Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»

На правах рукописи

Андрианова Валентина Ивановна

Моделирование и управление технологическим процессом закалки стекла для автомобильного транспорта

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 - 2022

Оглавление

Введение 4
Глава 1 Технологический процесс производства закаленного стекла для автомобильного транспорта и обеспечение качества 15
1.1 Особенности технологического процесса производства закаленных автомобильных стекол, как объекта управления 15
1.2 Качество закаленного стекла. Требования, предъявляемые к качеству стекла. Управление качеством закаленного стекла 27
1.3 Моделирование технологического процесса производства закаленного стекла 30
1.4 Выделение ключевых характеристик в производстве закаленного стекла ... 35
Выводы по 1-й главе 38
Глава 2 Оценка качества технологической системы и технологических процессов производства закаленного стекла 40
2.1 Оценка технологической системы производства закаленного стекла 42
2.2 Оценка отлаженности технологического процесса закалки по режимным переменным 51
2.3 Оценка отлаженности и настроенности технологического процесса закалки по показателям качества готовой продукции и уровню дефектности 57
Выводы по 2-й главе 63
Глава 3 Исследование и разработка моделей, описывающих процесс закалки автомобильного стекла 65
3.1 Выбор типа моделей для описания процесса закалки автомобильного стекла 65
3.2 Разработка моделей, описывающих зависимость отклонения формы стекла от режима закалки 66
3.3 Разработка моделей, описывающих зависимость характера разрушений стекла при испытаниях на механическую прочность от режима закалки 76

Выводы по 3-й главе 79
Глава 4 Алгоритм управления технологическим процессом закалки стекла 80
4.1 Формализация задачи управления технологическим процессом закалки стекла 80
4.2 Разработка алгоритма управления технологическим процессом закалки стекла 83
4.3 Постановка вычислительного эксперимента по оценке эффективности алгоритма управления по коррекции режима закалки автомобильного стекла.. 86
Выводы по 4-й главе 97
Заключение 98
Список сокращений и условных обозначений 100
Список литературы 101
Приложение А Акт опытно-промышленных испытаний Проектно-конструкторского бюро автоматизации производства ООО «ПКБ АП» 117
Приложение Б Заключение на диссертацию ООО «Стромизмеритель» 119
Приложение В Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе кафедры ИСПИ ВлГУ 121

Введение

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В современных условиях рыночной экономики предприятиям необходимо уделять особое внимание проблеме качества производимой продукции. Совершенствование технологии производства и повышение ее экономичности позволяет успешно решать проблемы качества. Важную роль в повышении качества продукции также играет автоматизация производственных процессов.

Стекольная промышленность является одной из важных подотраслей производства строительных материалов. Листовое стекло используется в качестве заготовок для производства всех видов автомобильных стекол. Перспективы развития российского производства автомобильного стекла и стекольной промышленности в целом связаны, в первую очередь, с расширением спроса на продукцию, как на внутреннем, так и на внешнем рынке. В проведении научно-исследовательских работ с целью усовершенствования производства и повышения качества выпускаемой продукции заинтересованы ведущие предприятия стекольной промышленности, среди которых ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод», АО «Саратовстройстекло», АО «Салаватстекло», АО «Саратовский Институт стекла» и другие [53].

На сегодняшний день научные исследования в области производства листового стекла проводят научные школы ряда ВУЗов и организаций, среди которых можно назвать:

1) Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова;
2) Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых;
3) Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева;

4) Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.;
5) Тверской государственный технический университет (ТвГТУ);
6) Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина и др. [53].

Научно-исследовательские работы в данной области осуществляются при содействии и непосредственном участии организаций стекольной отрасли, таких как:

1) ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод»;
2) АО «Институт стекла»;
3) АО ««Научно-исследовательский институт технического стекла им. В.Ф.Солинова» (НИТС);
4) ООО «Научно-исследовательский институт стекла» (г. Гусь-Хрустальный);
5) ООО «Стромизмеритель»;
6) АО «Саратовский институт стекла» и др.

Сегодня в автомобильной промышленности многие российские поставщики производят качественную продукцию, которой комплектуются иномарки, производимые в России. Автосборщики стремятся к унификации требований для своих поставщиков. Таким документом в России стал стандарт ГОСТ Р 51814.1-2009 «Системы менеджмента качества». Особые требования по применению ИСО 9001:2008 в автомобильной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части, определены в ИСО/ТУ 16949:2009. В стандарте содержатся требования к системам управления качеством в области автомобилестроения, основанные на требованиях как международного (*ISO* 9001:2008), так и национальных стандартов. Наличие сертификата соответствия требованиям «автомобильного стандарта» является условием для заключения контрактов с ведущими российскими автозаводами [29, 98].

ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод» – ведущее предприятие на российском стекольном рынке – удерживает лидирующие позиции не только в сегменте производства листового стекла, но и на рынке автомобильного стекла. Основные виды продукции завода (листовое и автомобильное стекло) сертифицированы в Росстандарте и Госстрое России. В настоящее время предприятие имеет омологационные свидетельства на все виды автомобильного стекла по межъевропейским и американским стандартам безопасности. Несмотря на неоднократное подтверждение качества автомобильного стекла аудитами автопроизводителей, повышение качества производимой продукции продолжает оставаться одним из приоритетных направлений исследований для завода [29].

Основой теории управления качеством применительно к стекольному производству являются труды известных академиков в области стекольного производства и химической технологии Кафарова В.В. [6, 32], Саркисова П.Д. [7], Китайгородского И.И. [97], Прангишвили И.В. [87] и др.

Изучению систем управления качеством, вопросов их внедрения и интеграции на производственных предприятиях посвящены работы Адлера Ю.П. [1], Макарова Р.И. [29], Никифорова А.Д. [81], Свиткина М.З. [91, 92], Тарбеева В.В. [99, 100, 101] и др.

Большинство научных исследований и публикаций связаны с повышением качества листового стекла, которое используется в качестве заготовок при производстве закаленного стекла.

Научно-исследовательские работы по снижению оптических дефектов листового стекла, с целью соответствия качества стекла международным стандартам, ведутся Белгородским государственным технологическим университетом им. В.Г. Шухова, АО ««Научно-исследовательский институт технического стекла им. В.Ф.Солинова» (НИТС) совместно с АО «Саратовский институт стекла». Данный вопрос рассматривали в работах следующие авторы: Шутов А.И. [111, 112], Кондрашов В.И. [28, 36], Гороховский А.В. [96], Юнева

Е.В. [114], Каплина Т.В. [96], Безлюдная В.С., Иванов А. Л [28], Егорова Т. А. [25].

На базе Тверского государственного технического университета проводились работы по оптимизации и автоматизации процессов отжига стеклоизделий. Данный вопрос рассматривался в исследованиях Марголиса Б.И., Дмитриева Г.А., Шейнмана А.А., Киселева А.Н., Шичкова А.В. [21, 22, 34, 71, 72, 73, 74, 75, 76] и др.

Исследования коллектива авторов под руководством Шутова А.И. (Остапко А.С., Остапко Т.С., Медведев К.А. [111, 112], и др.) посвящены вопросам влияния параметров сложной термической обработки на свойства листового стекла. Практическое значение представляют предложенные алгоритмы расчета режимов термообработки, позволяющие прогнозировать новые потребительские свойства листового стекла.

В работах авторов Кондрашова В.И., Безлюдной В.С., Иванова А.Л. [28, 36] и др. исследуются процессы выработки и формования стекла на линии многофункционального назначения, приводятся результаты совмещения на одной флоат-линии нескольких технологических процессов производства ленты стекла с различными показателями. Предложены приемы сокращения продолжительности перехода с одного вида стекла на другой при выработке на одной линии, а также повышения оптических показателей флоат-стекла.

В работах, выполненных в Уральском федеральном университете, рассматриваются вопросы, связанные с процессом функционирования стекловаренных печей. Авторы Дзюзер В. Я., Швыдкий В. С., Кутьин В. Б., Климычев В. Н. [20] в своих работах уделяют особое внимание построению математических моделей стекловаренных печей и математическому обеспечению специализированных технологических подсистем. Авторами разработаны уравнения регрессии полей температур для поверхности расплава, а также алгоритмы управления тепловой работой стекловаренной печи.

Большое число опубликованных работ, посвященных исследованиям процесса производства листового стекла, основано на математическом описании физических и химических процессов. На сегодняшний день существует несколько самостоятельных направлений исследований [63]:

1) статистические методы;
2) эвристические процедуры;
3) нечеткие множества;
4) нейросетевые методы.

Эффективность использования статистических методов для математического описания процесса производства стекла и контроля его качества подтверждена рядом работ, выполненных во Владимирском государственном университете. Кафедра Информационных систем и программной инженерии ВлГУ внесла значительный вклад в область автоматизации производства листового стекла с целью повышения качества производимой продукции. Научный коллектив под руководством профессора Макарова Р.И. на протяжении многих лет тесно сотрудничает с ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод», на базе которого проводятся научные исследования. Исследованию всех этапов производства листового стекла флоат-способом посвящены работы, как сотрудников кафедры, так и работников стекольного завода. В этих работах авторы исследуют влияние технологического режима на качество вырабатываемого стекла, выдают рекомендации по ведению процесса варки-выработки.

Автоматизации процесса производства листового стекла посвящены работы Макарова Р.И., Хорошевой Е.Р. [58, 69], Лукашина С.А.[42], Кирилловой С.Ю. [33], Шорикова А.В. [110], Левковского Д.И. [41]. Вопросы управления технологическим процессом приготовления стекольной шихты рассмотрены в работах Маневича В.Е., Ефременкова В.В., Субботина К.Ю. [27, 70] и др.

Проблемам управления качеством листового стекла посвящены работы авторов: Макарова Р.И., Хорошевой Е.Р. [65, 69, 101], Молодкина А.В. [78], Щукина М.В. [113], Васильева А.В. [10], Огрызкова С.А. [84] и др.

В результате исследований, выполненных данным научным коллективом, были разработаны линейные регрессионные модели, описывающие зависимость показателей качества вырабатываемого стекла от режима работы технологического оборудования, качества шихты, параметров стекла, свойств и химического состава стекла. Полученные модели используются для управления технологическим процессом и выработки корректирующих действий.

Вместе с тем следует отметить, что на сегодняшний день мало научных работ, посвященных управлению качеством производства безопасного стекла для наземного транспорта: многослойного («триплекса») и закаленного. Результаты научных исследований в области производства многослойного автомобильного стекла представлены в работах Чуплыгина В.Н. [101, 108] и Суворова Е.В. [98], в которых с использованием системного подхода и моделирования предложены принципы создания системы управления качеством автомобильного стекла. Оценена эффективность применения статистических методов при контроле качества продукции, определении точности и стабильности технологических процессов производства и удовлетворенности потребителей качеством вырабатываемого стекла и обслуживанием.

Результаты научных исследований в области производства закаленного стекла с целью повышения качества производимой продукции на сегодняшний день представлены работами российских исследователей Суворова Е.В., Макарова Р.И. и Обухова Ю.М. [63, 64, 67, 98]. Исследованию вопросов повышения механической прочности закаленного автомобильного стекла посвящены работы японских авторов *M. Schiavonato, E. Mognato, Lee H., Cho S.* и др. [126, 129, 133, 134]. Результаты исследования характера разрушения закаленного стекла для наземного транспорта представлены в работах финских авторов *M. Eronen*, *M. Saarela* и *J. Mustonen* [130].

Проведенный анализ позволил определить направления исследований в области управления производством и повышения качества закаленного автомобильного стекла.

Постановка задачи исследования – разработка математических моделей и алгоритмов управления технологическим процессом закалки автомобильных стекол, обеспечивающих повышение качества вырабатываемой продукции.

Целью диссертационной работы является повышение качества закаленного стекла для автомобильного транспорта за счет определения оптимального режима закалки стекла.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи:**

1. Проведено исследование технологического процесса производства гнутого закаленного стекла для автомобильного транспорта, как объекта управления; оценена точность, стабильность процессов и качество вырабатываемой продукции.

2. Разработаны структурные модели технологического процесса производства закаленного стекла; выявлены критичные технологические стадии процесса, влияющие на качество вырабатываемого стекла.

3. Разработаны и исследованы нейросетевые модели, описывающие зависимость геометрических параметров и механической прочности закаленного стекла от режимных параметров.

4. Разработан алгоритм управления технологическим процессом закалки гнутого стекла.

5. Создана программа автоматизированного расчета оптимального режима закалки стекла.

6. Проведено имитационное моделирование функционирования технологического процесса закалки для разработанного алгоритма управления.

Объект исследования – технологический процесс производства безопасного закаленного гнутого бесцветного стекла для автомобильного транспорта.

Предмет исследования – математические модели геометрических и механических свойств закаленного стекла и алгоритмы управления технологическим процессом производства закаленного стекла.

Новые научные результаты, полученные в диссертации, состоят в следующем:

1. Разработаны структурные модели технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта.

2. Разработаны нейросетевые модели, описывающие зависимость отклонения формы стекла и показателей характера разрушения при испытании изделий от режимов закалки.

3. Предложен алгоритм управления технологическим процессом закалки гнутого стекла, основанный на использовании нейросетевых моделей и учитывающий нестационарность протекающих процессов.

4. Введен комплексный критерий для оценки качества вырабатываемого закаленного автомобильного стекла, учитывающий отклонение гнутых изделий от заданной формы и показателей характера разрушения изделий при испытаниях.

5. Разработана программа в среде MS Excel для автоматизированного расчета оптимального режима закалки стекла.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1. Доказана применимость методики аксиоматического анализа для оценки точности и стабильности технологического процесса производства закаленного стекла.

2. Применительно к проблематике диссертации результативно использованы статистические и аксиоматические методы оценки технологической системы.

3. Изучены зависимости показателей качества стекла от режимных переменных технологических стадий процесса закалки.

4. Показаны результаты эффективного использования моделей на нейронных сетях для управления технологическим процессом закалки автомобильных стекол.

5. Проведена модернизация алгоритмов управления технологическими режимами процесса закалки стекла.

Практическая значимость работы

Практическая ценность диссертационной работы заключается в разработке нейросетевых моделей и алгоритма управления технологическим процессом закалки гнутого стекла, а также в реализации на их основе программы автоматизированного расчета оптимальных режимов процесса закалки.

Методы исследования

Поставленные задачи решались с использованием статистических методов и процессного подхода к управлению, методов теории управления, системного анализа, математического и имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурные модели технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта, позволившие выявить ключевые показатели процессов и характеристики закаленного стекла, наиболее критичные с точки зрения качества.

2. Нейросетевые модели, описывающие отклонение гнутых изделий от заданной формы и показатели характера разрушения при испытаниях изделий в зависимости от режимов технологического процесса закалки.

3. Алгоритм управления технологическим процессом закалки гнутого стекла, обеспечивающий возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

4. Программа автоматизированного расчета оптимального режима закалки стекла.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что:

1. Экспериментальные измерения произведены на сертифицированном оборудовании ПКО «Автостекло» ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод», показана воспроизводимость результатов исследования на различных видах изделий.

2. Используются статистические методы теории управления, системного анализа, математического моделирования, имитационного моделирования, результаты компьютерных расчетов согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме.

3. Идея базируется на анализе практики повышения качества закаленного безопасного стекла для автомобильного транспорта, обобщении передового опыта автопроизводителей.

4. Использованы сравнения авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике в работах авторов Макарова Р.И., Суворова Е.В. и т.д.

Апробация результатов

На разработанные математические модели и алгоритм управления получены акт опытно-промышленных испытаний от Проектно-конструкторского бюро автоматизации производств ООО «ПКБ АП» и положительное заключение от ООО «Стромизмеритель»; основные результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Информационные системы и программная инженерия» ВлГУ. Заключение и акты приведены в приложениях А-В.

Результаты диссертации обсуждались на XXI международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-21, Осенняя школа молодых ученых, ТГТУ, г. Тамбов, 2008г.), на XXII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-22, Летняя школа молодых ученых, ИГХТУ, г. Иваново, 2009г.), на XXIII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-23, СГТУ, г. Саратов, 2010г), на II международной молодежной научно-практической школе «Информационный

менеджмент социально-экономических и технических систем» (г. Москва, 2011г.), на II открытой городской научно-практической конференции школьников и студентов «Решение-2013» (Березниковский филиал ПГНИУ, г. Березники, 2013г.), на IX международной научно-практической конференции «Перспективные разработки науки и техники 2013» (г. Пшемысль (Przemysl), Польша, 2013г.), на межвузовских научно-практических конференциях ВЗФЭИ (г. Владимир, 2007-2009гг.), на научно-технических конференциях ВлГУ, (г.Владимир, 2007-2019гг.).

Основное содержание диссертации отражено в 19 публикациях, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus.

Глава 1 Технологический процесс производства закаленного стекла для автомобильного транспорта и обеспечение качества

1.1 Особенности технологического процесса производства закаленных автомобильных стекол, как объекта управления

Закаленным листовым стеклом называется стекло любого состава, цвета, формы и размеров, подвергнутое специальной термической обработке, в результате которой наружные слои приходят в состояние сильного сжатия, а внутренние − в состояние растяжения, образуя систему напряжений в стекле, обеспечивающую его высокую механическую и термическую прочность. При достижении предела прочности закаленное листовое стекло, разрушаясь, распадается на мелкие округленной формы осколки, не имеющие острых режущих граней [97].

Закалка – это процесс тепловой обработки (нагрев и быстрое охлаждение), приводящий к образованию остаточных напряжений в стекле, в результате чего повышается механическая прочность и термостойкость стекла [100].

Современная технология производства закаленного стекла представляет высокоавтоматизированное непрерывное поточное производство, состоящее из последовательных технологических операций (процессов). Структурная схема рассматриваемого технологического процесса представлена на рисунке 1.1.

Рисунок 1.1 – Структурная схема технологического процесса закалки стекла

Для закалки применяют установки с вертикальной щелевой электрической печью для нагрева стекла и установки горизонтальной закалки стекла. Горизонтальные печи обеспечивают более высокое качество продукции по сравнению с печами вертикального типа [100].

В данной работе рассматривается процесс закалки стекла в горизонтальной печи фирмы *SIV* непрерывного действия.

Установка горизонтальной закалки стекла (рисунок 1.2) включает туннельную электрическую печь (2), гибочное устройство (пресс) (3), камеру закалки (4), систему воздушного охлаждения (5), участок подачи/съема стекла (1, 6). Оборудование установки расположено последовательно и представляет единую поточную технологическую линию. Перемещение стекла осуществляется в горизонтальном положении на твердых опорах-валиках, которые проходят вдоль всей линии.

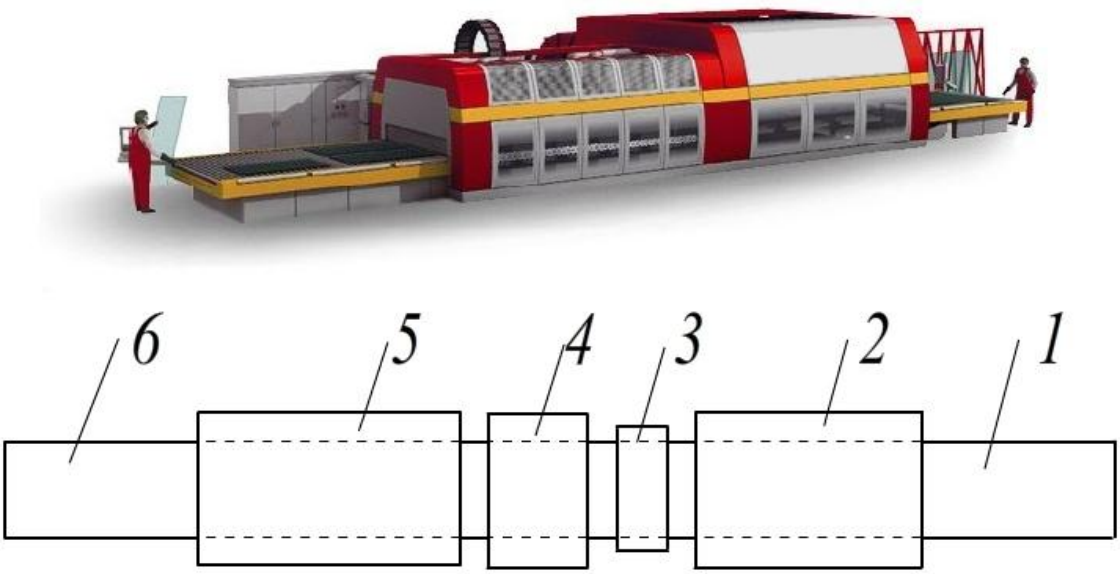


Рисунок 1.2 − Схема установки горизонтальной закалки стекла

1 – рольганг (участок загрузки), 2 − электрическая печь нагрева, 3 - гибочное устройство, 4 – камера закалки, 5 – устройство воздушного охлаждения, 6 − рольганг (участок съема стекла).

У такой закалочной установки высокая производительность, так как заготовки перемещаются с высокой скоростью, и исключается операция подвески стекла. Нагрев и закалка стекла происходят в непрерывном потоке. На установке горизонтальной закалки можно осуществлять быстрый переход с одной формы стекла на другую, а при установке гибочного устройства (пресса) возможно производить гнутые стекла.

Технологический процесс закалки стёкол включает несколько технологических стадий (рисунок 1.1):

1) загрузка заготовок на рольганг;
2) разогрев заготовок в печи;
3) изгиб заготовок в прессе;
4) закалка заготовки и получение готового изделия;
5) охлаждение изделия;
6) съем и контроль готового изделия.

На участке загрузки стекло укладывается на транспортирующие валы рольганга и направляется в печь. Электрическая печь нагрева делится на

несколько тепловых зон, схема расположения термопар по зонам четырех камер печи представлена на рисунке 1.3.

КАМЕРА 1		КАМЕРА 2		КАМЕРА 3		КАМЕРА 4	
Зона 1	Зона 2	Зона 1	Зона 2	Зона 1	Зона 2	Зона 1	Зона 2
x_1	x_5	x_9	x_{13}	x_{17}	x_{21}	x_{25}	x_{29}
x_2	x_6	x_{10}	x_{14}	x_{18}	x_{22}	x_{26}	x_{30}
x_3	x_7	x_{11}	x_{15}	x_{19}	x_{23}	x_{27}	x_{31}
Зона 11	Зона 12	Зона 11	Зона 12	Зона 11	Зона 12	Зона 11	Зона 12
x_4	x_8	x_{12}	x_{16}	x_{20}	x_{24}	x_{28}	x_{32}

Рисунок 1.3 – Схема расположения термопар по зонам камер электрической печи нагрева стекла

Контроль температуры в каждой зоне производится термопарами и поддерживается автоматически при помощи терморегуляторов. Температурный режим в печи обеспечивается сводовыми и подовыми электронагревательными панелями.

Температуры в 4-х камерах и 8 зонах горизонтальной печи обозначены следующими режимными переменными:

x_1 – температура в камере 1 зона 1 слева;

x_2 – температура в камере 1 зона 1 центр;

x_3 – температура в камере 1 зона 1 справа;

x_4 – температура в камере 1 зона 11;

x_5 – температура в камере 1 зона 2 слева;

x_6 – температура в камере 1 зона 2 центр;

x_7 – температура в камере 1 зона 2 справа;

x_8 – температура в камере 1 зона 12;

x_9 – температура в камере 2 зона 1 слева;

x_{10} – температура в камере 2 зона 1 центр;

x_{11} – температура в камере 2 зона 1 справа;

x_{12} – температура в камере 2 зона 11;

x_{13} – температура в камере 2 зона 2 слева;

x_{14} – температура в камере 2 зона 2 центр;

x_{15} – температура в камере 2 зона 2 справа;

x_{16} – температура в камере 2 зона 12;

x_{17} – температура в камере 3 зона 1 слева;

x_{18} – температура в камере 3 зона 1 центр;

x_{19} – температура в камере 3 зона 1 справа;

x_{20} – температура в камере 3 зона 11;

x_{21} – температура в камере 3 зона 2 слева;

x_{22} – температура в камере 3 зона 2 центр;

x_{23} – температура в камере 3 зона 2 справа;

x_{24} – температура в камере 3 зона 12;

x_{25} – температура в камере 4 зона 1 слева;

x_{26} – температура в камере 4 зона 1 центр;

x_{27} – температура в камере 4 зона 1 справа;

x_{28} – температура в камере 4 зона 11;

x_{29} – температура в камере 4 зона 2 слева;

x_{30} – температура в камере 4 зона 2 центр;

x_{31} – температура в камере 4 зона 2 справа;

x_{32} – температура в камере 4 зона 12.

Температура по зонам по ходу стекла постепенно возрастает от 450 до 630-650°С. Нагретая до пластичного состояния заготовка попадает на участок прессования.

Прессовое оборудование выполнено следующим образом: сверху укреплен неподвижный пуансон, а внизу в промежутках между транспортирующими валами поднимаются элементы матрицы.

В процессе прессования заготовка проходит несколько операций (рисунок 1.4). По установленной программе технологического процесса собирается привод, поднимая фиксаторы. Заготовка (3), упираясь в них, занимает строго ориентированное по форме пресса положение. В следующий момент валы (4) в зоне пресса останавливаются, срабатывает привод матрицы, и основание матрицы с

закрепленными на нем деталями (2) контура изделия поднимается, подхватывая с валов заготовку стекла, и поджимают ее к пуансону (1). Фиксаторы опускаются вниз [100].

После короткой выдержки матрица уже с выгнутой заготовкой с замедлением опускается, укладывая заготовку на валы, которые в этот момент получают быстрое вращение и перемещают заготовку в обдувочную камеру, где она снизу и сверху обдувается мощным потоком воздуха и получает закалку. На её место поступает новая заготовка. Процесс занимает секунды. Обдувочная камера рассчитана на закалку 3-х миллиметрового стекла. Далее уже готовое изделие, двигаясь по рольгангу, охлаждается вентиляторным воздухом, проходит участок контроля и укладывается в тару.

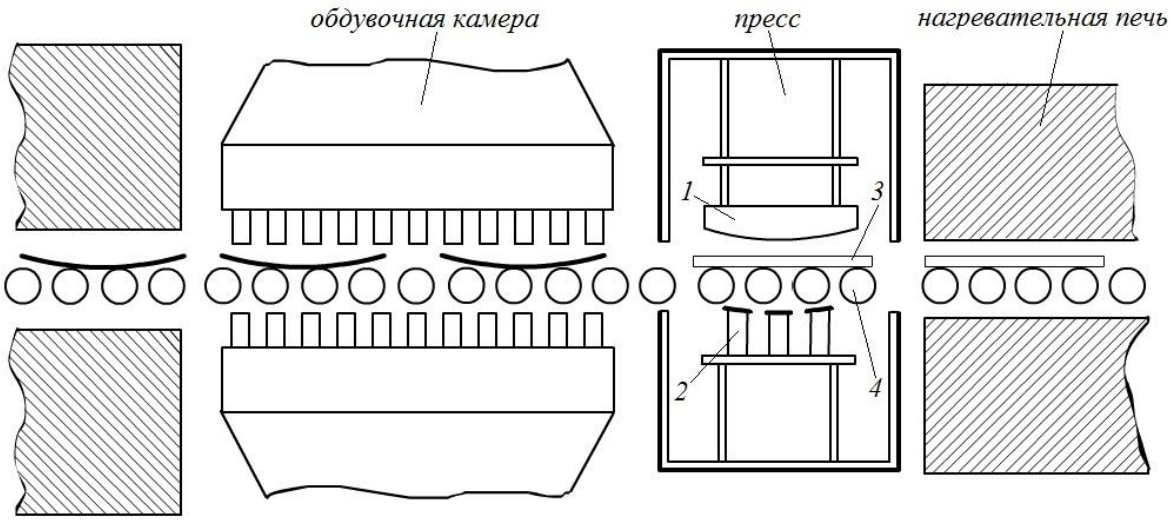


Рисунок 1.4 − Схема прессового оборудования для изгиба заготовок в закалочной установке с перемещением стекла на твердых опорах

Производство закаленного автомобильного стекла характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени. На каждом рабочем месте закреплено выполнение одной постоянно повторяющейся операции. При этом используется специальное высокопроизводительное оборудование, которое расставлено по поточному принципу (по ходу технологического процесса). Оборудование связано

транспортирующими устройствами и конвейерами с постами промежуточного автоматизированного и ручного контроля, а также промежуточными складами-накопителями заготовок. Используются автоматические линии и автоматизированные производственные системы.

Технологический процесс требует постоянного контроля и наладки оснастки. Незначительные отклонения технологических режимов вызывают дефекты изделия. В процессе горизонтальной закалки стекла встречаются следующие виды дефектов:

1) недопрессованное стекло (кривизна не соответствует требованиям чертежа);
2) одностороннее неприлегание к контрольному шаблону;
3) при испытании готовых изделий на характер разрушения величина осколков превышает допустимые размеры;
4) оптические искажения стекла и др.

Чертежи на исследуемое в работе бесцветное гнутое стекло для легкового автомобиля и ГОСТ 32565–2013 [17] на стекло для наземного транспорта накладывают определенные требования к показателям качества, производимого закаленного стекла, которые приведены в таблице 1.1 с допусками.

