

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

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

Официальные оппоненты: Гатчин Юрий Арменакович, доктор технических наук, профессор, доцент факультета безопасности информационных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

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

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Защита состоится «14» февраля 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

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

Автореферат разослан «___» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



С.М.Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

Перспективы развития российского производства автомобильного стекла связаны с расширением спроса на продукцию. Совершенствование технологии производства и повышение ее экономичности позволяет успешно решать проблемы качества стекла.

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. Важную роль в повышении качества продукции также играет автоматизация производственных процессов.

Однако на сегодняшний день большинство научных исследований в области автоматизации управления технологическими процессами и повышения качества производимой продукции посвящены листовому стеклу, которое используется в качестве заготовок при производстве закаленного автомобильного стекла.

Результаты научных исследований в области автоматизации и управления производством закаленного стекла с целью повышения его качества представлены работами российских исследователей Суворова Е.В., Макарова Р.И. и Обухова Ю.М. Исследованию вопросов повышения механической прочности закаленного автомобильного стекла посвящены работы японских авторов *M. Schiavonato, E. Mognato, Lee H., Cho S.* и др. Результаты исследований характера разрушения закаленного стекла для наземного транспорта представлены в работах финских авторов *M. Eronen, M. Saarela* и *J. Mustonen*.

Проведенный анализ позволил определить направления исследований в области управления производством и повышения качества закаленного автомобильного стекла. Актуальной научной задачей является разработка математических моделей, алгоритмов и программных средств, применение которых на производстве закаленного стекла позволит повысить качество выпускаемой продукции.

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 поставленной цели 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 критические 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.

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

Научная новизна работы, состоит 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.

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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурные модели технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта, позволившие выявить ключевые по-

казатели 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.

Достоверность и обоснованность 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.

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.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 19 публикациях, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах WoS и Scopus.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Содержит 121 страницу основного текста, включает 38 рисунков, 24 таблицы, список литературы из 138 наименований, 3 приложения с заключением и актами использования и опытно-промышленных испытаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и определены решаемые в диссертации научные задачи. Изложена научная новизна, теоретическая ценность и практическая значимость результатов работы. Обоснованы выбранные методы исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Технологический процесс производства закаленного стекла для автомобильного транспорта и обеспечение качества» рассмотрен технологический процесс закалки стекла и его технологические стадии, этапы, операции. По данным литературных источников приведены определения терминов «закаленное стекло» и «закалка».

