхностей изделия с окружающей средой, ограждающими поверхностями и между собой.

При разработке модели использованы неявные схемы решения дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах в среде Matlab, позволяющие рассмотреть сложные геометрическую форму, начальные и граничные условия при термообработке изделий.

В главе 2 автором решены следующие задачи:

1. Рассмотрены различные численные схемы решения задачи несимметричного конвективно-радиационного теплообмена для цилиндрических тел. Показано хорошее совпадение результатов расчета для явных, неявных схем и одномерного, двухмерного случаев. Продемонстрированы корректность и эффективность использования метода конечных элементов для повышения точности определения температурного поля в конечномерных цилиндрических изделиях.

2. Разработана модель температурного поля, учитывающая разбиение стеклоизделия на расчетные поверхности (цилиндрические тела) и взаимный радиационный теплообмен между внутренними донной и боковой поверхностями стакана.

3. С использованием созданной модели температурного поля решена задача идентификации условий теплообмена для изделий, отжигаемых на Спировском стеклозаводе "Индустрия". Показано хорошее совпадение рассчитанных температур характерных точек донной и боковой поверхностей

изделия с их экспериментальными значениями на этапах температурно-временного режима в печи отжига.

Продемонстрирована работа модулей идентификации условий теплообмена до и в печи отжига (G и H) автоматизированной системы в среде Matlab на примере сортового стекла, производимого в цехе отжига Спировского стеклозавода «Индустрия». Приведены экранные формы с рассчитанными значениями угловых коэффициентов излучения поверхностей цилиндрического изделия, температур характерных точек и параметров конвективно-радиационного теплообмена.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛАКСАЦИИ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЙ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ОТЖИГА СОРТОВЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

Как уже было отмечено во введении к работе, для расчета релаксации структуры и напряжений в стекле большинство авторов широко применяют релаксационную модель Тула-Нарайанасвами [28, 29] и алгоритм Ленинградского института химии силикатов [30]. Для стеклоизделий цилиндрической формы, имеющих боковую и донную поверхности, математическая модель расчета релаксации структуры и поля напряжений должна учитывать разбиение изделия на несколько расчетных тел [21, 22].

В данной работе в связи с расчетом температурного поля с помощью функции Matlab *parabolic* [31] возникает необходимость перехода от точек триангуляции выбранной геометрической области к двумерной сетке по радиусу и высоте. Введем следующие обозначения при расчете релаксации структуры и напряжений: $j = \overline{1, N_j}$ – номер поверхности расчета ($N_j = 2$; $j = 1$ – боковая поверхность; $j = 2$ – донная поверхность стакана); $i = \overline{0, N_{R_j}}$ – номер точки по горизонтальной координате (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 вертикальной координате (высоте), $N_{H_1} = N_H = (H - H_b)/\Delta h$; $N_{H_2} = 2H_b/\Delta h$; $m = 1, 2$ – горизонтальное ($m = 1$) и вертикальное ($m = 2$) направления [21, 22].

Тогда необходимо перейти от рассчитанных в l -й момент времени значений температур в точках триангуляции к температурам в узлах вышеприведенной пространственной сетки $T_l(j, i, k)$, $j = \overline{1, N_j}$; $i = \overline{0, N_{R_j}}$; $k = \overline{0, N_{H_j}}$.

Это производится усреднением температур двух ближайших к рассматриваемому узлу двумерной сетки точек триангуляции.

3.1. Математическая модель расчета релаксации структуры и поля напряжений в стеклоизделиях цилиндрической формы

Как было отмечено в главе 1.5, при рассмотрении процессов структурной релаксации в стеклоизделиях согласно релаксационной модели стеклования Тула-Нарайанасвами [28, 29] любое структурное состояние стеклообразующего вещества может быть описано значениями N_r структурных температур. При расчете температурно-временных зависимостей свойств количество релаксационных процессов $N_r = 5$ обеспечивает достаточную точность вычислений. Также для корректной работы модели релаксации структуры и напряжений необходимо, чтобы стекло в начальный момент расчета находилось в равновесном состоянии, когда структурная и фактическая температуры равны, а напряжения в его слоях отсутствовали.

Движущей силой процесса структурной релаксации является разность структурной и фактической температур:

$$\Delta T_{fl}(n, j, i, k) = \left[T_{f(l-1)}(n, j, i, k) - \Delta T_l(j, i, k) \right] \cdot \exp\left(-\frac{\Delta \tau_r}{\tau_l(n, j, i, k)} \right), \quad (3.1),$$

где $\Delta T_{fl}(n, j, i, k)$ – разность структурной и фактической температур на l -м временном шаге по n -му релаксационному процессу; $\Delta T_l(j, i, k)$ – изменение фактической температуры; $\Delta \tau_r, \tau_l(n, j, i, k)$ – шаг расчета и время релаксации структуры (с) [21]. Структурная температура $T_{fl}(j, i, k)$ и логарифм времени структурной релаксации $\lg \tau_l(n, j, i, k)$ рассчитываются по уравнениям:

$$\begin{cases} \lg \tau_l(n, j, i, k) = \lg \eta_{l-1}(j, i, k) - \lg K_n \cdot \frac{T_{f(l-1)}(j, i, k)}{T_{l-1}(j, i, k)}; \\ T_{fl}(j, i, k) = \sum_{n=1}^{N_r} g_n \cdot \left[\Delta T_{fl}(n, j, i, k) + T_l(j, i, k) \right]; \end{cases} \quad (3.2)$$

логарифм вязкости $\lg \eta_l(j, i, k)$ и дилатометрическая длина слоя $L_{dl}(j, i, k)$ – из

$$\begin{cases} \lg \eta_l(j, i, k) = \left[A + \frac{B}{T_{fl}(j, i, k) - T_0} \right] \cdot \frac{T_{fl}(j, i, k)}{T_l(j, i, k)} - \lg \eta_0 \cdot \left[\frac{T_{fl}(j, i, k)}{T_l(j, i, k)} - 1 \right]; \\ L_{dl}(j, i, k) = [T_{fl}(j, i, k) - T_0(j, i, k)] \cdot \alpha_l + [T_l(j, i, k) - T_{fl}(j, i, k)] \cdot \alpha_g. \end{cases} \quad (3.3)$$

Здесь A, B, T_0 – постоянные в уравнении Фулчера-Таммана, описывающем температурную зависимость вязкости стеклообразующего вещества в равновесном состоянии ($T_f = T$); $\lg \eta_0$ – постоянная в уравнении Аррениуса, описывающем температурную зависимость вязкости стеклообразующего вещества в изоструктурном состоянии $T_f = const$; $\lg K_n$ – модуль перехода от вязкости к времени релаксации по n -му релаксационному процессу при равновесной структуре [21]; α_l, α_g – коэффициенты температурного расширения для равновесного и изоструктурного состояний стеклообразующего вещества [12].

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

$$\begin{aligned} L_{fl}(m, j, i, k) &= L_{dl}(j, i, k) - R_{l-1}(m, j, i, k); \\ L_{rl}(1, j, i) &= \frac{\sum_{k=0}^N L_{fl}(1, j, i, k)}{N+1}; \quad L_{rl}(2, j, k) = \frac{\sum_{i=0}^N L_{fl}(2, j, i, k)}{N+1}; \\ \Delta \sigma_l(m, j, i, k) &= \left[(L_{dl}(j, i, k) - L_{rl}(m, j, i)) - (L_{d(l-1)}(j, i, k) - L_{r(l-1)}(m, j, i)) \right] \cdot \frac{E}{1-\mu}; \\ R_l(m, j, i, k) &= R_{l-1}(m, j, i, k) + \frac{1-\mu}{E} \cdot \Delta \sigma_{rl}(m, j, i, k); \\ \sigma'_l(m, n, j, i, k) &= \sigma'_{l-1}(m, n, j, i, k) + g_n \Delta \sigma_l(m, j, i, k); \\ \Delta \sigma_{rl}(m, n, j, i, k) &= \sigma'_l(m, n, j, i, k) \cdot [1 - \exp(-\Delta \tau_r / \tau_l(n, j, i, k))]; \\ \Delta \sigma_{rl}(m, j, i, k) &= \sum_{n=1}^{N_r} \Delta \sigma_{rl}(m, n, j, i, k); \quad \sigma_l(m, j, i, k) = [L_{rl}(m, j, i) - L_{fl}(m, j, i, k)] \cdot \frac{E}{1-\mu}; \\ \sigma_l(m, n, j, i, k) &= \sigma'_l(m, n, j, i, k) - \Delta \sigma_{rl}(m, n, j, i, k) = \sigma'_l(m, n, j, i, k) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta \tau_r}{\tau_l(n, j, i, k)}\right), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $L_{fl}(m, j, i, k)$ – свободный размер слоя; $R_l(m, j, i, k)$ – изменение свободной длины слоя за счет релаксации в нем напряжений за l шагов по времени;

$\Delta\sigma_{rl}(m,n,j,i,k)$, $\Delta\sigma_{rl}(m,j,i,k)$ – отрелаксировавшие в течение шага l напряжения по n -му релаксационному процессу и суммарные; $r_l(n,j,i,k) = \lg \Delta\tau_r - \lg \tau_l(n,j,i,k)$ – показатель релаксации; $L_{rl}(1,j,i)$, $L_{rl}(2,j,k)$ – 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 релаксационному процессу и суммарные [21]. Горизонтальные напряжения для общих точек тел расчета уравниваются по соотношениям:

$$\sigma_l(1,1,i,0) = \sigma_l(1,1,i,0) + \sigma_l(1,2,i,N_{H_2}); \sigma_l(1,2,i,N_{H_2}) = \sigma_l(1,1,i,0), i = \overline{0, N_{R_l}}. \quad (3.5)$$

Определение интегральных напряжений производится по формуле:

$$\sigma_l(j,i,k) = \sqrt{\sigma_l^2(1,j,i,k) + \sigma_l^2(2,j,i,k)}. \quad (3.6)$$

3.2. Моделирование процесса отжига сортовых стеклоизделий

Рассмотрим основные модули автоматизированной системы расчета режимов отжига стеклоизделий цилиндрической формы «АСРЦ», необходимые для моделирования процесса отжига [82]. На рис. 3.1 показан внешний вид экрана при запуске автоматизированной системы расчета, когда пользователю предоставляется возможность выбора необходимого модуля.

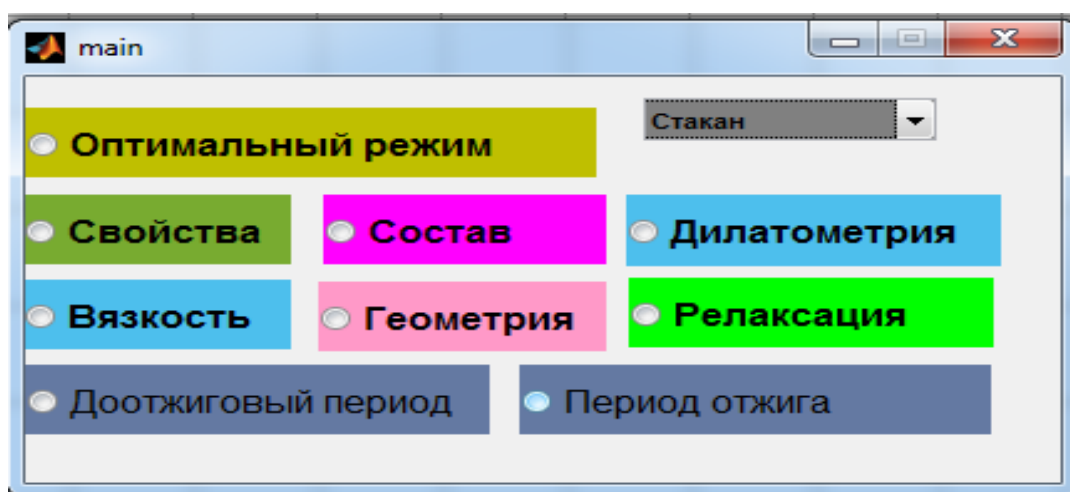


Рис. 3.1. Внешний вид экрана при работе «АСРЦ»

Производится последовательный запуск модулей для расчета свойств стекла по его химическому составу, обработки данных dilatометрических измерений, ввода геометрических размеров изделия, расчета температурной зависимости вязкости и определения постоянных структурной релаксации. Результаты расчетов для стакана, отжигаемого на Спировском стеклозаводе «Индустрия», подробно описаны в главе 1 работы.

Температурное поле на входе в печь отжига и температурный режим в печи, рассчитанные по моделям, разработанным в главе 2 диссертации, приведены на рис. 3.2 и 3.3 соответственно. Как видно из температурного распределения на рис.3.2, наблюдается значительный перепад температур между донной ($599.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) и наружной боковой ($518\text{ }^{\circ}\text{C}$) поверхностями стеклоизделия на входе в печь. На рис.3.3 показано распределение температур по толщине боковой цилиндрической поверхности в ходе нагрева, выдержки и охлаждения до комнатной температуры в период отжига [82].