Таблица 1.1 – Свойства закаленного стекла и характеризующие их параметры

Группы показателей качества стекла	Показатели качества стекла	Значения параметров
Размеры, предельные отклонения размеров	Площадь заготовки	Не более 1,5 $м^2$
	Толщина заготовки	3-6 мм
	Предельное отклонение толщины	От -0,3 мм до +0,3 мм
Отклонение гнутых изделий от заданной формы	Неприлегание сторон к контуру шаблона	До +1,5 мм
	Отклонение образующей цилиндра	От -1 до +2 мм
Испытание на характер разрушения	Максимальное количество осколков в квадрате 50х50 мм	400
	Минимальное количество осколков в квадрате 50х50 мм	40
	Длина осколков	Менее 75 мм
	Площадь осколков	Менее 3 $см^2$
Оптические	Светопропускание	не менее 70%

Эти характеристики изделия зависят от многих факторов: качества заготовок стекла, состояния используемого оборудования, технологических режимов производства и др. В каждом случае устанавливаются причины, вызывающие появление дефектов, и оперативно принимаются меры по их устранению.

Процесс закалки характеризуется большой размерностью векторов входных переменных, переменных состояния и выходных переменных, достигающие несколько десятков компонентов.

Для уменьшения размерности решаемой задачи из перечня выходных переменных отбираются определяющие (базовые) переменные. Важнейшей группой параметров, характеризующих свойства закаленного стекла, является отклонение формы стекла от чертежа (их значения приведены в таблице 1.1). Зазор между кромкой закаленного стекла и контуром шаблона контролируется по четырем сторонам: *A–B, B–C, C–D, D–F* (рисунок 1.5) и не должен превышать заданной величины, указанной в техническом листе (таблица 1.1). Контролируется также поперечная кривизна по отклонению образующей линии от цилиндрической поверхности (прямая, проходящая через точки *H*1, *H*2, *H*3 на рисунке 1.5).

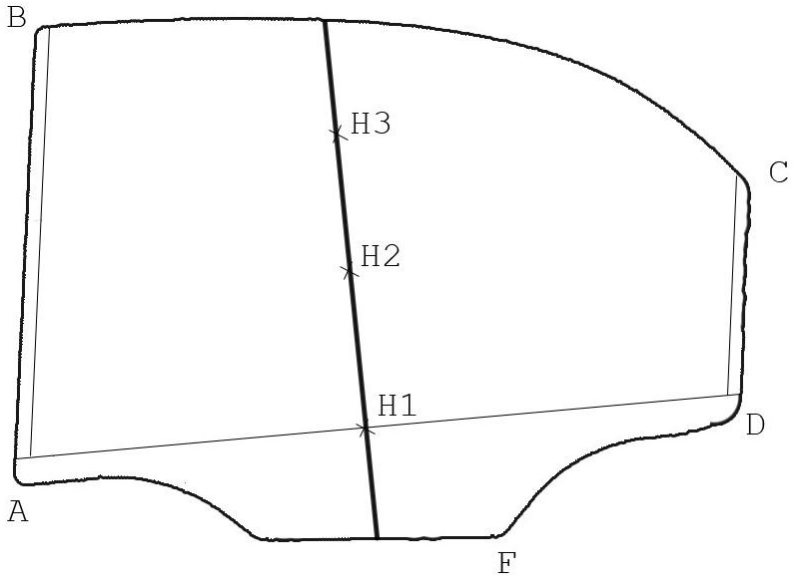


Рисунок 1.5 – Контур шаблона

Проведение системного анализа невозможно без формализации описания системы, т.е. построения ее модели. Проанализируем процесс закалки как объект управления.

Закалка стекла характеризуется сложностью процессов, протекающих в технологическом оборудовании – в горизонтальной печи закалки стекла. Объект управления является многомерным, характеризуется распределенностью параметров, плохо обусловлен и, подвержен действию высокого уровня шумов.

Процесс закалки как технологический объект управления характеризуется следующими основными группами параметров, описывающими текущее состояние объекта [5, 24]:

1) Y – выходные контролируемые переменные, которыми оценивается качество работы объекта и которые необходимо поддерживать на заданном уровне;
2) X – входные контролируемые независимые переменные, действующие на процесс; значения каждого параметра ограничены технологическим регламентом процесса;
3) V – входные контролируемые неуправляемые переменные;
4) Z – входные неконтролируемые параметры, характеризующие действие возмущающих факторов.

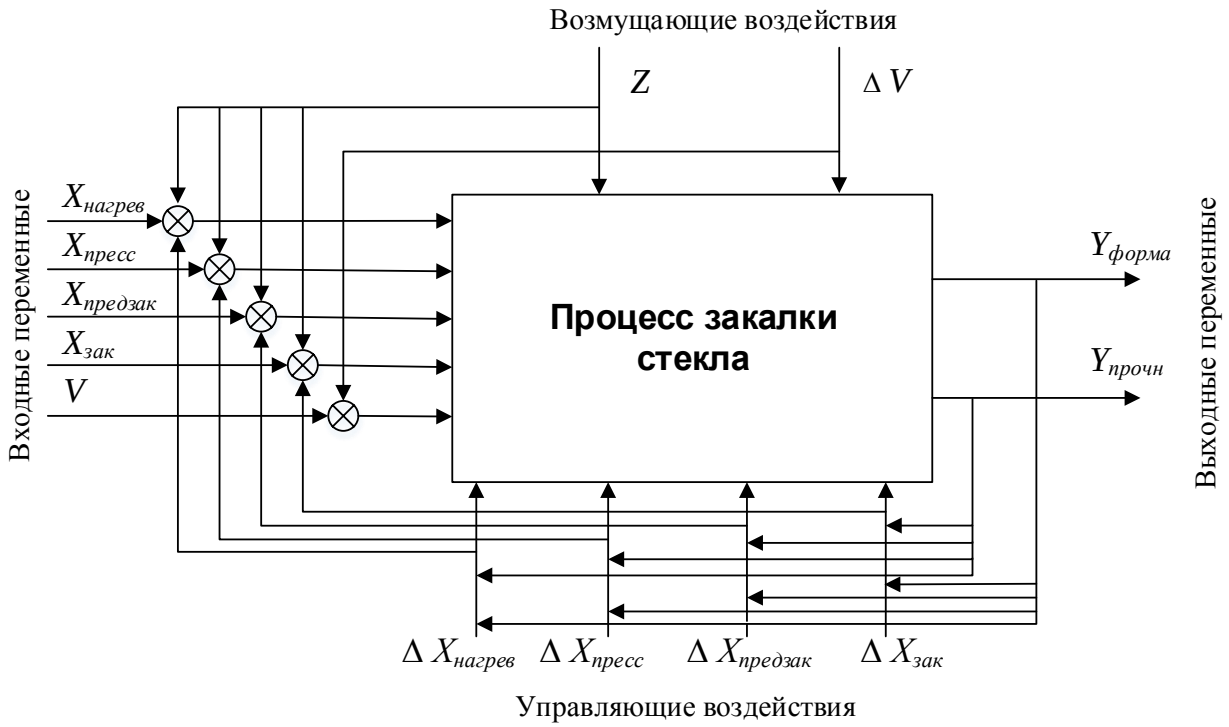


Рисунок 1.6 – Технологический процесс закалки стекла как объект управления

Рассмотрим непересекающиеся подмножества множества входных параметров X, определяющие технологические режимы нагрева стекла $X_{нагрев}$, прессования стекла $X_{пресс}$, предзакалки стекла $X_{предзак}$ и закалки стекла $X_{зак}$.

К подмножеству переменных состояния режима нагрева стекла $X_{нагрев}$ относятся:

$$X_{нагрев} = (x_t, x_{33}, x_{34}), \tag{1.1}$$

где x_{33} – скорость перемещения заготовки в печи; x_{34} – скорость в цикле ускорения на выходе из печи; x_t – вектор температур в 4-х камерах и 8–и зонах горизонтальной печи (рисунок 1.3), т.е.

$$x_t = (x_1, \dots, x_{32}). \tag{1.2}$$

К подмножеству переменных, определяющих режим прессования стекла, относятся:

$$X_{пресс} = (x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}, x_{39}, x_{40}, x_{41}, x_{42}, x_{43}, x_{44}, x_{45}, x_{46}), \tag{1.3}$$

где x_{35} – количество потоков заготовок стекла на транспортирующем конвейере; x_{36} , x_{37} – показания пирометра температуры заготовок стекла на входе пресса в 1 и 2 потоках; x_{38} – замедление валков на входе пресса; x_{39} – начало цикла левый; x_{40} – начало цикла правый; x_{41} – режим прессования, интервал левый 1; x_{42} – режим прессования, интервал левый 2; x_{43} – режим прессования, интервал правый 1; x_{44} – режим прессования, интервал правый 2; x_{45} – высота подъема пуансона 1; x_{46} – высота подъема пуансона 2.

Определяющими параметрами предзакалки стекла являются:

$$X_{предзак} = (x_{47}, x_{48}, x_{49}), \tag{1.4}$$

где x_{47} – расход воздуха на верхние обдувки; x_{48} – расход воздуха на нижние обдувки; x_{49} – расстояние между обдувками.

Определяющими переменными закалки стекла являются:

$$X_{зак} = (x_{50}, x_{51}), \tag{1.5}$$

где x_{50} – давление воздуха, подаваемое в верхние обдувные решетки; x_{51} – давление воздуха, подаваемое в нижние обдувные решетки.

Множество входных контролируемых неуправляемых переменных:

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6), \tag{1.6}$$

где v_1 – толщина заготовки стекла; v_2 – разнотолщинность стекла; v_3 – светопропускание в отраженном свете; v_4 –настройка оборудования; v_5 – геометрия инструмента; v_6 – твердость обрабатываемого материала.

Множество выходных переменных Y:

$$Y = (Y_{форма}, Y_{прочн}), \tag{1.7}$$

$$Y_{форма} = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5), \tag{1.8}$$

$$Y_{прочн} = (y_6, y_7, y_8), \tag{1.9}$$

где $Y_{форма}$ – множество выходных переменных, описывающих геометрию закаленного стекла; $Y_{прочн}$ – множество выходных переменных, описывающих механическую прочность закаленного стекла; y_1 – неприлегание стороны *A–B* к контуру шаблона; y_2 – неприлегание стороны *B–C* к контуру шаблона; y_3 – неприлегание стороны *C–D* к контуру шаблона; y_4 – неприлегание стороны *D–F* к контура шаблона; y_5 – отклонение образующей линии от цилиндрической поверхности; y_6 – максимальное количество осколков при испытаниях на механическую прочность; y_7 − минимальное количество осколков при испытаниях на механическую прочность; y_8 − длина осколков при испытаниях на механическую прочность.

На качество закаленного стекла влияет множество управляемых и неуправляемых величин.

Управляющие воздействия: $\Delta X_{нагрев}$ – изменения переменных режима нагрева стекла; $\Delta X_{пресс}$ – изменения переменных режима прессования; $\Delta X_{предзак}$ – изменения переменных режима предзакалки стекла; $\Delta X_{зак}$ – изменения переменных режима закалки стекла.

Возмущающие воздействия: ΔV – изменения входных контролируемых неуправляемых переменных (1.6); Z – вектор неконтролируемых возмущающих воздействий (δ – разнотолщинность заготовок стекла, $t_{возд}$ – температура воздуха окружающей среды, состояние оборудования и др.)

Количество компонент векторов определяющих переменных (1.1) – (1.9) зависит от особенностей технологического оборудования, размещения первичных датчиков на объекте управления, характера управляющих воздействий и других факторов. Количество определяющих переменных подлежит уточнению на автоматизируемом объекте с учетом особенностей технологического процесса закалки стекла.

1.2 Качество закаленного стекла. Требования, предъявляемые к качеству стекла. Управление качеством закаленного стекла

Решение проблемы качества является важнейшим фактором повышения уровня жизни. Качество – это понятие, которое характеризует эффективность всех сторон деятельности предприятия. Международная организация по стандартизации дает следующее определение понятию «качество»: это степень, с которой совокупность собственных характеристик объекта удовлетворяет установленным или предполагаемым потребностям и ожиданиям [13, 98, 39].

Для каждого вида продукции выбирают свою номенклатуру показателей, которая наиболее полно характеризует её качество. Выделяют две группы показателей качества: показатели назначения и экономические показатели [82]. Показатели назначения подразделяют на производственные и потребительские показатели.

Для автомобильного стекла основными производственными показателями назначения являются: выход продукции (*Yield*), ритмичность производства (*Cadence*), коэффициент использования оборудования (*CU*), доля дефектов на миллион изделий (*PPM*). Потребительскими показателями закаленного стекла являются: размеры, предельные отклонения размеров, отклонения толщины, светопропускание, оптические искажения, стойкость к удару и др. Экономические показатели качества также делят на производственные и потребительские. Для закаленного автомобильного стекла можно выделить следующие экономические показатели производственной группы: себестоимость, оптовая цена, капиталовложения в производство, рентабельность производства и др. К экономическим показателям из потребительской группы относятся в первую очередь капиталовложения, связанные с эксплуатацией изделия [29, 98].

Определяющие показатели качества являются оценочными, по ним судят о качестве изделий. Номенклатура определяющих показателей качества безопасного закаленного автомобильного стекла определена ГОСТ 32565–2013

«Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия» [17] (таблица 1.1).

Качество комплектующих изделий является наиболее общими и важными в отношениях между автосборщиками и поставщиками комплектующих. Автосборщики предъявляют высокие требования к качеству закаленного стекла, в частности, к отклонению изделий от заданной формы. На Борском стекольном заводе имеется положительный опыт по обеспечению требований и ожиданий потребителей в России и в странах СНГ в части обеспечения высокого качества автомобильного стекла. Но даже незначительное уменьшение процента брака по отдельным видам дефектов позволит повысить эффективность производства и качество продукции.

Современная теория управления качеством исходит из положения, что деятельность по управлению качеством должна осуществляться в ходе производства продукции. Важна также деятельность по обеспечению качества, предшествующая процессу производства. Качество определяется действием многих случайных и субъективных факторов. Для предупреждения влияния этих факторов на качество продукции создается система управления качеством, которая оказывает постоянное воздействие на процесс создания продукта [81, 104, 98]. Согласно стандартам ИСО серии 9000 постоянное повышение качества вырабатываемой продукции возможно лишь с использованием системного подхода к управлению качеством, основу которого составляет управление качеством технологического процесса [80].

Основные процессы системы управления качеством производства закаленного стекла ОАО «Эй Джи СИ Борский стекольный завод» отражены в функциональной *IDEF*0-модели «Управлять качеством» (рисунок 1.7) [102].

Существующая на предприятии система управления качеством позволяет согласовать требования к управлению качеством закаленного стекла, которые формируются на всех стадиях жизненного цикла продукции.

Важная роль в управлении качеством принадлежит техническим условиям на продукцию и стандарту предприятия, в котором определены основные требования к продукции и технологические параметры процесса изготовления закаленного стекла.

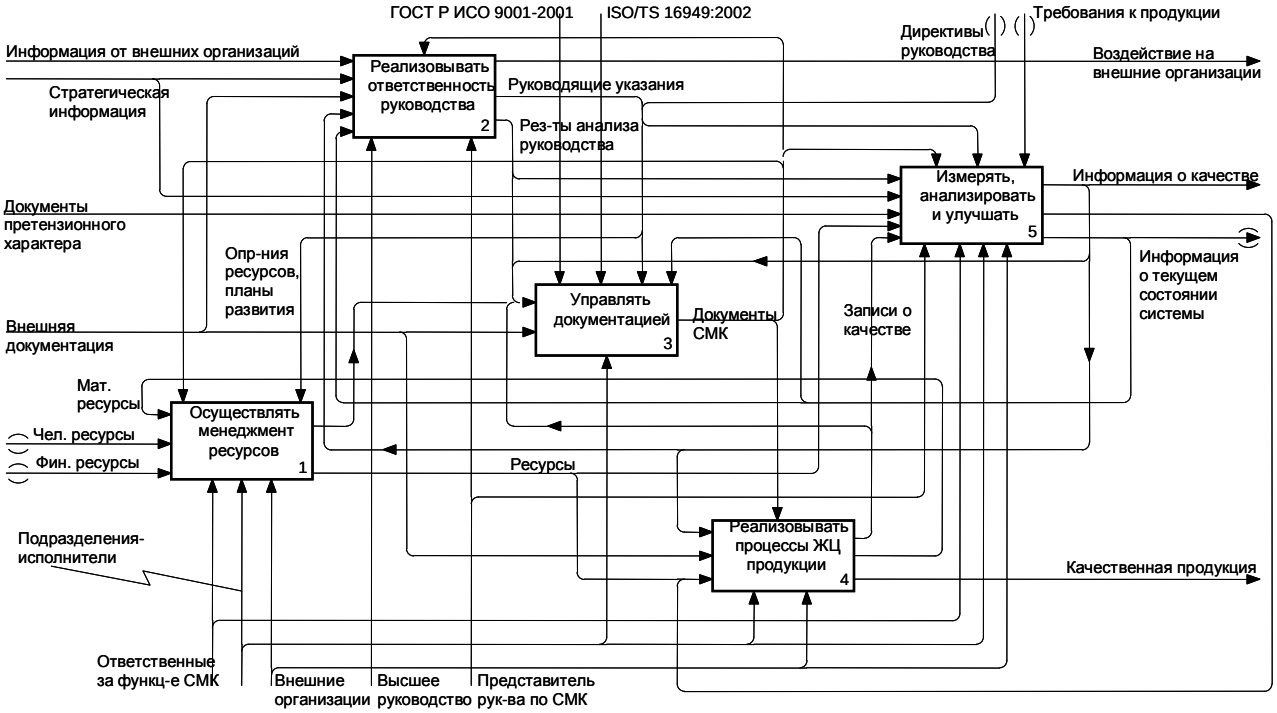


Рисунок 1.7 – Декомпозиция контекстной диаграммы «Управлять качеством»

Средством обнаружения и измерения отклонений изделий от заданных значений является контроль качества продукции. Контроль также служит основным источником информации, используемым для принятия решений о необходимости и степени корректировки системы менеджмента качества продукции. На предприятии используют две группы методов контроля – технический и автоматизированный контроль.

Технический контроль предполагает проверку соответствия продукции или процесса, от которого зависит качество продукции, установленным техническим требованиям. Автоматизированный контроль качества используют для повышение быстродействия и точности измерений, а также для повышения объективности контрольных операций [29, 98].

Общие требования к обеспечению качества для различных предприятий определены стандартами ИСО серии 9000. Автопроизводители стремятся унифицировать требования для своих поставщиков. Стандарт ИСО/ТУ 16949:2009 совместно с *ISO* 9001:2008 устанавливает требования к системе качества при проектировании и разработке, производстве, монтаже и обслуживании продукции автомобилестроения.

На предприятии непрерывно ведутся работы по совершенствованию разработанных систем управления качеством. Заводом получен единый сертификат на соответствие требованиям международных стандартов *ISO* 9001, *ISO* 14001 и *OHSAS* 18001.

1.3 Моделирование технологического процесса производства закаленного стекла

Адекватно отобразить исследуемый технологический процесс производства закаленного стекла и провести идентификацию возможно с помощью моделирования. Разработку математической модели технологического процесса производства начинают с составления формализованного описания процессов, протекающих в объекте моделирования. Математическую модель необходимо рассматривать в совокупности трех ее аспектов: смыслового (формализованное описание), аналитического (математическое описание) и вычислительного (моделирующий алгоритм) [6].

При разработке формализованного описания используется процессный подход, для которого основополагающим принципом является последовательное уточнение и усложнение моделей [40]. Данный подход аналогичен «блочному принципу», предложенному Кафаровым В.В. [6], согласно которому «математическое описание объекта в целом получают как совокупность математических описаний отдельных «элементарных» процессов, протекающих в объекте моделирования».

Для создания формализованного описания технологического процесса производства закаленного автомобильного стекла была использована графическая

нотация *IDEF*0 методологии структурного анализа и проектирования (*SADT*), отличительными особенностями которой являются наглядность, простота понимания моделей и обеспеченность инструментальными средствами (например, *AllFusion Process Modeler*) [11, 19, 30, 88]. Согласно данной методологии, формализованное описание производства безопасного закаленного стекла для автомобильного транспорта представляет набор диаграмм, имеющих иерархическую структуру. Вся иерархия *idef0*-диаграмм является моделью технологического процесса, поскольку представляет собой отображение (образ) процесса и его компонентов [19]. Согласно классификации Волковой В.Н. и Темникова Ф.Е. [12] нотация *IDEF0* является графическим методом формализованного представления систем, а *idef0*-диаграммы относятся к следующим подвидам математических моделей: по степени абстрагирования – формализованные, по форме представления (по методу моделирования) – графические, по способу реализации – компьютерные.

IDEF0-модель бизнес-процесса «Производить безопасное закаленное стекло для наземного транспорта» (рисунок 1.8) представляет собой иерархию диаграмм, которая развивается в процессе структурной декомпозиции. Контекстная диаграмма верхнего уровня, содержащая всегда один блок, декомпозируется на 4 блока: резать и обрабатывать стекло, закалять стекло, упаковать готовую продукцию и управлять несоответствующей продукцией (рисунок 1.9). В дальнейшем каждый блок диаграммы рассматривается как отдельный процесс и декомпозируется [55, 107, 127].

Помимо набора диаграмм разработанное формализованное описание технологического процесса содержит глоссарий, который определяет взаимосвязи процессов с исполнителями и объектами.

В горизонтальном положении стекло передается в позицию маркировки (рисунок 1.9, блок 1). После маркировки стекла загружают и базируют для последующей подачи в туннельную четырехкамерную печь, где они начинают разогреваться (рисунок 1.9, блок 2), перемещаясь на керамических валах.

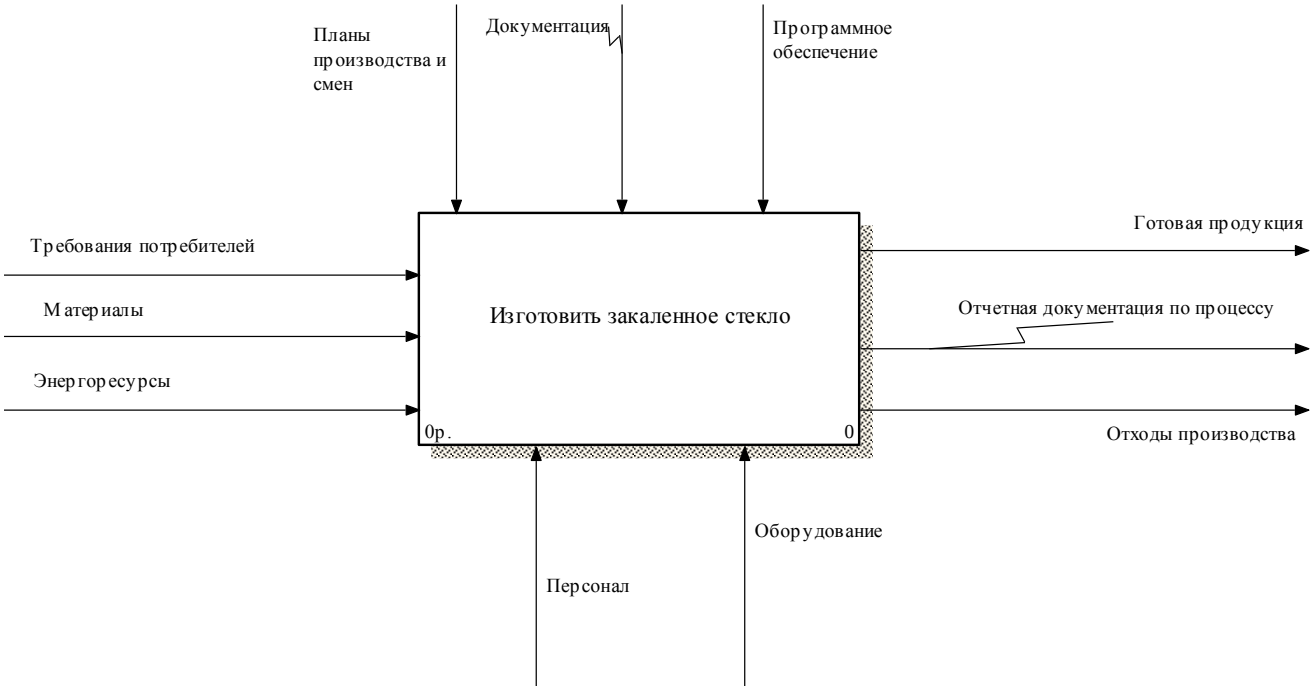


Рисунок 1.8 – Контекстная диаграмма технологического процесса «Производить закаленное стекло»

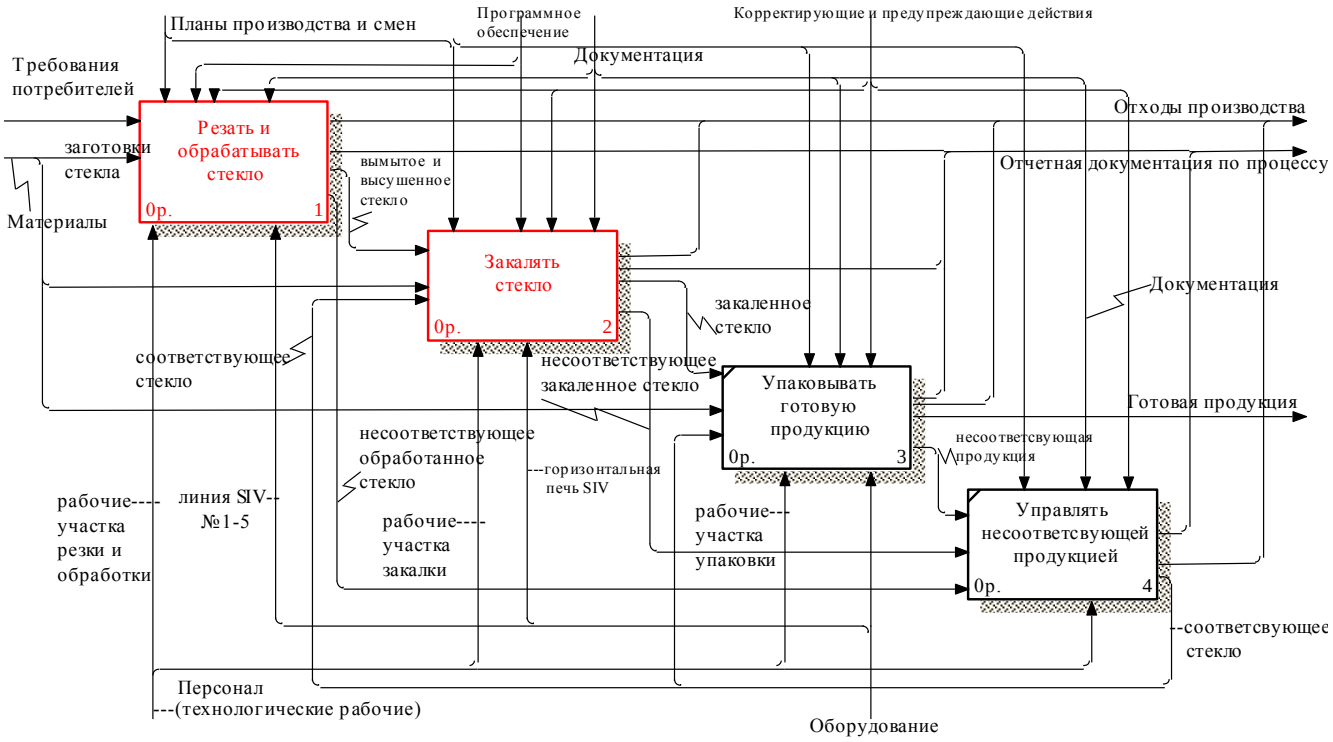


Рисунок 1.9 – Декомпозиция контекстной диаграммы технологического процесса производства закаленного стекла

Технологический режим нагрева заготовок стекла контролируется с помощью 32–х термопар, установленных в камерах печи. Каждая камера состоит

их двух зон. В каждой зоне измеряется температура с помощью 4–х термопар, установленных по ширине печи. Как только стекла разогрелись до нужной температуры размягчения (около 630 °С), они прессуются для придания стеклу заданной формы.

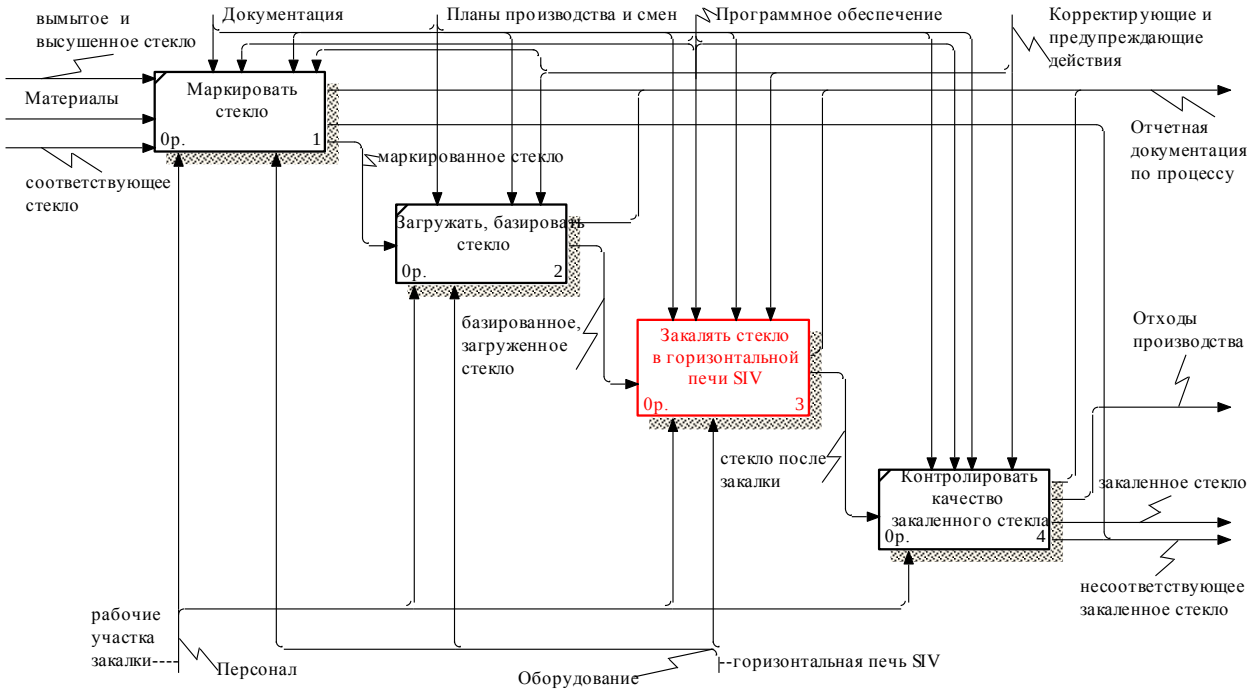


Рисунок 1.10 − Декомпозиция блока «Закалять стекло» технологического процесса производства закаленного стекла

На выходе из пресса устанавливается малая обдувочная решетка, которая способствует фиксированию формы стекла, без снижения качества последующей закалки. Далее изделия передаются в секцию закалки и охлаждения. Закалка стекла, происходит в камере закалки, где обе поверхности стекла, разогретые до нужной температуры, быстро обдуваются потоком воздуха. Благодаря тому, что поверхность стекла охлаждается и затвердевает моментально, а внутренний слой остается какое-то время еще мягким создается определенная картина распределения напряжений: на поверхности сжимающие напряжения, а внутри – растягивающие напряжения. Далее уже готовое изделие проходит участок контроля (рисунок 1.10, блок 4) и укладывается в тару.