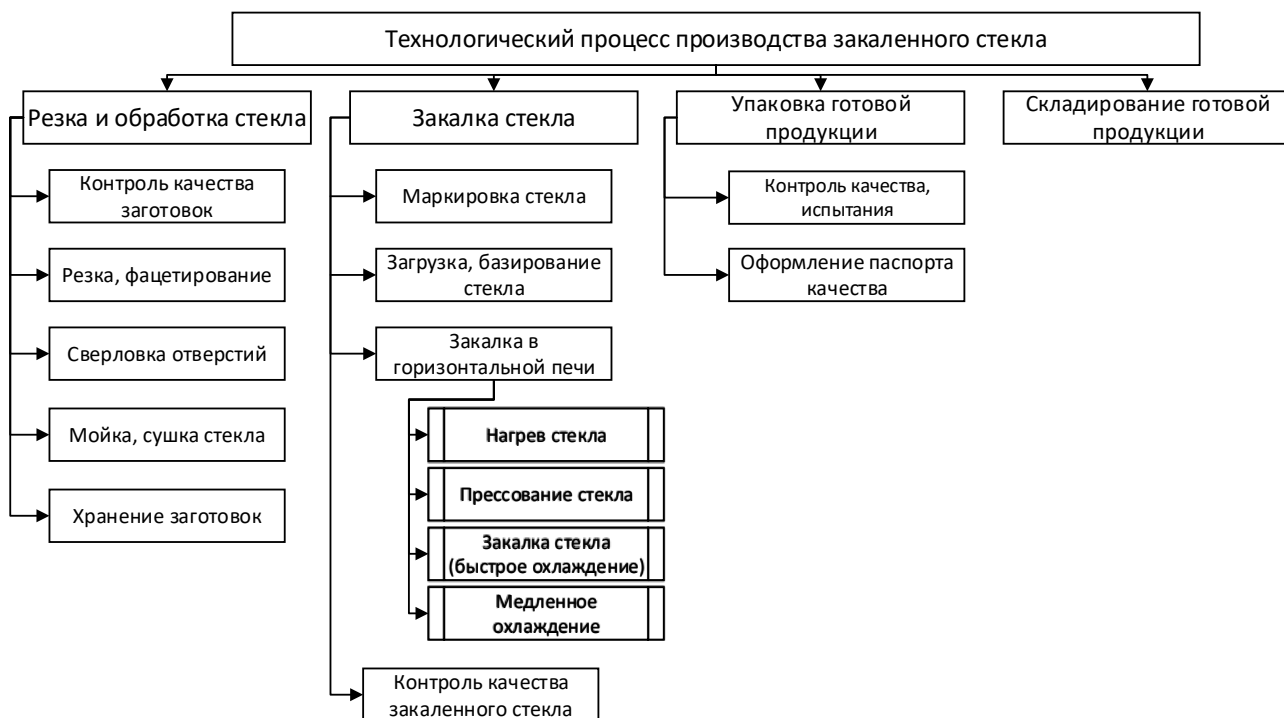


Рисунок 1 – Структурная схема технологического процесса закалки стекла

Детально технологический процесс производства закаленного автомобильного стекла отражен в моделях технологического процесса (рисунок 2), разработанных с использованием графической нотации *IDEF0* методологии структурного анализа и проектирования (*SADT*).

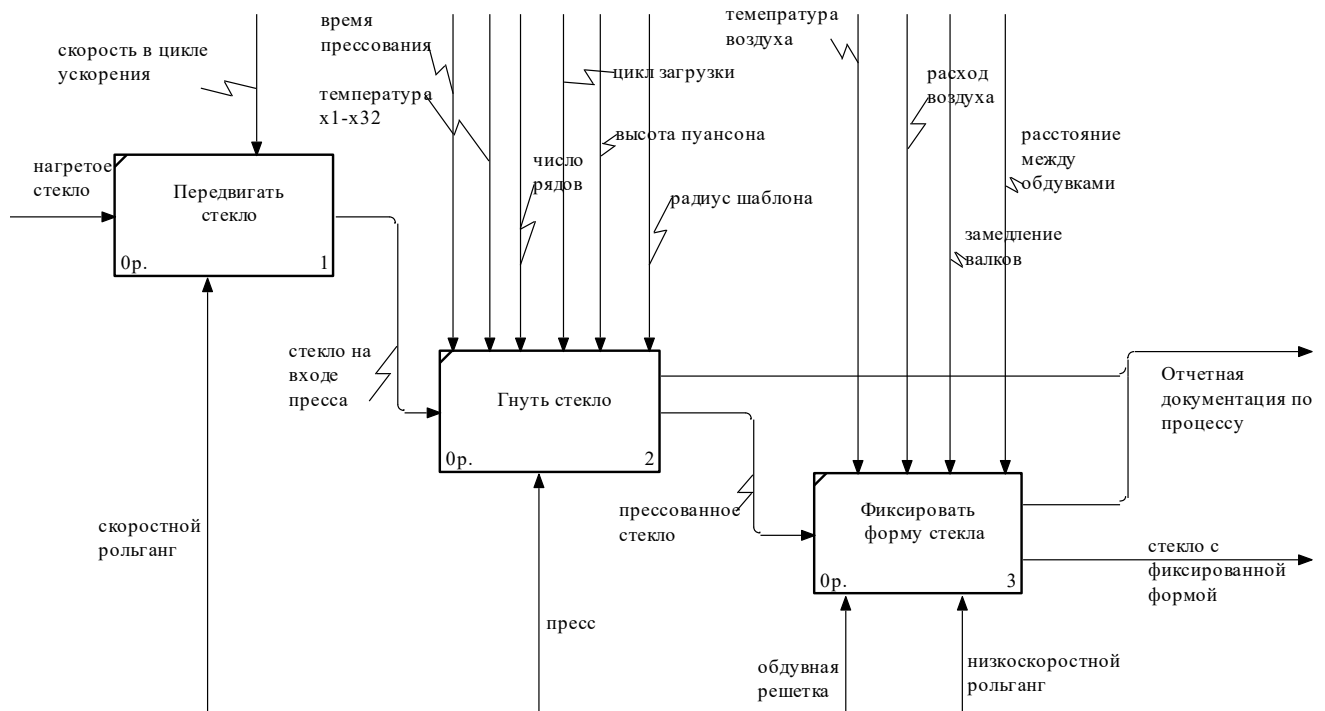


Рисунок 2 – IDEF0 модель «Прессовать стекло»

Подробно рассмотрено оборудование этапов закалки и прессования, используемое в ПКО «Автостекло» ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод». В результате анализа технологического процесса закалки стекла была разработана структурная схема технологического процесса как объекта управления (рисунок 3). Были выделены группы параметров, описывающие текущее состояние объекта.