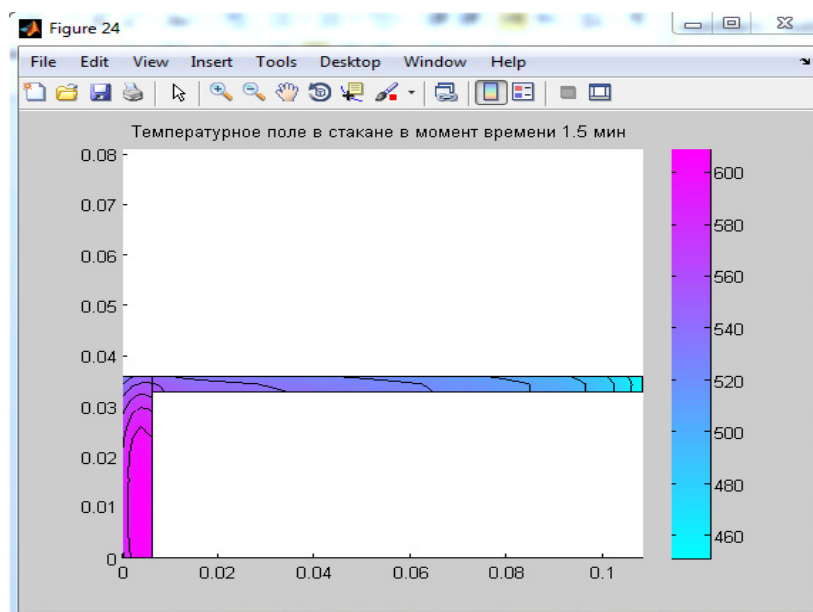


Рис. 3.2. Температурное поле в стакане на входе в печь отжига

Для расчета релаксации структуры и напряжений используется рассмотренный в разделе 3.1 работы алгоритм (формулы (3.1)-(3.6)). Рассчитанное с помощью программы распределение временных напряжений

по высоте и радиусу изделия на входе в печь отжига показано на рис. 3.4. На рис. 3.5 показаны рассчитанные распределения остаточных напряжений по высоте и радиусу стакана. По результатам расчета на рис.3.5 можно сделать следующие выводы.

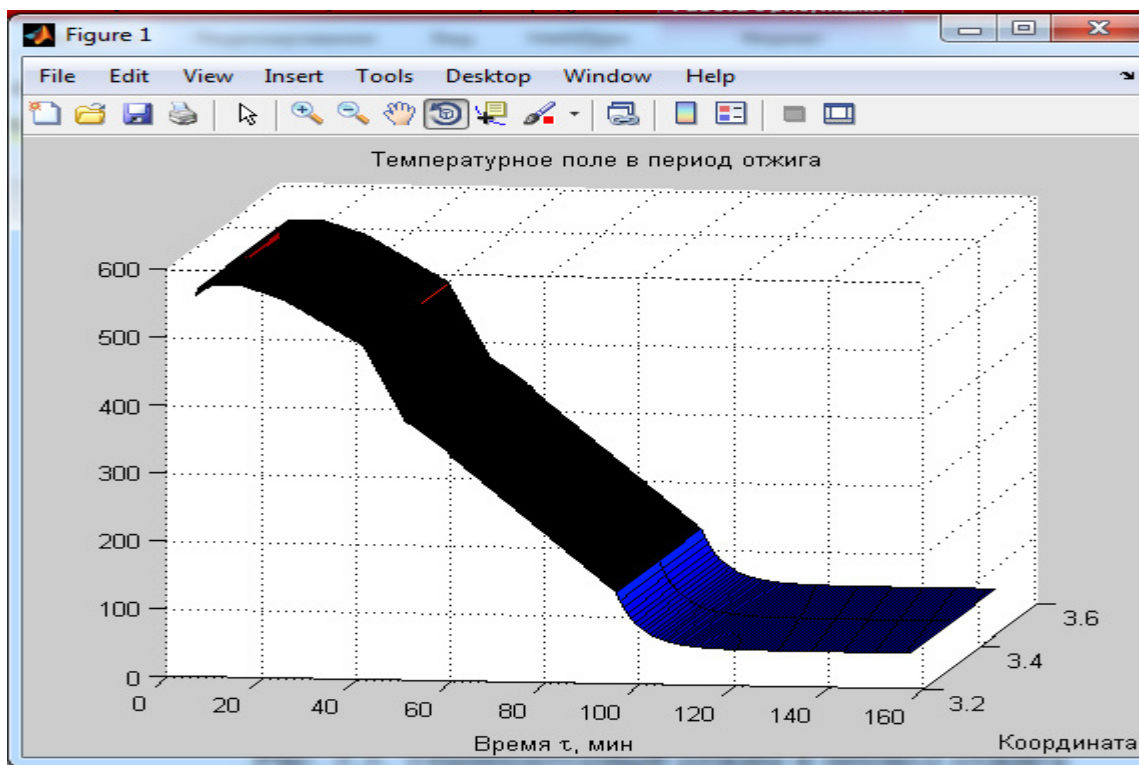


Рис. 3.3. Температурный режим в стакане в период отжига

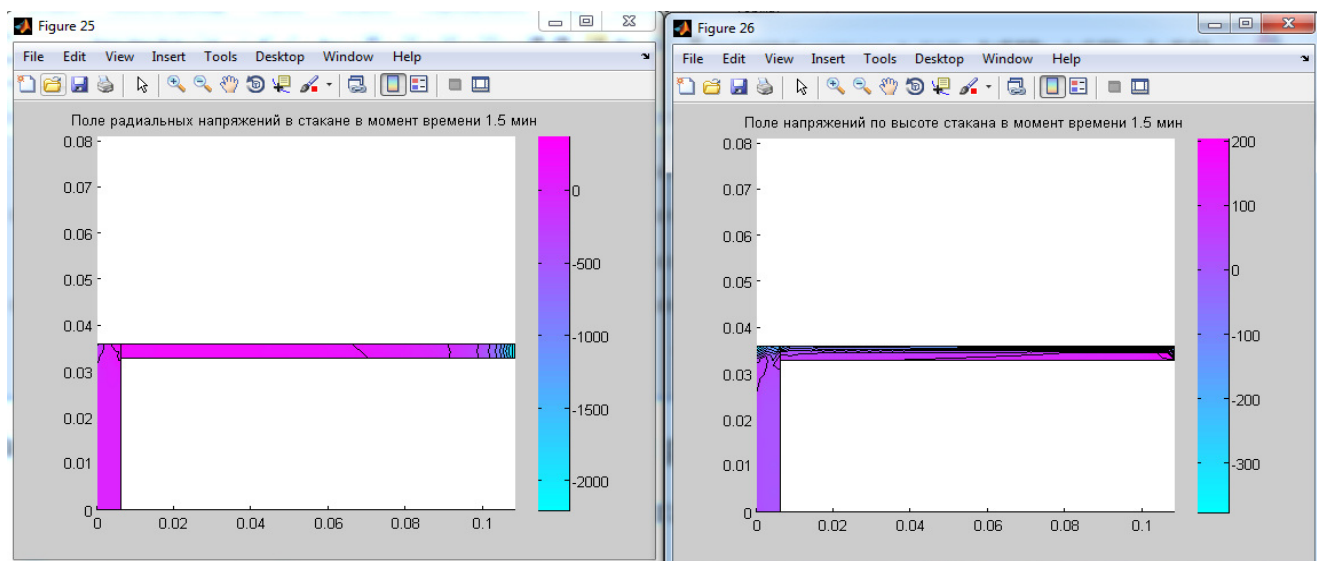


Рис. 3.4. Поля напряжений по высоте и радиальной координате цилиндрического изделия на входе в печь отжига

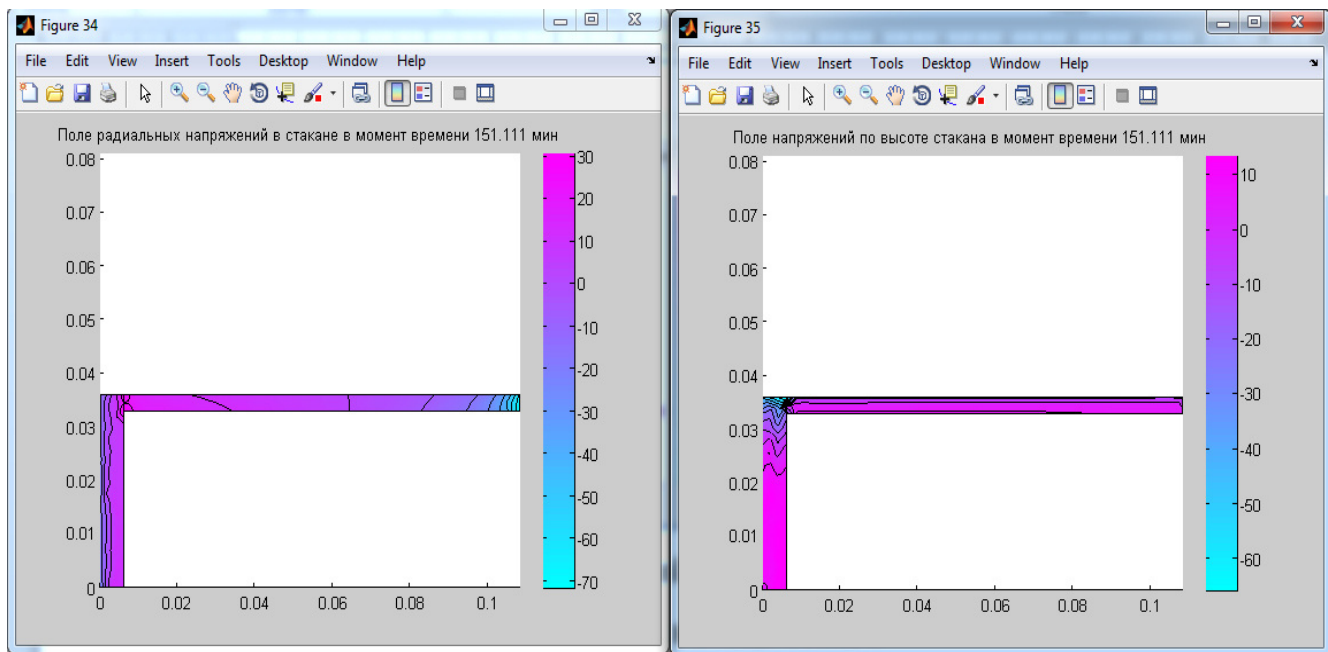


Рис. 3.5. Поля напряжений по высоте и радиальной координате цилиндрического изделия в конце отжига

Значения остаточных напряжений по радиальной координате являются напряжениями сжатия, что согласуется с закономерностями образования напряжений при охлаждении стекла. Они максимальны для торцевых точек боковой поверхности стакана (72 нм/см), что можно объяснить учетом угловых коэффициентов излучения в рассмотренной модели температурного поля. Остаточные напряжения по вертикальной координате максимальны в точках перехода от боковой к донной поверхности и составляют 65 нм/см, что является следствием геометрии изделия и большей толщины донной поверхности по сравнению с боковой.

Существующие напряжения в изделии не превышают технологических допусков (100 нм/см для сортовых стеклоизделий), но находятся близко к их границе. Однако следует учитывать, что в реальных стеклоизделиях, которые являются полупрозрачными телами, температурные градиенты и напряжения ниже по сравнению с рассчитанными в работе по "непрозрачной" модели. Тем не менее, для повышения качества стеклоизделий необходимо решить задачу оптимизации, предложив в качестве оптимального режим с более высокой температурой отжига.

3.3. Методика расчета оптимального режима отжига сортовых стеклоизделий

Как уже было отмечено во введении, целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса отжига сортовых стеклоизделий за счет получения режима, обеспечивающего заданный уровень остаточных напряжений в них. Для ее достижения необходимо использование разработанных в работе математических моделей температурного поля и релаксации напряжений в сортовых стеклоизделиях. Также должен быть создан комплекс программ, позволяющий для стекла заданного химического состава, геометрической формы и размеров, отжигаемого в печи с известными характеристиками и заданным температурно-временным режимом, рассчитать оптимальный с точки зрения энергетических затрат или качества стеклоизделия режим отжига [21].

Рассмотрим нахождение оптимального режима отжига, обеспечивающего минимальное отклонение максимальных остаточных напряжений в изделии σ_r от заданного на них допуска σ_{giv} . В этом случае критерий оптимальности можно записать в виде:

$$J = |\sigma_r - \sigma_{giv}| \rightarrow \min, T_B \leq T_{an} \leq T_H, \quad (3.7)$$

где температура окончания нагрева стеклоизделия T_{an} должна находиться между нижней T_B и верхней T_H границами интервала отжига (см. главу 1).

Для нахождения оптимальной кривой отжига при охлаждении стеклоизделия воспользуемся соотношением из теории образования напряжений:

$$\sigma(x, t) = \int_0^t R[\xi(t) - \xi(t')] \cdot \left[\partial \sigma_g(x, t') / \partial t' \right] dt', \quad (3.8)$$

где $\sigma(x,t)$ – напряжения в точке x в момент времени t ; $R(t)$ – вспомогательный модуль релаксации стекла; ξ – приведенное время; $\sigma_g(x,t)$ – напряжения, возникшие в точке x до момента времени t [11, 83,84].

Возьмем в качестве переменной, которую необходимо минимизировать, остаточные напряжения в некоторой поверхностной точке стеклоизделия Z (середине боковой наружной поверхности цилиндрического изделия). Используя в качестве независимой переменной температуру этой точки, выражение (3.8) можно переписать следующим образом:

$$\sigma_r = \int_{T_c}^{T_H} M(T) \left[d\sigma_g(T)/dT \right] dT + \sigma_g(T_c), \quad (3.9)$$

где $\sigma_r = \sigma(z, \infty)$ – остаточные напряжения в поверхностной точке изделия Z ; $M(T) = R[\xi(\infty) - \xi(t)]$ – функция памяти; $\sigma_g(T)$ – возникшие в поверхностной точке напряжения; $T = T(z)$ – температура поверхностной точки; T_c, T_H – температуры соответственно значительно ниже и значительно выше интервала отжига [11, 85, 86].

Для функции памяти выполняются следующие соотношения:

$$\begin{cases} M(T) = 0, T \geq T_H; \\ M(T) = 1, T \leq T_c. \end{cases} \quad (3.10)$$

Введем следующие два упрощающих предположения.