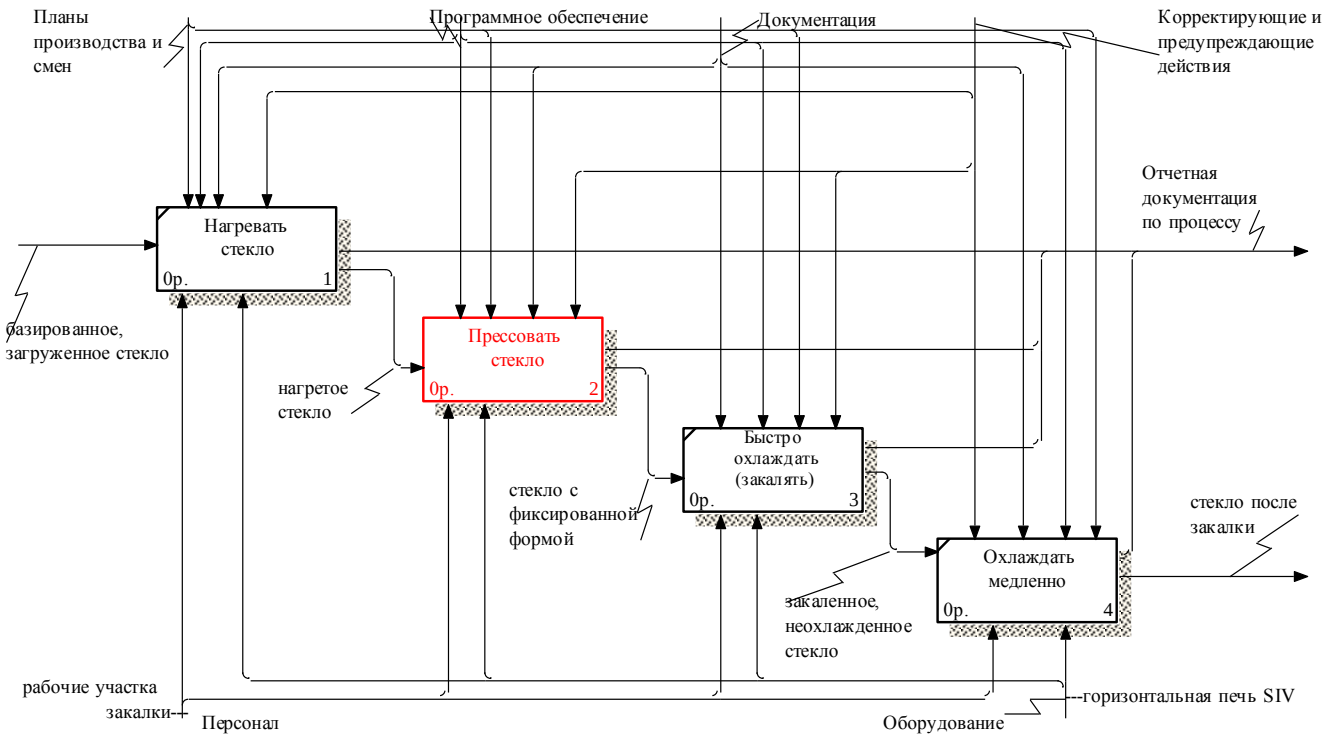


Рисунок 1.11 − Декомпозиция блока «Закалять стекло в горизонтальной печи SIV» технологического процесса производства закаленного стекла

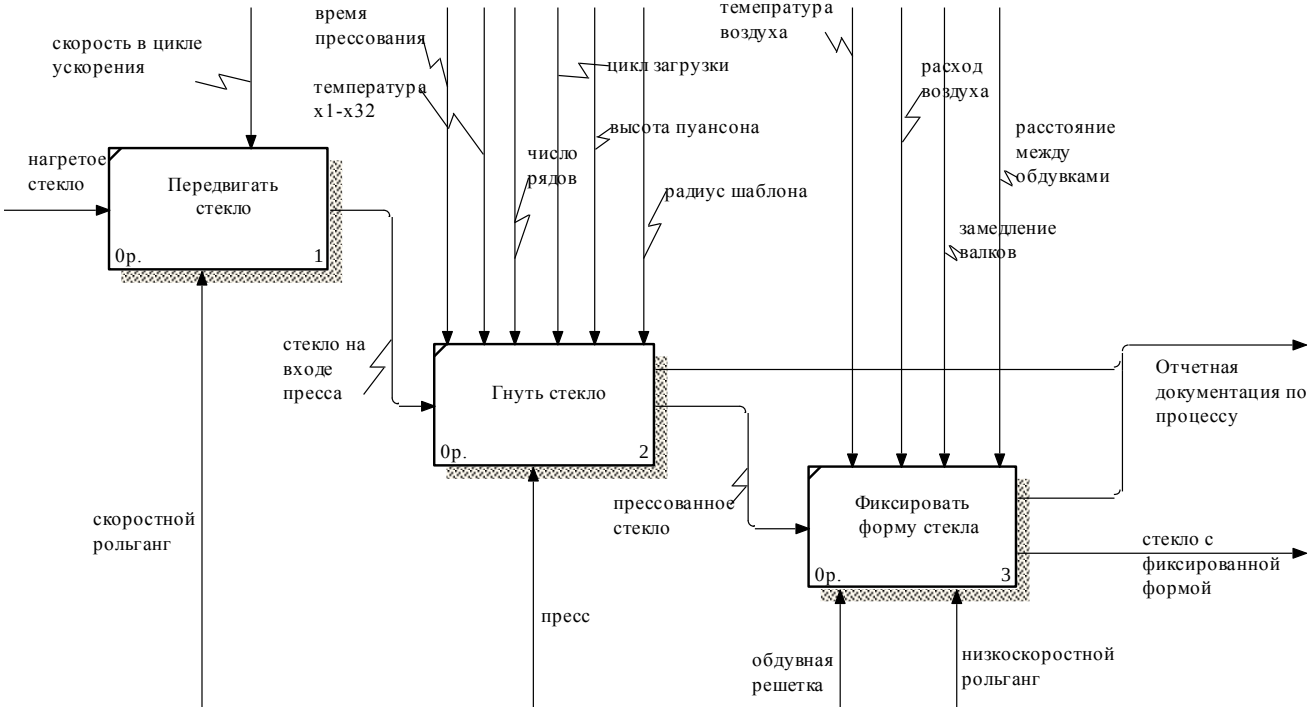


Рисунок 1.12 − Декомпозиция блока «Прессовать стекло»

Разработанное формализованное описание технологического процесса производства безопасного закаленного стекла для наземного транспорта [55, 127]

в дальнейшем использовалось для анализа влияния каждого участка технологического процесса на качество продукции; оценки эффективности методов контроля качества заготовок стекла, отдельных технологических операций и готовой продукции.

1.4 Выделение ключевых характеристик в производстве закаленного стекла

По отношению к процессному подходу понятие «идентификация» рассматривается как создание модели процесса и ее использование для нахождения оптимальных параметров процесса [82, 104]. Для идентификации технологического процесса производства закаленного стекла были определены:

- входные и выходные параметры процесса;
- режимные переменные,
- расход материалов;
- критерии качества выполнения процесса.

В результате анализа формализованного описания технологического процесса производства закаленного стекла можно определить ключевые характеристики [51, 102], которые подлежат особому контролю в производстве (таблица 1.2). Выделяют ключевые характеристики продукции, компонентов, процессов, режимов и условий. Существует две группы ключевых показателей: критические (*CC - Critical Characteristic*) и значительные (*SC - Significant Characteristic*) [82, 98].

При производстве безопасного закаленного автомобильного стекла (гнутого, плоского) важнейшими характеристиками являются требования по безопасности (ГОСТ 32565–2013 «Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия» [17]). Качество закаленного стекла во многом зависит от качества компонентов производства (заготовки полированного стекла) и режимов протекания технологических процессов производства. Соблюдение требуемых режимов и условий технологического процесса возможно лишь при точной настройке и исправной работе оборудования, а также высокой квалификации производственного персонала.

Таблица 1.2 − Ключевые показатели производства закаленного стекла

Категория ключевых характеристик	Наименование ключевых показателей
Ключевые показатели изделия	*критические показатели:* выдерживание удара шаром, стойкость к пробиванию шаром, механическая прочность, характер разрушения (тест на фрагментацию) *значительные показатели:* размеры, сколы, неприлегание, светопропускание, оптические искажения, смещение проектируемой линии, смещение вторичного изображения, оптические искажения в проходящем и вторичном свете
Ключевые показатели компонентов	*критические показатели:* заготовки полированного стекла по СТП 006-2003 и ГОСТ 111-2001 *значительные показатели:* нанесение черного канта на стекло
Ключевые технологические процессы	*критические технологические процессы:* Базирование стекла, нагрев, прессование, закалка, охлаждение *значительные технологические процессы:* резка, обработка, мойка, сушка заготовок, маркировка, подработка поправимых дефектов, упаковка
Ключевые режимы и условия технологического процесса	*критические режимы:* технологические режимы горизонтальной установки для нагрева, прессования и закалки стекла (режимы электрической печи, пресса, обдувочной камеры) *значительные режимы:* режимы линии резки стекла, режимы моечно-сушильной машины (чистота и температура воды в моечных машинах), отслеживание качественной обработки кромок стекла (отслеживание качественной репрофиляции кругов для обработки)

Определенные ключевые характеристики технологического процесса закалки являются наиболее критичными с точки зрения качества стекла (таблица 1.3) [52]. Для обеспечения необходимого уровня показателей качества закаленного автостекла необходимо контролировать и поддерживать выделенные ключевые характеристики на протяжении всего процесса производства (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Ключевые характеристики технологического процесса закалки стекол

Ключевые этапы и оборудование, определяющие эффективность технологического процесса закалки	Наиболее критичные, с точки зрения качества, показатели	Статистические инструменты контроля качества.
Маркировать стекло. Линия закалки стекла.	Качество маркировки (положение, равномерность нанесения)	Выборочный контроль.
Загружать, базировать стекло. Загрузочное устройство линии закалки стекла.	Расположение стекла, настройка упоров.	Сплошной контроль.
Закалять стекло в горизонтальной печи. Горизонтальная печь (скоростной рольганг, пресс, обдувные решетки, низкоскоростной рольганг), напоромер мембранный.	Скорость движения скоростного рольганга, температура нагревателей в печи по зонам, температура стекла на выходе из печи/входе пресса, качество обработки транспортирующих валов, время прессования, температура прессования, число рядов, высота пуансона, радиус шаблона; температура воздуха, расход воздуха, давление воздуха, расстояние между обдувками.	Сплошной контроль скорости в цикле ускорения, температуры нагревателей, давления воздуха. Сплошной контроль по расходу/давлению воздуха, по температуре стекла на выходе из секции охлаждения.
Контролировать качество закаленного стекла.	Форма, размеры, показатели внешнего вида, качество обработки кромок.	Сплошной визуальный контроль.
Контрольный шаблон для проверки форм и размеров, линейка измерительная, щуп.		
Испытательные установки на механическую прочность, характер разрушения, светопропускание.	Механическая прочность, характер разрушений. Светопропускание.	Выборочный контроль. Периодический контроль.

Свойства и характеристики стекла оцениваются измерениям, проводимым вручную. Управление режимом работы технологического оборудования ведется вручную. Стабилизация заданных режимов выполняется средствами локальной автоматики. Ручные приемы управления основаны на практике ведения технологического процесса и опыте работы технологического персонала. Все эти особенности производства закаленного стекла усложняют решение задачи автоматизации управления этим процессом. Проблема автоматизации производства закаленного стекла является комплексной. Она требует совместного рассмотрения и решения вопросов теории систем управления, математического моделирования, планирования экспериментов, учета особенностей технологии производства стекла и практических приемов управления.

Выводы по 1-й главе

1. Изучены особенности технологического процесса производства закаленных автомобильных стекол, как объекта управления. Показана многостадийность процесса и их взаимозависимость. Существенное влияние на качество изделий оказывает стадия (процесс) закалки. Разработана структурная схема процесса закалки, как объекта управления. Определены режимные переменные и показатели качества вырабатываемой продукции.

2. Определены показатели назначения вырабатываемого закаленного стекла. Уточнены производственные и потребительские показатели качества гнутых закаленных стекол. Качество вырабатываемых стекол обеспечивается системами управления качеством, удовлетворяющими требованиям стандартов ИСО/ТУ 16949:2009 и *ISO* 9001:2008.

3. Приведено формализованное описание технологического процесса производства закаленного стекла с использованием методологии *IDEF*0. Модель технологического процесса представлена иерархически организованной совокупностью диаграмм. Показано место процесса закалки в общей технологической схеме производства закаленных стекол и взаимосвязь ее с остальными стадиями технологического процесса.

4. Выделены ключевые характеристики в производстве закаленного безопасного стекла. Определены наиболее критичные, с точки зрения качества, показатели процессов и определены инструменты, используемые при контроле качества. Закалка является основной критической стадией процесса выработки закаленных стекол, определяющая геометрию и параметры готовых стекол, что и определило объект исследований диссертационной работы. Предметом исследования явились математические модели, и алгоритм управления технологическим процессом закали стекла.

Глава 2 Оценка качества технологической системы и технологических процессов производства закаленного стекла

Задача повышения эффективности и качества производства закаленного стекла требует системного подхода к изучению технологических процессов и выбору управляющих воздействий. Технологический процесс производства закаленного автостекла обеспечивает собственная технологическая система, которая имеет свою структуру и обладает определенными свойствами. Основной задачей рассматриваемой системы является обеспечение выпуска закаленного стекла с заданными показателями качества и ритма при сохранении заданных условий производства. При этом под качеством следует понимать степень соответствия присущих продукции характеристик определенным требованиям, которые установлены в нормативной документации [81].

Оценку качества технологической системы (ТС) ведут по параметрам ее производительности, затрачиваемым ресурсам и по качеству изготавливаемой продукции [15]. Технологическую систему считают надежной, если она обеспечивает выполнение производственного задания по показателям качества изготавливаемой продукции и по производительности [98].

Для получения требуемого качества изделий из закаленного стекла необходимо влиять на сам процесс производства продукции, т.е. влиять на процесс преобразования входных данных на выходные (рисунок 2.1). Это достигается соответствующим контролем и управлением всеми процессами преобразования. Измеряются параметры качества, как самих процессов, так и преобразуемой на них продукции. Результаты измерений сравниваются с требованиями, которые указаны в стандарте предприятия на изготовление гнутых и плоских закаленных безопасных автомобильных стекол. Контроль

правильности и точности исполнения технологии процесса осуществляется на всем протяжении от входа до выхода [29,98].

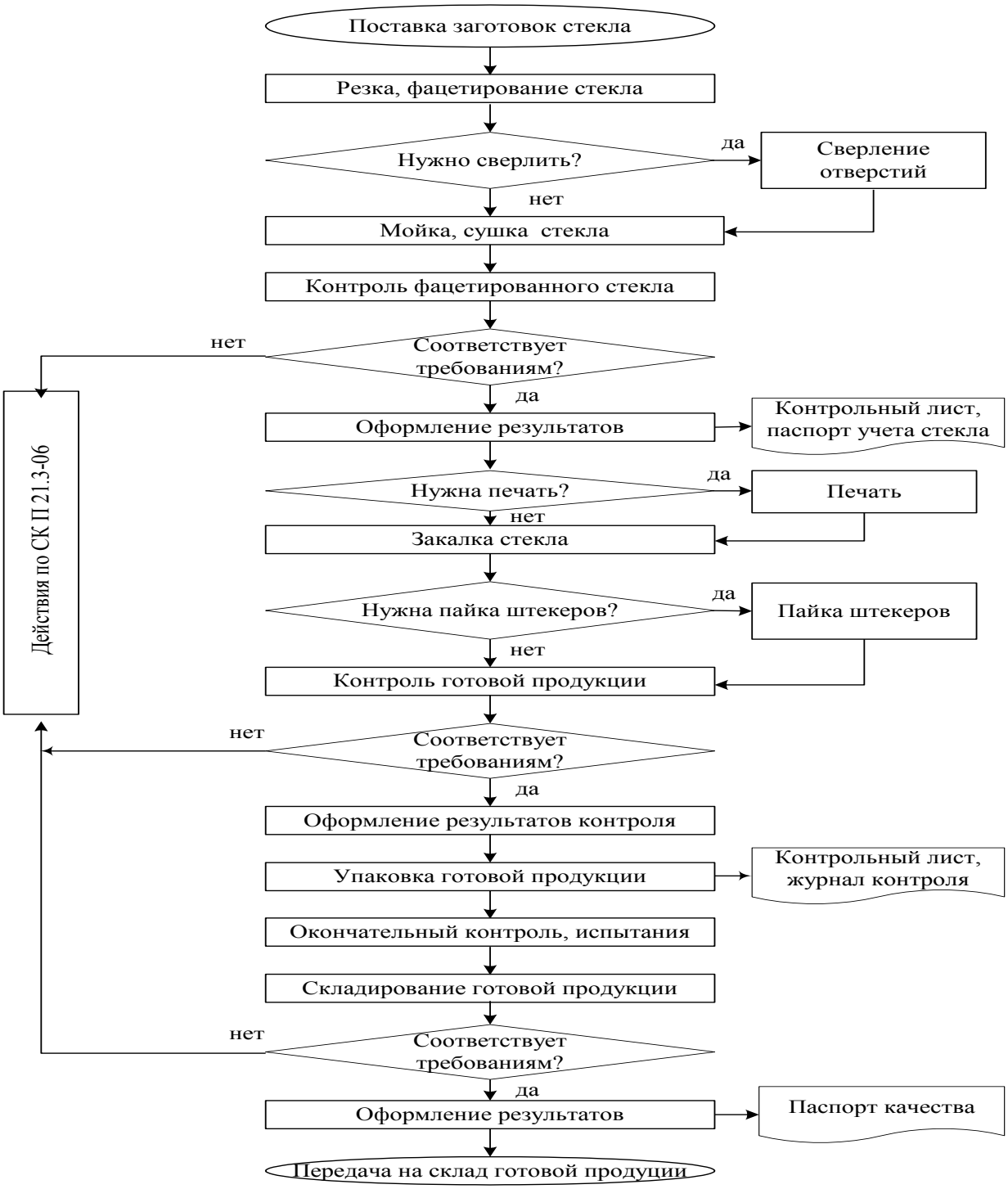


Рисунок 2.1 – Блок-схема технологического процесса изготовления закаленного стекла

Предусматривается сплошной самоконтроль процесса его исполнителем, выборочный – контролёрами, а также систематический аудит процесса в целом. По результатам контроля и в случае обнаружения несоответствий вырабатывается

корректирующее действие. В качестве инструментов для выработки решений могут использовать статистические и др. методы

На производстве «Закаленное стекло» функционирует автоматизированная система мониторинга *GP* 2000. Вся информация о протекающем процессе собирается и сохраняется в базе данных системы. Анализ собранной информации позволяет оценивать технологическую систему производства закаленного стекла, тенденции изменений и принимать корректирующие действия по поддержанию высокого качества изготавливаемой продукции.

2.1 Оценка технологической системы производства закаленного стекла

Одним из организационно-технических принципов управления технологическими системами (ТС) является *принцип обеспечения надежности ТС*. Данный принцип устанавливает необходимость оценки ТС по параметрам качества изготовляемой продукции при разработке и внедрении мероприятий по совершенствованию действующих технологических процессов в части повышения их надежности и качества продукции [81].

Согласно ГОСТ 27.202-83. «Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции» для оценки показателей ТС по параметрам качества производимого закаленного стекла могут быть использованы расчетные, опытно-статистические и экспертные методы. Оценку ТС производства закаленного стекла целесообразно проводить по [15]:

- параметрам качества продукции;
- параметрам производительности;
- параметрам затрачиваемых ресурсов.

К данным группам параметров относятся следующие показатели, значения которых фиксируются в автоматизированной системе мониторинга производства закаленного стекла:

- объем производства (выработка закаленного стекла);
- процент выхода продукции по качественному и пропущенному стеклу *(Yield)*;

- ритмичность производства *(Cadence)*;
- коэффициент использования оборудования *(CU)*;
- коэффициент годной упакованной продукции *(Netpacked)*;
- уровень дефектности *(PPM);*
- время выполнения заказа;
- время переналадки оборудования;
- производительность оборудования;
- размер незавершенного производства;
- технологические параметры работы оборудования и др.

Надежность технологического процесса производства закаленного стекла является комплексной характеристикой, единичными показателями которой служат выход годного стекла *Yield*, ритмичность *Cadence*, коэффициент использования оборудования *CU* и др.

При оценке ТС производства закаленного стекла по производительности за объем изготовленной продукции принимается только годная продукция. Выработка стекла по месяцам отображена на рисунке 2.2, в котором прослеживается временной тренд. Анализируемый параметр ТС характеризуется следующими показателями:

- среднее значение 544676,8 шт/месяц;
- стандартное отклонение 86600 шт/месяц;
- коэффициент вариации 15,9%.

Результаты выполненной оценки свидетельствуют о недостаточной стабильности и точности рассматриваемого процесса, что совпадает с результатами оценки ТС производства закаленного стекла по производительности, полученными ранее Макаровым Р.И. и Суворовым Е.В [26, 29, 98, 103].

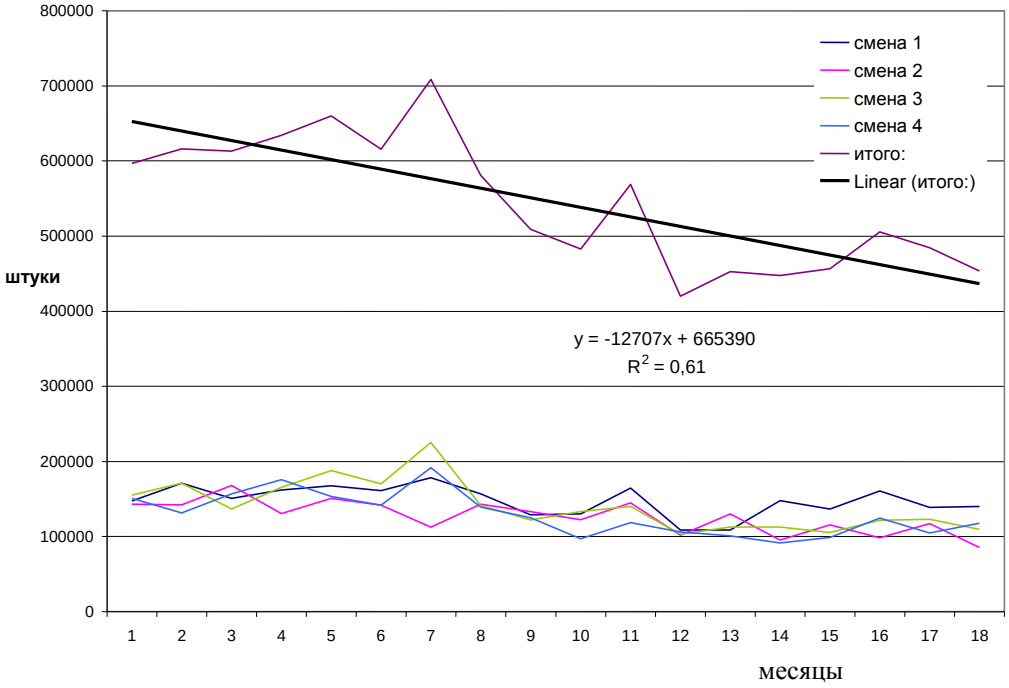


Рисунок 2.2 − График выработки закаленного стекла на горизонтальной печи

Упорядоченные во времени данные выработки закаленного стекла аппроксимируются временным рядом, порождаемым аддитивным случайным процессом:

$$Y_t = T_t + S_t + e_t\,, \tag{2.1}$$

где T_t – трендовая компонента; характеризующая тенденцию изменения показателя во времени; S_t – сезонная (циклическая) компонента, вызываемая периодическими воздействиями; e_t – случайная компонента; t – дискретность наблюдения во времени, $t = 1,2, \ldots,18$.

Для построения модели (2.1) необходимо получить оценки каждой компоненты. Для выделения компонент использовали процедуру фильтрации [23, 26]. В рассматриваемом случае временной тренд аппроксимируется линейным уравнением

$$T_t = -12707t + 665390. \tag{2.2}$$

Для выделения сезонной компоненты (со случайной составляющей) необходимо вычесть из исходного ряда выделенный тренд:

$$Y_t - T_t = S_t + e_t\,. \qquad (2.3)$$

Выделенная сезонная компонента аппроксимируется синусоидальной кривой с периодичностью 12 месяцев:

$$S_t = 50000\sin((2\pi/12)t + 2\pi\cdot 2{,}85/4). \qquad (2.4)$$

Рисунок 2.3 − Выделение гармонической и случайной компонент временного ряда выработки закалённого стекла

Амплитуда синусоиды и фазовый сдвиг подбирались средствами пакета *Matlab* [77]. В ходе оценки случайной компоненты e_t определены следующие значения параметров:

− среднее значение -226,3 шт/месяц (статистически незначимо при уровне значимости 0,05);

− дисперсия 1,37 10^9 (шт/месяц)^2.

Анализ случайной компоненты выполняется для определения правильности выделения трендовой (T_t) и сезонной компонент (S_t).

Проведенный анализ подтвердил выполняемость всех четырех свойств, что подтверждает адекватность разработанной модели (2.5):

$$Y_t = -12707t + 665390 + 50000\sin((2\pi/12)t + 2\pi\cdot 2{,}85/4) + e_t \qquad (2.5)$$

− случайность колебаний, определяемая по точкам перегиба, $p = 11 > p_к = 9$;

− соответствие распределения нормальному закону распределения, определяемое по *R/S* критерию (*R/S*=3,69 что находится в области критических границ для уровня значимости 0,05, равной *R/S* = 3,3 – 4,21);

− равенство математического ожидания нулю, определяемое с помощью *t* - критерия Стьюдента ($t_p = 0{,}48 \leq t_{кр} = 2{,}1$ (для уровня значимости 0,05));

− независимость значений уровней случайной последовательности (*d*-критерий Дарбина – Уотсона: $dw = 1{,}4 > d_2 = 1{,}39$ (для уровня значимости 0,05 имеем d_1=1,16; d_2=1,39)).

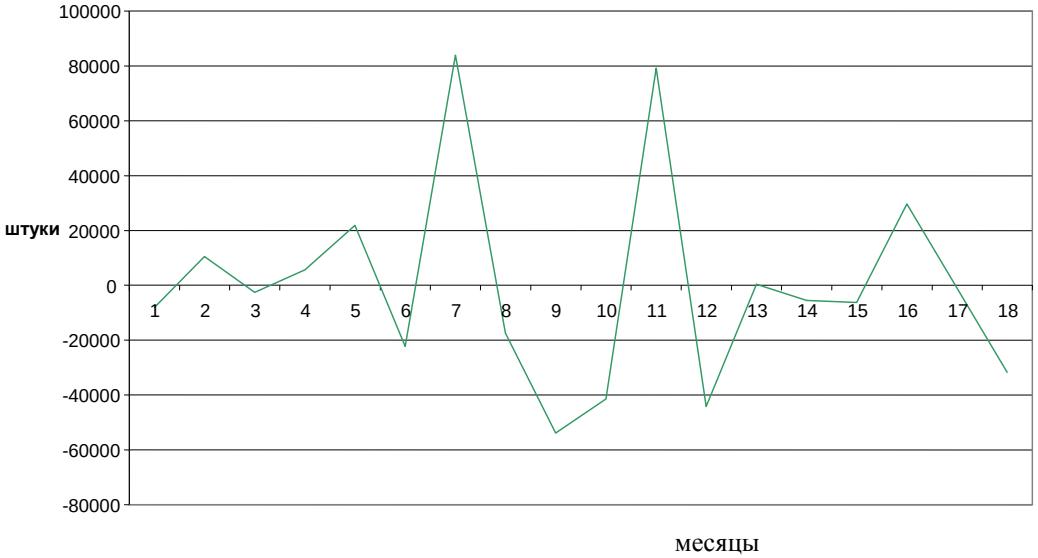


Рисунок 2.4 − Случайная компонента временного ряда выработки закаленного стекла

Выполненная оценка временного ряда подтвердила нестабильность выработки стекла в рассматриваемом временном интервале. Среднее абсолютное уменьшение выработки закаленного стекла в течение месяца составляет $\Delta y_{ср}$ = 12707 шт. Относительная скорость уменьшения выработки стекла равна 2,83% в месяц. Выделенная сезонная компонента показывает увеличение выработки в зимние месяцы (декабрь-январь) и сокращение в летние месяцы (июнь-июль) примерно на 50 000 штук в месяц. Сезонные колебания обусловлены производимой номенклатурой стекол (в зимние месяцы производят малогабаритные стекла, а крупногабаритные – в летние месяцы). Кроме того, свое

влияние оказывает колебание температуры воздуха, используемого для охлаждения стекла в процессе закалки.