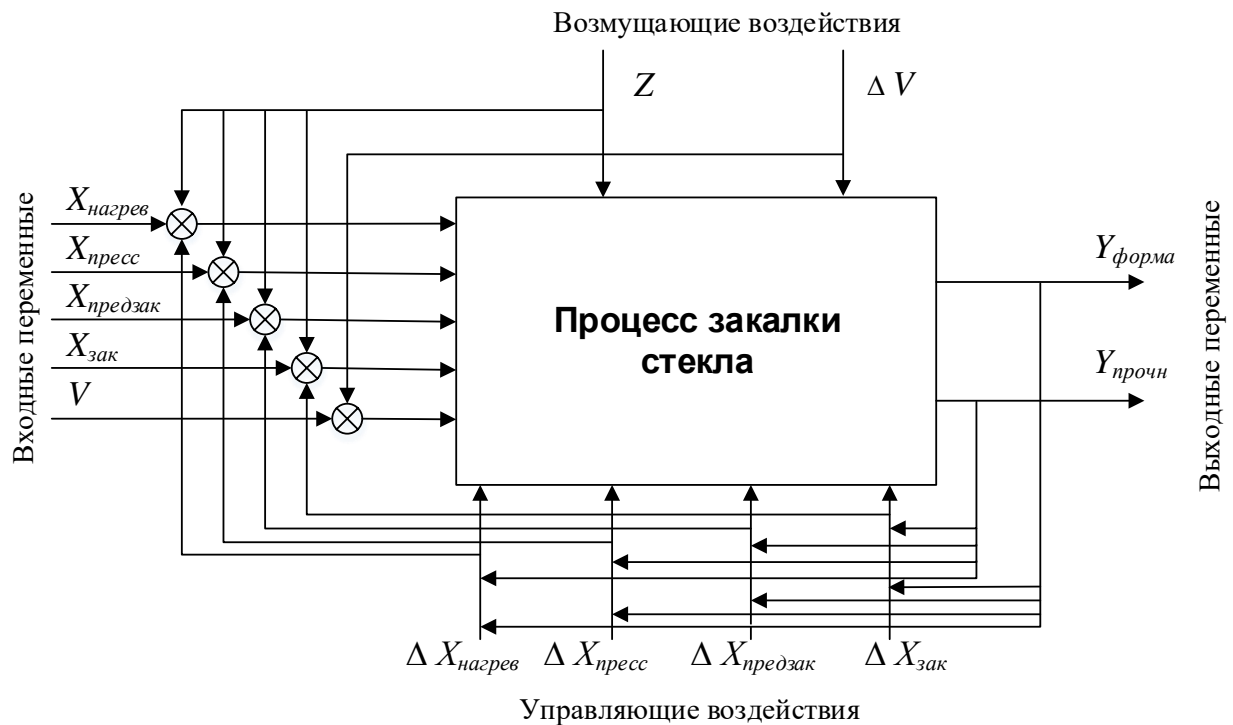


Рисунок 3 – Технологический процесс закалки стекла как объект управления

На структурной схеме объекта управления введены следующие обозначения.

- Входные переменные - 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:

$$X_{нагрев} = (x_t, x_{33}, x_{34}), \quad (1)$$

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, т.е.

$$x_t = (x_1, \dots, x_{32}). \quad (2)$$

К подмножеству переменных, определяющих режим прессования стекла, относятся:

$$X_{пресс} = (x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}, x_{39}, x_{40}, x_{41}, x_{42}, x_{43}, x_{44}, x_{45}, x_{46}), \quad (3)$$

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:

$$X_{предзак} = (x_{47}, x_{48}, x_{49}), \quad (4)$$

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:

$$X_{зак} = (x_{50}, x_{51}), \quad (5)$$

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

Множество входных контролируемых неуправляемых переменных:

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6), \quad (6)$$

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.