1. Возникшие напряжения $\sigma_g(T)$ пропорциональны скорости охлаждения температуры поверхностной точки $R(T)$, т.е.

$$\sigma_g(T) = C \cdot R(T). \quad (3.11)$$

2. Функция памяти $M(T)$ остается постоянной для всех режимов отжига, имеющих одинаковую среднюю скорость охлаждения R_m между T_H и T_c .

Интегрируя по частям первый член правой части уравнения (3.9) и используя выражения (3.10) и (3.11), можно упростить формулу для расчета остаточных напряжений [11, 21]:

$$\sigma_r = C \cdot \int_{T_c}^{T_H} W(T)R(T) dT, \quad (3.12)$$

где $W(T) = -\frac{dM(T)}{dT} = \frac{d}{dT} \left[\frac{dT_f}{dT} \right]$ – весовая функция.

Для окончательного решения оптимизационной задачи необходимо наложить ограничение на время охлаждения: $\Delta t = \int_{T_c}^{T_H} \frac{dT}{R(T)} = \frac{T_H - T_c}{R_m}$. (3.13)

Используя метод неопределенных множителей Лагранжа для уравнений (3.12) и (3.13), можно получить окончательное выражение для определения оптимального значения скорости охлаждения $R(T)$ [21, 85, 86]:

$$R(T) = \frac{A}{\Delta t \cdot \sqrt{W(T)}}, \quad A = \int_{T_c}^{T_H} \sqrt{W(T)} dT. \quad (3.14)$$

Выражение (3.14) определяет оптимальную кривую отжига стекла при его охлаждении, для которой скорости охлаждения в интервале отжига обратно пропорциональны квадратному корню от весовой функции. Для температур вне интервала отжига ($T \geq T_H$ и $T \leq T_c$) весовая функция принимает нулевое значение, что в соответствии с (3.14) означает бесконечно большие скорости охлаждения. Таким образом, идеальный оптимальный режим отжига невозможно реализовать на практике, но можно приблизиться к нему, охлаждая стеклоизделие вне интервала отжига с максимально возможными для данной печи скоростями [21]. Минимальные остаточные напряжения для оптимального режима можно найти подстановкой (3.14) в (3.12), так что

$$\sigma_{r_{\min}} = \frac{C \cdot A^2}{\Delta t}. \quad (3.15)$$

Все вышеприведенные формулировки и выражения справедливы для так называемого отжига "сверху", когда изделие входит в печь с достаточно высокой температурой, при которой релаксируют все возникающие в нем

напряжения. В реальном технологическом процессе отжига сортовой посуды на первом этапе происходит выравнивание температурных градиентов за счет теплообмена горячей донной и холодной боковой поверхностей с температурой среды в зоне печи отжига T_{an} . Поэтому предложенную в работах [87, 88] коррекцию оптимального режима отжига для общего случая термообработки, включающего стадии нагрева, выдержки и охлаждения стеклоизделия, можно не осуществлять.

Для поиска минимума критерия оптимальности (3.7) в работе используется метод золотого сечения [89]. В качестве левой границы поиска используется нижняя температура отжига T_B , а в качестве правой границы – заведомо превышающая верхнюю температуру стеклования температура T_H . За 5-7 шагов метод сходится к оптимальной T_{an}^* , обеспечивающей минимальное отклонение рассчитанных остаточных напряжений в характерной точке изделия от заданного на них допуска.

При расчете оптимальной кривой охлаждения все величины удобно сделать дискретными, т.е. определять значения $W(T_i)$ и $R(T_i)$ для $i = \overline{1, n_W}$, где $n_W = T_{an} - T_{fin}$; $T_1 = T_{an}$; $T_2 = T_{an} - 1$; ...; $T_{n_W} = T_{fin} + 1$; $R(T_i)$ – скорость охлаждения стекла в интервале температур от T_i до T_{i+1} . В качестве T_{fin} берется температура в конце последней регулируемой зоны охлаждения печи.

Интеграл A в формуле (3.14) в этом случае можно вычислить по методу трапеций [90]:

$$A = \sqrt{W(T_1)}/2 + \sum_{i=2}^{n_W-1} \sqrt{W(T_i)} + \sqrt{W(T_{n_W})}/2. \quad (3.16)$$

Оптимальный режим отжига представляет собой зависимость температуры поверхности стеклоизделия от времени отжига, обеспечивающую заданные остаточные напряжения в нем. Для его реализации в печи нужно в соответствии с рассчитанными скоростями охлаждения $R(T_i)$ определить для каждой зоны отжига среднюю скорость охлаждения и конечную температуру 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 отжига производится с помощью локальных систем управления температурным режимом. Оптимальный с точки зрения достижения заданного уровня остаточных напряжений $\sigma_{giv} = 50$ нм/см режим отжига стаканов, рассчитанный автоматизированной системой «АСРЦ», приведен на рис. 3.6.

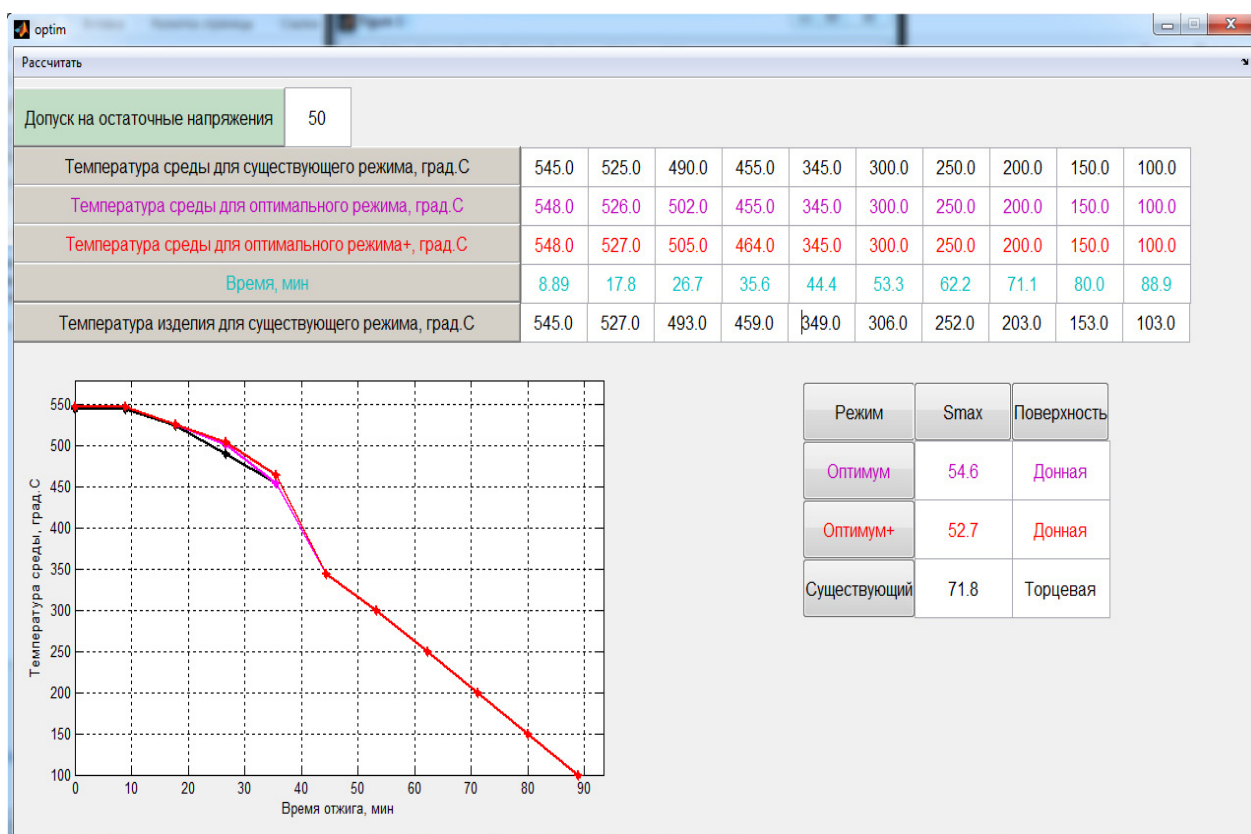


Рис. 3.6. Оптимальный режим отжига сортового стекла

Поля напряжений по высоте и радиальной координате стакана в конце процесса при предлагаемом оптимальном режиме отжига приведены на рис. 3.7. Интегральные напряжения определяются по выражению (3.6). Применение оптимального режима позволяет получить интегральные напряжения в стакане, удовлетворяющие допускам на остаточные напряжения в сортовых стеклоизделиях с двойным запасом. Требуется увеличение темпе-

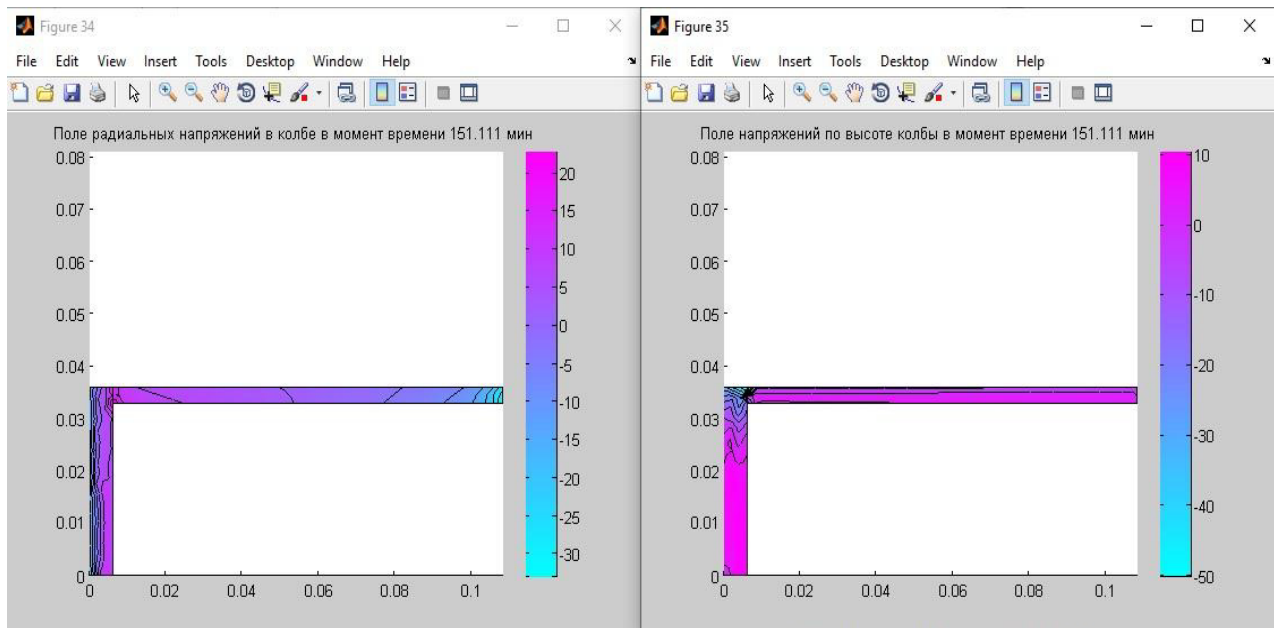


Рис. 3.7. Поля напряжений по высоте и радиальной координате цилиндрического изделия в конце отжига

ратуры окончания нагрева с 545°C до 548°C для лучшей релаксации напряжений при температуре отжига. Несмотря на незначительное увеличение скорости охлаждения в последующих 2-й, 3-й и 4-й зонах, легко реализуемое в данной печи отжига, 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.3.7).

3.4. Выводы

В главе 3 диссертации разработана математическая модель релаксации структуры и напряжений при отжиге сортовых стеклоизделий, учитывающая идентифицированные для данного сорта стекла релаксационные постоянные и реальную геометрию тел цилиндрической формы, приводящую к разбиению изделия на несколько расчетных тел. При разработке модели использованы соотношения релаксационной теории Тула-Нарайанасвами и алгоритма

Ленинградского института химии силикатов, распространенные на двухмерный случай.

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.

В главе 3 автором решены следующие задачи:

1. Произведен переход от точек триангуляции выбранной геометрической области к двухмерному температурному полю по радиусу и высоте.

2. Разработана модель релаксации структуры и напряжений, учитывающая разбиение стеклоизделия на расчетные поверхности (цилиндрические тела) и двухмерность задачи.

3. С использованием созданной релаксационной модели решена задача определения временных и остаточных напряжений в сортовых стеклоизделиях в течение доотжигового периода и периода отжига. Рассчитаны значения 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.

4. Выбран критерий оптимальности и ограничения при решении поставленной оптимизационной задачи.

5. Произведен вывод формул для расчета скоростей охлаждения при оптимальном режиме отжига.

6. Рассчитаны оптимальные уставки регуляторов для всех зон отжига печи, обеспечивающие необходимые кривую изменения температуры поверхности изделия и остаточные напряжения в нем.

7. С использованием разработанной методики решена задача определения оптимального режима отжига сортовых стеклоизделий,

производимых на Спировском стеклозаводе "Индустрия". Рассчитанные значения интегральных остаточных напряжений во всех точках изделия удовлетворяют заданным допускам.

Расчет полей напряжений происходит в модулях G и H автоматизированной системы расчета режимов отжига стеклоизделий цилиндрической формы в среде Matlab по рассчитанным температурным распределениям для сортового стекла, производимого в цехе отжига Спировского стеклозавода «Индустрия». Приведены экранные формы с модулями «АСРЦ».

Расчет оптимального режима происходит в модуле J «АСРЦ» с учетом идентифицированных параметров конвективно-радиационного теплообмена для существующего в цехе отжига Спировского стеклозавода «Индустрия» режима. Приведены графики оптимального режима и рассчитанных для него полей горизонтальных и вертикальных напряжений в конце отжига.