Ритмичность производства (*Cadence)* описывает установленный порядок производственного процесса закалки во времени. Динамика изменения ритмичности производства закаленного стекла в течение 18 месяцев приведена на рисунке 2.5.

Упорядоченная во времени последовательность значений ритмичности производства закаленного стекла аппроксимируется временным рядом, порождаемым аддитивным случайным процессом.

Рассматриваемый временной ряд можно представить как сумму трех компонент: тренд, гармоническая составляющая и случайная компонента. Временной тренд аппроксимируется полиномом третьего порядка:

$$T_t = 0{,}2t^3 - 5{,}02t^2 + 23{,}9t + 1160{,}6\ . \qquad (2.6)$$

Сезонная компонента (2.7) данной модели (рисунок 2.6) отражает колебания ритмичности производства каждые полгода – повышение ритмичности производства (март-апрель и сентябрь-октябрь), а также снижение в летние месяцы (июнь-июль) и в зимние (декабрь-январь) на величину, примерно равную 24 шт/час, что может быть обусловлено периодом отпусков и продолжительными зимними каникулами [47, 54].

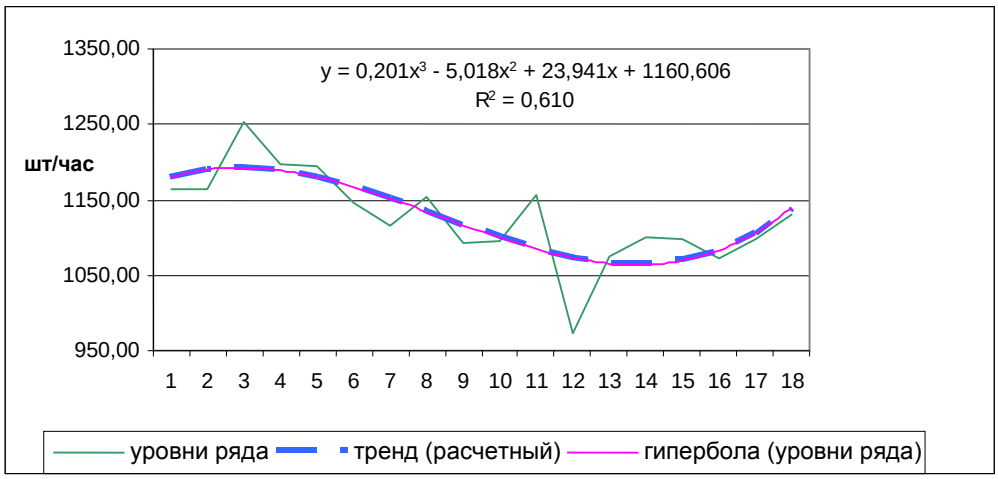


Рисунок 2.5 − График ритмичности производства закаленного стекла

$$S_t = 24{,}19sin(1{,}148t+3{,}48)+e(t). \quad (2.7)$$

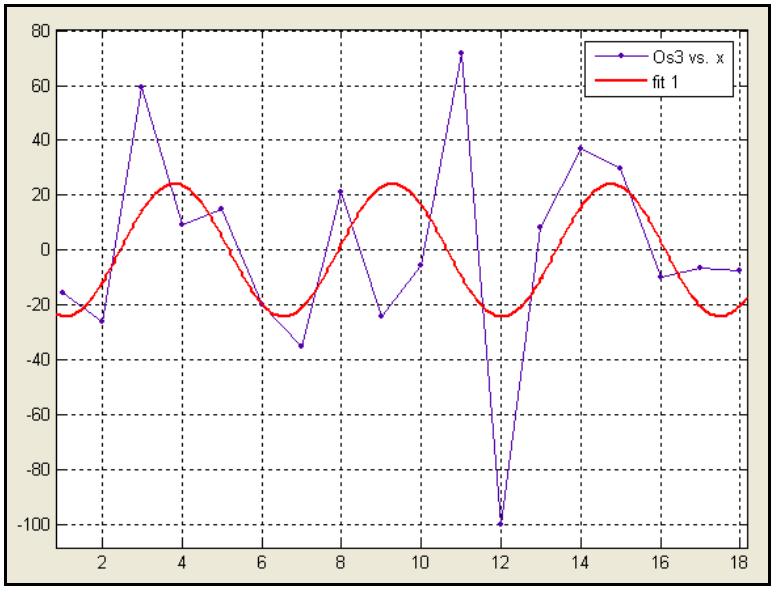


Рисунок 2.6 – Выделение сезонной компоненты ритмичности производства

После подстановки компонент модель ритмичности производства закаленного стекла принимает вид:

$$Y_{cadence}(t) = 0{,}2t^3-5{,}02t^2+23{,}9t+1160{,}6+24{,}19sin(1{,}148t+3{,}48)+e(t). \quad (2.8)$$

Модель временного ряда ритмичности производства является адекватной, что подтверждено анализом остаточной компоненты [85, 103].

Одним из показателей надежности технологического процесса является его безотказность. Под безотказностью технологического процесса понимают свойство процесса непрерывно функционировать в течение заданного времени при условии производства определенного количества продукции [81]. Коэффициент использования технической системы характеризует временную эффективность технологического процесса:

$$CU = (T_f / T_p), \quad (2.9)$$

где T_f – длительность технологического процесса (фактическое время работы), час.; T_p – плановое время работы, час.

Коэффициент использования различного оборудования (стекольных автоматов, моечной машины, печи) оценивается в каждой рабочей смене. На рисунке 2.7 приведен график коэффициента использования машин *CU* технологического процесса выработки закаленного стекла за период равный 18 месяцам [47]. Коэффициент использования оборудования линии производства закаленного стекла описывается моделью вида:

$$Y_{CU}(t)=-0{,}0002t^2+0{,}0028t+0{,}85+0{,}013sin(1{,}98t+4{,}49)+e(t). \qquad (2.10)$$

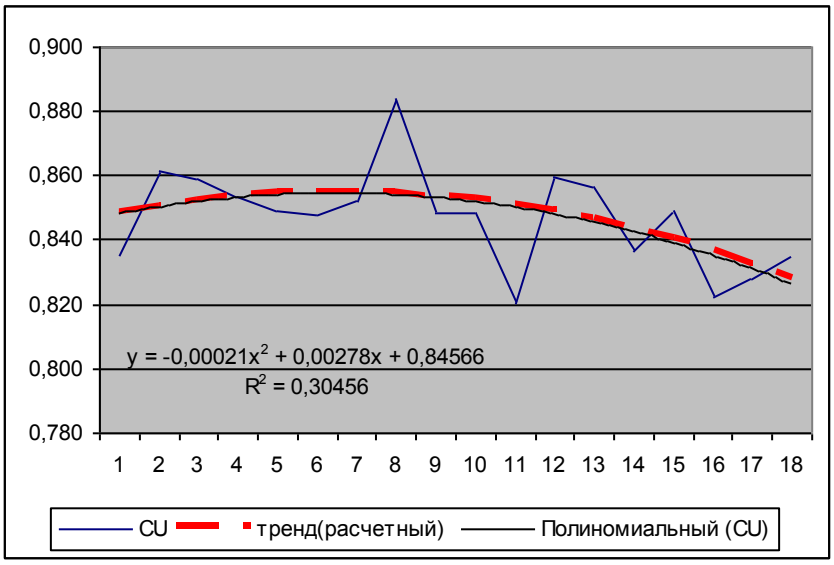


Рисунок 2.7 − График коэффициента использования технологического оборудования

Сезонная компонента (рисунок 2.8) отражает увеличение коэффициента использования оборудования на линии производства закаленного стекла к середине первого квартала и к началу осени (август-сентябрь), а также уменьшение в мае-июне и ноябре-декабре.

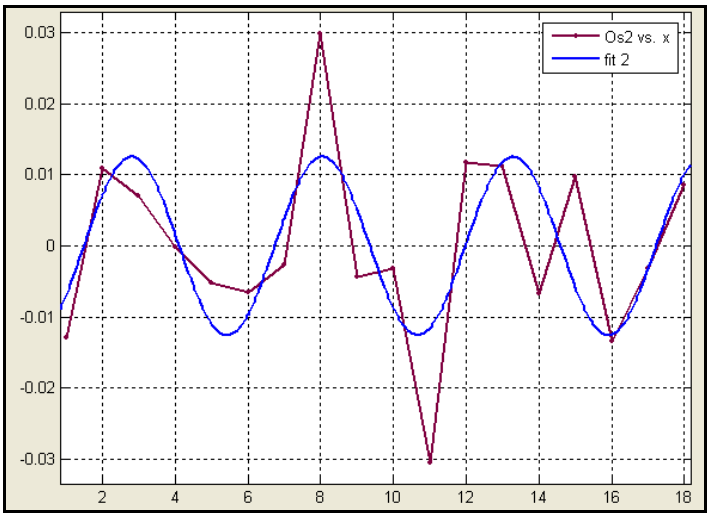


Рисунок 2.8 − Выделение сезонной компоненты модели коэффициента использования оборудования

Причинами колебания значений *CU* могут быть изменение температуры воздуха, используемого для охлаждения стекла в процессе закалки, сезонный характер спроса на выпускаемую продукцию и др.

Обработкой статистических данных технологического процесса производства закаленного стекла была получена модель временного ряда, описывающая коэффициент годной упакованной продукции в пакетах *Netpacked* (рисунок 2.9):

$$Y_{netpacked}(t) = -0{,}9466t^2+10{,}197t+936{,}33+33{,}8sin(2{,}441t-1{,}257)+e(t) \qquad (2.11).$$

Временной ряд содержит тренд и сезонную компоненту. Анализ остатков временного ряда (2.11) подтвердил адекватность разработанной модели [46]. Среднее арифметическое значение выхода стекла составило 93,56% со стандартным отклонением 1,12%. Коэффициент вариации равен 1,2%.

Совместный анализ временных рядов, описывающих ритмичность *Cadence* и выхода продукции *Yield*, показал их взаимную зависимость. Коэффициент корреляции этих показателей равен 0,58, статистически значим при уровне значимости 0,05. Это отражает наличие стохастической связи между выходом годной продукции и ритмичностью производства закаленного стекла.

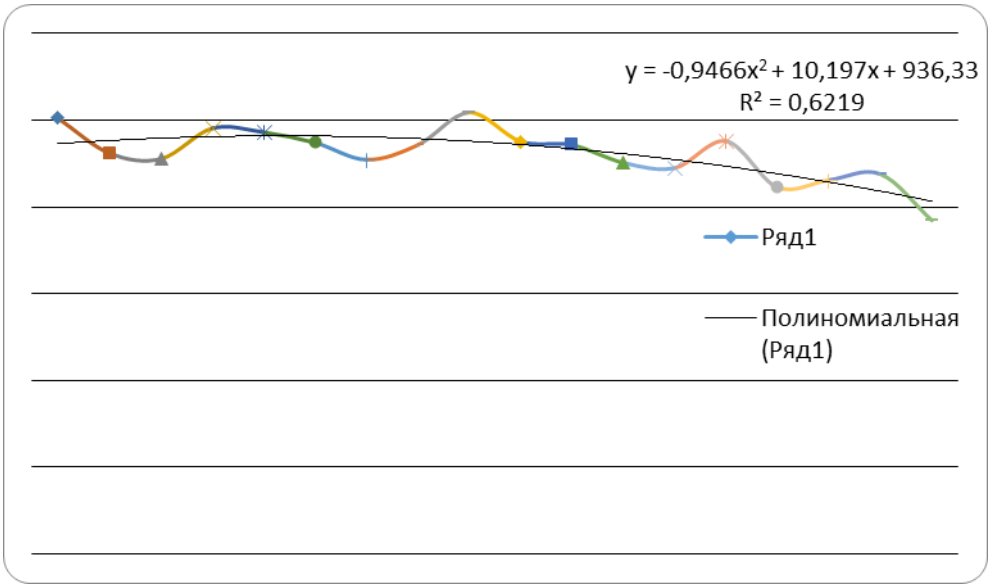


Рисунок 2.9 − Динамика коэффициента годной упакованной продукции в пакетах

Результаты проведенных исследований выявили недостаточную стабильность показателей технологической системы и возможность дальнейшего увеличения выхода годной продукции на действующем производстве.

2.2 Оценка отлаженности технологического процесса закалки по режимным переменным

Важным свойством процесса является его отлаженность. Показателями отлаженности процесса являются стабильность, точность и воспроизводимость технологического процесса. Эти показатели могут оцениваться по статистическим данным режима работы горизонтальной печи, показателям свойств произведенной продукции и уровню дефектности продукции [14, 98, 99].

Технологический процесс закалки автомобильного стекла протекает в горизонтальной печи непрерывного действия (рисунок 1.11). Режим нагрева заготовок из листового стекла контролируется с помощью 32-х термопар, которые установлены в камерах печи. Каждая камера состоит из двух зон. В каждой зоне по ширине печи установлены 4 термопары, с помощью которых измеряется температура. Однако, информативными являются лишь 8 термопар, о чем

свидетельствуют исследования профессора Макарова Р.И. [83, 29]. Применение методов кластерного и множественного корреляционного анализов позволяет существенно понизить размеры системы, описывающей температурный режим нагревания стекла (таблица 2.1). Таким образом, для дальнейшего контроля температурного режима печи достаточно иметь 8 информативных сигналов.

Таблица 2.1 − Информативные импульсы по показаниям термопар

Камера	1	2	3	4
Сводовые термопары	x_2	x_{15}	x_{18}	x_{30}
Подовые термопары	x_4	x_{16}	x_{20}	x_{32}

Скорость перемещения заготовок стекла контролируется в печи, в цикле ускорения и на выходе из печи. Для рассматриваемой печи характерен постоянный цикл загрузки заготовок стекла. Количество потоков (от одного и до четырех) зависит от размера заготовок. Количество потоков вырабатываемого стекла влияет на ритмичность закалки и на выработку закаленных стекол.

На производстве для оценки стабильности технологических процессов чаще всего пользуются традиционными методами контроля, основанными на предположении нормальности закона распределения анализируемых показателей [35, 65, 106, 116, 118, 119]. Отлаженность технологического процесса оценивалась по статистическим данным производства гнутого закаленного стекла по выборке (32 измерения), собранной в течение 9 месяцев. Анализ температурного режима в камерах нагрева печи закалки выполнялся с использованием традиционных методов и показал на их стабильность и высокую точность. Коэффициент вариации температур относительно среднего уровня не превышает 4,3% [29]. Однако плотность вероятностей распределения температуры в контролируемых точках печи отличается от нормального закона распределения – об этом свидетельствуют расчетные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса (таблица 2.2). Для нормального закона распределения эти характеристики должны равняться нулю [103].

Отличие данного распределения от нормального закона не позволяет корректно использовать традиционные методы контроля для оценки точности и стабильности процессов [60, 62, 86, 109].

Таблица 2.2 − Статистические оценки температурного режима камер печи по показаниям информативных термопар

Камера	Термопара	Коэффициент вариации, %	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
1	Сводовая x_2 Подовая x_4	3,8 4,3	-3,78 -4,66	1,54 5,0
2	Сводовая x_{15} Подовая x_{16}	1,8 2,0	-1,79 -1,85	0,32 -0,36
3	Сводовая x_{18} Подовая x_{20}	1,7 2,5	0,3 3,8	-0,44 1,69
4	Сводовая x_{30} Подовая x_{32}	1,8 2,9	-0,41 2,96	-0,37 0,32

Игнорирование этого факта при анализе процессов может привести к ошибочным выводам. Вместо традиционного метода статистического контроля в работе используется оценка отлаженности технологического процесса с использованием метода аксиоматического анализа контроля качества [109]. Аксиоматический анализ контроля процессов лишен недостатков традиционных методов, рассчитанных на анализ нормально распределенных процессов. Для проведения аксиоматического анализа стабильности и точности производственного процесса необходимо минимальное число измерений. Это существенно сокращает расходы времени на анализ, возрастает степень оперативности контроля, что важно для выработки корректирующих действий при управлении производством в режиме реального времени.

Проверим нормальность распределения статистических данных режимных переменных x_i (температуры в камере предварительного нагрева печи закалки) с формулировки гипотезы: статистические данные распределены симметрично.

Проверка этой предпосылки проводится на основе анализа условий трех принципов: порядка, сходства и соответствия. Результаты проверки стабильности всех режимных переменных процесса закалки стекла представлены в таблице 2.3

[45]. Из таблицы видно, что условия трех принципов не выполняются для температур x_2, x_{20} и x_{32}.

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что температурный режим закалки стекла нестабильный. Неоднородность данных температурного режима закалки ограничивает возможность корректного использования традиционных методов контроля, что может привести к ошибочным выводам о стабильности процесса.

Таблица 2.3 – Результаты оценки стабильности температур печи нагрева

Результаты проверки	Температура в камере предварительного нагрева печи закалки							
Обозначение переменой	x_2	x_4	x_{15}	x_{16}	x_{18}	x_{20}	x_{30}	x_{32}
Принцип порядка	+	+	+	+	+	+	+	+
Тип распределения	*D*	*D*	*D*	*D*	*D*	*D*	*D*	*D*
P	0,78	0,79	0,75	0,71	0,66	0,73	0,69	0,66
K_c	0,49	0,66	0,84	0,88	0,87	0,39	0,55	-0,18
Принцип сходства	–	+	+	+	+	–	+	–
$Sk(T_k)$	-2,14	-1,75	-0,90	-1,01	0,06	1,73	-0,42	1,30
Принцип соответствия	+ тип *D*	+ тип *D*	+ тип *D*	+ тип *D*	+ тип *D*	+ тип *D*	+ тип *D*	+ тип *D*

Примечание: «+» − проверяемый принцип выполняется; «–» − проверяемый принцип не выполняется

В то же время выдерживание температурного режима в камерах нагрева печи характеризуется высокой точностью, что подтверждено соответствующими результатами аксиоматического анализа размаха колебаний. Таким образом, представленные результаты оценки стабильности и точности доказывают несоответствие результатов оценки, получаемых с использованием традиционных статистических методов и с помощью аксиоматического анализа.

Стадия прессования технологического процесса закалки (см. рисунок 1.12) характеризуется циклом загрузки, количеством потоков, температурой заготовки стекла на входе пресса, измеряемой пирометром в каждом потоке, временем прессования, радиусом шаблона, замедлением валков, началом цикла левого и правого, интервалом 1 и 2 левым и правым, высотой подъема пуансона 1-го и 2-го, расходом воздуха на верхние и нижние обдувки, а также расстоянием между

обдувками. Процесс быстрого охлаждения контролируется по давлению воздуха, подаваемого в обдувные решетки верхние и нижние.

Оценка отлаженности технологической стадии прессования с применением традиционного подхода к контролю точности и стабильности режимов прессования выявила высокую вариабельность таких параметров прессования, как высота пуансона 1 (34,3%) и интервал левый 1 (26,3%). Данный факт объясняется периодической перенастройкой пресса на выработку стекол других типов. Остальные технологические параметры прессования имеют средний коэффициент вариации, не превышающий величины 6,9% [45].

Таблица 2.4 − Статистические данные режима работы пресса

Параметры	Обозначение	Коэффициент вариации, %	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Температура заготовки стекла по показанию пирометра 1	x_{36}	1,79	2,7	1,8
Замедление валков	x_{38}	6,0	-2,2	2,2
Начало цикла, левый	x_{39}	0,61	4,3	8,1
Интервал левый 1	x_{41}	26,3	-0,1	-1,7
Интервал левый 2	x_{42}	6,3	-1,0	-2,33
Высота пуансона 1	x_{45}	34,3	-1,8	-1,4
Давление воздуха на предварительное охлаждение секла, верх	x_{47}	2,9	-2,2	-1,4
Давление воздуха на предварительное охлаждение стекла, низ	x_{48}	6,9	0,17	-1,8

Результаты проверки стабильности режимов стадии прессования представлены в таблице 2.5 [45]. Из таблицы видно, что принцип порядка выполняется лишь для четырех параметров из 9 исследованных.

Условия трех принципов не выполняются для режимных переменных интервал левый 1, интервал левый 2, высота пуансона 1, предварительное охлаждение (низ), начало цикла (левый). Анализируемая выборка режимов прессования является нерепрезентативной и, следовательно, неоднородной. Использование традиционного подхода к анализу режимов прессования (интервал

левый 2 и предварительное охлаждение (низ)), привело к ложным выводам, определив режимы как стабильные. Нестабильность исследованных режимов может быть обусловлена плохой наладкой оборудования, периодической перенастройкой оборудования на выработку изделий разных типов, заменой операторов, ошибками при ручном ведении процесса и т.д.

Таблица 2.5 – Результаты оценки стабильности режимных переменных стадии прессования

Результаты проверки	Режимные переменные пресса							
	Температура пирометра 1, x_{36}	Замедление валков, x_{38}	Начало цикла, левый, x_{39}	Интервал левый 1, x_{41}	Интервал левый 2, x_{42}	Высота пуансона 1, x_{45}	Предварительное охлаждение, верх, x_{47}	Предварительное охлаждение, низ, x_{48}
Принцип порядка	+	+	+	–	–	–	+	–
Тип распределения	*D*	*D*	*D*	*B*	–	*B*	*D*	*B*
P	0,88	0,90	0,76	0,56	0,56	0,55	0,90	0,44
K_c	0,76	0,74	0,41	-0,45	1	-0,45	0,96	-1,59
Принцип сходства	+	+	–	–	–	–	+	–
Sk	-1,98	-3,33	-2,35	0,12	0,29	-0,68	-1,88	0,11
Принцип соответствия	+ тип *D*	+ тип *D*	+ тип *D*	– тип С	– тип *C*	– тип *C*	+ тип *D*	– тип *D*

Примечание: «+» − проверяемый принцип выполняется; «–» − проверяемый принцип не выполняется

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что в целом режим прессования стекла нестабильный. Использование традиционных методов контроля для анализа стабильности и точности процессов может привести к недостоверным результатам, что согласуется с ранее полученными выводами других авторов [60, 59, 62, 64, 66, 109].

2.3 Оценка отлаженности и настроенности технологического процесса закалки по показателям качества готовой продукции и уровню дефектности

Стабильность и точность технологического процесса во многом, но не полностью, определяют показатели качества производимого закаленного стекла. Поскольку на качество могут влиять и другие факторы, необходимо дополнительно оценивать отлаженность и настроенность технологического процесса закалки по показателям качества произведенной продукции и уровню дефектности [98].

ГОСТ на безопасное стекло для наземного транспорта [17] и технические условия на закаленные автомобильные стекла определяют требования к качеству изделий, которые можно классифицировать на критические и значительные показатели [81].

К критическим показателям относятся механическая прочность изделий, выдерживание удара стального шара, и требования на характер разрушения, регламентируется число образовавшихся осколков при испытаниях и их размеры (испытания на фрагментацию). Значительными показателями являются отклонение гнутых изделий от заданной формы (неприлегание по сторонам, отклонение образующей цилиндра), сколы, светопропускание, оптические искажения, смещение вторичного изображения (таблица 1.1). Каждый вид дефекта имеет идентификатор. Результаты анализа вида дефектов, встречающихся в выработанных закалённых стеклах, представлены на рисунке 2.10 [29]. Различают 10 видов дефектов: неприлегание, бой, дефекты, вызванные наладкой при переходах на выработку другой продукции, царапины, заколы, брак, вызываемый хранением на стеллажах, дефекты черного канта, посечки, осыпь (мелкие заколы) [98].

Дефекты, обнаруженные в процессе контроля, оперативно регистрируются информационной системой. В таблице 2.7 приведены сравнительные данные дефектов закаленного стекла, обнаруженные на протяжении двух месяцев. Дефектами процесса закалки являются неприлегание, бой и потери в процессе

наладки при переходах на выработку стекол других типов. Наиболее часто встречаются дефекты вида неприлегание стекла и царапины. Количество бракованных изделий по этим дефектам достигает двух процентов. Дефекты вида бой, потери при переналадках, дефекты черного канта не превышают одного процента (см. рисунок 2.10).

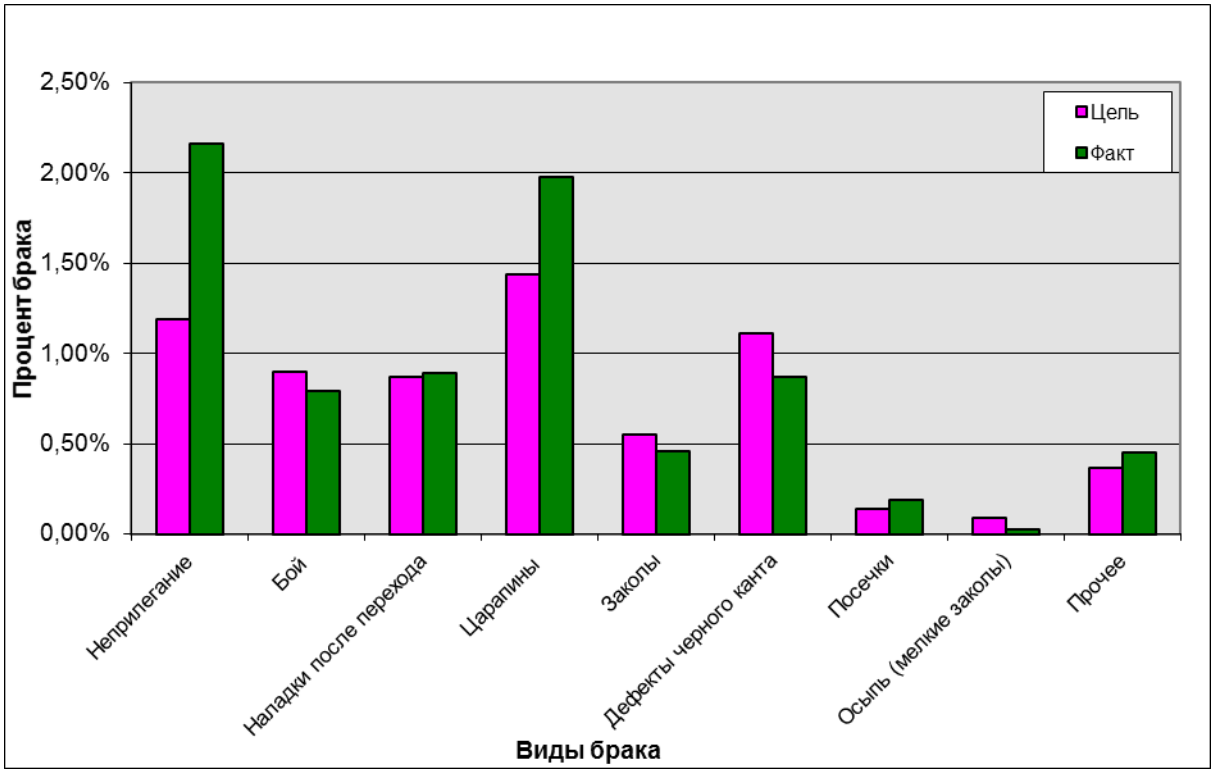


Рисунок 2.10 – Диаграмма Парето дефектов закаленного стекла

Таблица 2.6 − Дефекты, обнаруженные в процессе выработки закаленного стекла на горизонтальной печи за 1 месяца, в процентах, в сравнении с целевым показателем по браку

Парето	Неприлегание	Бой	Наладка после перехода	Царапины	Заколы	Дефекты черного канта	Посечки	Осыпь (мелкие заколы)	Прочее
Цель	1,19	0,90	0,87	1,44	0,55	1,11	0,14	0,09	0,37
Факт	2,16	0,79	0,89	1,98	0,46	0,87	0,19	0,03	0,45

На рисунке 2.11 отображен график изменения уровня дефектности изготовленной продукции участка закалки производства «Закаленное стекло» за 18 месяцев. Исследуется показатель *PPM (Parts Per Million)* – количество дефектных образцов по отношению к миллиону изготовленных. При расчете принимается во внимание не количество дефектов, а количество изделий, содержащих хотя бы один дефект. Каждое дефектное изделие может содержать различное количество дефектов.