- Выходные переменные Y :

$$Y = (Y_{форма}, Y_{прочн}), \quad (7)$$

$$Y_{форма} = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5), \quad (8)$$

$$Y_{прочн} = (y_6, y_7, y_8), \quad (9)$$

где $Y_{форма}$ – множество выходных переменных, описывающих геометрию закаленного стекла; $Y_{прочн}$ – множество выходных переменных, описывающих механиче-

скую 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.

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

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

В результате анализа формализованного описания технологического процесса производства закаленного стекла были определены ключевые характеристики стекла, которые подлежат особому контролю в производстве:

- 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.

Для обеспечения необходимого уровня показателей качества закаленного автостекла необходимо контролировать и поддерживать выделенные ключевые характеристики на протяжении всего процесса производства.

Кроме того, выявлены критические технологические процессы. Закалка является одним из процессов, влияющих на качество вырабатываемого стекла.

Во второй главе «Оценка качества технологической системы и технологических процессов производства закаленного стекла» проведена оценка технологической системы по параметрам производительности (ритмичность производства, коэффициент использования оборудования, коэффициент годной упакованной продукции, выход продукции), а также оценка отлаженности технологических процессов по режимным переменным и показателям качества готовой продукции.

Оценка технологической системы по параметрам производительности осуществлялась с использованием математического аппарата временных рядов и традиционных статистических методов.

Таблица 1 – Оценки временных рядов показателей производительности технологической системы

Показатели	Тренд во времени	Сезонная компонента	
		Амплитуда	Период (месяцы)
Выработка, шт/месяц	$-12707 \cdot t$	50000	12
Ритмичность, шт/час	$0,2t^3 - 5,02t^2 + 23,9t$	24,19	5,47
Коэффициент использования оборудования, %	$-0,000t^2 + 0,0028t$	0,13	3,17
Выход годного стекла, %	$-0,95t^2 + 10,2t$	33,8	2,57
Уровень дефектности	$29,64t^2 - 543,5t$	800	12

Проведенный анализ показал наличие в моделях тренда и гармонической составляющей, свидетельствующих о недостаточной стабильности показателей технологической системы и возможности дальнейшего увеличения выхода годной продукции на действующем производстве.

Отлаженность технологического процесса закалки стекла оценивалась по режимным переменным стадий нагрева и прессования стекла. В выборку вошли статистические данные производства гнутого закаленного стекла, собранные в течение 9 месяцев. Анализ температурного режима в камерах нагрева печи закалки, выполненный с использованием традиционных методов, показал его стабильность и высокую точность: коэффициент вариации температур относительно среднего уровня не превышает 4,3%.

Оценка отлаженности стадии прессования с применением традиционного подхода к контролю точности и стабильности режимов выявила высокую вариативность всего двух из восьми контролируемых параметров: высота пуансона 1 (34,3%) и интервал левый 1 (26,3%). Данный факт объясняется периодической перенастройкой прессы на выработку стекол других типов. Остальные технологические параметры прессования имеют средний коэффициент вариации, не превышающий величины 6,9%.

Неоднородность данных температурного режима закалки и режима прессования (на это указывают расчетные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса) ограничивает возможность корректного использования традиционных статистических методов контроля, исходящих из предположения о нормальности распределения анализируемых данных. Игнорирование данного факта может привести к ошибочным выводам о стабильности анализируемых процессов.

Вместо традиционного метода статистического контроля для оценки отлаженности технологического процесса в работе используется метод аксиоматического анализа контроля качества. Аксиоматический анализ 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.

Анализ стабильности состоит в проверке выполнения условий трех принципов: принцип порядка, принцип сходства, принцип соответствия. В случае выполнения трех принципов подтверждается предпосылка о репрезентативной однородности выборки. Результаты проверки стабильности режимных переменных процесса закалки стекла, полученные традиционными статистическими методами и с помощью аксиоматического анализа, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оценки стабильности температуры в печи нагрева

Результаты проверки	Температура в камерах нагрева печи закалки							
Обозначение переменной	x_2	x_4	x_{15}	x_{16}	x_{18}	x_{20}	x_{30}	x_{32}
<i>Статистические оценки</i>								
Коэффициент вариации, %	3,8	4,3	1,8	2,0	1,7	2,5	1,8	2,9
Коэффициент асимметрии	-3,78	-4,66	-1,79	-1,85	0,3	3,8	-0,41	2,96
Коэффициент эксцесса	1,54	5,0	0,32	-0,36	-0,44	1,69	-0,37	0,32
<i>Аксиоматические оценки</i>								
Принцип порядка	+	+	+	+	+	+	+	+
Коэффициент сходства K_c	0,49	0,66	0,84	0,88	0,87	0,39	0,55	-0,18
Принцип сходства	–	+	+	+	+	–	+	–
Принцип соответствия	–	+	+	+	+	–	+	–