4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТЖИГА СОРТОВЫХ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

4.1. Технологический процесс отжига стеклоизделий как объект управления

Основными задачами управления процессом отжига стеклоизделий являются: поддержка необходимой температуры готового изделия при возможных возмущающих воздействиях в процессе работы; максимизация темпов производительности и получение желаемого качества изделия при оптимальных эксплуатационных расходах, стабилизация всего процесса [91].

Технологический процесс отжига, как объект управления, включает в себя печь отжига и физико-химические процессы, происходящие в стеклоизделии при его термообработке. К входным параметрам рассматриваемого объекта управления относятся (см. разд.1.1 работы):

- химический состав стекла Q_p (содержание окислов в массовых процентах), определяющий теплофизические, механические, оптические Q_T и дилатометрические, вязкостные Q_v свойства стекла;
- геометрические размеры стеклоизделия Q_G ;
- технологические характеристики стеклоизделий в доотжиговой период Q_f от окончания формования до входа в печь отжига (температура в конце формования T_f , скорость движения V_f , расстояние до печи L_f , экспериментальные температуры характерных (средних) точек наружной боковой tl_iden и внутренней донной tl_bot поверхностей изделия на входе в печь);
- технологические характеристики стеклоизделий в период отжига Q_o (скорость движения V_{art} конвейерной ленты в печи, количество изделий по ширине печи N_{art} и расстояние между ними d_{art}).

По технологическим характеристикам стеклоизделий в доотжиговой период производится идентификация параметров конвективно-радиационного теплообмена и рассчитываются релаксация структуры (температурно-временные изменения свойств), поля температур $T_0(j,i,k)$ и напряжений $\sigma_0(j,i,k)$ в изделии на входе в печь отжига.

Выходные переменные рассматриваемого объекта управления:

- температурное поле в стеклоизделии в ходе процесса отжига $T_1(j,i,k)$, $l = \overline{0,\infty}$;
- остаточные напряжения в точках стеклоизделия $\sigma_\infty(j,i,k)$.

К переменным состояниям процесса отжига относятся:

- тип печи по характеру теплообмена в ней Q_H (конвективная, радиационная, конвективно-радиационная);
- технологические характеристики оборудования Q_E (техническое состояние и загрузка оборудования);
- основные характеристики печи отжига Q_F (длина L_F , ширина B_F , высота H_F , число зон отжига N_{an}).

Объект имеет следующие возмущающие воздействия:

- изменение химического состава стекла ΔQ_P ;
- изменение геометрических размеров стеклоизделия ΔQ_G ;
- изменение некоторых технологических параметров стеклоизделий в доотжиговой период ΔQ_f ;
- изменение скорости транспортировки изделия в печи отжига ΔQ_O .

Действующие на объект возмущения представляют собой изменения условий отжига, которые условно можно разделить на текущие и планируемые. К текущим изменениям условий отжига относятся колебания химического состава стекла вследствие вариации состава шихты и стеклобоя, изменение размеров изделия в результате неточного формования, колебания

скорости движения стеклоизделия; к планируемым – изменение химического состава стекла, геометрических размеров и скорости движения изделия при смене ассортимента [10].

Вектор управления для технологического процесса отжига сортового стекла представлен следующими воздействиями:

- температурно-временной режим (ТВР) в печи отжига ΔQ_{TTR} (температуры среды по показаниям рабочих и контрольных термопар);
- параметры теплообмена $\Delta Q_{\alpha\varepsilon}$ (коэффициенты конвективного α_1, α_2 и (или) радиационного теплообмена $\varepsilon_{s_1}, \varepsilon_{s_2}$).

После выделения в процессе отжига сортовых стеклоизделий входных и выходных переменных, возмущающих и управляющих воздействий структурная схема объекта управления примет вид, приведенный на рис.4.1.

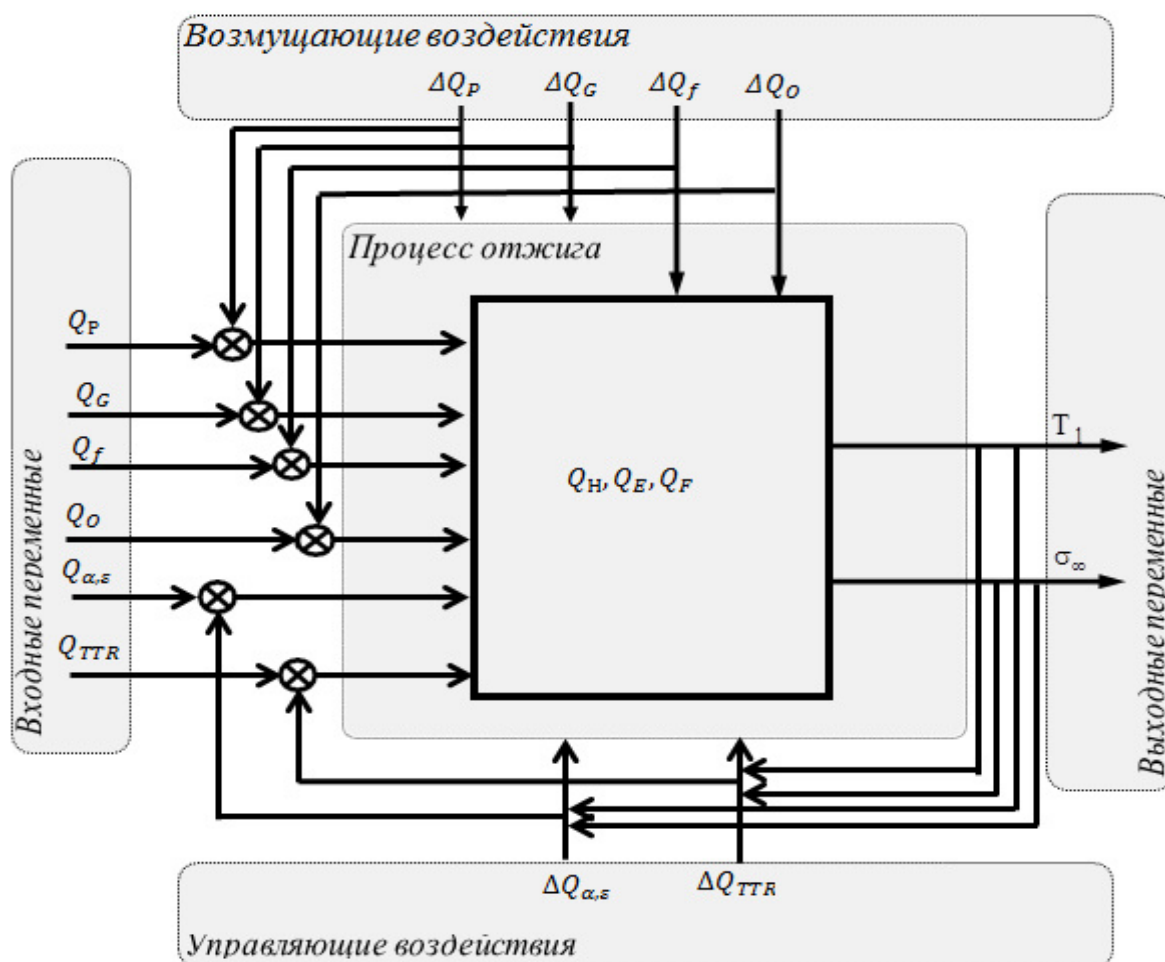


Рис. 4.1. Технологический процесс отжига стекла как объект управления

При управлении технологическим процессом в конвективных печах отжига проще изменять уставки рабочих термодпар по зонам отжига ΔQ_{TTR} , чем коэффициенты конвективного теплообмена α_1, α_2 . Оптимальный ТВР в печи отжига должен обеспечивать минимальное отклонение остаточных напряжений в изделии от заданного допуска (см. разд.3.3).

4.2. Структура автоматизированной системы управления процессом отжига сортовых стеклоизделий

На основе анализа технологического процесса отжига в разделе 4.1 были выделены входные и выходные переменные, возмущающие и управляющие воздействия для объекта управления. Рассмотрим структуру системы управления технологическим процессом, взяв в качестве основного выходного параметра напряжения в стеклоизделии σ (рис. 4.2).

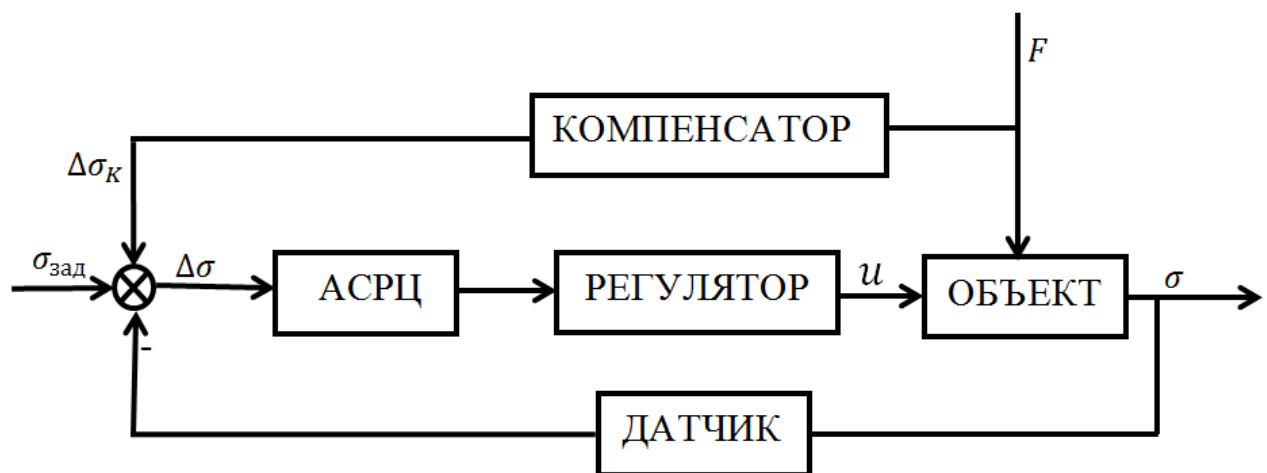


Рис.4.2. Структурная схема системы управления отжигом стеклоизделий

Для объекта управления необходимо получить его математическую модель, формализующую преобразование входных воздействий объекта в выходные величины [91]. Одним из подходов теории управления является использование аппарата передаточных функций, описывающих в операторном виде объект управления как динамическую систему [92].

Производится идентификация модели объекта в виде передаточной функции по экспериментальной динамической характеристике – реакции

объекта на входное ступенчатое воздействие. Одним из широко известных методов определения коэффициентов дробно-рациональной передаточной функции объекта является метод Симою [93, 94].

После нахождения передаточной функции объекта решается задача выбора регулирующего устройства. Наиболее удобно с точки зрения минимальной стоимости, максимальной надежности и простоты реализации использовать типовые общепромышленные пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы [95]. Нахождение их настроек осуществляется одним из наиболее широко применяемых методов – методом расширенных частотных характеристик (РЧХ) [95-97]. В работах [96, 97] рассмотрены стандартный, альтернативный и численный варианты метода РЧХ. В качестве критерия оптимальности используется минимальное отклонение перерегулирования и времени переходного процесса от их требуемых значений при заданной степени колебательности процесса [96].

Исследуемой характеристикой объекта (отжига) являются напряжения в стекле, обусловленные режимом термообработки. Эти напряжения, как и температуры в точках изделия, зависят не только от времени, но и от пространственных координат, заданных геометрическими размерами тела. Поэтому технологический процесс отжига с точки зрения управления является объектом с распределёнными параметрами.

В этом случае математическая модель объекта содержит частные производные и описывает как динамику процесса во времени, так и распределенность характеристики в пространстве. Разработка моделей для автоматического управления объектами с распределенными параметрами является более сложной задачей по сравнению с объектами с сосредоточенными параметрами [97]. Для технологического процесса отжига это выразится в следующих усложняющих обстоятельствах:

1. Состояние объекта описывается функциями нескольких независимых переменных.

2. Математической моделью объекта являются системы дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Управляющие воздействия на объект имеют распределенный характер, то есть описываются функцией нескольких независимых переменных.

4. На управляющие воздействия и функции состояния объекта могут накладываться дополнительные ограничивающие условия типа равенств или неравенств гораздо более разнообразного характера по сравнению с ограничивающими условиями для систем с сосредоточенными параметрами.

5. Техническая реализация управляющей системы, включающей в себя первичные датчики состояния объекта, регуляторы, исполнительные устройства и регулирующие органы, связана со значительно большими трудностями и проблемами.

В связи с этим было принято решение отказаться от стандартного подхода, разработанного в [93-97]. Управляющим воздействием в технологическом процессе отжига являются уставки термопар в зонах печи. Их формирование в автоматизированной системе управления производится программным комплексом «АСРЦ», содержащим модели для расчета свойств, температур и напряжений в стекле (главы 2, 3).

Вернемся к рис.4.2 и рассмотрим более подробно составляющие структурной схемы. Система управления отжигом (остаточными напряжениями) состоит из подсистем: измерения регулируемого параметра σ и основных возмущений F , расчета управляющего воздействия u .

Подсистема измерения регулируемого параметра и основных возмущений включает в себя комплекс технических средств: приборы контроля и измерения остаточных напряжений, экспресс-контроля химического состава и толщины стекла, контроля и диагностики температурно-временного режима [10]. Для контроля остаточных напряжений применяется полярископ-поляриметр ПКС-250М, использующий явление двойного лучепреломления в анизотропных средах. По интерференционной

окраске можно определить разность хода, которая позволяет по толщине и фотоупругой постоянной для данного стекла перейти к величине остаточных напряжений.