Упорядоченная во времени последовательность дефектности закаленного стекла (рисунок 2.11) хорошо аппроксимируется временным рядом, порождаемым аддитивным случайным процессом (2.12). Для выделения компонент воспользуемся процедурой фильтрации с использованием регрессионного анализа. Трендовая составляющая T аппроксимируется полиномом второй степени:

$$T_t = 29{,}64t^2 - 543{,}5t + 3626{,}4. \qquad (2.12)$$

Сезонная компонента S_t отражает увеличение дефектности *PPM* стекла в начале года (январь-май месяцы) и уменьшение в осенние месяцы (август-ноябрь) на величину, примерно равную, 800. Она хорошо аппроксимируется синусоидальной кривой:

$$St = 800sin((2\pi/12)t + 2\pi\cdot 6/12). \qquad (2.13)$$

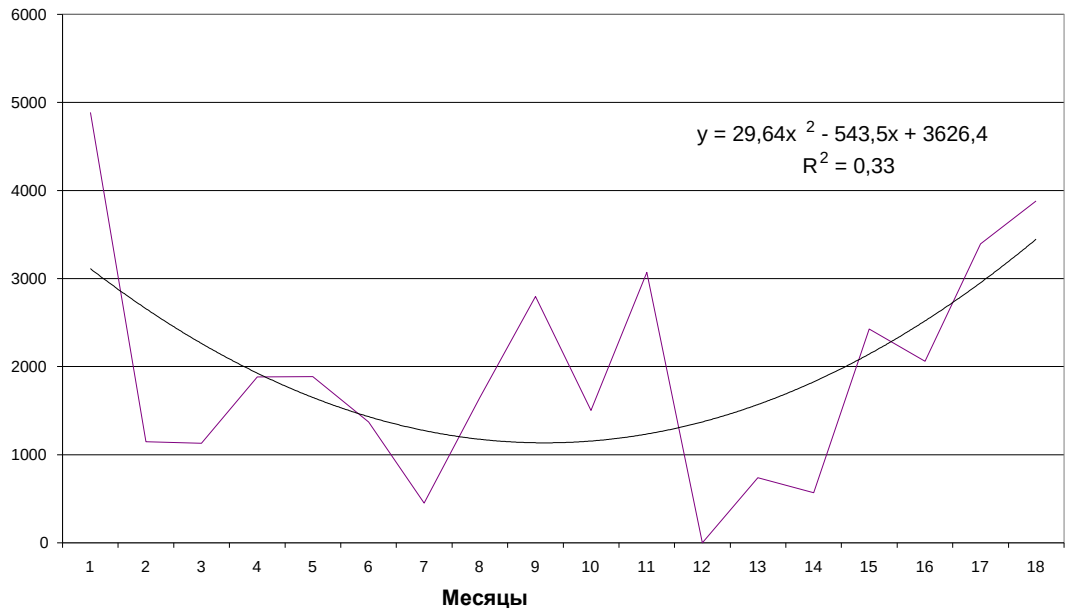


Рисунок 2.11 − График изменения уровня дефектности вырабатываемого стекла

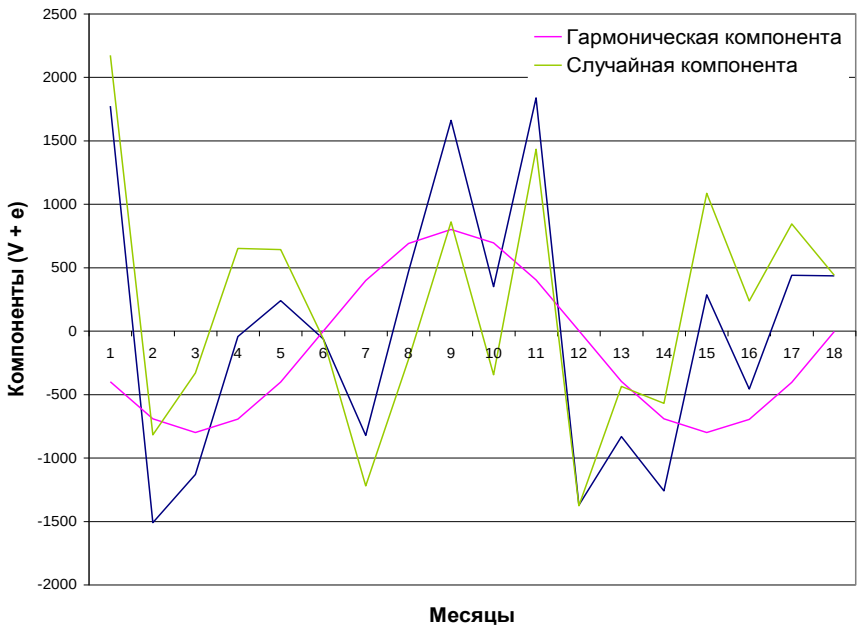


Рисунок 2.12 − Гармоническая и случайная компоненты временного ряда уровня дефектности продукции

После подстановки трендовой и сезонной компонент динамический ряд уровня дефектности продукции принимает вид:

$$Y_{ppm}(t) = 29{,}64t^2 - 543{,}5t + 3626{,}4 + 800sin((2\pi/12)t + 2\pi\cdot 6/12) + e_t\,. \qquad (2.14)$$

Модель временного ряда характеристики *PPM* является адекватной, что подтверждается анализом остаточной компоненты [103].

Проведенный анализ показал, что в рассматриваемом временном интервале дефектность закаленного стекла характеризуется нестабильностью. Причины могут быть как производственного, так и технологического характера.

Для оценки отлаженности технологического процесса закалки стекла по параметрам качества проанализируем значения отклонений формы стекла с использованием статистических методов. Как следует из данных таблицы 2.7, характер распределения результатов измерений отличается от нормального закона распределения вероятностей, на что указывают ненулевые значения расчетных коэффициентов асимметрии и эксцесса [103].

Таблица 2.7 − Статистические показатели отклонения формы стекла

Показатель	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
Коэффициент асимметрии	0,04	0,34	0,29	1,91	0,62
Коэффициент эксцесса	-1,63	-2,0	-1,41	-0,46	-1,3

Оценка коэффициента вариации отклонения формы стекла от чертежа показала нестационарность параметров y_1-y_5 (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Сравнительная характеристика коэффициентов вариации показателей качества стекла

Показатели качества	Коэффициент вариации
y_1 – неприлегание стороны *A-B* к шаблону	29%
y_2 − неприлегание стороны *B-C* к шаблону	46%
y_3− неприлегание стороны *C-D* к шаблону	38%
y_4 −неприлегание стороны *D-F* к шаблону	36%
y_5 − отклонение образующей линии от цилиндрической поверхности	75%
y_6 – максимальное количество осколков при испытаниях на механическую прочность	30%
y_7 – минимальное количество осколков при испытаниях на механическую прочность	21%
y_8 –длина осколков при испытаниях на механическую прочность	22%

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что качество закаленного стекла нестабильное. Неоднородность данных показателей качества стекла ограничивает возможность корректного использования традиционных методов контроля, что может привести к ошибочным выводам об отлаженности процесса.

Проверим правильность полученных выводов, проведя оценку показателей качества производимой продукции с использованием аксиоматического подхода. Оценку целесообразно проводить с учетом результатов корреляционного и кластерного анализов значений отклонений формы стекла от контрольного шаблона [69]. Так коллективом научной школы под руководством профессора Макарова Р.И. была установлена прямая взаимосвязь между неприлеганиями на противоположных сторонах стекла: *A-B* и *C-D, B-C* и *D-F*. То есть с увеличением неприлегания на одной стороне стекла наблюдается увеличение на противоположной стороне и наоборот. Отрицательное значение коэффициентов корреляции неприлегания, измеренных между смежными сторонами стекла указывает на обратный характер взаимосвязи, т.е. при увеличении неприлегания на одной стороне стекла наблюдается уменьшение на смежной стороне. При проведении кластерного анализа была установлена близость значений неприлегания в двух выделенных кластерах (не более 20) и существенные различия в разных кластерах (около 110). Данный вывод позволяет контролировать величину неприлегания в двух точках измерения на смежных сторонах стекла: y_1 по стороне *A-B* и y_2 по стороне *B-C* (таблица 2.9).

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что в целом качество стекла нестабильное. Использование традиционных методов контроля для анализа стабильности показателей качества продукции может привести к недостоверным результатам, что согласуется с ранее полученными выводами других авторов [3, 59, 64, 109].

Таблица 2.9 – Результаты оценки стабильности показателей качества продукции

Результаты проверки	Показатели качества производимой продукции		
	Неприлегание по стороне А-В, y_1	Неприлегание по стороне В-С, y_2	Отклонение образующей цилиндра, y_5
Принцип порядка	выполняется	выполняется	выполняется
Тип распределения	*C*	*C*	*C*
K_c	0,40	0,03	0,70
Принцип сходства	не выполняется	не выполняется	выполняется
Принцип соответствия	не выполняется	не выполняется	выполняется тип *C*

Выводы по 2-й главе

1. Оценена надежность технологической системы производства безопасного закаленного стекла по производительности, ритмичности производства, коэффициенту использования оборудования, коэффициенту годной упакованной продукции и выходу продукции. Построены модели временных рядов, оценены изменения характеристик технологической системы во времени. Проведенный анализ показал наличие в моделях сезонного тренда, гармонической составляющей и случайных компонент, нарушающих стабильность и точность технологического процесса закалки.

2. С применением методов аксиоматического анализа проведена оценка стабильности и точности технологических режимов стадий процесса закалки. Температурный режим нагрева стекла является нестабильным. Режим прессования характеризуется значительной вариабельностью. Выявлено несоответствие результатов оценки стабильности и точности технологического процесса, получаемых с использованием традиционных статистических методов и с помощью аксиоматического анализа. Доказана целесообразность применения

метода аксиоматического анализа для контроля и управления технологическим процессом закалки автомобильных стекол.

3. Проведен анализ видов дефектов, возникающих в процессе выработки закаленного стекла. Дефектность характеризуется нестабильностью. Большая доля дефектов вызвана отклонением формы гнутого стекла от чертежа (неприлегание стекла к контрольному шаблону). Меньшее количество дефектов связано с царапинами, боем, потерями при переналадках и дефектами черного канта. С применением методов аксиоматического анализа проведена оценка стабильности показателей качества продукции, подтверждающая нестабильность качества стекла.

Глава 3 Исследование и разработка моделей, описывающих процесс закалки автомобильного стекла

Проведенный анализ качества технологической системы и технологических процессов показал на недостаточную их стабильность и обосновал необходимость автоматизации управления технологическим процессом закалки. Решение поставленной задачи требует разработки математических моделей, описывающих зависимость характеристик вырабатываемых закаленных стекол от режимов закалки и синтеза алгоритмов управления этим процессом.

Технологический процесс закалки стекла – это сложный и слабо формализуемый объект управления. На результат закалки влияет множество управляемых и неуправляемых переменных величин и их взаимосвязи. Все это усложняет использование традиционных методов для исследования процесса закалки.

3.1 Выбор типа моделей для описания процесса закалки автомобильного стекла

Эффективное управление технологическим процессом возможно в том случае, когда основные закономерности, присущие процессу, представлены в виде математического описания. Построение математического описания объекта является первым этапом синтеза системы управления [4, 93]. Полученная модель позволяет разработать алгоритм управления и определить структуру системы управления.

Вопросам описания процесса закалки автомобильного стекла регрессионными моделями посвящены работы авторов Макаров Р.И., Суворова Е.В., Обухова Ю.М. и др. [63, 64, 83]. Целью данного исследования является разработка моделей процесса закалки на нейронных сетях, а также сравнение

полученных моделей с ранее разработанными регрессионными моделями. Модели на нейронных сетях будут использоваться в алгоритмах управления для выработки управляющих воздействий в производстве закаленных стекол.

Для моделирования технологического процесса закалки стекла на нейронных сетях подходят сети радиального базиса и многослойный перцептрон (*MLP – Multilayer Perceptron*) [77, 79]. В данной работе был сделан выбор в пользу архитектуры типа многослойный перцептрон. Данная архитектура отвечает специфике поставленной задачи, так как обладает способностью экстраполировать данные, более компактна за счет эффективного использования всех нейронов сети, зачастую требует меньшего числа обучающих примеров, в меньшей степени страдает от «проклятия размерности», а также имеет удовлетворительную для решения рассматриваемой задачи скорость обучения. В качестве метода обучения был выбран метод спуска по сопряженным градиентам [38, 77, 79]. Обоснованность выбора данной архитектуры и алгоритма проверена автоматическим конструктором сетей пакета *Statistica Neural Networks*, в котором реализованы сложные алгоритмы поиска наилучшего варианта архитектуры нейронной сети.

3.2 Разработка моделей, описывающих зависимость отклонения формы стекла от режима закалки

Для построения моделей использованы данные пассивного эксперимента, представляющие результаты измерения режимных переменных и показателей качества стекла в режиме нормальной эксплуатации промышленного оборудования. Данные собирались с технологической линии производства «Закаленное стекло» ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод» в течение одного года непрерывной работы. При построении математического описания использовался аппарат нейронных сетей. Размерность системы, описывающей процесс закалки стекла была понижена, за счет использования для построения моделей на нейронных сетях 18-ти наиболее информативных показателей технологического режима [102].

Таблица 3.1 – Информативные параметры технологического режима процесса закалки стекла

Технологические режимы процесса закалки	Кодированное значение	Диапазон изменения
Режим нагрева заготовок. Параметры печи закалки:		
Камера 1, Зона 1, центр, ^0C	x_2	555-585
Камера 1 Зона 11, ^0C	x_4	520-575
Камера 2 Зона 2, центр, ^0C	x_{15}	575-605
Камера 2 Зона 12, ^0C	x_{16}	560-590
Камера 3 Зона 1, центр, ^0C	x_{18}	600-665
Камера 3 Зона 11, ^0C	x_{20}	590-655
Камера 4 Зона 2, центр, ^0C	x_{30}	597-670
Камера 4 Зона 12, ^0C	x_{32}	587-660
Скорость транспортера в печи, м/с	x_{33}	6,8-7,2
Количество потоков вырабатываемого стекла	x_{35}	1-2
Режим прессования:		
Показания пирометра (1 поток), ^0C	x_{36}	540-707
Замедление валков транспортера, м/с^2	x_{38}	0,18-0,25
Начало цикла левый, с	x_{39}	1,2-1,26
Интервал левый 1, 1	x_{41}	0,25-0,45
Интервал левый 2, 1	x_{42}	0,3-0,45
Высота подъема пуансона 1, мм	x_{45}	7-25
Режим закалки:		
Расход воздуха на верхние обдувки, мм.вод.ст.	x_{47}	145-185
Расход воздуха на нижние обдувки, мм.вод.ст.	x_{48}	100-150

При управлении технологическим процессом закалки должны выполняться ограничения технологического регламента, накладываемые на диапазон изменения режимных переменных (таблица 3.1). Система неравенств 3.1 задает требования к отклонению формы стекла от чертежа в миллиметрах по ГОСТ 32565–2013 (таблица 1.1):

$$\begin{aligned} &0 \le y_1 \le 1{,}5 \\ &0 \le y_2 \le 1{,}5 \\ &0 \le y_3 \le 1{,}5 \\ &0 \le y_4 \le 1{,}5 \\ &-1 \le y_5 \le 2 \end{aligned} \qquad (3.1)$$

Ниже приводятся результаты исследования влияния режима закалки на отклонения формы стекла от требований чертежа на примере выработки исследуемых гнутых стекол для легкового автомобиля [43, 48, 50]. Анализировалась зависимость неприлегания по четырем сторонам стекла (y_1-y_4), а также отклонения образующей линии от цилиндрической поверхности (y_5). Объем выборки составил 313 измерений. В выборку вошли данные измерений отклонений формы боковых стекол больших размеров 760х600 мм (левого и правого), а также малых размеров 686х526 мм (левого и правого).

Построение нейросетевой модели в контексте решаемой задачи включает в себя следующие подзадачи [37, 77, 79, 114]:

1) выбор или разработка архитектуры сети, адекватной решаемой задаче;
2) определение количества нейронов в скрытом слое сети;
3) определение длины обучающей выборки, или, точнее, такого отношения длин обучающей, контрольной и тестирующей выборок, при котором разница между значениями переменных, полученных на выходе нейронной сети, и реальными данными не превышала бы некоторой наперед заданной величины;
4) обучение сети на обучающей выборке.

Перед началом использования нейронную сеть следует обучить – настроить весовые коэффициенты для каждого нейрона. При этом обучающая выборка должна быть репрезентативной, т.е., полно описывать поведение объекта управления. Если в контрольной выборке встретится ситуация, которая не была учтена в обучающей выборке, то существует вероятность того, что нейронная сеть выдаст недостоверные результаты [125, 131, 135].

Допустимую погрешность модели принимаем равной погрешности измерения показателей качества закаленного стекла. Показатели качества вырабатываемого закаленного стекла контролируются измерительной техникой. Отклонение гнутых изделий от заданной формы проверяют путем измерения зазоров между изделием и контрольным шаблоном щупом с точностью 0,1 мм.

Отклонение образующей линии цилиндрической поверхности изделия проверяют металлической линейкой с точностью до 1 мм. В таблице 3.7 представлены значения абсолютной инструментальной погрешности и расчетной среднеквадратичной погрешности измерений в предположении нормального закона распределений (формула 3.2) [17].

Таблица 3.2 – Измерительная техника и значения погрешностей

Показатель качества	Наименование измерительной техники	Инструментальная погрешность (Δ), мм	Погрешность измерений ($Se_{изм}$), мм
Неприлегание сторон к контуру шаблона	Щуп ГОСТ 882–75	0,1	0,05
Отклонение образующей линии цилиндрической поверхности	Линейка ГОСТ 427–75	1	0,5

Погрешность измерений подчинена нормальному закону распределения с вероятностью p=0,95. Среднеквадратичная погрешность измерений ($Se_{изм}$) будет определяться по формуле:

$$Se_{изм} = \frac{\Delta}{2} \ . \tag{3.2}$$

Таким образом, условием адекватности нейронной сети принимаем величину среднеквадратичной погрешности модели, которая не должна превышать среднеквадратичную погрешность измерений:

$$Se \le Se_{изм}, \tag{3.3}$$

где Se–среднеквадратичная погрешность модели на тестовом множестве, которая находится по формуле:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{im}-y_{ir})^2}{n-1}}, \tag{3.4}$$

где y_{im} – значение модельных данных, y_{ir} – реальные значения, n – количество наблюдений.

Выбор архитектуры сети и определение оптимального размера выборки осуществлялся с помощью автоматического конструктора сети *Intelligent Problem Solver* пакета *ST Neural Networks* [79].

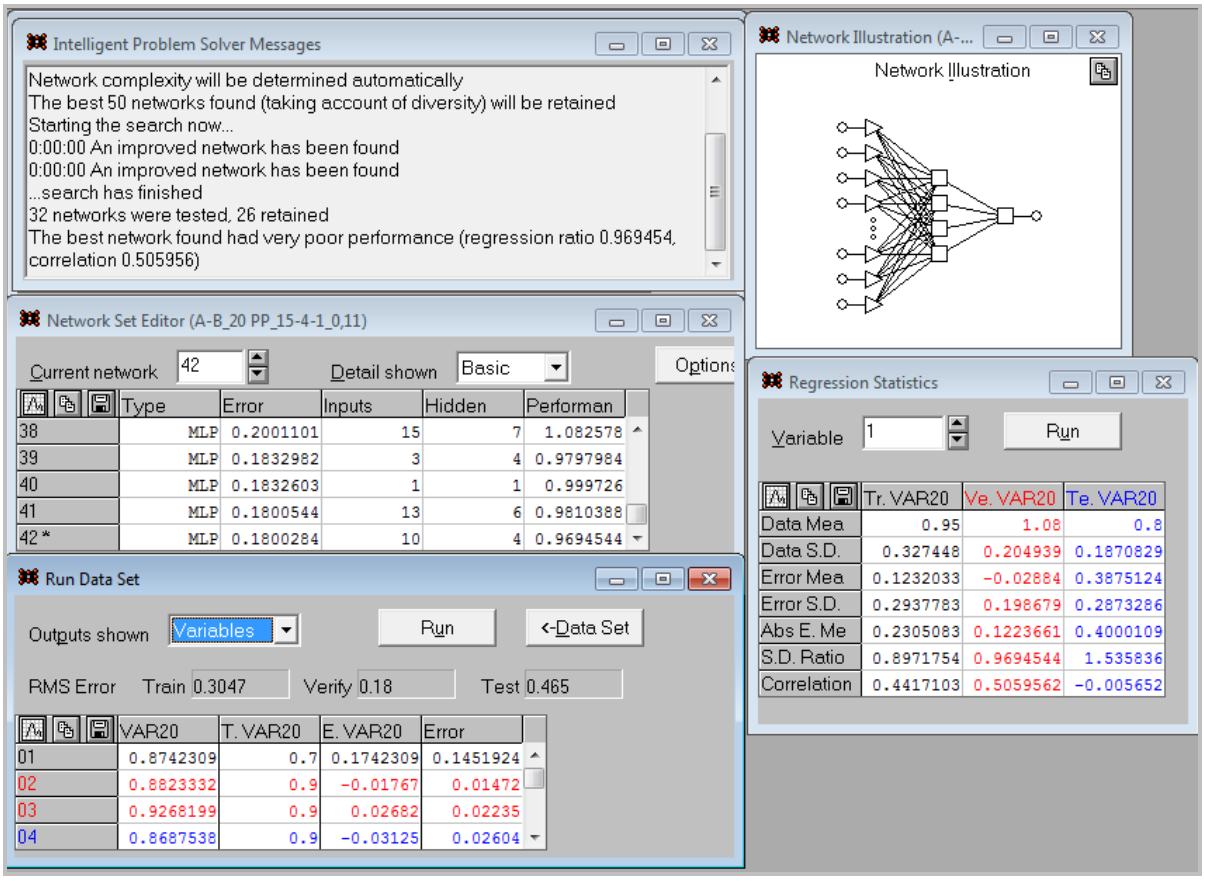


Рисунок 3.1 – Результаты работы конструктора нейронных сетей

В ходе запуска автоматического конструктора на наборе данных из 18 режимных переменных, характеризующих отклонение формы закаленного стекла на стороне *A-B* (y_1), было рассмотрено 42 различных варианта архитектур сети. При этом анализировались следующие типы сетей: линейные, вероятностные, обобщенно-регрессионные сети, радиальные базисные функции и трехслойные персептроны. В качестве алгоритма обучения использовался метод спуска по сопряженным градиентам. Условие выхода из процесса обучения – момент достижения стандартной (среднеквадратичной) ошибки модели (*Error*) на обучающей выборке среднеквадратичной погрешности измерения.

При определении размера выборки учитывался характер изменения во времени режимных переменных процесса закалки. Продолжительность эксперимента определялась по методике [5] и составила 781,38 ч, что при средней

дискретности измерений Δt=3,5 ч позволит провести 223 опыта. Полученное значение не противоречит результатам оценки интервала репрезентативной выборки для нейросетевых моделей [37]:

$$2(k+m+i) \le N \le 10(k+m+i), \tag{3.5}$$

где k – размерность входного сигнала; i – размерность выходного сигнала; m – число нейронов в скрытом слое.

Для рассматриваемого случая выборка должна удовлетворять следующему соотношению: $60 \le N \le 300$. Таким образом, для построения нейросетевой модели было использовано 223 опыта, полученная выборка является реперезентативной. Лучшей архитектурой по итогам работы автоматического конструктора сети выбрана архитектура трехслойного перцептрона.

Проведение серии из 22-х опытов на выборке из 220 значений (с шагом равным 10) показало, что на контрольной выборке среднеквадратичная погрешность сети превышает допустимую погрешность, равную s=0,05.

Таблица 3.3 – Результаты моделирования на выборке из 220 значений

№ опыта	Длина обучающей выборки	Архитектура сети *(k-m-i)*	Среднеквадратичная погрешность сети		
			на обучающей выборке	на контрольной выборке	на тестирующей выборке
1	10	15-7-1	0,2537	0,07398	0,1051
3	30	15-5-1	0,3781	0,233	0,5464
5	50	18-8-1	0,3189	0,2225	0,4752
8	80	12-8-1	0,3067	0,3601	0,5272
10	100	14-5-1	0,5954	0,3676	0,5574
15	150	14-8-1	0,421	0,4513	0,6166
22	220	18-6-1	0,4985	0,4444	0,5343

Далее была выдвинута гипотеза о том, что использование обучающей выборки с нормальной плотностью распределения позволит уменьшить погрешность нейронной сети. Формирование нормально распределенной обучающей выборки из исходных данных привело к сокращению её размеров с 223 до 80 значений. Полученная выборка использовалась для обучения нейронной сети, а оставшиеся значения 143 опытов – для контроля и тестирования построенных сетей.

Для проверки выдвинутой гипотезы эксперимент проводился четыре раза (из-за ограничения длины выборки) при k=2, t=2 (где k – отношение длины обучающей выборки к контрольной, t-отношение длины обучающей выборки к тестирующей) и длине обучающей выборки равной 80 значениям. Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице 3.4. В первом опыте обучающая выборка представлена нормально распределенными данными, в остальных трех опытах обучающая выборка была сформирована из нормально распределенных значений режимных переменных.

Таблица 3.4 – Результаты испытания нейронной сети, построенной на нормально распределенной выборке из 80 значений

№ опыта	Архитектура сети *(k-m-i)*	Среднеквадратичная ошибка сети на контрольной выборке
1	15-8-1	0,3668
2	15-4-1	0,449
3	17-7-1	0,5109
4	16-10-6-1	0,4881

Погрешность нейронной сети на контрольной выборке, обученной на нормально распределенных данных, является минимальной. Для проверки гипотезы влияния обучающей выборки на погрешность модели было проведено сравнение дисперсий погрешностей с использованием критерия Фишера при уровне значимости α=0,05. Результаты попарного сравнения погрешностей первой модели с тремя другими приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Сравнение результатов моделирования

№ опыта	Архитектура сети	Число степеней свободы $f = n – (k+1)$			S^2	$F_{расч}$	$F_{табл}$
		n	k	f			
1	15-8-1	40	8	31	0,1345	-	-
2	15-4-1	40	4	35	0,2016	1.499	1.57
3	17-7-1	40	7	32	0,2610	1.9407	1.6
4	16-10-6-1	40	16	23	0,2505	1.319	1.76

k – число нейронов в скрытом(-ых) слое (-ях)

Проведенные расчеты подтвердили выдвинутую гипотезу о равенстве дисперсий погрешностей моделей в 1-3 опытах. Наиболее точно зависимость формы закаленного стекла от режима закалки описывается нейронными сетями типа трехслойный персептрон.

В таблице 3.6 приведены статистические характеристики пяти разработанных моделей с помощью аппарата нейронных сетей (НС) в сравнении с регрессионными моделями [63].

Таблица 3.6 − Статистические характеристики регрессионных и нейросетевых моделей

Модель	Коэффициент детерминации R^2, %		F-критерий		Среднее значение стандартной ошибки, S, мм		Коэффициент корреляции расчетных данных с реальными данными	
	регрессия	НС	регрессия	НС	регрессия	НС	регрессия	НС
y_1	14,9	5,7	18,0	4,35	0,47	0,37	0,38	0,24
y_2	19,5	8,7	12,4	25,00	0,44	0,44	0,44	0,38
y_3	11,3	11,6	13,1	1,96	0,46	0,29	0,34	0,49
y_4	13,3	23,6	12,0	1,41	0,49	0,35	0,36	0,55
y_5	29,0	30,3	15,5	1,69	0,30	0,31	0,54	0,66

По сравнению с соответствующими уравнениями регрессии нейросетевые модели y_3-y_5 характеризуются более тесной связью расчетных данных с модельными, однако, коэффициенты детерминации разработанных моделей не высокие. Расчетные значения F-критерия меньше табличных данных для уровня значимости 0,05, что свидетельствует о незначимости полученных

коэффициентов детерминации, т.е. показывают отсутствие стохастической связи между результирующими переменными и влияющими факторами. Близость модельных данных к экспериментальным оценивалась с помощью коэффициентов парной корреляции между расчетными и фактическими данными отклонений формы стекла. Расчетные коэффициенты получились статистически незначимыми.

Полученные результаты обусловлены нестационарностью исследуемого технологического процесса закалки. Для обучения сетей целесообразно использовать экспериментальные данные, собранные на меньшем отрезке времени, на котором выполняются условия стационарности протекающего технологического процесса.

Следующая серия экспериментов проводилась на короткой обучающей выборке из 10 значений (см. таблицу 3.7). Рисунок 3.2 иллюстрирует результаты моделирования зависимости отклонения стекла от контрольного шаблона по стороне В-С от режимных переменных.

Таблица 3.7 − Статистические характеристики нейросетевых моделей

Модель	Архитектура сети *(k-m-i)*	Коэффициент детерминации R^2, %	*F*-критерий	Среднее значение стандартной ошибки, *S*, мм	Коэффициент корреляции расчетных данных с реальными данными
y_1	8-4-1	60,2	1,89	0,203	0,78
y_2	3-4-1	82,6	5,95	0,089	0,91
y_3	18-8-1	97,1	4,04	0,227	0,99
y_4	12-3-1	73,2	5,45	0,135	0,86
y_5	7-4-1	89,9	11,09	0,083	0,98

где *k* – размерность входного сигнала; *i* – размерность выходного сигнала; *m* – число нейронов в скрытом слое.