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

Результаты аксиоматического анализа свидетельствуют о том, что температурный режим закалки стекла нестабильный: одновременное выполнение трех принципов наблюдается только у пяти термопар. Режим прессования также характеризуется значительной вариабельностью.

Сопоставление результатов оценки стабильности и точности технологического процесса, получаемых с использованием традиционных статистических методов и с помощью аксиоматического анализа, выявило их несоответствие. Доказана целесообразность применения метода аксиоматического анализа для контроля и управления технологическим процессом закалки автомобильных стекол.

В третьей главе «Исследование и разработка моделей, описывающих процесс закалки автомобильного стекла» обоснован выбор типа математических моделей, приведены результаты исследований и разработки математических моделей на нейронных сетях, описывающих зависимость характеристик закаленного стекла от параметров режима закалки.

Для построения моделей использовались данные пассивного эксперимента, представляющие результаты измерения 18 режимных переменных и показателей качества вырабатываемого стекла в режиме нормальной эксплуатации технологического оборудования. Учитывались ограничения технологического регламента, накладываемые на диапазон изменения режимных переменных (таблица 3).

Система неравенств (10) задает требования к отклонению формы стекла от чертежа в миллиметрах по ГОСТ 32565–2013. Геометрическая форма вырабатываемого стекла оценивались по отклонению стекла от шаблона и отклонению об-

разрушающей цилиндра. Характер разрушения стекла оценивался по минимальному и максимальному количеству осколков и максимальной длине. Допустимая погрешность модели принималась равной погрешности измерения показателей качества закаленного стекла.

$$\begin{aligned} 0 \leq y_1 &\leq 1,5 \\ 0 \leq y_2 &\leq 1,5 \\ 0 \leq y_3 &\leq 1,5 \\ 0 \leq y_4 &\leq 1,5 \\ -1 \leq y_5 &\leq 2 \end{aligned} \quad (10)$$

Таблица 3 – 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, $^{\circ}C$	x_2	555-585
Камера 1 Зона 11, $^{\circ}C$	x_4	520-575
Камера 2 Зона 2, центр, $^{\circ}C$	x_{15}	575-605
Камера 2 Зона 12, $^{\circ}C$	x_{16}	560-590
Камера 3 Зона 1, центр, $^{\circ}C$	x_{18}	600-665
Камера 3 Зона 11, $^{\circ}C$	x_{20}	590-655
Камера 4 Зона 2, центр, $^{\circ}C$	x_{30}	597-670
Камера 4 Зона 12, $^{\circ}C$	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), $^{\circ}C$	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

Выбор архитектуры нейронной сети и алгоритмов обучения проводился с помощью автоматического конструктора сети *Intelligent Problem Solver* пакета *Statistica Neural Networks* (рисунок 4).