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.

Подсистема реализации управляющего воздействия (регулятор) включает в себя локальные системы управления температурным режимом и скоростью движения изделия в печи отжига.

Компенсатор возмущений представляет собой комплекс математических моделей, по которым при изменении ассортимента изделия или текущих возмущениях с помощью программного комплекса «АСРЦ» рассчитывается вызванное этими причинами изменение остаточных напряжений $\Delta\sigma_K$.

Автоматизированная система управления отжигом стеклоизделий работает следующим образом. При существующих условиях отжига идентифицируются параметры конвективно-радиационного теплообмена в печи и моделируются поля температур и напряжений в стеклоизделии. Рассчитывается оптимальный по остаточным напряжениям ТВР (см. главу 3) и осуществляется его реализация в печи с помощью локальных систем управления температурным режимом.

Если существующие или планируемые (например, смена ассортимента) возмущения приводят к значительным отклонениям остаточных напряжений в изделии $\Delta\sigma$ от их допустимого уровня σ_{giv} , то система в диалоговом режиме производит коррекцию оптимального температурно-временного режима в соответствии с изменяющимися условиями отжига.

4.3. Реализация автоматизированной системы управления процессом отжига сортовых стеклоизделий

Из приведенных в главах 1-3 моделей расчета свойств, полей температур, напряжений и оптимального режима отжига стекла следует, что их можно использовать для любого ассортимента сортового стекла. В качестве примера рассмотрим реализацию полученных моделей для цеха производства медицинского сортового стекла (колб) на Клинском стекольном заводе АО «Медстекло».

Необходимо учесть изменение химического состава, геометрических размеров и характеристик печи. Архитектура разработанной программной системы «АСРЦ» состоит из совокупности модулей и компонентов (см. главу 1), работающих в определенной последовательности. Сначала по введенному химическому составу стекла рассчитываются его теплофизические, механические и оптические свойства стекла при 0°C.

Массовые содержания окислов для сортового стекла, отжигаемого на АО «Медстекло», и рассчитанные по ним с помощью «АСРЦ» свойства представлены на рис. 4.3. Геометрические размеры медицинского стекла (колб), результаты обработки dilatометрических и расчета вязкостных характеристик приведены на рис. 4.4, 4.5 и 4.6 соответственно.

Ввод химического состава		Свойства стекла		Прочитать
<input type="radio"/> Все окислы <input checked="" type="radio"/> Состав		Теплопроводность	0.9602	
Окисел	Содержание	Теплоемкость	822.4	
SiO2	73	Температуропроводность*E6	0.4729	
B2O3	4	К Т Р*E7	70.31	
Al2O3	4.5	Плотность	2468.98	
Na2O	8.5	Модуль Юнга *E-10	7.328	
K2O	2	Коэффициент Пуассона	0.2074	
CaO	7	Прочность на растяжение*E-6	84.82	
MgO	1	Прочность на сжатие*E-6	1028.0	
Сумма	100	Показатель преломления	1.514	
		Фотоупругая постоянная*E12	2.635	

Рис. 4.3. Химический состав и значения свойств сортового стекла при 0°C

Геометрические размеры		
Наружный диаметр	2	см
Внутренний диаметр	1.8	см
Высота	5.5	см
Толщина доньшка	0.1	см

Рис. 4.4. Геометрические размеры медицинского флакона

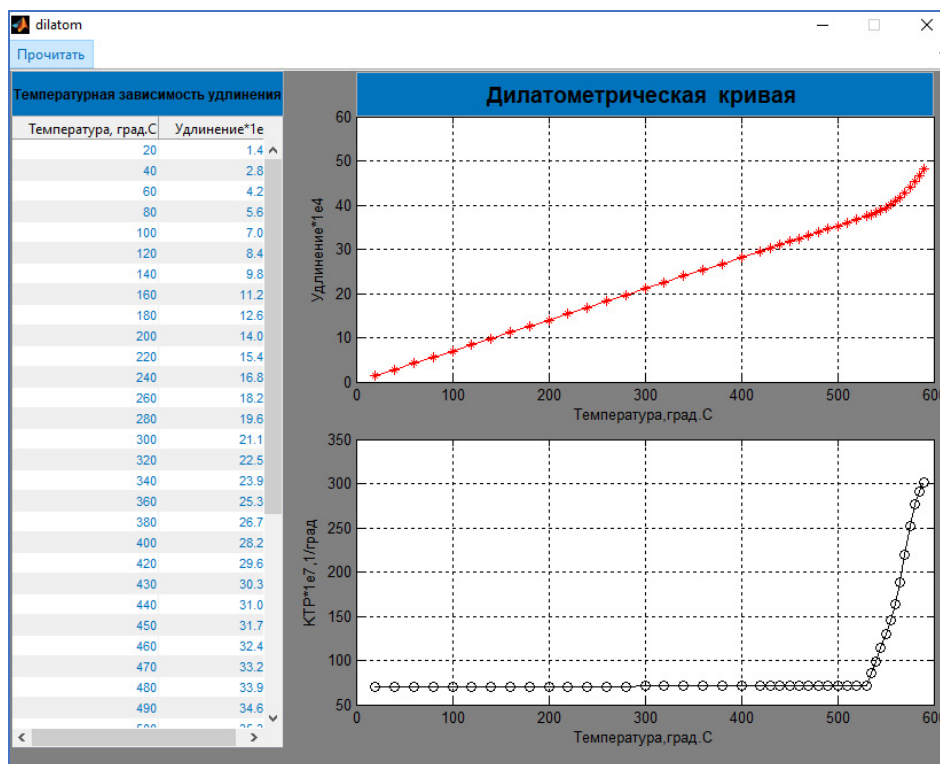


Рис. 4.5. Результаты обработки дилатометрической кривой сортового стекла

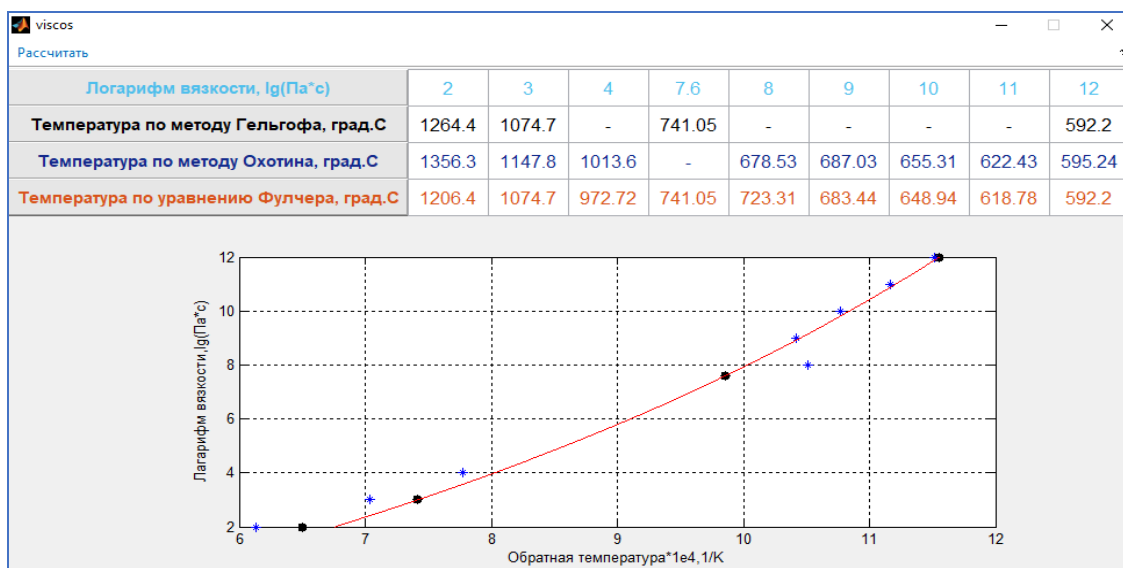


Рис. 4.6. Расчет точек температурной зависимости вязкости стекла

Анализ полученной для медицинского стекла температурной кривой вязкости показывает, что температура отжига, приблизительно соответствующая вязкости 10^{12} Па·с, $T_{an} = 592,2$ °С, что значительно (более чем на 30 градусов) превосходит ее значение для стекла, отжигаемого на АО «Индустрия». Значения релаксационных постоянных приведены на рис. 4.7.

Определение постоянных структурной релаксации	
Постоянная перехода lgK_s , $lg(\text{Па})$	10.42
Показатель Кольрауша b	0.5689
Экстраполяция $lg t_0$ $\kappa_1/T=0$, $lg(\text{с})$	-22.77
Постоянная перехода lgK_1 , $lg(\text{Па})$	13.2
Постоянная перехода lgK_2 , $lg(\text{Па})$	11.9
Постоянная перехода lgK_3 , $lg(\text{Па})$	11.07
Постоянная перехода lgK_4 , $lg(\text{Па})$	10.42
Постоянная перехода lgK_5 , $lg(\text{Па})$	9.84
СКО*E4	-
Постоянная Фулчера -Таммана А	-4.867
Постоянная Фулчера -Таммана В, К	7113.0
Постоянная Фулчера -Таммана T_0 , К	443.6
Постоянная Аррениуса В, К	15999.0
Постоянная Аррениуса lgV_0 , $lg(\text{Па}^*с)$	-5.747
Изоструктурный КТР*E7, 1/град	70.44
Равновесный КТР*E7, 1/град	301.0

Рис. 4.7. Релаксационные постоянные сортового медицинского стекла

На АО «Медстекло» при производстве сортового медицинского стекла специфика технологического процесса заключается в том, что после формирования колбы охлаждаются до комнатной температуры. В связи с этим технологические характеристики стеклоизделий в доотжиговый период изменяются: температура в конце формования $T_f = 800$ °С, скорость движения $V_f = 31$ (м/мин), расстояние до характерной точки измерений $L_f = 57$ м, экспериментальные температуры точек наружной боковой и внутренней донной поверхностей $t_{l_iden} = t_{l_bot} = 240$ °С. Результаты идентификации степеней черноты поверхностей колбы при естественной конвекции до печи отжига приведены на рис.4.8.

Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена стакана до печи отжига							
Температура среды внутри изделия, град.С	600	450	25	25	25	25	
Температура среды снаружи изделия, град.С	600	450	25	25	25	25	
Температура верхней ограждающей поверхности, град.С	500	350	25	25	25	25	
Температура нижней ограждающей поверхности, град.С	500	350	25	25	25	25	
Расчетная температура боковой поверхности, град.С	604.7	506.7	394.7	306.1	239.3	26.8	
Расчетная температура донной поверхности, град.С	613.4	514.2	403.7	311.5	241.2	26.66	
Время от формующей машины, мин	0.35	0.71	1.1	1.4	1.8	13.0	
Коэффициент конвективной теплоотдачи от наружных поверхностей, Вт/(кв.м*град)							9.308
Приведенная степень черноты для нижней ограждающей поверхности							0.7262
Коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренних поверхностей, Вт/(кв.м*град)							9.317
Приведенная степень черноты для верхней ограждающей поверхности							0.762
Экспериментальная температура наружной боковой поверхности изделия на входе в печь, град.С							240
Экспериментальная температура внутренней донной поверхности изделия на входе в печь, град.С							240
<input type="radio"/> Идентификация параметров теплообмена							

Рис. 4.8. Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена колбы до печи отжига

Печь отжига на стекольном заводе АО «Медстекло» относится к конвективному типу. Направление и распределение воздушных потоков в ней осуществляется за счёт взаимосвязанной работы конвективных и вытяжных вентиляторов и конвейера. Количество регулируемых зон, в которых ведётся строгий температурный контроль и автоматическое поддержание заданного режима отжига, $N_{ан} = 7$. В каждой зоне отжига температура контролируется и регулируется автоматической системой, состоящей из термопары и цифровых регуляторов, с помощью которых контролируют скорость конвейера. Регулятор, управляющий скоростью, приводит температуру в зоне к желаемому значению согласно режимной карте отжига. Необходимое значение получается за счёт регулирования скорости конвейера, которая устанавливается автоматически регулятором частоты вращения приводного двигателя и составляет $V_{art} = 0,2$ (м/мин).

Как уже было отмечено, на входе в печь отжига флаконы имеют комнатную температуру. В период отжига идентифицируются коэффициенты

искусственного конвективного теплообмена с наружными поверхностями изделия. В ходе этапов нагрева и охлаждения при отжиге флякона в печи происходит выравнивание распределения температур, наблюдается практически равномерное температурное распределение. Подбираются такие значения параметров теплообмена, которые обеспечивают наименьшее отклонение рассчитанных температур поверхностей изделия от их экспериментальных значений. На рис.4.9 показаны результаты идентификации параметров теплообмена стеклоизделий в печи отжига на АО «Медстекло».

Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена стакана в печи отжига							
Температура среды, град.С	350	520	600	480	320	130	35
Температуры ограждающих поверхностей, град.С	350	520	600	480	320	130	35
Расчетная температура боковой поверхности изделия, град.С	350.0	518.0	598.0	481.0	330.0	140.0	45.0
Время, мин	6.0	18.0	24.0	36.0	42.0	54.0	60.0
Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(кв.м*град)	74.8	96.0	107.0	112.0	45.7	30.7	37.8
Приведенная степень черноты верхней поверхности	0.8	0.8	0.8	0.8	0.799	0.799	0.801
Экспериментальная температура боковой поверхности, град.С	349.0	515.0	595.0	485.0	330.0	140.0	45.0
Приведенная степень черноты нижней поверхности	0.8	0.8	0.8	0.8	0.799	0.799	0.801

○ Идентификация параметров теплообмена

Рис. 4.9. Идентификация условий конвективно-радиационного теплообмена флякона в печи отжига

В разделе 4.1 показано, что процесс отжига сортового стекла можно представить в виде многосвязного объекта управления (рис.4.1) с несколькими входами и двумя выходами, а управляемыми параметрами являются остаточные напряжения. Температурный режим сортового стекла в печи отжига приведен на рис.4.10. На этом рисунке показано распределение температур по толщине боковой цилиндрической поверхности во время отжига и охлаждения до комнатной температуры. Рассчитанное «АСРЦ» распределение остаточных напряжений по слоям флякона для существующего режима приведено на рис.4.11. Видно, что для удовлетворения допускам $\sigma_{giv} = 100$ нм/см необходима коррекция ТВР в печи отжига.