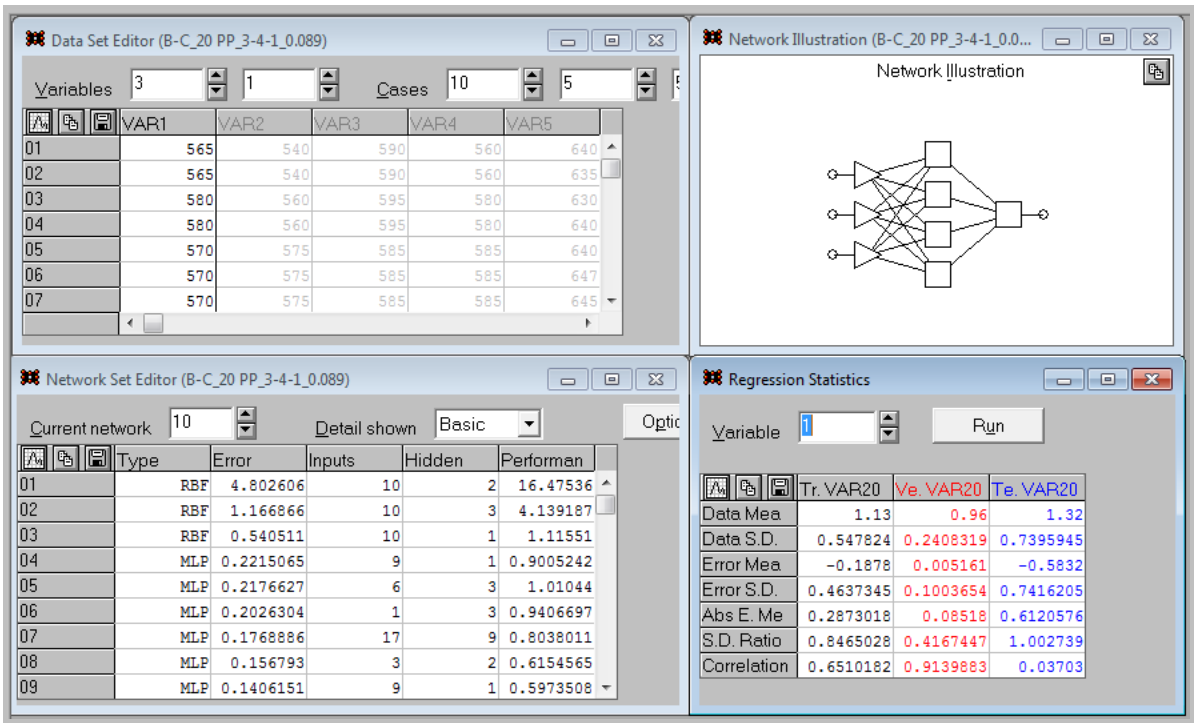


Рисунок 3.2 – Результаты построения модели y_2

Полученные модели характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации, значимость которых подтверждена расчетными значениями *F*-критерия. Коэффициенты корреляции между модельными и реальными данными более чем в полтора раза превышают соответствующие значения, полученные в моделях, обученных на выборке из 80 значений. Среднее значение стандартной ошибки на контрольной выборке меньше, чем в регрессионных и ранее разработанных нейросетевых моделях. Среднеквадратичная ошибка модели y_5 не превышает значения среднеквадратичной ошибки погрешности измерения отклонения, образующей цилиндра (0,5 мм), следовательно, данная модель может использоваться для выработки управляющих воздействий по коррекции режимов закалки. Поскольку требуемая среднеквадратичная погрешность неприлегания стекла к контуру контрольного шаблона не должна превышать 0,05 мм, то полученная точность моделей y_1-y_4 недостаточна для выработки корректирующих действий. Для повышения их точности необходимо проводить уточнение параметров моделей в процессе эксплуатации и инициировать алгоритм адаптации при превышении ошибки модели допустимой величины.

3.3 Разработка моделей, описывающих зависимость характера разрушений стекла при испытаниях на механическую прочность от режима закалки

В данном пункте приводятся результаты исследования влияния процесса закалки на характер разрушения стекла при испытаниях [49]. Анализировалась зависимость таких показателей характера разрушения, как максимальное и минимальное количество осколков (y_6 и y_7), а также максимальная длина осколков (y_8). Объем выборки составил 35 результатов испытаний. В выборку вошли данные испытаний стекол больших размеров 760х600мм (левого (10 результатов) и правого (11 результатов)), а также малых размеров 686х526 мм (правого – 14 результатов).

В перечень влияющих переменных не вошли характеристики заготовок стекла, режимные переменные и настройки, не меняющиеся при выработке заданного вида и типа стекол. Дополнительно в разрабатываемых моделях учитывались такие факторы, как размер стекол, связанные с количеством потоков – 1 или 2, и сторона остекления (переднее левое, переднее правое и заднее правое).

В процессе исследований были разработаны 9 моделей по каждому виду вырабатываемого стекла и 3 модели по всем видам стекол для максимального (y_6) и минимального (y_7) количества осколков, а также максимальной длины осколков (y_8). Наиболее точно зависимость характера разрушения стекла при испытаниях от режимов закалки описывается нейронными сетями типа трехслойный персептрон [49]. Точность разработанных моделей оценивалась по среднему значению стандартной ошибки на контрольной выборке. Значимость моделей определялась по значениям коэффициента детерминации и F-критерию Фишера. Параметры архитектуры и статистические характеристики разработанных моделей приведены в таблице 3.8.

Разработанные нейросетевые модели характеризуются тесной связью результатов моделирования с фактическими данными. Высокие значения

Таблица 3.8 − Статистические характеристики нейросетевых моделей характера разрушения стекла при испытаниях

Модель	Вид стекла	Архитектура сети (k-n-i)	Среднее значение стандартной ошибки, S, мм	Коэффициент корреляции расчетных данных с реальными данными	Коэффициент детерминации R^2, %	F-критерий	$F_{табл}$
y_6	Переднее левое	14-6-1	27,78	0,99	61	–	–
	Переднее правое	10-2-1	10,08	0,99	98		
	Заднее правое	10-7-1	2,48	0,89	76		
y_7	Переднее левое	16-8-1	1,03	0,99	99		
	Переднее правое	10-7-1	2,09	0,92	84		
	Заднее правое	12-4-1	1,26	0,55	15		
y_8	Переднее левое	10-9-1	2,88	0,99	89		
	Переднее правое	15-10-1	0,57	0,99	97		
	Заднее правое	6-1-1	2,17	0,89	77		
y_6	Все стекла	3-3-1	7,80	0,99	98	104,00	8,84
y_7	Все стекла	4-5-1	4,92	0,94	88	8,66	4,95
y_8	Все стекла	3-5-1	3,44	0,93	85	6,64	4,95

коэффициента детерминации характеризуют обоснованный выбор режимных переменных при построении нейронных сетей. Расчетные значения F-критерия больше табличных значений для уровня значимости 0,05, что свидетельствует о значимости полученных коэффициентов детерминации, т.е. показывает значимую стохастическую связь между результирующими переменными и влияющими факторами. Средние значения стандартной ошибки моделей на контрольной выборке по отдельным видам стекол значительно меньше, чем в моделях по всем

видам производимых стекол, за исключением модели максимального количества осколков (y_6) по переднему левому и переднему правому стеклам. В этих моделях наблюдается явление «переобучения» нейронной сети, выраженное в существенном возрастании погрешности модели. По сравнению с регрессионными уравнениями [61] нейросетевые модели характеризуются более высокими коэффициентами детерминации (таблица 3.9).

Нейросетевое моделирование позволило установить зависимость характера разрушения стекла при испытаниях от переменной x_{19} (сторона остекления); подтвердилась зависимость от температуры в камере 4 в зоне 12 (x_8), высоты пуансона (x_{16}), интервала 2 левого (x_{15}) и количества потоков (x_{10}). Из этого следует, что показатели характера разрушения стекла при испытаниях зависят не только от режимных переменных, таких как температура и высота установки пуансона пресса, но и от размера и типа заготовок стекла.

Таблица 3.9 − Сравнение характеристик регрессионных и нейросетевых моделей

<table>
<tr><th rowspan="2">Модель</th><th colspan="2">Регрессионные уравнения</th><th colspan="2">Нейронные сети</th></tr>
<tr><th>Кодированное значение режимной переменной</th><th>Коэффициент детерминации R^2, %</th><th>Кодированное значение режимной переменной</th><th>Коэффициент детерминации R^2, %</th></tr>
<tr><td rowspan="3">y_6</td><td>x_{10}</td><td rowspan="3">86,6</td><td>x_{10}</td><td rowspan="3">97,5</td></tr>
<tr><td>x_{15}</td><td>x_{16}</td></tr>
<tr><td>x_{16}</td><td>x_{19}</td></tr>
<tr><td rowspan="4">y_7</td><td>x_6</td><td rowspan="4">81,0</td><td>x_8</td><td rowspan="4">87,8</td></tr>
<tr><td>x_8</td><td>x_{16}</td></tr>
<tr><td>x_{15}</td><td rowspan="2">x_{19}</td></tr>
<tr><td>x_{16}</td></tr>
<tr><td rowspan="4">y_8</td><td>x_{10}</td><td rowspan="4">83,3</td><td>x_{10}</td><td rowspan="4">84,7</td></tr>
<tr><td>x_{15}</td><td>x_{14}</td></tr>
<tr><td rowspan="2">x_{16}</td><td>x_{15}</td></tr>
<tr><td>x_{19}</td></tr>
</table>

Обозначения переменных: x_6 – температура в камере 3 зона 11, x_8 – температура в камере 4 зона 12, x_{10} – количество потоков, x_{14} – интервал 1 левый, x_{15} - интервал 2 левый, x_{16} – высота пуансона, x_{19} – сторона остекления

Несмотря на выявленное преимущество над регрессионными моделями, разработанные нейросетевые модели, обученные на фиксированной выборке, не

обеспечивают заданную точность описания технологического процесса закалки. Для повышения точности необходимо корректировать параметры нейросетевых моделей в процессе их эксплуатации – инициировать алгоритм адаптации при превышении ошибки модели допустимой величины.

Выводы по 3-й главе

1. На основе статистического анализа технологического режима закалки гнутого автомобильного стекла выбраны информативные импульсы, влияющие на показатели качества готовых изделий – отклонение формы стекла и характер разрушения при испытаниях. Отклонения формы стекла от требований не подчиняются нормальному закону распределений, что необходимо учитывать при разработке моделей, описывающих процесс закалки.

2. Разработаны модели на нейронных сетях, адекватно описывающие зависимость отклонения формы закаленного стекла от режимов закалки по таким показателям, как неприлегание стекла к контрольному шаблону и отклонение образующей цилиндра. Среднеквадратичная погрешность моделей колеблется в пределах от 0,08 до 0,23 мм.

3. Разработаны модели на нейронных сетях, адекватно описывающие зависимость показателей характера разрушений закаленного стекла при испытаниях от режимов закалки. Среднеквадратичная погрешность моделей, описывающих количество осколков при испытаниях, колеблется от 5 до 8 шт. Среднеквадратичная погрешность модели, описывающей максимальную длину осколков при испытаниях, составляет 3,4 мм.

4. Проведен сравнительный анализ точности разработанных нейросетевых моделей с регрессионными моделями, описывающими характеристики вырабатываемого закаленного автомобильного стекла. Нейросетевые модели отличаются высокой точностью по сравнению с регрессионными моделями. Для дальнейшего повышения точности нейросетевых моделей необходимо периодически обучать модели в процессе их эксплуатации.

Глава 4 Алгоритм управления технологическим процессом закалки стекла

4.1 Формализация задачи управления технологическим процессом закалки стекла

Основной целью производства автомобильного стекла является выпуск продукции конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынке. Это требует оперативности управления технологическим процессом производства стекла, которое достигается благодаря использованию современных автоматизированных систем управления. Задача повышения качества гнутого закаленного стекла сводится к управлению режимом закалки. Поставленная задача решается путем разработки алгоритмов управления процессом закалки стекла и использованием их для выработки решений по коррекции режимов закалки.

Построение математического описания технологического процесса является первым этапом синтеза системы автоматизированного управления процессом закалки автомобильного стекла. Для управления технологическим процессом закалки стекла были использованы модели на нейронных сетях (см. главу 3), описывающие зависимость отклонения формы закаленного стекла и механических свойств от режимов закалки:

$$Y = \varphi(X_{inf}), \tag{4.1}$$

где $Y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$ – вектор выходных показателей качества стекла (формула 3.1);

$X_{inf} = (x_2, x_4, x_{15}, x_{16}, x_{18}, x_{20}, x_{30}, x_{32}, x_{33}, x_{35}, x_{36}, x_{38}, x_{39}, x_{41}, x_{42}, x_{45}, x_{47}, x_{48})$ – вектор параметров технологического режима, влияющих на показатели качества (таблица 3.1);

φ– оператор системы, описывающий связь между указанными величинами.

Рассмотрим задачу управления технологическим процессом закалки стекла. Целью является минимизация отклонений формы закаленного стекла от чертежа.

Ввиду нестабильности формы и механической прочности закаленного стекла в качестве критерия управления выбрана сумма отклонений формы стекла от чертежа в точках контроля и требований к результатам испытаний изделий на характер разрушения. При этом должны выполняться ограничения на максимально допустимое отклонение неприлегания стекла к контрольному шаблону и одновременно выдерживаться ограничения на характер разрушения изделий при испытаниях, а также на диапазон изменения режимных переменным процесса закалки, задаваемый технологическим регламентом (таблица 1.1, формула 3.1). С учетом данных условий функция цели управления технологическим процессом закалки стекла принимает вид:

$$\mathrm{F} = \min \sum_{i=1}^{5} y_i \tag{4.2}$$

при выполнении следующей системы ограничений

$$\begin{cases} y_i \le y_{i,\,\text{зад}} \text{ для } i=1, 2, \ldots 5 & (4.3) \\ y_i \le y_{i,\,\text{зад}} \text{ для } i=6, 8 & (4.4) \\ y_7 \ge y_{7\,\text{зад}}; & (4.5) \\ x_{n,\min} \le x_n \le x_{n,\,\max} \text{ для } n=1, 2, \ldots 18, & (4.6) \end{cases}$$

где $y_{\text{i зад}}$ – ограничения на величину отклонения формы стекла y_{i} в точках контроля, $y_{6\,\text{зад}}$ - $y_{8\,\text{зад}}$ – ограничения на показатели характера разрушения.

Первое неравенство (4.3) требует, чтобы неприлегание по сторонам стекла и отклонение образующей цилиндра не превышало заданной величины $y_{\text{i,зад}}$. Второе ограничение (4.4) определяется требованиями на характер разрушения стекла при испытаниях. Максимальное количество осколков y_6 и наибольшая длина осколков y_8 не должны превышать значений $y_{\text{i зад}}$, указанных в ГОСТ. Неравенство (4.5) ограничивает минимальное количество осколков при испытаниях изделий, которое должно быть больше заданной величины $y_{7\text{ зад}}$. Последнее неравенство означает, что необходимо выбирать решения x_n по коррекции режима работы

оборудования из области, задаваемой технологическим регламентом (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Управляющие переменные

Режимная (управляющая) переменная	*n*	Кодированное значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг изменения
Температура сводовая в камере 1 по центру зоны 1,^0C	*1*	x_2	555	585	5
Температура подовая в камере 1 в зоне 11,^0C	*2*	x_4	520	575	5
Температура сводовая камеры 2 в центре зоны 2,^0C	*3*	x_{15}	575	605	5
Температура сводовая камеры 2 в зоне 12,^0C	*4*	x_{16}	560	590	5
Температура сводовая в камере 3 по центру зоны 1,^0C	*5*	x_{18}	600	665	5
Температура подовая в камере 3 в зоне 11,^0C	*6*	x_{20}	540	655	5
Температура подовая в камере 4 в зоне 2,^0C	*7*	x_{30}	597	670	5
Температура подовая в камере 4 в зоне 12,^0C	*8*	x_{32}	587	660	5
Скорость в печи, м/с	*9*	x_{33}	6,8	7,2	0,015
Количество потоков вырабатываемого стекла	*10*	x_{35}	1	2	1
Температура заготовок стекла (пирометр 1),^0C	*11*	x_{36}	540	707	5
Замедление валков транспортера на входе в пресс, м/с^2	*12*	x_{38}	0,18	0,25	0,007
Начало цикла левый, с	*13*	x_{39}	1,2	1,26	0,006
Интервал 1 левый, с	*14*	x_{41}	0,25	0,45	0,01
Интервал 2 левый, с	*15*	x_{42}	0,30	0,45	0,0025
Высота подъема пуансона 1, мм	*16*	x_{45}	7	25	0,65
Предварительный обдув сверху, мм вод. ст.	*17*	x_{47}	145	185	2
Предварительный обдув снизу, мм вод. ст.	*18*	x_{48}	100	150	1,25

Решаемая задача управления является задачей оптимизации и заключается в определении оптимального статического режима закалки, при котором критерий (4.2) принимает минимальное значение. Для исключения в критерии компенсирующего влияния отклонений формы стекла от шаблона друг на друга необходимо контролировать выход каждого из слагаемых критерия за

допустимые пределы. В связи с этим ограничения, накладываемые на целевую функцию, можно записать в виде следующего уравнения:

$$D = \sum_{i=1}^{6} w_i \max\left(\frac{y_i - y_{i,\text{зад}}}{y_{i,\text{зад}}}, 0\right) + w_7 \min\left(\frac{y_7 - y_{7,\text{зад}}}{y_{7,\text{зад}}}, 0\right) + w_8 \max\left(\frac{y_8 - y_{8,\text{зад}}}{y_{8,\text{зад}}}, 0\right), \quad (4.7)$$

где w_i – коэффициенты («веса») слагаемых принимаются одинаковыми, равными 0,125, поскольку все показатели качества стекла имеют равную значимость. Все слагаемые нормализованы путем деления на их значения, заданные в ограничениях (4.3 - 4.6). Тогда целевая функция принимает следующий вид:

$$\mathrm{F} = \min\left(\sum_{i=1}^{5} y_i + \lambda D\right), \quad (4.8)$$

где λ – множитель Лагранжа. Анализ приведенной системы ограничений показывает, что допустимое множество имеет внутреннюю точку, поэтому без потери общности можно положить λ = 1 [138].

Сформулированная задача управления заключается в поиске режима закалки стекла, при котором выражение (4.8) принимает минимальное значение. В пределе данная функция может равняться нулю – это возможно при выработке стекла, точно соответствующего шаблону и удовлетворяющего всем требованиям по характеру разрушения изделия при испытаниях.

4.2 Разработка алгоритма управления технологическим процессом закалки стекла

Одним из методов внедрения информационных технологий в управление технологическими процессами является применение систем поддержки принятия решений (СППР). Организация управления процессом закалки реализована с использованием адаптивных математических моделей на нейронных сетях, описывающих влияние технологических режимов процесса закалки на неприлегание формы стекла к контрольному шаблону и характер разрушения

изделий при испытаниях. Предлагаемый алгоритм управления СППР «Закаленное автостекло» приведен на рисунке 4.1.

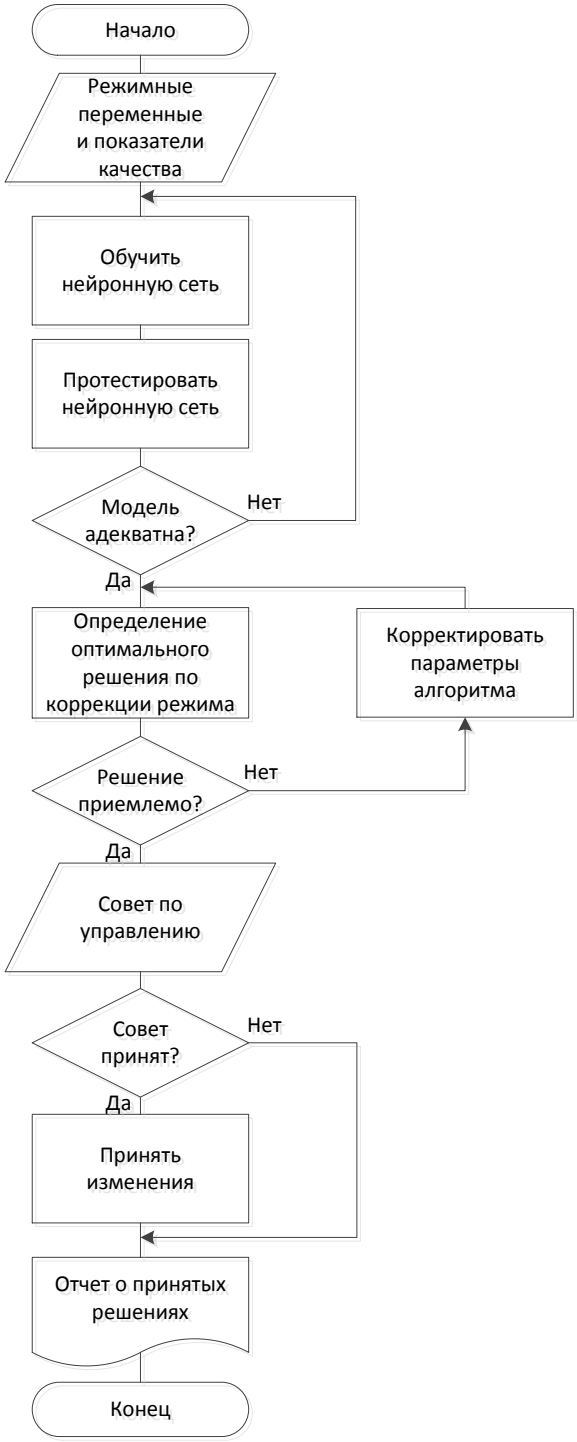


Рисунок 4.1 – Схема алгоритма управления

Схема алгоритма управления отражает человеко-машинное взаимодействие, в данном случае между технологом и СППР. Данные о качестве вырабатываемого

стекла и режиме закалки подаются на вход нейронной сети. Проводится обучение и тестирование нейронной сети с использованием текущих данных. Решается задача поиска оптимальных режимов закалки стекла. Определяются оптимальные параметры по коррекции технологического режима закалки. Затем выдается «совет» по управлению технологическим процессом закалки автомобильного стекла. Технолог принимает окончательное решение по коррекции технологического режима – использовать выданный СППР «совет» или воспользоваться своим опытом управления.

В процессе эксплуатации системы разработанные нейросетевые модели могут потерять точность описания протекающих процессов. Для повышения их точности проводится уточнение параметров моделей в процессе эксплуатации. При превышении ошибкой модели допустимой величины инициируется алгоритм адаптации (рисунок 4.2).

Алгоритм, используя информацию о входных и выходных переменных, значения текущих параметров модели и ее ошибки, проводит уточнение параметров нейросетевых моделей:

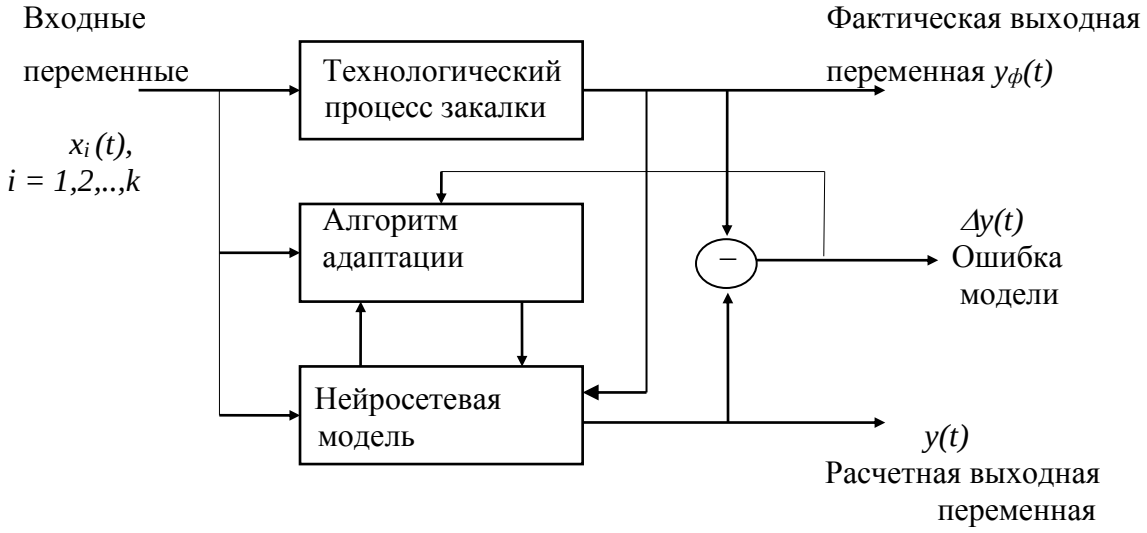


Рисунок 4.2 − Схема коррекции параметров нейросетевой модели

Здесь t - момент времени, при котором ошибка модели превышает допустимую величину; $y(t)$, $x_i(t)$ – значения переменных в момент времени t

Для проверки эффективности разработанного алгоритма управления проводилось имитационное моделирование системы управления с использованием реальных данных, собранных с технологической линии закалки стекла. Результаты вычислительного эксперимента описаны далее.

4.3 Постановка вычислительного эксперимента по оценке эффективности алгоритма управления по коррекции режима закалки автомобильного стекла

Решение по коррекции режима закалки автомобильного стекла принимается по результатам имитационного моделирования алгоритма управления. Для моделирования использовались ретроспективные данные о работе горизонтальной печи закалки при выработке боковых автомобильных стекол. Целью эксперимента была оценка возможности повышения качества вырабатываемого стекла на горизонтальной печи при оптимальном управлении технологическим процессом закалки [44]. Для проведения вычислительного эксперимента была реализована программа автоматизированного расчета параметров режима закалки стекла в среде *MS Excel*.

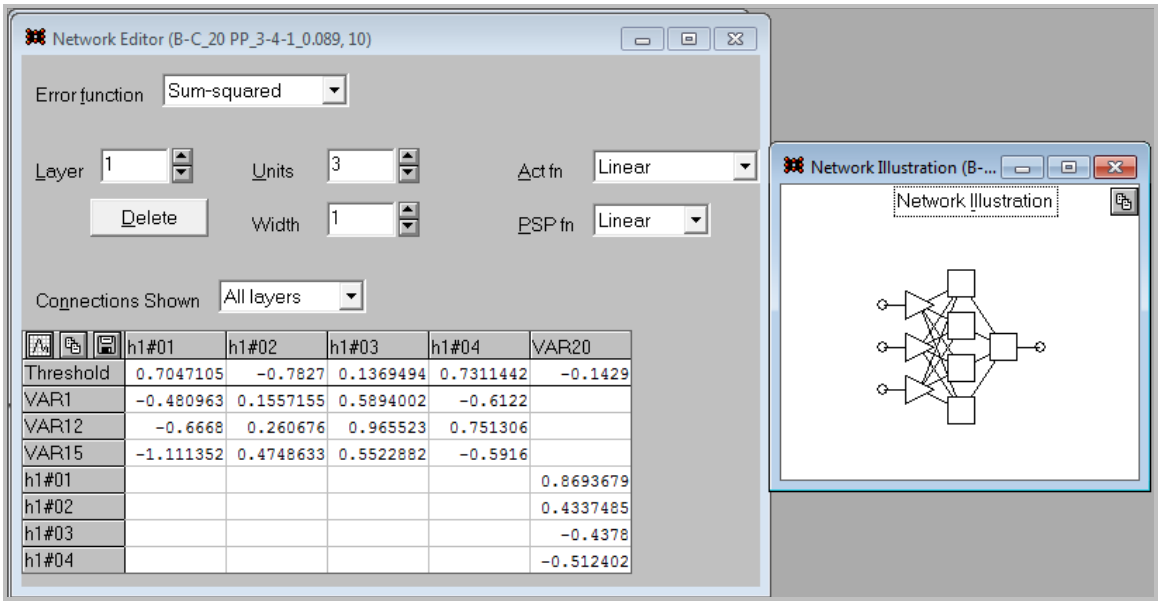
Поскольку математическое описание технологического процесса закалки стекла представлено в виде моделей на нейронных сетях, которые по своей природе являются нелинейными, поиск оптимального режима целесообразно проводить методом безусловной минимизации нулевого порядка, который использует в процессе поиска информацию, получаемую не на основе анализа производных, а сравнением оценок величины критерия управления на каждом шаге поиска.

Для процедуры поиска оптимального решения по коррекции режима закалки стекла в программе использовался метод покоординатного спуска. Для каждой режимной переменной область поиска была равна диапазону её изменения. Величина шага изменения режимных переменных при поиске составляла не более 10% от диапазона изменения переменных при ручном ведении процесса закалки (таблица 4.1).

Для вычисления значения критерия управления на каждом шаге поиска потребовалось определить для каждой из пяти нейросетевых моделей следующие значения:

– значения активации для каждого нейрона на внутреннем слое;
– значение синапса;
– пороговое значение активации.

Значения синапсов и пороговые значения активации были получены в процессе моделирования в среде *Statistica Neural Networks*. Значения активации для нейронов внутренних слоев рассчитывались по формулам 4.9 ,4.11.



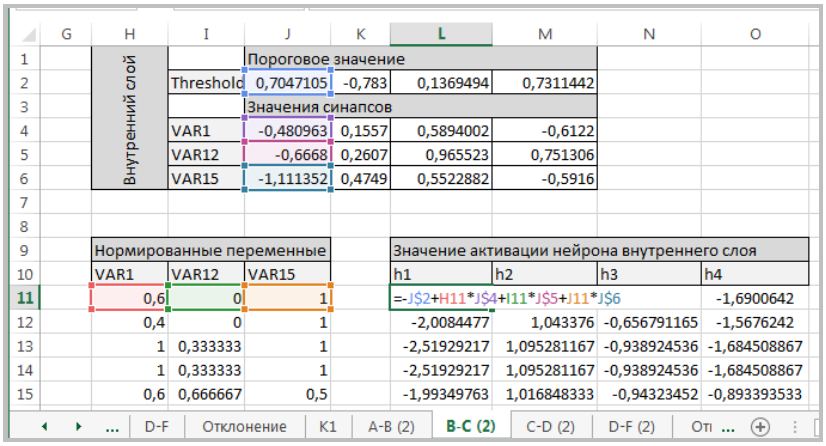
	h1#01	h1#02	h1#03	h1#04	VAR20
Threshold	0.7047105	-0.7827	0.1369494	0.7311442	-0.1429
VAR1	-0.480963	0.1557155	0.5894002	-0.6122	
VAR12	-0.6668	0.260676	0.965523	0.751306	
VAR15	-1.111352	0.4748633	0.5522882	-0.5916	
h1#01					0.8693679
h1#02					0.4337485
h1#03					-0.4378
h1#04					-0.512402

Рисунок 4.3 – Вкладка программы *Statistica Neural Networks* со значениями синапсов и пороговых значений активации модели y_2

При использовании нейронной сети в алгоритме управления во входные элементы подаются значения входных переменных, которые нормируются, а затем последовательно отрабатывают нейроны промежуточных и выходного слоев. Каждый из них вычисляет свое значение активации, беря взвешенную сумму выходов элементов предыдущего слоя и вычитая из нее пороговое значение. Значение активации для каждого нейрона на внутреннем слое:

$$\mathrm{h_i} = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{X_{iнорм}} * W_{\mathrm{ki}} - \mathrm{Threshold_k}, \qquad (4.9)$$

где W_{kj} значение синапса нейронов внутреннего слоя, $\mathrm{Threshold_k}$ - пороговое значение для нейронов внутреннего слоя, k – количество нейронов внутреннего слоя.