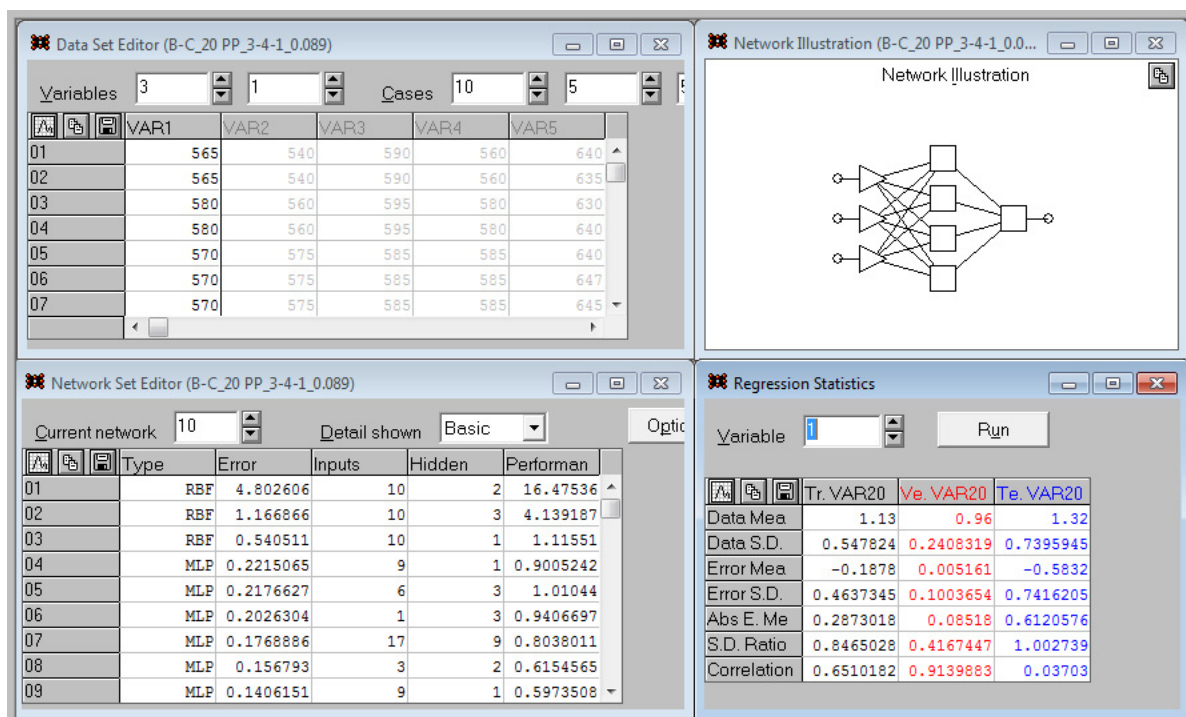


Рисунок 4 – Результаты построения модели y_2

Разработаны модели, адекватно описывающие зависимость отклонения формы стекла (y_1 - y_5) и характера разрушений при испытаниях (y_6 - y_8) от технологических режимов стадий процесса закалки (таблица 4).

Таблица 4 – 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
y_6	3-3-1	97,5	104	7,80	0,99
y_7	4-5-1	87,8	8,66	4,915	0,94
y_8	3-5-1	84,7	6,64	3,44	0,93

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

Полученные модели характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации, значимость которых подтверждена расчетными значениями F -критерия.

В процессе разработки нейросетевых моделей установлена зависимость характеристик вырабатываемого от режимов стадий процесса закалки. Кроме того, выявлено влияние размера стекла и формы (левое, правое) на его характеристики.

Проведен сравнительный анализ точности разработанных нейросетевых моделей с регрессионными моделями из научных работ Макарова Р.И., Суворова Е.В., Обухова Ю.М. Нейросетевые модели отличаются высокой точностью по сравнению с регрессионными, однако достигнутая точность моделей, оцениваемая величиной среднеквадратичной погрешности, не удовлетворяет заданным требованиям. Нейросетевые модели, обученные на фиксированной выборке, не обеспечивают заданную точность описания технологического процесса в широком диапазоне изменения режимных переменных процесса закалки. Для дальнейшего повышения точности нейросетевых моделей необходимо их периодически обучать в процессе эксплуатации.

В четвертой главе «Алгоритм управления технологическим процессом закалки стекла» сформулирована задача оптимизации подбора режимов закалки, разработан алгоритм управления, приведены результаты имитационного моделирования функционирования технологического процесса закалки с предложенным алгоритмом управления, доказывающие возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

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 переменных процесса закалки, задаваемый технологическим регламентом. С учетом данных условий функция цели управления технологическим процессом закалки стекла принимает вид:

$$F = \min \sum_{i=1}^5 y_i \quad (11)$$

при выполнении следующей системы ограничений

$$\left\{ \begin{array}{l} y_i \leq y_{i, \text{зад}} \text{ для } i=1, 2, \dots, 5 \\ y_i \leq y_{i, \text{зад}} \text{ для } i=6, 8 \\ y_7 \geq y_{7, \text{зад}}; \\ x_{n, \text{min}} \leq x_n \leq x_{n, \text{max}} \text{ для } n=1, 2, \dots, 18, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (12) \\ (13) \\ (14) \\ (15) \end{array}$$

где $y_{i, \text{зад}}$ – 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 (12) требует, чтобы неприлегание по сторонам стекла и отклонение образующей цилиндра не превышало заданной величины $y_{i, \text{зад}}$. Второе ограничение (13) определяется требованиями на характер разрушения стекла при испытаниях. Максимальное количество осколков y_6 и наибольшая длина осколков y_8 не должны превышать значений $y_{i, \text{зад}}$, указанных в ГОСТ. Неравенство (14) ограничивает минимальное количество осколков при испытаниях изделий, кото-

рое 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 3).