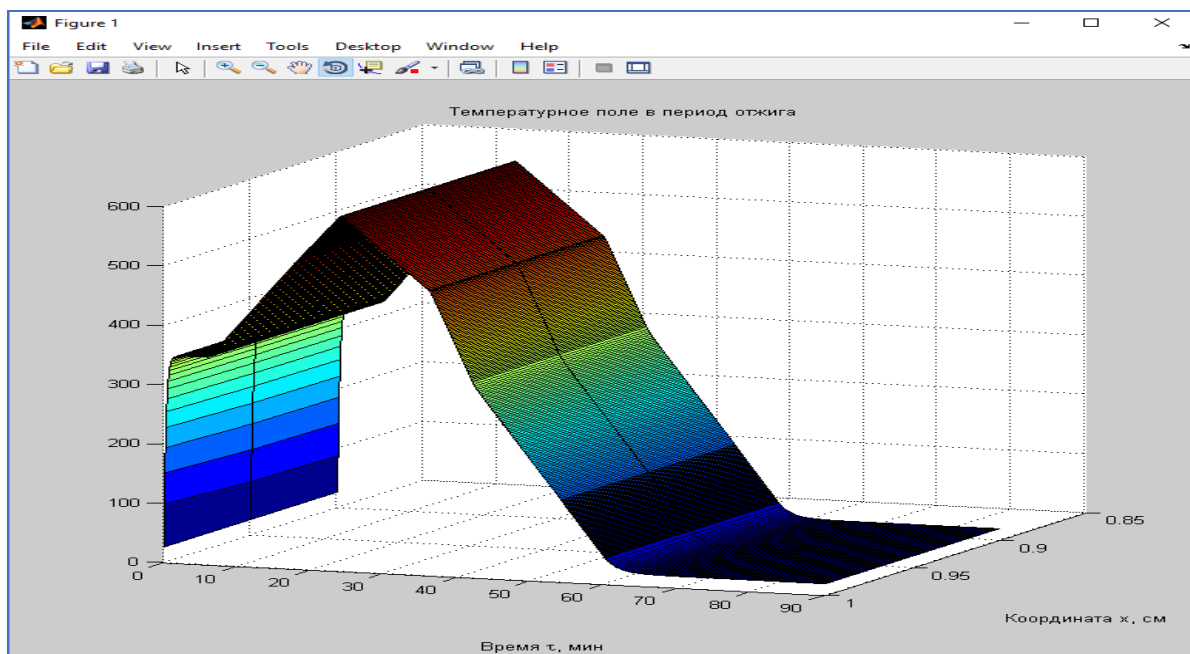


Рис. 4.10. Температурный режим колбы в период отжига

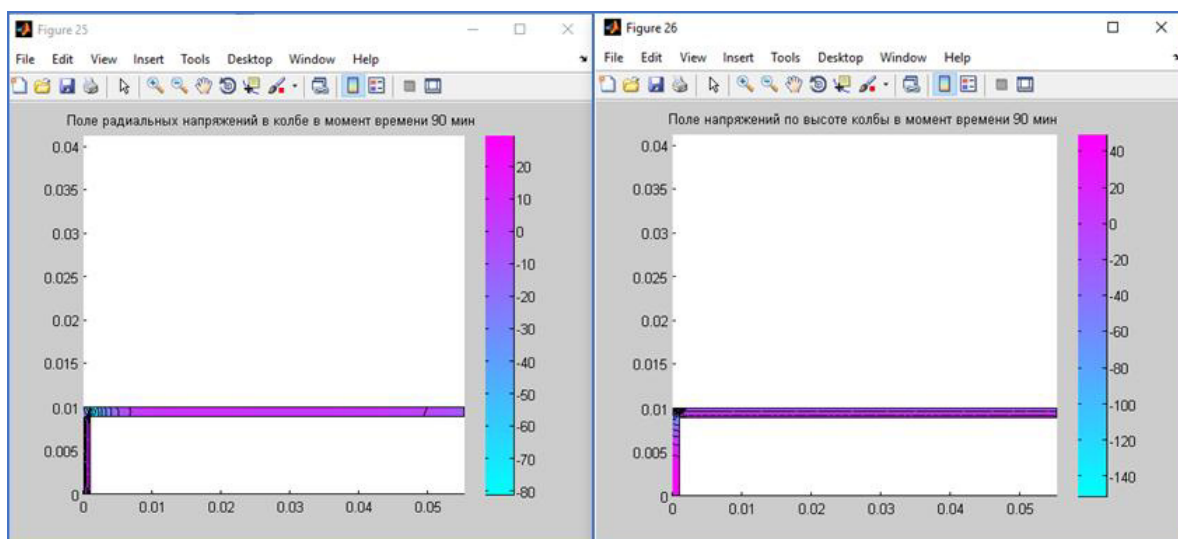


Рис. 4.11. Поля напряжений по радиальной координате и высоте флакона в конце отжига

Некоторые отклонения в расчетах от результатов экспериментов можно объяснить тем, что спецификой доотжигового периода является изготовление из шихты стеклотрубки, а затем уже изготовление из стеклотрубки флаконов на формующей машине.

Как было отмечено во введении, цель диссертации заключается в повышении эффективности отжига сортового стекла за счет получения

режима, обеспечивающего желаемый уровень остаточных напряжений в нем. На рис. 4.12 приведен рассчитанный «АСРЦ» по методике главы 3 режим отжига флаконов с желаемым уровнем остаточных напряжений $\sigma_{giv} = 50$ нм/см. Поля остаточных напряжений по радиальной координате и высоте колбы в конце процесса при оптимальном режиме отжига показаны на рис. 4.13.

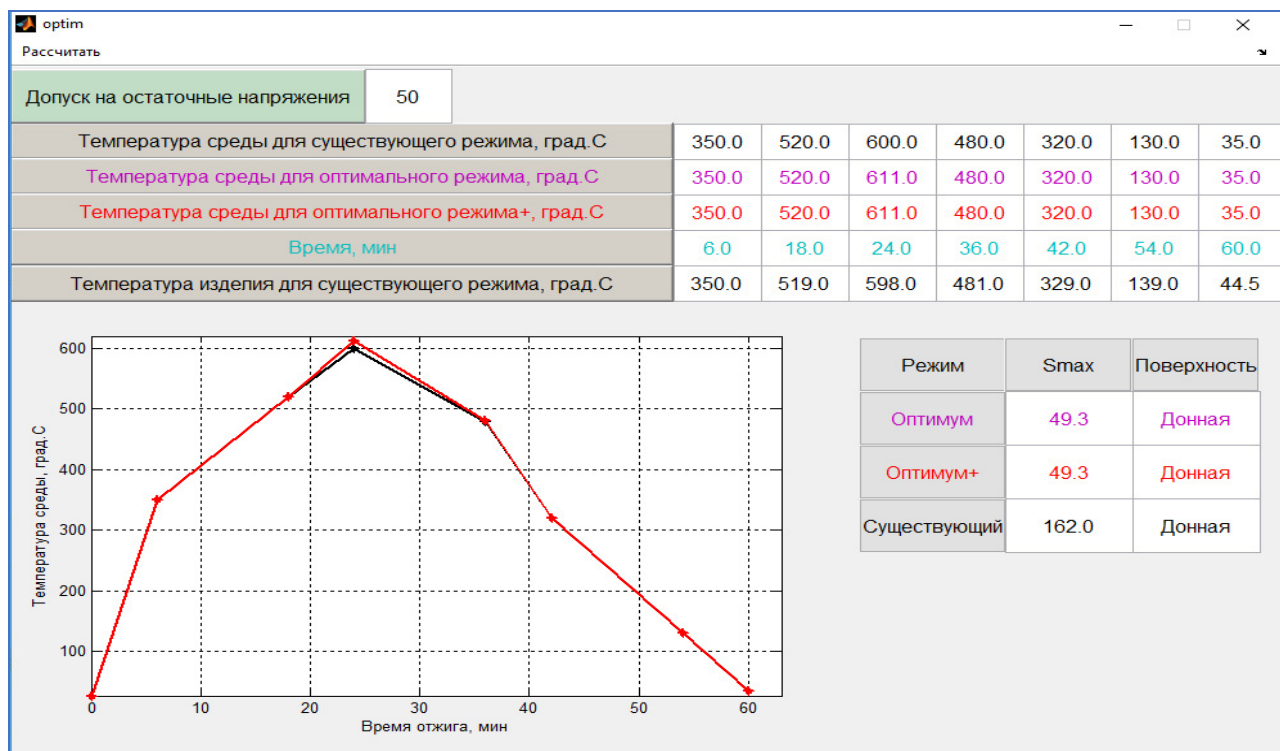


Рис. 4.12. Оптимальный режим отжига флаконов на АО «Медстекло»

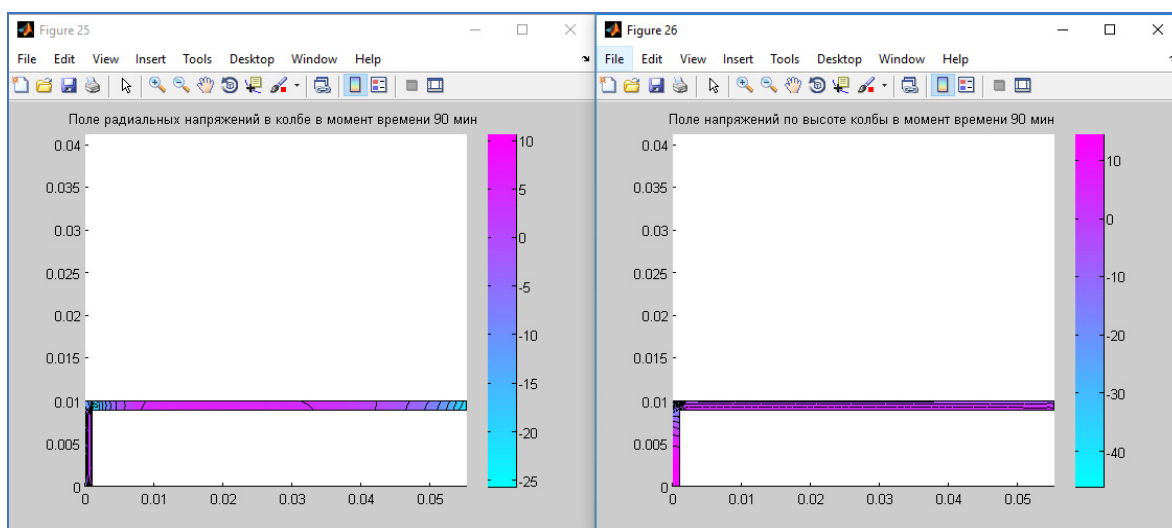


Рис. 4.13. Поля остаточных напряжений по радиальной координате и высоте флакона для оптимального режима

Понижение уровня остаточных напряжений до 49,3 нм/см достигается за счет повышения температуры окончания нагрева до 611 °С, в результате чего лучше релаксируют напряжения на стадии медленного охлаждения.

4.4. Выводы

Глава 4 диссертации посвящена структурному анализу технологического процесса отжига сортового стекла и автоматизированной системы управления им, тестированию программного комплекса «АСРЦ» при расчете отжига флаконов на Клинском заводе АО «Медстекло».

В главе 4 решены следующие задачи:

1. Рассмотрен технологический процесс отжига как объект управления, выделены векторы входных и выходных переменных, возмущающих и управляющих воздействий.

2. Разработана структура автоматизированной системы управления отжигом сортовых стеклоизделий, проанализированы основные параметры и подсистемы их измерения и расчета.

3. Произведен анализ технологических особенностей процесса отжига флаконов на Клинском стеклозаводе АО «Медстекло».

4. Доказана возможность практической реализации предложенных в работе моделей, методов, алгоритмов и разработанного комплекса программ для моделирования технологического процесса отжига.

5. С использованием разработанного в среде Matlab программного комплекса «АСРЦ» рассчитаны температурно-временные зависимости свойств, температур и напряжений в сортовом стекле при отжиге на АО «Медстекло».