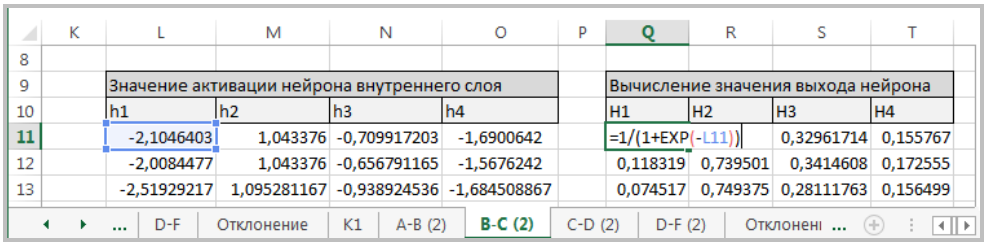
	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Внутренний слой		Пороговое значение					
2			Threshold	0,7047105	-0,783	0,1369494	0,7311442		
3				Значения синапсов					
4			VAR1	-0,480963	0,1557	0,5894002	-0,6122		
5			VAR12	-0,6668	0,2607	0,965523	0,751306		
6			VAR15	-1,111352	0,4749	0,5522882	-0,5916		
7									
8									
9		Нормированные переменные				Значение активации нейрона внутреннего слоя			
10		VAR1	VAR12	VAR15		h1	h2	h3	h4
11		0,6	0	1		=-J$2+H11*J$4+I11*J$5+J11*J$6			-1,6900642
12		0,4	0	1		-2,0084477	1,043376	-0,656791165	-1,5676242
13		1	0,333333	1		-2,51929217	1,095281167	-0,938924536	-1,684508867
14		1	0,333333	1		-2,51929217	1,095281167	-0,938924536	-1,684508867
15		0,6	0,666667	0,5		-1,99349763	1,016848333	-0,94323452	-0,893393533

Рисунок 4.4 – Этап программного расчета значения активации нейронов внутреннего слоя

Используя значение функции активации, вычисляем выход нейрона внутреннего слоя:

$$\mathrm{H_{ik}} = \frac{1}{1+e^{-h_{ik}}}, \tag{4.10}$$

где k – количество нейронов внутреннего слоя.



	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
8										
9		Значение активации нейрона внутреннего слоя					Вычисление значения выхода нейрона			
10		h1	h2	h3	h4		H1	H2	H3	H4
11		-2,1046403	1,043376	-0,709917203	-1,6900642		=1/(1+EXP(-L11))		0,32961714	0,155767
12		-2,0084477	1,043376	-0,656791165	-1,5676242		0,118319	0,739501	0,3414608	0,172555
13		-2,51929217	1,095281167	-0,938924536	-1,684508867		0,074517	0,749375	0,28111763	0,156499

Рисунок 4.5 – Этап программного расчета значения выхода нейронов внутреннего слоя

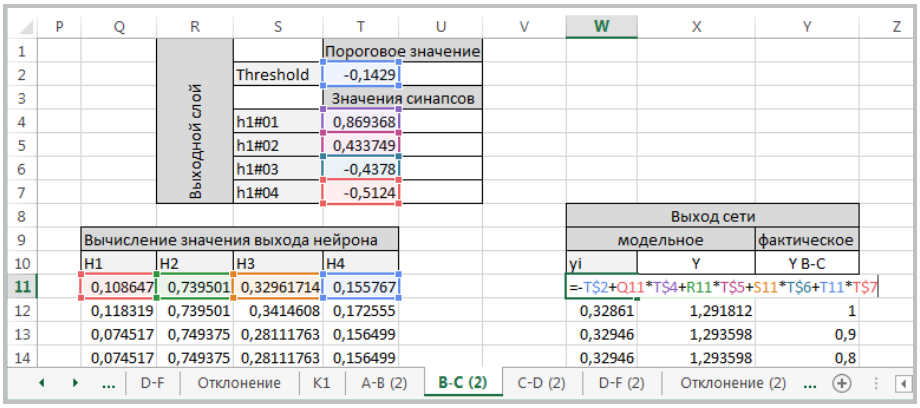
Расчет по формуле 4.13 повторяем для слоя выходных нейронов, только в качестве нормированных данных будут выступать значения выхода нейронов промежуточного слоя H_{ik}:

$$y_i = \sum_{k=1}^{m} \mathrm{H_{ik}} * \widetilde{W}_{\mathrm{k}} - \mathrm{Threshold}, \tag{4.11}$$

где Threshold – пороговое значение для нейрона выходного слоя, $\widetilde{W}_k$ – значение синапса для нейрона выходного слоя.

После того, как вся сеть отработает, выходные значения элементов выходного слоя принимаются за выход всей сети в целом. Выход всей сети рассчитывается как:

$$Y_j = \frac{y_j * y_{jmax}}{1-Se} + y_{jmin}\,. \qquad (4.12)$$

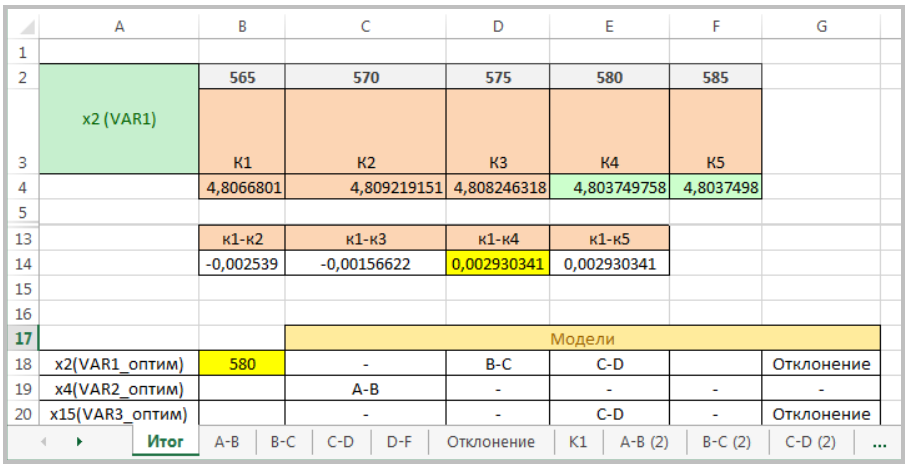


	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1			Выходной слой		Пороговое значение						
2				Threshold	-0,1429						
3					Значения синапсов						
4				h1#01	0,869368						
5				h1#02	0,433749						
6				h1#03	-0,4378						
7				h1#04	-0,5124						
8								Выход сети			
9		Вычисление значения выхода нейрона						модельное		фактическое	
10		H1	H2	H3	H4			yi	Y	Y B-C	
11		0,108647	0,739501	0,32961714	0,155767			=-T$2+Q11*T$4+R11*T$5+S11*T$6+T11*T$7			
12		0,118319	0,739501	0,3414608	0,172555			0,32861	1,291812	1	
13		0,074517	0,749375	0,28111763	0,156499			0,32946	1,293598	0,9	
14		0,074517	0,749375	0,28111763	0,156499			0,32946	1,293598	0,8	

... D-F | Отклонение | K1 | A-B (2) | B-C (2) | C-D (2) | D-F (2) | Отклонение (2) ...

Рисунок 4.6 – Этап программного расчета значения выхода сети

Программа автоматизированного расчета параметров оптимального режима закалки стекла позволяет на основе введенных вручную исходных данных (значений режимных переменных x_i) рассчитать такие значения выхода сети (y_1 – y_5), при которых значение функции управления F будет минимальным (формула 4.8). Поиск оптимального значения выполняется для всех 18 режимных переменных (таблица 4.1), которые вошли в структуру разработанных нейростевых моделей. Количество итераций в расчете по каждой модели зависит от величины диапазона допустимого изменения переменной и размера шага итерации. Каждая итерация расчета завершается определением критерия управления k_i, как суммы значений выходов всех нейросетевых моделей (см. формула 4.8). Каждое значение k_i сравнивается с критерием k, рассчитанным для исходных значений (не подвергшихся корректировке) режимных переменных. Оптимальным значением режимной переменной является значение, при котором $k_i < k$.



	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	x2 (VAR1)	565	570	575	580	585	
3		К1	К2	К3	К4	К5	
4		4,8066801	4,809219151	4,808246318	4,803749758	4,8037498	
5							
13		к1-к2	к1-к3	к1-к4	к1-к5		
14		-0,002539	-0,00156622	0,002930341	0,002930341		
15							
16							
17			Модели				
18	x2(VAR1_оптим)	580	-	B-C	C-D		Отклонение
19	x4(VAR2_оптим)		A-B	-	-	-	-
20	x15(VAR3_оптим)		-	-	C-D	-	Отклонение

Итог | A-B | B-C | C-D | D-F | Отклонение | K1 | A-B (2) | B-C (2) | C-D (2) | ...

Рисунок 4.7 – Этап сравнения критериев управления

При проведении вычислительного эксперимента были заданы повышенные требования к качеству закаленного стекла (таблица 4.2.): требования к допустимой величине неприлегания по сторонам уменьшены до 2-х мм, а к отклонению образующей цилиндра до 1,5 мм. Скорректированы требования к минимальному количеству осколков - до 60 штук и изменены требования к максимальным размерам осколков в сторону уменьшения - до 60 мм.

Таблица 4.2 − Требования к качеству закаленного стекла

Характеристика стекла	Кодированное значение	Заданное значение	Максимальное значение
Неприлегание на стороне *A-B*, мм	y_1	2,0	3,0
Неприлегание на стороне *B-C*, мм	y_2	2,0	3,0
Неприлегание на стороне *C-D*, мм	y_3	2,0	3,0
Неприлегание на стороне *D-F*, мм	y_4	2,0	3,0
Отклонение образующей, мм	y_5	1,5	2,0
Максимальное количество осколков, шт	y_6	400	400
Минимальное количество осколков, шт	y_7	60	40
Максимальная длина осколков, мм	y_8	60,0	75,0

Проведенный вычислительный эксперимент подтвердил возможность повышения качества вырабатываемого стекла при ведении процесса закалки.

Результаты имитационного моделирования с использованием программы автоматизированного расчета параметров режима закалки и результаты ручного ведения процесса закалки приведены на рисунке 4.8 и в таблице 4.3 [57].

	Название режимной переменной	Оптимальное значение	Допустимые значения	
			Мин	Макс
4	Температура x2(VAR1_оптим)	580	555	585
5	Температура x4(VAR2_оптим)	540	520	575
6	Температура x15(VAR3_оптим)	580	575	605
7	Температура x16(VAR4_оптим)	560	560	590
8	Температура x18(VAR5_оптим)	665	600	665
9	Температура x20(VAR6_оптим)	655	590	655
10	Температура x30(VAR7_оптим)	640	597	670
11	Температура x32(VAR8_оптим)	610	587	660
12	Скорость в печи x33(VAR9_оптим)	7	6,8	7,2
13	Пирометр 1 x36(VAR11_оптим)	597	540	707
14	Замедление валков x38(VAR12_оптим)	0,23	0,18	0,25
15	Интервал левый 1 x41(VAR14_оптим)	0,25	0,25	0,45
16	Интервал левый 2 x42(VAR15_оптим)	0,4	0,3	0,45
17	Высота пуансона x45(VAR16_оптим)	14	7	25
18	Предварительный обдув верхний x47(VAR17_оптим)	165	145	185
19	Предварительный обдув нижний x48 (VAR18_оптим)	130	100	150

Итог

Рисунок 4.8 – Результаты программного расчета оптимального режима закалки стекла

Предложенный алгоритм управления позволяет производить закаленное стекло с требуемыми параметрами качества: неприлегание стекла по сторонам не превышает 1,39 мм, отклонение образующей цилиндра не больше 0,46 мм, минимальное количество осколков составило 62 штуки, и максимальная длина осколков не превышает 60 мм. Выдерживание в процессе моделирования более стабильных значений технологических режимов закалки позволило уменьшить разброс характеристик закаленного стекла, что следует из сравнений стандартных отклонений результатов моделирования с ручным ведением процесса закалки.

Таблица 4.3 − Сравнительные характеристики вырабатываемых изделий при программном моделировании и ручном ведении процесса закалки

Характеристика стекла	Кодированное значение	Результаты моделирования		Ручное ведение процесса	
		Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Неприлегание на стороне *A*-*B*, мм	y_1	0,32	0,17	0,95	0,29
Неприлегание на стороне *B*-*C*, мм	y_2	1,10	0,05	1,12	0,47
Неприлегание на стороне *C*-*D*, мм	y_3	1,15	0,24	1,18	0,39
Неприлегание на стороне *D*-*F*, мм	y_4	1,39	0,10	1,31	0,31
Отклонение образующей цилиндра, мм	y_5	0,46	0,04	0,44	0,77
Максимальное количество осколков, шт.	y_6	160,50	7,30	175,80	53,20
Минимальное количество осколков, шт.	y_7	62,40	1,42	65,10	13,76
Максимальные размеры осколков, мм	y_8	53,60	2,10	52,80	11,61

Для наглядности на рисунках 4.9-4.11 в качестве примера приведены графики изменения неприлегания стекла по сторонам и отклонению образующей цилиндра при моделировании и ручном ведении процесса закалки.

Рисунок 4.9 − Неприлегание закаленного стекла к шаблону на стороне A-B

Выбросы значений неприлегания при ручном ведении процесса закалки в 10-ом и 16-ом наблюдениях вызваны перенастройкой режимов технологического оборудования на выработку стекол других типов и размеров. Аналогичные изменения неприлегания стекла на стороне *C-D* наблюдается на графике, приведенном на рисунке 4.10.

Рисунок 4.10 − Неприлегание закаленного стекла к шаблону на стороне C-D

Рисунок 4.11 − Отклонение образующей цилиндра

Результаты испытания стекла на характер разрушения отображены на графике (рисунок 4.12). Как видно из графика максимальное и минимальное количество осколков при испытаниях стабилизируется по сравнению с ручным ведением процесса закалки.

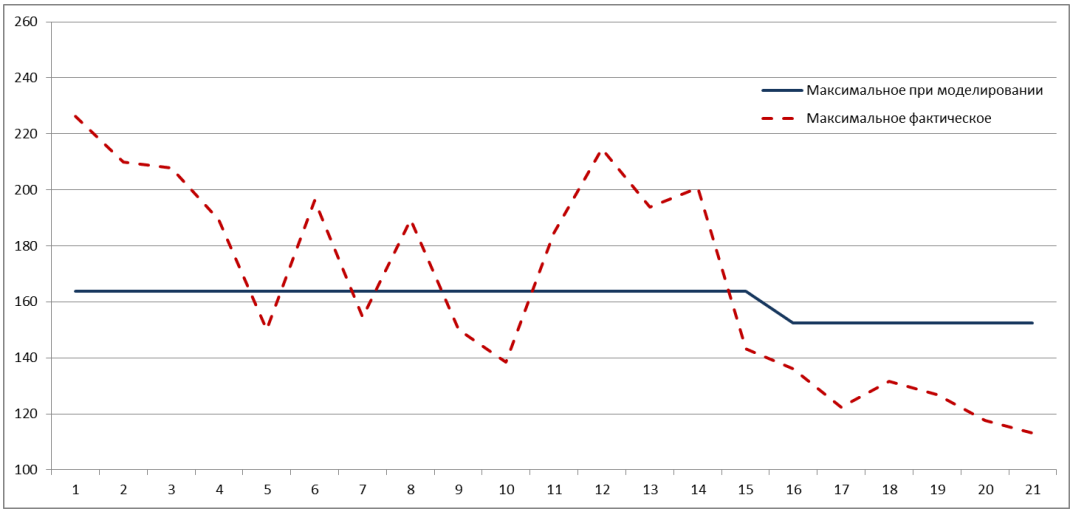


Рисунок 4.12 − Количество осколков стекла при испытаниях

Стабилизация характеристик стекла достигается за счет определения оптимального режима закалки. Сравнение режимов закалки стекла при программном моделировании с ручным ведением процесса (таблица 4.4) иллюстрирует, что тепловой режим печи закалки корректируется незначительно,

не более чем на 6,5%, в сторону уменьшения температуры. Заметной коррекции в сторону уменьшения подверглись интервал левый 1 (x_{41}) на 16,7% и интервал левый 2 (x_{42}) на 30,6%. Корректировка в большую сторону затронула следующие режимы работы пресса: замедление валков транспортера (x_{38}) на 4,5%; высоты пуансона (x_{45}) на 7,7%; предварительный обдув стекла сверху (x_{47}) на 4,4%.

При оптимальном управлении увеличилась точность изготовления стекол за счет уменьшения величины неприлегания к контрольному шаблону и отклонения образующей цилиндра (см. таблица 4.3). При ручном ведении процесса закалки неприлегание по сторонам стекла колебалась в пределах от 0,3 по стороне *C-D* до 2,6 мм по стороне *B-C*, а отклонение образующей цилиндра достигало 1,26 мм. Сохранилась значительная вариация неприлегания стекла на стороне *A-B* (52%) и *C-D* (21%), что объясняется возмущениями, связанными с изменением стороны остекления и количества, поступающих на закалку потоков заготовок стекла с одного до двух. Вариация остальных показателей уменьшилась с 31–77% при ручном ведении процесса до 5-8% при оптимальном управлении. Предложенный алгоритм управления позволяет вырабатывать закаленное стекло с заданными характеристиками: отклонение формы стекла по сторонам не превышает 1,39 мм, отклонение образующей цилиндра не больше 0,46 мм. Показатели характера разрушения изделий при испытаниях удовлетворяют предъявляемым требованиям (таблица 4.4).

Имитационное моделирование функционирования технологического процесса закалки, с предложенным алгоритмом управления и программой автоматизированного расчета оптимального режима закалки стекла, доказало возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

Разработанный алгоритм управления может использоваться в эксплуатируемых и вновь создаваемых системах поддержки принятия решений в производстве закаленных стекол. Он позволяет технологам принимать

обоснованные и эффективные решения по коррекции режимов стадий процесса закалки в производстве гнутых автомобильных стекол.

Таблица 4.4 − Сравнение режимов закалки стекла при программном моделировании с ручным ведением процесса

Режимная переменная	Кодированное значение	Ручное ведение процесса		Результаты программного моделирования	
		Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
1	2	3	4	5	6
Температура сводовая в камере 1 по центру зоны 1,^0C	x_2	569	10,90	555	0
Температура подовая в камере 1 в зоне 11,^0C	x_4	558	9,19	540	0
Температура сводовая камеры 2 в центре зоны 2,^0C	x_{15}	588	6,63	580	0
Температура сводовая камеры 2 в зоне 12,^0C	x_{16}	579	6,34	560	0
Температура сводовая в камере 3 по центру зоны 1,^0C	x_{18}	645	11,00	640	0
Температура подовая в камере 3 в зоне 11,^0C	x_{20}	632	13,96	630	0
Температура подовая в камере 4 в зоне 2,^0C	x_{30}	649	10,92	640	0
Температура подовая в камере 4 в зоне 12,^0C	x_{32}	636	14,89	610	0
Скорость в печи	x_{33}	7	0,06	7	0,05
Температура пирометр 1,^0C	x_{36}	638	25,78	597	0
Замедление валков транспортера Интервал 1 левый	x_{38} x_{41}	0,22 0,30	0,01 0,06	0,23 0,25	0 0,015
Интервал 2 левый	x_{42}	0,36	0,04	0,25	0
Высота пуансона, мм	x_{45}	13	5,35	14	0,2
Предварительный обдув сверху, мм вд. ст.	x_{47}	158	4,22	165	0
Предварительный обдув снизу, мм вд. ст.	x_{48}	132	2,36	130	0

Выводы по 4-й главе

1. Сформулирована задача управления технологическим процессом закалки стекла в виде задачи математического программирования. В качестве критерия управления выбраны отклонение формы стекла от шаблона и образующей цилиндра. Результаты испытаний стекла на механическую прочность заданы ограничениями. В качестве управляющих воздействий выбраны технологические режимы стадий процесса закалки.

2. Разработан алгоритм управления процессом закалки стекла, позволяющий вычислять оптимальные значения технологических режимов стадии процесса закалки. Учитывая нелинейность нейросетевых моделей и случайный характер контролируемых переменных, в качестве метода поиска оптимального режима выбран метод покоординатного спуска. Для исключения компенсирующего влияния отклонений формы стекла по сторонам предложен критерий управления в виде штрафной функции.

3. Вычислительным экспериментом подтверждена эффективность разработанного алгоритма управления процессом закалки, позволяющего повысить качество вырабатываемого стекла на действующем технологическом оборудовании. Отклонение формы стекла по сторонам не превышает 1,39 мм, отклонение образующей цилиндра не больше 0,46 мм. Результаты испытаний стекла на механическую прочность удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Заключение

В диссертационной работе решена актуальная научная задача повышения качества закаленного стекла для автомобильного транспорта за счет определения оптимального режима закалки стекла, обеспечивающего минимальные отклонения геометрических параметров и механической прочности стекла от требуемых значений. Получены следующие основные результаты:

1. На основе анализа состояния современных систем управления производством закаленных стекол для автомобильной промышленности показана актуальность проведения теоретических исследований и разработок, направленных на совершенствование систем управления технологическими процессами.

2. Создано формализованное описание технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта. Выявлены критичные технологические стадии процесса закалки, влияющие на качество вырабатываемого стекла.

3. Показана целесообразность использования методики аксиоматического анализа для контроля стабильности и точности технологического процесса закалки, которая позволяет оценивать характеристики процесса по выборке малого объема.

4. Разработаны нейросетевые модели, описывающие отклонение формы и показатели характера разрушения при испытании изделий в зависимости от режимов стадий технологического процесса закалки.

5. Разработано формализованное описание задачи управления технологическим процессом закалки гнутого стекла. Критерий управления оценивает отклонение гнутых изделий от заданной формы и показатели характера

разрушения изделий при испытаниях. Управляющими воздействиями выбраны технологические режимы стадий процесса закалки.

6. Предложен алгоритм управления технологическим процессом закалки гнутого стекла. Результаты имитационного моделирования функционирования технологического процесса закалки с предложенным алгоритмом управления доказали возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

7. Разработанные модели, алгоритмы контроля и управления технологическим режимом закалки рекомендуются к использованию в производстве закаленных автомобильных стекол.

Список сокращений и условных обозначений

ПКО – производственное коммерческое объединение;

PPM (*part per million*) – доля дефектов на миллион изделий (возможностей);

CC (*Critical Characteristic*) – критические показатели;

SC (*Significant Characteristic*) – значительные показатели;

Yield – выход продукции;

CU – коэффициент использования оборудования;

Netcadence – производительность по качественному стеклу;

Netpacked – производительность по упакованному стеклу;

Список литературы

1. Адлер, Ю.П. Контрольные карты Шухарта в действии [Текст]/ Ю.П Адлер, В.Л. Шпер // Методы менеджмента качества. – 2004. – №2. – С. 34-37.
2. Андрианова, В.И. Автоматизированное управление процессом закалки автомобильных стекол [Текст] / В.И. Андрианова, Р.И. Макаров, Е.Р. Хорошева // Стекло и керамика. – 2015. – №7. − С.3-5.
3. Андрианова, В.И. Контроль качества закаленного автомобильного стекла. [Текст] / В.И. Андрианова, Б.И. Марголис // Динамика сложных систем. Т.13. – 2019. – №1. – С.61-64.
4. Анфилатов, В.С. Системный анализ в управлении [Текст]/ В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.В. Кукушкин; Под ред. А.А Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 368 с. – ISBN 5-279-02435-X.
5. Бородюк, В.П. Статистическое описание промышленных объектов [Текст]/ В.П. Бородюк, Э.К. Лецкий – М.: «Энергия», 1971. – 112с.
6. Бояринов, А.И. Методы оптимизации в химической технологии [Текст]/ А.И. Бояринов, В.В, Кафаров; под ред. чл.-корр. АН СССР В.В. Кафарова. М.: Химия, 1969. – 564с.
7. Будов, В.М. Производство строительного и технического стекла [Текст]/ В.М. Будов, П.Д. Саркисов – М.: Высшая школа. – 1991. – 319 с.
8. Бутт, Ю.М. Общая технология силикатов [Текст]/ Ю.М. Бутт, Г.Н. Дудеров, М.А. Матвеев – изд-е 3-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1976. – 600с.
9. Василевская, С.В. О применимости подходов, практик, методов и инструментов в ИСМ [Текст]/ С.В. Василевская // Методы менеджмента качества. – 2010. – №9. – С. 15-19.
10. Васильев, А.В. Исследование и разработка алгоритмов управления многостадийным процессом производства листового стекла. [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.06 / Васильев Артем Вячеславович. – Владимир, 2006г. – 16 с.

11. Вендров, А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем [Текст]/ А.М. Вендров. М.: Финансы и статистика, 2001. – 32 с. – ISBN 5-279-02937-8.
12. Волкова, В.Н. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата [Текст] / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. — 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2014. – 616 с. – ISBN 978-5-9916-4213-2.
13. Гиссин, В.И. Управление качеством: учеб. пособие [Текст]/ В.И. Гиссин. 2-е изд. – Москва: МарТ, 2003. – 400 с. – ISBN 5-241-00269-3.
14. ГОСТ 27.202–83. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготовляемой продукции [Текст]. – Введ. 1984-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 53 с.: ил.
15. ГОСТ 27.203–83. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности [Текст]. – Введ. 1984-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 8 с.
16. ГОСТ 27903–88. Стекло безопасное для автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин. Определение механических свойств [Текст]. – Введ. 1990-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 12 с.: ил.
17. ГОСТ 32565–2013. Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия [Текст].– Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016.– 47 с.: ил.
18. Гусева, Т.В. Интеграция как закономерный этап развития систем менеджмента [Текст]/ Т.В. Гусева // Менеджмент в России и за рубежом. – 2003. – № 5. – С. 75-86.
19. Давид Марка. Методология структурного анализа и проектирования: пер. с англ. [Текст]/ Давид Марка, Клемент МакГоуэн. – М.: 1993. - 240с. – ISBN 0-07-040235-3.
20. Дзюзер, В. Я. Методология адаптации сопряженной математической модели гидродинамики и теплообмена в стекловаренной печи с подковообразным

направлением пламени [Текст]/ В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий //Стекло и керамика. – 2006. – №12.

21. Дмитриев, Г.А. Многоуровневая система контроля и управления производством стеклоизделий [Текст] / Г.А. Дмитриев, Б.И. Марголис, Шараф Фади // Программные продукты и системы. – 1999. – №3. –С. 16-17.
22. Дмитриев, Г.А. Моделирование теплофизических, механических и оптических свойств стекла по его химическому составу [Текст] / Г.А. Дмитриев, Б.И. Марголис, Шараф Фади // Программные и технические средства медико-биологических и технических систем: Межвузовский сборник научных трудов / Тверской государственный технический университет. – 1998.– С.69-72.
23. Дубров, А.М. Многомерные статистические методы: Учебник [Текст]/ А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 352с. – ISBN 5-279-019450-3.
24. Дудников, Е.Г. Автоматизация управления в химической промышленности. Учебник для ВУЗов [Текст]/ под ред. Е.Г. – М.: Химия, 1987.
25. Егорова, Т. А. Формирование ленты стекла различной толщины в ванне расплава олова. [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.17.1/Егорова Т.А. – Москва, 2003г.
26. Елисеева, И.И. Эконометрика: учебник [Текст]/ И.И. Елисеева, С.В. Курышева, Т.В. Костеева и др.; под ред. И.И. Елисеевой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 576с.: ил. – ISBN 5-279-019450-3.
27. Ефременков, В.В. Анализ и управление технологическим процессом приготовления стекольной шихты [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.01/ Ефременков Валерий Вячеславович. - Нижний Новгород, 2006г.- 20 с.
28. Иванов, А. Л. Приемы повышения оптических показателей флоат-стекла [Текст]/А. Л. Иванов, В. С. Безлюдная, В. И. Кондрашов // Стекло и керамика. – 2002. – №9.