Решаемая задача управления является задачей оптимизации и заключается в определении оптимального статического режима закалки, при котором критерий (11) 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:

$$D = \sum_{i=1}^6 w_i \max\left(\frac{y_i - y_{i,\text{зад}}}{y_{i,\text{зад}}}, 0\right) + w_7 \min\left(\frac{y_7 - y_{7,\text{зад}}}{y_{7,\text{зад}}}, 0\right) + w_8 \max\left(\frac{y_8 - y_{8,\text{зад}}}{y_{8,\text{зад}}}, 0\right), \quad (16)$$

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 (12 - 15). Тогда целевая функция принимает следующий вид:

$$F = \min\left(\sum_{i=1}^5 y_i + \lambda D\right), \quad (17)$$

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

Разработан алгоритм управления процессом закалки стекла, позволяющий вычислять оптимальные значения режимов стадий процесса закалки. Учитывая нелинейность нейросетевых моделей и случайный характер контролируемых переменных, для процедуры поиска оптимального решения по коррекции режима закалки стекла использовался метод покоординатного спуска. Для проведения вычислительного эксперимента была реализована программа автоматизированного расчета параметров режима закалки стекла в среде *MS Excel*. В разделе 4.3 приведено подробное описание работы программы. Величина шага изменения режимных переменных при поиске не превышала 10% диапазона изменения режимных переменных. Для повышения точности вычислений параметры нейросетевых моделей корректируются в процессе эксплуатации с использованием текущей информации о характеристиках вырабатываемого стекла и технологических режимах стадий процесса закалки.

Имитационным моделированием функционирования технологического процесса закалки оценивалась эффективность разработанного алгоритма управления. Вычислительный эксперимент проводился с использованием ретроспективных данных процесса закалки при производстве бесцветных гнутых боковых стекол. Результаты имитационного моделирования с использованием программы автома-

тизированного расчета параметров режима закалки и результаты ручного ведения процесса закалки приведены в таблице 5.

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 5 – Сравнительные характеристики вырабатываемых изделий при ручном ведении и программном моделировании процесса закалки

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

Стабилизация характеристик стекла достигается за счет определения оптимального режима закалки. Сравнение режимов закалки стекла при программном моделировании с ручным ведением процесса 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%.

Имитационным моделированием функционирования технологического процесса закалки с предложенным алгоритмом управления и программой автоматизированного расчета оптимального режима закалки стекла, доказана возможность

повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

В главе даны предложения по использованию разработанного алгоритма управления в действующих и создаваемых системах поддержки принятия решений для технологов производства. Предложенный алгоритм позволит вырабатывать эффективные решения по коррекции режимов стадий процесса закалки в производстве гнутых автомобильных стекол.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 использовать в производстве закаленных автомобильных стекол.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК:

1. 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. (Соискатель – 70%).

2. 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) (Соискатель – 90%).

3. 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. (Соискатель – 30%).

4. 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. (Соискатель – 80%).

В изданиях, индексируемых в международных базах цитирования WoS и Scopus:

5. Mazanova, V.I. The process approach and statistical methods in quality control of hardened glass / V.I. Mazanova, R.I. Makarov, Yu. M. Obukhov // Glass and Ceramics, Springer US, 2009.- vol.65, no.9, pp.328 (Соискатель – 70%).

6. Andrianova, V.I. Automated Control of Tempering Process for Automobile Glass. / V.I. Andrianova, R.I. Makarov, E.R. Khorosheva // Glass and Ceramics, November 2015. - Volume 72, Issue 7, pp. 231-233 (Соискатель – 30%).

В прочих изданиях:

7. 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.

8. 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 (Соискатель – 80%).

9. 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.

10. 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.

11. 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. – С.23.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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. гос. национ. иссл. политехн. ун-та, 2013. – С.63-64 (Соискатель – 80%).

18. 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 (Соискатель – 80%).

19. Мазанова, В.И. Управление процессом закалки гнутого автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2013» Volume 40. Techniczne nauki. Fizyka.: Przemysł. Nauka i studia, 2013. – С.12-16.