6. Рекомендован оптимальный режим отжига сортового стекла, производимого на Клинском заводе АО «Медстекло», позволяющий добиться удовлетворяющего заданным допускам и более низкого по сравнению с существующим уровня остаточных напряжений в точках стеклоизделия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача повышения эффективности производства сортового стекла за счет совершенствования моделей технологического процесса отжига и достижения оптимального режима отжига, обеспечивающего заданный уровень остаточных напряжений в стеклоизделиях. В работе, развивающей теоретические основы моделирования технологического процесса отжига сортовых стеклоизделий, получены следующие основные результаты:

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

2. Решена задача расчета физико-химических свойств и 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 сортовых стеклоизделий, 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, используемых в производстве стаканов на Спировском стекольном заводе «Индустрия» и флаконов на Клинском стекольном заводе 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 сортовых стеклоизделий для различных химического состава, размеров стекла и характеристик печей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучеров, О.Ф. Автоматизированные системы управления производством стекла / О.Ф. Кучеров, В.Е. Маневич, В.В. Клименко. Л.: Стройиздат, 1980. 178 с.
2. Гулюян, Ю.А. Физико-химические основы технологии стекла. Владимир: Транзит-Икс, 2008. 736 с.
3. Пух, В.П. Прочность и разрушение стекла. М.: Наука, 1973. 155 с.
4. Таганцев, Д.К. Стеклообразные материалы: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 204 с.
5. Мазурин, О.В. Математическая модель процесса отжига листового стекла/ О.В. Мазурин, Н.В. Лалыкин // Стекло и керамика. М.: Стройиздат. 1984. №1. С.13-15.
6. Ванин, В.И. Отжиг и закалка листового стекла. М.: Издательство литературы по строительству, 1965. 116 с.
7. Будов, В.М., Саркисов П.Д. Производство строительного и технического стекла / В.М. Будов, П.Д. Саркисов. М.: Высшая школа, 1985. 215 с.
8. Химическая технология стекла и ситаллов / Под ред. д-ра техн. наук Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1983.
9. Термические основы формования стекла / Под ред. Л.С. Эйгенсона. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1959. 268 с.
10. Марголис, Б.И. Математическое моделирование и оптимизация процессов отжига стеклоизделий: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тверь, 1994. 112 с.
11. Narayanaswamy, O.S. Optimum schedule for annealing flat glass. J.Amer.Ceram. Soc., 1981, v.64, №2, p.109-114.
12. Мазурин, О.В. Отжиг и закалка стекла: учебное пособие / О.В. Мазурин, Ю.Л. Белоусов.– М.: Издательство МИСИ и БТИСМ, 1984. 114 с.

13. Adams, L.H. Annealing of glass / L.H. Adams, E.D. Williamson J.Francl.Inst, 1920, vol.190, №5, p.597-631; №6, p.835-870.
14. Gardon, R. Calculation of temperature distributions in glass plates undergoing heat-treatment. J.Amer.Ceram.Soc., 1958, v.41, №6, p.200-209.
15. Бартенев, Г.М. К теории процесса термообработки неорганических стекол. Нагрев и охлаждение стеклянной пластины / Г.М. Бартенев, Р.З. Фридкин // Физика и химия обработки материалов. 1971. №6. С.17-23.
16. Мазурин, О.В. Расчет напряжений в листовом стекле при непрерывном изменении скорости охлаждения/ О.В. Мазурин, Н.В. Лалыкин // Физика и химия стекла. 1980. Т.6. №5. С.622-625.
17. Рубанов, В.Г. Оптимизация процесса отжига стеклоизделий / В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов // Стекло и керамика. М.: Стройиздат. 1997. №8. С.3-6.
18. Рубанов, В.Г. Математическая модель процесса отжига строительных стеклоблоков / В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов // Стекло и керамика. М.: Стройиздат. 1998. №7. С.8-10.
19. Рубанов, В.Г. Математическая модель для расчета температурного поля и напряжений при отжиге стеклянных труб/ В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов // Стекло и керамика. М.: Стройиздат. 1998. №6. С.3-5.
20. Рубанов, В.Г. Математическая модель динамики температурного поля стеклоизделий сложной конфигурации при их отжиге / В.Г. Рубанов, Д.В. Величко, О.В. Луценко // Стекло и керамика. М.: Ладья. 2018. №5. С.3-8.
21. Марголис, Б.И. Оптимизация процессов отжига листового и сортового стекла: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Тверь, 2004. 180 с.
22. Марголис, Б.И. Моделирование полей температур и напряжений в стеклоизделиях: монография. Тверь: ТвГТУ, 2001. 100 с.
23. Марголис, Б.И. Программа идентификации условий теплообмена для изделий плоской формы // Программные продукты и системы. 2017. №1. С. 148-151.

24. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. СПб.: Питер, 2005. 512 с.
25. Дьяконов, В.П. MATLAB: Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2014. 768 с.
26. Сирота, А.А. Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в MATLAB: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. 384 с.
27. Крайнов, А.Ю. Численные методы решения задач тепло и массопереноса: учебное пособие/ сост. А.Ю. Крайнов, Л.Л. Миньков. Томск: СТТ, 2016. 92 с.
28. Tool, A.Q. Relation between inelastic deformability and thermal expansion of glass in its annealing range. J.Amer.Ceram.Soc, 1946, v.29, №9, p.240-253.
29. Narayanaswamy, O.S. Model of structural relaxation in glass. J.Amer.Ceram.Soc., 1971, v.54, №10, p.491-498.
30. Мазурин, О.В. Стеклование. Спб.: Наука, 1986. 158 с.
31. Марголис, Б.И. 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.
32. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ: учебное пособие для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. М.: Высшая школа, 1989. 367 с.
33. Губанов, В.А. Введение в системный анализ: учебное пособие / В.А. Губанов, В.В. Захаров, А.Н. Коваленко. Л.: Издательство ЛГУ, 1988. 227 с.
34. Роус, Б. Стекло в электронике: Пер. с чешского. М.: Советское радио, 1969. 356 с.
35. Инденбом, В.Л. Термопластические и структурные напряжения в твердых телах / В.Л. Инденбом, Л.И. Видро // Физика твердого тела. 1964. Т.6. №4. С.992-1000.
36. Шелби, Дж. Структура, свойства и технология стекла: Пер. с англ. М.: Мир, 2006. 288 с.

37. Матвеев, М.А. Расчеты по химии и технологии стекла: справочное пособие / М.А. Матвеев, Г.М. Матвеев, Б.Н. Френкель. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 240 с.
38. Автоматическое управление электротермическими установками / Под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
39. Липов, В.Я. Конвейерные закалочнно-отпускные электропечи и агрегаты / В.Я. Липов, В.А. Ревзин, Г.К. Рубин. М.: Энергоатомиздат, 1989. 144 с.
40. Рубин, Г.К. Электрические печи скоростного нагрева. М.: Энергия, 1969. 158 с.
41. Головин, Е.П. Расчет технологических параметров стекол: учебное пособие. Владимир, 1981. 34 с.
42. Христофоров, А.И. Расчеты физико-химических свойств стекол: учебное пособие / И.А Христофорова, А.И. Христофоров// Владим. гос. ун-т. Владимир, 2004. 80 с.
43. Демкина, Л.И. Плотность и оптические свойства стекол// Физико-химические основы производства оптического стекла. Л., 1976. С.78-116.
44. Аппен, А.А. Химия стекла. Л., 1970. 352 с.
45. Мазурин, О.В. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов: справочник / О.В. Мазурин, М.В. Стрельцина, Т.П. Швайко-Швайковская. Л., 1973. Т.1. 443 с.; Л., 1977. Т.3. 586 с.
46. Применко, В.И. Зависимость модуля упругости щелочных силикатных стекол от температуры / В.И. Применко, А.Н. Ширяева, В.И. Галянт // Стекло и керамика. М.: Стройиздат, 1978, Т11. С. 20-21.
47. Применко, В.И. Оценка зависимости упругих характеристик промышленных силикатных стекол от температуры / В.И. Применко, В.И. Галянт // Стекло и керамика. – М.: Стройиздат, 1976. Т7. С. 14-15.
48. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Статистические методы идентификации в химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Л.Н. Липатов. М.: Наука, 1982. 344 с.

49. Марголис, Б.И. 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.
50. Мазурин, О.В. Тепловое расширение стекла / А.С.Тотеш, М.В.Стрельцина, Т.П. Швайко-Швайковская. Л.: Наука, 1969. 216 с.
51. Таганцев, Д.К. Стеклообразные материалы: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 204 с.
52. Мазурин, О.В. Расчет вязкости стекла: учебное пособие / О.В. Мазурин, Г.П. Николина, М.Л. Петровская. Л.: Издательство ЛТИ, 1988. 75 с.
53. Стекло: Справочник / Под ред. д-ра техн. наук Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1973. 487 с.
54. Безбородов, М.А. Вязкость силикатных стекол. Минск: 1975. 352 с.
55. Мазурин, О.В. Исследование температурных зависимостей вязкости некоторых стекол при постоянной структурной температуре / О.В. Мазурин, Ю.К. Старцев, Л.Н.Поцелуева// Физика и химия стекла, 1979. Т.5. №1. С.82-94.
56. Белоусов, Ю.Л. Метод расчета температурной зависимости равновесной вязкости многокомпонентных силикатных стекол по их химическому составу / Ю.Л. Белоусов, В.А. Фирсов // Физика и химия стекла. 1991. Т.17. №3. С.411-418.
57. Привень, А.И. Ускоренный расчет релаксации свойств неорганических стекол // Физика и химия стекла. 1986. Т.12. №2. С.251-254.
58. Немилов, С.В. Оптическое материаловедение: Термодинамические и релаксационные свойства стеклообразующих расплавов и стекол: учебное пособие. СПб НИУ ИТМО, 2014. 120 с.
59. Мазурин, О.В. Расчет релаксации напряжения в нестабилизированном стекле при несоблюдении принципа терморологической простоты /

О.В. Мазурин, Д.Г. Дамдинов, Ю.К. Старцев // Физика и химия стекла. 1988. Т.14. №4. С.535-541.

60. Лыков, А.В. Теория теплопроводности: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

61. Пехович, А.И. Расчеты теплового режима твердых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких. Л.: Энергия, 1976. 352 с.

62. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г Карслоу, Д. Егер: Пер. с англ. М.: Наука, 1964. 487 с.

63. Беляев, И.М. Методы теории теплопроводности: учебное пособие для вузов: в 2-х частях/ И.М. Беляев, А.А. Рядно. М.: Высшая школа, 1982. Ч.2. 304 с.

64. Формалеев, В.Ф. Теплопроводность анизотропных тел. Часть 1. Аналитические методы решения задач. М.: Физматлит, 2014. 349 с.

65. Мочалин, А.И. Задача теплопроводности для неограниченного цилиндра // Инженерно-физический журнал. 1959. №11. С.109-114.

66. Лаврентьев, С.А. Задача о нагреве цилиндра // Инженерно-физический журнал. 1960. №7. С.135-138.

67. Плятт, Ш.Н. Решение задач нестационарной теплопроводности полых цилиндров методом Гринберга // Инженерно-физический журнал. 1962. №6. С.81-88.

68. Соковишин, Ю.А. Теплообмен вертикального цилиндра свободной конвекцией и излучением // Инженерно-физический журнал. 1977. №10. С.694-700.

69. Спэрроу, Э.М. Исследование нестационарных и стационарных процессов теплопроводности в телах произвольной формы с произвольно заданными граничными и начальными условиями / Э.М. Спэрроу, А. Хаджи-Шейх // Теплопередача. 1968. №1. С.109-117.

70. Эдвардс, Д.К. Радиальный лучистый тепловой поток в цилиндре // Теплопередача. 1973. №3. С.138-139.

71. Копли, Р. Двумерное нестационарное поле температуры в цилиндрических телах при пульсирующих во времени и распределенных по поверхности граничных условиях // Теплопередача. 1974. №3. С.40-47.

72. Шперлинг, Р.П. Решение неосесимметричной задачи нестационарной теплопроводности для двухслойного полого цилиндра конечной длины // Инженерно-физический журнал. 1972. №5. С.871-879.

73. Кравченко, В.Ф. Расчет нестационарного температурного поля в составном (трехслойном) цилиндре// Инженерно-физический журнал. 1977. №4. С.729-734.

74. Соковишин, Ю.А. Свободный конвективный теплообмен цилиндра с экспоненциально убывающим потоком тепла на поверхности // Инженерно-физический журнал. 1979. №9. С.508-513.

75. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие/ Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. Томск:Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

76. Марголис, Б.И. 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.

77. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.

78. Зигель, Р. Теплообмен излучением/ Р. Зигель, Дж. Хауэлл: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 934 с.

79. Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен: Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 616 с.

80. Мучник, Г.Ф. Методы теории теплообмена: в 3 ч./ Г.Ф. Мучник, И. Б. Рубашов. М.: Высшая школа, 1974. Ч.2. 270 с.

81. Марголис, Б.И. Расчет угловых коэффициентов теплообмена излучением поверхностей цилиндрического стакана // Инженерная физика. М. 2004. №1. С.12-15.

82. Марголис, Б.И. 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.

83. Gardon, R. Stress and volume relaxation in annealing flat glass/ R. Gardon, O.S. Narayanaswamy. J.Amer.Ceram.Soc., 1970, v.53, №7, p.380-385.

84. Narayanaswamy, O.S. Annealing of glass. Glass, science and technology, 1986, v.3, p.275-318.

85. Gardon, R. Nonlinear annealing of glass. J.Amer.Ceram.Soc., 1981, v.64, №2, p.114-119.

86. Narayanaswamy, O.S. Stress and structural relaxation in tempering glass. J.Amer.Ceram.Soc., 1978, v.61, №3-4, p.146-152.

87. Лалыкин, Н.В. Расчет оптимальных параметров отжига листового стекла / Н.В. Лалыкин, О.В. Мазурин // Стекло и керамика. М.: Стройиздат. 1978. №12. С.7-9.

88. Марголис, Б.И. Нахождение оптимального режима отжига стеклоизделий, обеспечивающего минимальные энергозатраты // Стекло и керамика. М.: Стройиздат. 2003. №5. С.12-13.

89. Кудрявцев, Е.М. Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах. М.: Радио и связь, 1984. 184 с.

90. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений: Пер. с англ. / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. М.: Мир, 1980. 280 с.

91. Палюх, Б. В. Основы построения и разработки автоматизированной системы управления эксплуатационной надежностью химических производств: дисс. докт. техн. наук: 05.13.06. М, 1991. 360 с.

92. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.

93. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник для ВУЗов / Под ред. Е.Г. Дудникова. М.: Химия, 1987. 368 с.

94. Марголис, Б.И. 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.

95. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учебник. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 396 с.

96. Марголис, Б.И. Компьютерные методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования в среде Matlab: учебное пособие. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. 92 с.

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

98. Материалы сайта «МИР СТЕКЛО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mirstekla-expo.ru/ru/article-about-glass/2016/pechi-otzhigalery-dlya-stekla/>

99. Михайленко, Н.Ю. Типы и виды стекла и стекломатериалов. Терминологический справочник / Н.Ю. Михайленко, Л.А. Орлова. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012.

100. Власова, С.Г. Основы химической технологии стекла: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 108 с.

101. Руководство по эксплуатации. Полярископ-поляриметр 250М. Россия, 2008.

102. Тютюник, В. Излучательные печи отжига // Стекло и керамика. М.: Стройиздат. 2001. №1. С.62.

103. Лукашин, С.А. Автоматизация процесса отжига полированного листового стекла. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн.наук. Владимир, 2001. 18 с.

104. Гейтвуд, Б.Е. Температурные напряжения. М.: Наука, 1959. 225 с.

105. Инденбом, В.Л. Способ определения напряжений на поверхности закаленного плоского стекла Авторское свидетельство № 104658,

зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 12 октября 1954 года, заявка № 5707/453646.

106. Мазурин, О.В. Релаксационная теория отжига стекла и расчет на ее основе режимов отжига. М.: Изд. МХТИ, 1986. 83 с.

107. Nashimura, M. Symultaneous heat transfer by radiation and conduction. High-temperature one-dimensional heat transfer in molten glass / M. Nashimura, M. Hasatani, S. Sugiyama // Intern. Chem. Engineering. 1968. V. 8. № 4. P. 739-745.

108. Фридкин, Р.З. Теория радиационного отжига стекла / Р.З. Фридкин, О.В. Мазурин // Физика и химия стекла. 1987. Т.13. № 3. С. 447-453.

109. Ван дер Темнел, Л. Теплопроводность стекла. Эмпирическая модель // Физика и химия стекла. 2002. Т. 28. № 3. С. 213-220.

110. Клюев, В.П. Измерение вязкости стекол методом вдавливания конического индентора в тонкие пластинки // Физика и химия стекла. 2001. Т. 27. № 5. С. 636-650.

111. Привень, А.И. Расчет теплопроводности оксидных стеклообразующих расплавов и оценка скачка теплоемкости в интервале стеклования по химическому составу // Физика и химия стекла. 2002. Т. 28. № 1. С. 74-83.

112. Мазурин, О.В. Стеклование и стабилизация неорганических стекол. Л.: Наука, 1978. 62 с.

113. Мазурин, О.В. Релаксационная теория отжига стекла и расчет на ее основе режимов отжига. М.: Изд. МХТИ, 1986. 83 с.

114. Yauari, A.R. Thermal stresses and viscoelastic relaxation in metallic glasses / A.R. Yauari, P. Destre // SCI. Let., 1983, V 3, № 9, P. 516-518.

115. Кузенко, А.А. Идентификация передаточных функций процесса термообработки листового стекла / А.А. Кузенко, А.Г. Филатов / Сборник трудов 13-й международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ». СПб. 2000. Т.3. С. 68-70.

116. Горбань, И.А. Математическая модель процесса комбинированного теплообмена при литье заготовок из стекла / И.А. Горбань, А.Г. Устинов //

Основные направления интенсификации процессов стекловарения. Сб. науч. тр. ГИС. М., 1982. С. 72-75

117. Белоусов, Ю.Л. Рациональные режимы отжига стеклоблоков / Ю.Л. Белоусов, В.А. Фирсов, С.Ю. Стошкус // Физико-химические основы и научно-технический прогресс в технологии стекла и стеклокристаллических материалов с использованием вторичного сырья: Сб. трудов. М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1987. С. 125-130.

118. Кононко, В.Б. Отжиг и закалка стекла // Известия Киевского политехнического института. 1960. № 4. С. 69-81.

119. Рубанов, В.Г. Оптимизация процесса отжига стеклоизделий / В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов // Современ. проблемы естественных наук (сборник трудов). Курск. 1998. С. 213-219.

120. Шутов, А.И. Возможности дифференциальной закалки стекла // Физико-химические основы и научно-технический прогресс в технологии стекла и стекло-кристаллических материалов с использованием вторичного сырья. Сб. трудов. М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1987. С. 118-121.

121. Иняхин, С.В. Параметры нагрева и охлаждения стекол при закалке / С.В. Иняхин, И.П. Казакова // Стекло и керамика. 1981. №11. С. 14-15.

122. Шутов, А.И. Формирование заданных потребительских свойств листового стекла / А.И. Шутов, П.В. Попов, А.А. Чистяков // Известия вузов. Строительство. 1996. №10. С. 101-105.

123. Шутов, А.И. Расчет скорости вывода стекол из печи нагрева при закалке / А.И. Шутов, В.И. Потапов, Н.Т. Качалов // Стекло и керамика. 1982. №6. С. 10-12.

124. Шутов, А.И. Экономичные режимы охлаждения при воздушоструйной закалке тонкого стекла / А.И. Шутов, В.И. Потапов, В.И. Агибалов // Стекло и керамика. 1988. №12. С. 4-6.

125. Фридкин, Р.З. Расчет температурного поля при нагреве и охлаждении стеклянной пластины для любых степеней черноты внешних

ограждающих поверхностей / Р.З. Фридкин, С.А. Бабаев, И.Н. Дорохов // Физика и химия стекла. 1980. Т.6. № 4. С. 509-510.

126. Фридкин, Р.З. Усовершенствованный способ расчета температурного поля, возникающего в стеклянной пластине при ее нагреве и охлаждении / Р.З. Фридкин, О.В. Мазурин, А.И. Шагина // Физика и химия стекла. 1982. Т.8. №6. С. 747-749.

127. Лалыкин, Н.В. Интенсификация отжига листового стекла на горизонтальных линиях // Стекло и керамика. 1985. №1. С. 13-14.

128. Кузнецов, В.А. К расчету теплообмена излучением в поглощающей среде // Инж.-физ. журнал. 1980. Т. 38. № 1. С. 134-139.

129. Кузнецов, В.А. Эффективный метод расчета радиационного и комбинированного теплообмена // Тепломассообмен - ММФ-92. 2-ой Минский международный форум. Т. 2. Радиационный и комбинированный теплообмен. Минск, 1992. С. 89-92.

130. Журавлев, Ю.А. Зональный анализ теплообмена в топке / Ю.А. Журавлев, А.Г. Блох // Тепломассообмен - VI. Пр. VI Всесоюз. конф. по тепломассообмену. Минск: ИТМО АН БССР, 1980. Т.8. С. 3-10.

131. Куролесова, Т.Н. Экспоненциальные интегральные функции в математической модели отжига стеклоизделий / Т.Н. Куролесова, В.А. Кузнецов // Математическое моделирование в технологии строительных материалов. Сб. науч. трудов. Белгород: Изд. БТИСМ, 1992. С. 70-73.

132. Кузнецов, В.А. Метод расчета температурного поля в стеклоизделиях сложной формы / В.А. Кузнецов, В.Е. Новоселов, Т.И. Куролесова // Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении. Ч. 3. Технология стекла и стеклокристаллических материалов: Тез. докл. всесоюз. конференции. Белгород. 1989. С. 96-97.

133. Кузнецов, В.А. Особенности расчета температурного поля в стеклоизделиях сложной формы // Физико-химические основы и научно-технический прогресс в технологии стекла и стеклокристаллических

материалов с использованием вторичного сырья. Сб. трудов. М.: Изд. МИСИ и БТИСМ, 1987. С. 110-117.

134. Белоусов, Ю.Л. Оптимизация процесса отжига штучных стеклоизделий / Ю.Л. Белоусов, Ю.Н. Сопин // Стекло и керамика. 1993. № 4. С. 10-11.

135. Белоусов, Ю.Л. Оптимизация отжига стеклоблоков/Ю.Л. Белоусов, Н.В. Николенко, В.Е.Новоселов // Стекло и керамика. 1992. №3. С. 2-3.

136. Белоусов, Ю.Л. Оптимизация отжига бутылок для шампанских вин/ Ю.Л. Белоусов, В.А. Фирсов, Е.С. Донской // Стекло и керамика. 1990. №1. С.17-19.

137. Сергеев, О.А. Теплофизика оптических сред / О.А. Сергеев, А.Г. Шашков. Минск: Наука и техника, 1983. 230 с.

138. Арапов, А.Д. Расчет температурного поля и напряжений в стенке стеклянной трубы, непрерывно вытягиваемой из расплава / А.Д. Арапов, Е.И. Некрасова, Б.Н. Юдаев // Стекло и керамика. 1985. № 4, С. 13-14.

139. Некрасова, Е.И. Математическое моделирование теплообмена при изготовлении полых изделий из стекла // Стекло и керамика. 1996. № 5. С.6-7.

140. Филатов, А.Г. Автоматизация процесса отжига строительных стеклоизделий на основе оптимальных режимов термообработки, обеспечивающих энергосбережение. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 1998. 22 с.

141. Андрюхина, Т.Д. Возможности оптимизации производства стеклоблоков/ Т.Д. Андрюхина, С.Ю. Стошкус// Стекло и керамика. 1985.№10. С 5-6.

142. Касман, А.Я. Определение толщины стенки полых стеклоизделий при расчетах режимов отжига / Стекло и керамика. 1991. №8. С. 14-15.

143. Гуляян, Ю.А. Технология стеклотары и сортовой посуды. М.: Легпромбытиздат, 1986.263 с.

144. Walker G.E. The annealing of commercial glass-ware // Glass.1984. V.61, №7. P. 235-238.

145. Шмуклер, В.А. Экспериментальное определение температурного интервала отжига стеклянной тары / В.А. Шмуклер, А.С. Шмуклер // Производство и исследование стекла и силикатных материалов. Вып. 8. Ярославль: Верх.-Волж. кн. изд., 1985. С. 113-116.

146. Кузенко, А.А. Автоматизация технологического процесса отжига стеклоизделий сложной конфигурации в конвейерных печах с комплексированными источниками энергии: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Белгород, 2005. 168 с.

147. Тихомирова, Т.И. Исследование процесса отжига стеклоизделий в условиях сложного теплообмена: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Белгород, 2003. 178 с.

148. Карпович, Д.С. Аналитический и численный методы решения уравнения теплопроводности / Д.С. Карпович, О.Н. Суша, Н.П. Коровкина, В.П. Кобринец // Труды БГТУ. Серия 3. Физико-математические науки и информатика. № 6 (179). Минск: УО БГТУ, 2015, С.122-127.

149. Марголис, Б.И. Программы моделирования температурных полей в изделиях плоской формы // Программные продукты и системы. 2016. №2. С. 124-127.

150. Сагдеева, Ю.А. Введение в метод конечных элементов: методическое пособие/ Ю.А. Сагдеева, С.П. Копысов, А.К. Новиков. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет». 2011. 44 с.

151. Margolis V.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.

УТВЕРЖДАЮ**Директор****Проектно-конструкторского
бюро автоматизации производств****ООО «ПКБ АП»****Кожемякин В.М.**

03

2021 г.

АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ
автоматизированной информационно-советующей системы
расчета режимов отжига сортовых стеклоизделий «АСРЦ»

Сотрудники Тверского государственного технического университета заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов» (АТП) Марголис Б. И., аспирант кафедры АТП Мансур Г.А совместно с сотрудниками Проектно-конструкторского бюро автоматизации производств ООО «ПКБ АП» главным конструктором Беловым Ю.Н., ведущим специалистом Садиковым М.И. в период с 29.03.2021 по 30.03.2021 на персональном компьютере провели испытания автоматизированной информационно-советующей системы расчета режимов отжига сортовых стеклоизделий «АСРЦ».

1. Целью испытаний была проверка работоспособности системы при функционировании в информационно-советующем режиме.

2. Испытания предусматривали расчет оптимального по остаточным напряжениям режима отжига сортовых стеклоизделий с учетом:

- химического состава стекла;
- геометрической формы и размеров стеклоизделия;
- характеристик печи отжига;
- температурной зависимости коэффициента расширения (КТР) стекла;
- температурного режима стеклоизделий при их формовании и отжиге;

3. Производился расчет и анализ режима отжига для стеклянных флаконов из бесцветного медицинского стекла НС-3 цеха отжига № 2 Клинского стекольного завода ОАО «Медстекло».

В результате испытаний установлена работоспособность системы и возможность использования ее для расчета распределения температур и напряжений и оптимального с точки зрения остаточных напряжений режима

отжига для заданных химического состава и геометрических размеров стеклоизделий.

В связи с необходимостью поддержания заданного качества стекла, определяемого уровнем остаточных напряжений, возможности системы были использованы для расчета оптимального режима отжига, обеспечивающего заданную величину остаточных напряжений и повышение качества отжига. Результаты расчета показали необходимость подъема уставки регулирующей терморпары в третьей зоне отжига печи. Внедрение предложенного режима позволит сократить потери от брака при производстве флаконов.

Таким образом, автоматизированная информационно-советующая система расчета режимов отжига сортовых стеклоизделий «АСРЦ» продемонстрировала свою работоспособность и может быть использована на Клинском стекольном заводе ОАО «Медстекло» для расчета температурных режимов в печах отжига при изменении ассортимента стеклянных флаконов.

От Проектно-конструкторского бюро
автоматизации производств
ООО «ПКБ АП»

От Тверского государственного
технического университета
ТвГТУ

Главный конструктор

 Белов Ю.Н.

Ведущий специалист

 Садиков М.И.

Заведующий кафедрой АТП

 Марголис Б. И.

Аспирант кафедры АТП

 Мансур Г. А.