29. Информационные технологии в управлении качеством автомобильного стекла [Текст] / Р. И. Макаров [и др.]; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 276 с.
30. Калянов, Г.Н. CASE-технология: консалтинг в автоматизации бизнес-процессов [Текст]/Г.Н. Калянов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. – 317 с. – ISBN 5-93517-099-X.
31. Карманов, В.Г. Математическое программирование [Текст]/В.Г. Карманов. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
32. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств [Текст]/В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Е.П. Марков. – М.: Наука, 1986. – 359 с.
33. Кириллова, С.Ю. Разработка моделей и методики идентификации процесса стекловарения в производстве листового стекла. [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.06 / Кириллова Светлана Юрьевна. – Владимир, 2002. – 18с.
34. Киселев, А.Н. Автоматизированная система стабилизации остаточных напряжений при отжиге стеклоизделий [Текст] / А.Н. Киселев, А.А. Шейнман, Б.И. Марголис, // Автоматизированное управление и моделирование сложных технологических процессов: Межвузовский сборник научных трудов / Тверской политехнический институт. – 1991. – С.28-37.
35. Клячкин, В.Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии: учебное пособие [Текст]/В.Н, Клячкин. – М.: Финансы и статистика, 2007. −304с.−ISBN 978-5-279-03046-0.
36. Кондрашов, В.И. Технологические процессы производства листового термически полированного стекла на линии многофункционального назначения. [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.17.11/ Кондрашов В.И.– Москва, 2001. – 48с.
37. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика [Текст] / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.: ил. - На рус.яз. - Российская Федерация. - ISBN 5-93517-031-0.

38. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст]: Учеб. пособие для студентов вузов по спец. "Прикл. информатика (по областям)" / М.И. Дли, Р.Ю. Голунов - М.: Физматлит. - 2001. - 224 с.: ил. - На рус.яз. - Российская Федерация. - ISBN 5-94052-027-8.
39. Крюков, И.И. Сбалансированная система показателей в интегрированной системе качества [Текст] / И.И. Крюков, А.Д. Шадрин // Стандарты и качество. – 2004. – №6.
40. Кучерявский, С.В. Технология анализа процессов [Текст] / С.В. Кучерявский // Методы менеджмента качества. – 2006. – №5. – С.12-17.
41. Левковский, Д.И. Использование моделей нейронных сетей для статистического анализа и регулирования процесса формования ленты стекла на расплаве олова [Текст] / Д.И. Левковский, Р.И. Макаров // Стекло и керамика. – 2008. – №6. – С.15-17.
42. Лукашин, С.А. Автоматизация процесса отжига полированного листового стекла. [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.06 / Лукашин Станислав Алексеевич. – Владимир, 2001г. – 16 с.
43. Мазанова, В.И. Анализ моделей нейронных сетей, описывающих зависимость формы стекла от режима закалки [Текст] / В.И. Мазанова // Математические методы в технике и технологиях − ММТТ-23 [текст]: сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.10. Секция 11 / под общ. ред. В.С. Балакирева. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – С.51-53.
44. Мазанова, В.И. Анализ процесса закалки гнутых автомобильных стекол и выработка предложений для повышения качества выпускаемых изделий [Электронный ресурс] / В.И. Мазанова, Р.И. Макаров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; Режим доступа: http://www.science-education.ru/113-11478 (дата обращения: 01.01.2014). – Загл. с экрана.
45. Мазанова, В.И. Анализ стабильности и точности технологических режимов производства закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова, Е.Ю. Шагивалеева //

Алгоритмы, методы и системы обработки данных: сборник научных статей; Выпуск 26/Под ред. С.С. Садыкова, Д.Е. Андрианова – Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО ВлГУ. − 2013 − С.3-8.

46. Мазанова, В.И. Анализ технологического процесса производства закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова, Е.Ю. Шагивалеева // Материалы Второй открытой городской научно-практической конференции школьников и студентов «Решение – 2013», Березники, 18 октября 2013. – Пермь: Березниковский филиал Перм. национ. иссл. политехн. ун-та, 2013. – С.63-63.
47. Мазанова, В.И. Исследование и разработка математических моделей технологического процесса производства закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Современные технологии и методы исследований. Сборник материалов межвузовской студенческой научной конференции. Владимир. ВЗФЭИ, 2009.
48. Мазанова, В.И. Исследование моделей закалки автомобильного стекла [Текст]/ В.И. Мазанова // Математические методы в технике и технологиях − ММТТ-22: сб. трудов XXII Междунар. науч. конф.: в 11 т. Т.11: Летняя Школа молодых ученых / под общ.ред. д.т.н., проф. В.С. Балакирева; Иваново: изд-во Ивановского гос. хим.-технол. ун-та, 2009. – С.279-281.
49. Мазанова, В.И. Исследование моделей нейронных сетей, описывающих зависимость механической прочности стекла от режима закалки [Текст] / В.И. Мазанова // Вестник Костромского гос. ун-та имени Н.А. Некрасова. Серия: Технические и естественные науки «Системный анализ. Теория и практика». – 2010. – № 2. – С.23-24.
50. Мазанова, В.И. Исследование моделей нейронных сетей, описывающих зависимость формы стекла от режима закалки [Текст] / В.И. Мазанова // Вестник Костромского гос. ун-та имени Н.А. Некрасова. Серия: Технические и естественные науки «Системный анализ. Теория и практика». – 2010. – № 1. – С.44-46.

51. Мазанова, В.И. Ключевые показатели технологического процесса производства безопасного закаленного стекла для наземного транспорта [Текст] / В.И. Мазанова, Ю.М. Обухов // Трансформация экономики регионов в условиях устойчивого развития: теория и практика. Материалы межвузовской научно-практической конференции. - Владимир: ВЗФЭИ, 2008. – С.209-212.
52. Мазанова, В.И. Ключевые характеристики технологического процесса производства безопасного закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21): сб. тр. XXI Междунар. науч. конф.: В 11 т. Т.11: Осенняя школа молодых ученых / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.С. Балакирева; Тамб. гос. техн. ун-та. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. − С.131-133.
53. Мазанова, В.И. Обзор научных исследований в области автоматизации технологических процессов производства листового стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Вестник филиала Всероссийского заочного финансово-экономического института в г. Владимире. Выпуск 2. – Владимир, 2007. – С.127-129.
54. Мазанова, В.И. Оценка технологического процесса производства закаленного автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Алгоритмы, методы и системы обработки данных: Сборник научных статей / Под ред. С.С. Садыкова, Д.Е. Андрианова – М.: «Центр информационных технологий в природопользовании», 2008. – С.83-87.
55. Мазанова, В.И. Процессный подход и статистические методы в управлении качеством закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова, Р.И. Макаров, Ю.М. Обухов // Стекло и керамика. – 2008. – №9. − С.36-38.
56. Мазанова, В.И. Структуризация целей и задачи управления производством закаленного автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Информационный менеджмент социально-экономических и технических систем – 2011: сборник материалов II Международной молодежной научно-практической школы (г. Москва). – Владимир: Транзит-ИКС, 2011. – С.35-37.

57. Мазанова, В.И. Управление процессом закалки гнутого автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Materiały IX Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2013» Volume 40. Techniczne nauki. Fizyka.: Przemyśl. Nauka i studia, 2013. – С.12-16.
58. Макаров, Р.И. Автоматизация процесса производства листового стекла [Текст]/ Р.И. Макаров, Е.Р. Хорошева, С.А. Лукашин. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2002. – 192 с.
59. Макаров, Р.И. Анализ точности и стабильности процессов. Сравнительная оценка методов анализа [Текст]: сборник научных трудов / Р.И. Макаров, Е.Р. Хорошева, О.В. Полунина – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 52с., ISBN 0131-9582.
60. Макаров, Р.И. Аксиоматический подход к оценке стабильности процесса производства автомобильных стекол [Текст] / Р.И. Макаров // Анализ точности и стабильности процессов. Сравнительная оценка методов анализа: сборник научных трудов. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – С.25-27.
61. Макаров, Р.И. Исследование и разработка моделей механической прочности закаленного стекла [Текст] / Р.И. Макаров, Ю.М. Обухов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных: Сборник научных статей / Под ред. С.С. Садыкова, Д.Е. Андрианова – М.: «Центр информационных технологий в природопользовании», 2008. – С.92-98.
62. Макаров, Р.И. К вопросу контроля стабильности процессов. Анализ точности и стабильности процессов [Текст] / Р.И. Макаров // Анализ точности и стабильности процессов. Сравнительная оценка методов анализа: сборник научных трудов. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – С.3-8.
63. Макаров, Р.И. Математическое моделирование производства гнутого закаленного автомобильного стекла [Текст] / Р.И. Макаров, Ю.М. Обухов, Е.В. Суворов // Математические методы в технике и технологиях − ММТТ-22: сб.

трудов XXII Междунар. науч. конф.: в 11 т. Т.9, секция 10 / под общ.ред. д.т.н., проф. В.С. Балакирева; Псковский гос. политехн. и-т, 2009. – С.187-188.

64. Макаров, Р.И. Математическое описание процесса закалки автомобильного стекла [Текст] / Р.И. Макаров, Е.В. Суворов // Стекло и керамика. –2009. – №5.– С.12-14.
65. Макаров, Р.И. Место моделирования в производственном менеджменте на примере стекольного завода [Текст] / Р.И. Макаров, В.В. Тарбеев, Ю.М. Обухов // Трансформация экономики регионов в условиях устойчивого развития: теория и практика. Материалы межвузовской научно-практической конференции. - Владимир: ВЗФЭИ, 2008. – С. 221-223.
66. Макаров, Р.И. Оценка методов анализа точности и стабильности процессов [Текст] / Р.И. Макаров, Е.Р. Хорошева // Анализ точности и стабильности процессов. Сравнительная оценка методов анализа: сборник научных трудов. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – С.27-31.
67. Макаров, Р.И. Оценка механических свойств, гнутых закаленных автомобильных стекол [Текст] / Р.И. Макаров, Е.Р. Хорошева // Анализ точности и стабильности процессов. Сравнительная оценка методов анализа: сборник научных трудов. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – С.27-31.
68. Макаров, Р.И. Применение статистических методов и моделирование в производстве автомобильных стекол [Текст] / Р.И. Макаров, Е.В. Суворов // Материали за 7-а международна научна практична конференция, "Новината за напреднали наука". – Технологии, София."Бял ГРАД - БГ" ООД, 2011. – Том 23. – С.91-95.
69. Макаров, Р.И. Управление качеством листового стекла (флоат-способ) [Текст]/ Р.И. Макаров, В.В. Тарбеев, Е.Р. Хорошева, Ю.М. Попов, В.Н. Чуплыгин. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2004. – 152с.
70. Маневич, В.Е. Сырьевые материалы, шихта и стекловарение [Текст] / В.Е. Маневич, К.Ю. Субботин, В.В. Ефременков // под ред. д.т.н. В.Е. Маневича. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2008. – 224с. – ISBN 978-5-94026-012-7

71. Марголис, Б.И. Математическое моделирование и оптимизация технологического процесса отжига стеклоизделий [Текст] /Б.И. Марголис, А.В. Шичков // Автоматизация и проектирование в промышленных системах: Межвузовский сборник научных трудов/ Тверской государственный технический университет. – 1994. – С.65-69.
72. Марголис, Б.И. Математическое моделирование и оптимизация процессов отжига стеклоизделий: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. − Тверь, 1994. – 112 с.
73. Марголис, Б.И. Моделирование температурных полей в стеклоизделиях при их отжиге [Текст] / Б.И. Марголис// Стекло и керамика. – 2003. – №2. – С.3-5.
74. Марголис, Б.И. Нахождение оптимального режима отжига стеклоизделий, обеспечивающего минимальные энергозатраты [Текст] / Б.И. Марголис // Стекло и керамика. – 2003. –№5. – С.12-13.
75. Марголис, Б.И. Программное обеспечение автоматизированной системы стабилизации остаточных напряжений при отжиге стеклоизделий [Текст] / Б.И. Марголис, А.А. Шейнман // Автоматизация химических производств: Межвузовский сборник научных трудов / Московский институт химического машиностроения. – 1990. – С.116-119.
76. Марголис, Б.И. Структура автоматизированной системы расчета режимов отжига стеклоизделий [Текст] / Б.И. Марголис // Стекло и керамика. – 2003. – №4. – С.3-5.
77. Медведев, В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 [Текст] / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с. – ISBN 5–86404–163–7
78. Молодкин, А.В. Анализ и управление производством листового стекла [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.01 / Молодкин Алексей Васильевич. - Бор, 2005. -19 с.
79. Нейронные сети. Statistica Neural Networks [Текст]/ Пер. с англ. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 184 с. – ISBN 5–93517–015–9

80. Никитин, В.А. Управление качеством на базе стандартов ИСО 9000:2000 [Текст] / В.А. Никитин, В.В. Филончева. – 2-е издание. – Спб.: Питер, 2005. – 127 с.
81. Никифоров, А.Д. Управление качеством [Текст] / А.Д. Никифоров. – М.: ДРОФА, 2004. –720с. – ISBN 5-7107-6970-3.
82. Новицкий, Н.И. Управление качеством продукции [Текст] / Н.И. Новицкий. – М.: ООО «Новое знание», 2002. – 367с.
83. Обухов, Ю.М. Контроль технологического процесса нагрева в производстве закаленного стекла [Текст] / Ю.М. Обухов, Р.И. Макаров // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21): сб. тр. XXI Междунар. науч. конф.: В 11 т. Т.11: Осенняя школа молодых ученых / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.С. Балакирева; Тамб. гос. техн. ун-та. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. − С.129-131.
84. Огрызков, С.А. Исследование и разработка интегрированной системы управления (ИСУ) производства листового стекла [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.01/Огрызков Станислав Анатольевич. − Владимир, 2007.
85. Пащенко, Ф.Ф. Введение в состоятельные методы моделирования систем [Текст] / Ф.Ф. Пащенко; в 2-х ч.; Ч.1. Математические методы моделирования систем. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 328 с.: ил. – ISBN 5-279-02922-X
86. Полунина, О.В. Анализ стабильности процесса моллирования в производстве многослойных автомобильных стекол [Текст] / О.В. Полунина // Анализ точности и стабильности процессов. Сравнительная оценка методов анализа: сборник научных трудов. – LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – С.187-24.
87. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности [Текст] / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528с. – ISBN 5- 89638-042-9.
88. Р 50.1.028 – 2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования [Текст]. – Введ. 2001-07-02. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2003. – 49 с.: ил.

89. Репин, В.В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов [Текст] / В.В. Репин, В.Г. Елиферов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2008 – 408 с. – ISBN 978-5-94938-063-5
90. Рыбашов, М.В. Градиентные методы решения линейных равенств, неравенств и задач линейного программирования на АВМ [Текст] / М.В. Рыбашов, Е.Е. Дудников. – Изд-во "Советское радио", 1970. –144с.
91. Свиткин, М.З. Интегрированные системы менеджмента [Текст] / М.З. Свиткин// Стандарты и качество. – 2004. - № 2.
92. Свиткин, М.З. От менеджмента качества к качеству менеджмента [Текст] / М.З. Свиткин. // Методы менеджмента качества. – 2000. – № 4. – С.18-22.
93. Системный анализ в экономике и организации производства [Текст]/ С.А. Валуев, В.Н. Волкова, А.П. Градов [и др.]; под общей ред. С.А. Валуева, В.Н. Волковой. – Л.: Политехника, 1991. – 398 с.
94. Системный анализ и принятие решений. Словарь-справочник [Текст] / под ред. В.Н. Волковой, В.Н.Козлова. – М.: Высш. шк., 2004. – 616с. – ISBN 5-06-004875-6.
95. Смирнов, Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений [Текст]/ Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Физматгиз, 1958. – 436 с.
96. Солинов, В.Ф. Влияние параметров формования на термомеханические свойства листового силикатного стекла [Текст] / В.Ф. Солинов, Т.В. Каплина, А.В. Гороховский // Стекло и керамика. – 1992. –№ 5. – С.7-8.
97. Справочник по производству стекла [Текст]: том 1 / под ред. Китайгородского И.И., Сильвестровича С.И. – М.: Госстройиздат, 1963. – 1014 с.
98. Суворов, Е.В. Анализ и управление производством безопасного многослойного стекла для автомобильного транспорта [Текст]: автореф. дис. канд. тех. наук: 05.13.01 / Суворов Е.В. - Бор, 2007. -22 с.
99. Тарбеев, В. В. Производство листового и безопасного стекла в России [Текст]/ В. В. Тарбеев // Стекло и керамика. – 1998.

100. Тарбеев, В. В. Производство стекла [Текст] / В. В. Тарбеев, Д.Н. Шепелев, А.И. Бутняков, Т.Г. Цепелева – Н.Новгород: ФГУИПП "Нижполиграф", 2002. – 224 с.: ил. – ISBN 5-7628-0244-2

101. Тарбеев, В. В. Процессный подход и статистические методы в управлении качеством триплекса [Текст] / В. В. Тарбеев, В. Н. Чуплыгин, Р. И. Макаров, Е. Р. Хорошева // Стекло и керамика. – 2004. – №7.

102. Управление качеством автомобильного стекла [Текст]: монография / Р.И. Макаров [и др.] – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 280 с.

103. Федосеев, В.В. Экономико-математические методы и прикладные модели [Текст] / В.В. Федосеев, А.Н. Гармаш, Д. М. Дайитбегов, И.В. Орлова, В.А. Половников: под ред. В.В. Федосеева. – М.: ЮНИТИ, 1999. – 391 с.

104. Федюкин, В.К. Управление качеством процессов [Текст]/ В.К. Федюкин. – СПб.: Питер, 2004. – 208с. – ISBN 5-94723-962-0.

105. Фейгенбаум, А.В. Интервью, статьи и речи по вопросам полного контроля качества: [Текст] / А.В. Фейгенбаум – М.: Б. и., 1990. – 66 с.: ил. – На рус.яз. - Российская Федерация. – Тираж 150 экз.

106. Цветков, Э.И. Нестационарные случайные процессы и их анализ [Текст]/ Э.И. Цветков – М.: "Энергия", 1973. – 128 с.

107. Черемных, С.В. Структурный анализ систем: IDEF-технологии [Текст]/ С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 208с. – ISBN 5-279-02433-3.

108. Чуплыгин, В.Н. Управление качеством безопасного многослойного стекла для автомобильного транспорта [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.01 / Чуплыгин Владимир Николаевич. - Бор, 2005. -22 с.

109. Швырков, В.В. Тайна традиционной статистики запада [Текст]/В.В. Швырков. − М.: Финансы и статистика, 1998. − 144 с. – ISBN 5-279-019641.

110. Шориков, А.В. Автоматизация технологического процесса формования ленты стекла на расплаве олова [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.06 / Шориков Андрей Владимирович. − Владимир, 2003, -16 с.

111. Шутов, А. И. Алгоритм расчета нелинейных режимов термообработки листового стекла [Текст] / А. И. Шутов, А. С. Остапко, Т. С. Остапко // Стекло и керамика. – 2003. – №7.

112. Шутов, А. И. Влияние параметров сложной термической обработки на свойства листового стекла [Текст] / А. И. Шутов, А. С. Остапко, Т. С. Остапко // Стекло и керамика. – 2003. – №7.

113. Щукин, М.В. Исследование и разработка системы управления производством листового стекла с учетом экологических аспектов [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.13.01 / Щукин М.В. − Бор, 2007. – 20 с.

114. Юнева, Е. В. Совершенствование технологии флоат-процесса листового стекла с высокими оптическими показателями [Текст]: автореф. дис. … канд. тех. наук: 05.17.11/ Юнева Е.В. – Белгород, 2007.

115. Anil, K. J. Artificial Neural Networks: A Tutorial [Текст] / K. J. Anil, Mao Jianchang, K.M. Mohiuddin // Computer. – 1996. – Volume 29, No.3. – pp. 31-44.

116. Boldrini, M. Scientific truth and statistical method [Текст] / M. Boldrini // New York: Hafner publishing Co. – 1972.

117. Deming, W.E. The New Economics for Industry, Government, Education: 2nd ed. [Текст] / W.E. Deming. – MIT Press, 2000.

118. Green, W. H. Econometrics analysis [Текст] / W. H. Green // New York. – 2000.

119. Harber, R. Structure identification of nonlinear systems – A survey on input/output approaches [Текст]/ R. Harber, H. Unbehaunen // Automatica. – 1990. – Volume 26, No.43.

120. Hertz, J. Introduction to the Theory of Neural Computation [Текст] / J. Hertz, A. Krogh, R.G. Palmer // Addison-Wesley, Reading, Mass. – 1991.

121. Ishikawa, K. QC Circle Koryo: General Principles of the QC Circle. [Текст] / K. Ishikawa // Tokyo: QC Circle Headquarters, Union of Japanese Scientists and Engineers. – 1980.

122. Ishikawa, K. What is Total Quality Control? The Japanese Way, D. J. Lu (trans.) [Текст] / K. Ishikawa // New Jersey: Prentice Hall. – 1985.

123. Ishikawa, K. How to Operate QC Circle Activities. Tokyo: QC Circle Headquarters [Текст] / K. Ishikawa // Union of Japanese Scientists and Engineers. – 1985.

124. Jalham, I. S. The Effect of Glass Plate Thickness and Type and Thickness of the Bonding Interlayer on the Mechanical Behavior of Laminated Glass [Текст] / I. S. Jalham, O. Alsaed // New Journal of Glass and Ceramics.– 2011.– №1.– p. 40-48.

125. Kramer, M.A. Nonlinear principal components analysis using autoassociative neural networks [Текст] / M.A. Kramer // AIChe Journal. – 1991.–Volume 2. – p. 233–243.

126. Lee,H. Glass Thickness and Fragmentation Behaviour in Stressed Glasses [Электронный ресурс] / H. Lee, S. Cho, K. Yoon // Режим доступа: http:// www.glassonweb.com/articles/article/833/ (дата обращения: 02.11.2013).

127. Mazanova, V.I. The process approach and statistical methods in quality control of hardened glass [Текст] / V.I. Mazanova, R.I. Makarov, Yu. M. Obukhov // Glass and Ceramics, Springer US. 2009. – vol.65 no.9 – pp.328–330.

128. McLeod, R. System analysis and design / An organizational approach [Текст] / R. McLeod // The Driden Press. – 2002.

129. Mognato, E., Thermally Toughened Safety Glass: Correlation between Flexural Strength, Fragmentation and Surface Compressive Stress [Текст] / E. Mognato, A. Barbieri, M. Schiavonato, M.//Glass Performance Days. – 2011. – pp. 115-118.

130. Mustonen, J. Traditional but challenging Bent Tempered Glazing [Электронный ресурс] / J. Mustonen, M. Eronen // Режим доступа: http://www.glassonweb.com/ articles/article/590 (дата обращения: 02.11.2013).

131. Patterson, D. Artificial neural networks [Текст] / D. Patterson // Singapore: Prentice Hall. – 1996.

132. Quality Control Handbook, New York, New York: McGraw-Hill, 6th edition, 2010

133. Redner, A. S. Correlation between Strength and Measured residual stress in tempered glass products [Текст] / A. S. Redner, M. Schiavonato, E. Mognato // Journal of ASTM International. – 2005. –Vol. 2, No. 3. – pp. 85-94.

134. Schiavonato, M. Stress Measurement, Fragmentation and Mechanical Strength [Текст] / M. Schiavonato, E. Mognato, A. S. Redner // Glass Performance Days. – 2005. – pp. 92-95.

135. Shepherd, A.J. Second-order methods for neural networks [Текст] / A.J.Shepherd // New York: Springer. – 1997.

136. Shewhart, W. Statistical method from the viewpoint of quality control [Текст] / W. Shewhart // The Graduate School, the Department of Agriculture, Deming. Washington, D.C. – 1939. – pp. 155.

137. Speckt, D.F. A generalized regression neural networks [Текст] / D.F. Speckt // IEE transactions on neural networks. – 1991. –Volume 6. – p. 568–576.

138. Поляк, Б.Т. Введение в оптимизацию / Б.Т. Поляк. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. –384 с.

Приложение А Акт опытно-промышленных испытаний Проектно-конструкторского бюро автоматизации производства ООО «ПКБ АП»

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

«17» 03 2022 г.

АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ
программы автоматизированного расчета параметров
режима закалки стекла для автомобильного транспорта

Сотрудники Тверского государственного технического университета заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов» (АТП) Марголис Б. И. и Владимирского государственного университета, соискатель кафедры АТП Андрианова В.И. совместно с сотрудниками Проектно-конструкторского бюро автоматизации производств ООО «ПКБ АП» главным конструктором Беловым Ю.Н., ведущим специалистом Садиковым М.И. в период с 15.03.2022 по 16.03.2022 на персональном компьютере провели испытания программы автоматизированного расчета параметров режимов закалки стекла для автомобильного транспорта.

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

2. Испытания предусматривали расчет оптимального режима закалки стекла для автомобильного транспорта с учетом требований к геометрической форме закаленного стекла, а также диапазона допустимых значений режимных переменных процесса закалки стекла.

3. Производился расчет и анализ режима закалки гнутых закаленных стекол для автомобильного транспорта цеха закалки ПКО «Автостекло» ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод».

В результате испытаний установлена работоспособность программы и возможность использования ее для расчета оптимального режима закалки стекла.

Для поддержания требуемого качества закаленного стекла, определяемого параметрами геометрической формы и механической прочности стекла, возможности программы были использованы для расчета

оптимального режима закалки, обеспечивающего допустимые отклонения кромки стекла от контрольного шаблона, допустимое отклонение образующей цилиндра, а также требуемые параметры механической прочности закаленного стекла. Внедрение предложенного метода расчета оптимального режима закалки позволит сократить потери от брака при производстве закаленного стекла.

Таким образом, программа автоматизированного расчета параметров режима закалки стекла продемонстрировала свою работоспособность и может быть использована в ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод» для расчета оптимального режима закалки стекла для автомобильного транспорта.

От Проектно-конструкторского бюро автоматизации производств ООО «ПКБ АП»	От Тверского государственного технического университета ТвГТУ
Главный конструктор	Заведующий кафедрой АТП
_____ Белов Ю.Н.	_____ Марголис Б. И.
Ведущий специалист	Соискатель кафедры АТП
_____ Садиков М.И.	_____ Андрианова В. И.

Приложение Б Заключение на диссертацию ООО «Стромизмеритель»

УТВЕРЖДАЮ

Президент ООО Стромизмеритель
д.т.н._____ Субботин К.Ю

«22» 03 2022 г.

Заключение
на диссертацию Андриановой В.И. «Моделирование и управление технологическим процессом закалки стекла для автомобильного транспорта» по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)»

Перспективы развития российского производства автомобильного стекла связаны, в первую очередь, с расширением спроса на продукцию. Что требует от производителей выпускать качественную продукцию, соответствующую требованиям автосборщиков и автопроизводителей. В России таким документом являются технические условия ИСО/ТУ 16949:2009, в которых содержатся требования к системам менеджмента качества в области автомобилестроения, основанные на требованиях международного (*ISO* 9001:2008) и национальных стандартов.

Анализ состояния современных систем управления производством закаленных стекол для автомобильной промышленности показывает важность проведения теоретических исследований и разработок, направленных на совершенствование существующих систем управления технологическими процессами. Это определяет актуальность диссертационной работы Андриановой В.И., в которой решается задача повышения качества вырабатываемых изделий за счет автоматизации управления технологическим процессом закалки стекла.

Объектом исследования в работе является технологический процесс производства безопасного закаленного гнутого стекла для автомобильного транспорта в ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод». Анализ проводится с использованием статистических данных, полученных на производстве в течение полутора лет выработки гнутых закаленных автомобильных стекол.

Произведена оценка точности и стабильности технологических процессов и качества вырабатываемой продукции. Выявлены резервы для повышения качества вырабатываемых закаленных стекол.

Разработано формализованное описание (в виде структурных моделей) технологического процесса закалки, которое позволило выявить критичные технологические стадии процесса, определяющие качество вырабатываемых изделий. Влияние технологических режимов стадий закалки на геометрические параметры и механическую прочность закаленного стекла описывается с помощью нейросетевых моделей, которые позволяют учитывать нелинейные зависимости.

В работе сформулирована и решена задача оптимизации управления технологическим процессом закалки гнутого стекла. Критерий управления, отражает требования к характеристикам закаленных стекол. Эффективность разработанного алгоритма управления подтверждена имитационным моделированием с использованием программы автоматизированного расчета параметров режима закалки стекла. Показана возможность дальнейшего повышения точности изготовления гнутых закаленных стекол на действующем производстве.

Выполненная диссертационная работа вносит определенных вклад в теорию управления непрерывными технологическими процессами. В ней показана применимость аксиоматического анализа для оценки точности и стабильности нестационарных технологических процессов.

Результаты исследований имеют практическое значение: определяют перспективы практического использования моделей на нейронных сетях и предложенного алгоритма управления в системах управления технологическими процессами и в системах менеджмента качества предприятий, производящих закаленное автомобильное стекло.

Разработанные модели и алгоритмы управления рекомендуется использовать в системах поддержки принятия решений технологов для коррекции режимов закалки в производстве гнутых автомобильных стекол.

Первый заместитель генерального директора,
к.т.н. Ефременков В.В.

Приложение В Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе кафедры ИСПИ ВлГУ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной деятельности ВлГУ
_____ А. А. Панфилов
«24» 03 2022 г.

А К Т
об использовании результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Андриановой Валентины Ивановны
«Моделирование и управление технологическим процессом закалки стекла для автомобильного транспорта»
в учебном процессе Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)

Основные научные результаты диссертации Андриановой В.И. «Моделирование и управление технологическим процессом закалки стекла для автомобильного транспорта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)», используются в учебном процессе кафедры ИСПИ ВлГУ для подготовки бакалавров по направлениям 09.03.02 «Информационные системы и технологии» и 09.03.04 «Программная инженерия».

Материалы диссертации вошли в состав курсов лабораторных и практических занятий по дисциплине «Проектирование информационных систем».

В рамках направления диссертационной работы под руководством соискателя успешно защищены две выпускные квалификационные работы по направлению 09.03.02 «Информационные системы и технологии».

Заведующий кафедрой ИСПИ,
д.т.н., профессор **И. Е. ЖИГАЛОВ**