

**ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
доктора технических наук, профессора**

**Темкина Игоря Олеговича
на диссертационную работу
Петрова Дмитрия Юрьевича**

**на тему «Методическое и программно-информационное обеспечение
автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью
многостадийного производства высококачественного листового стекла»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами»**

Актуальность диссертационного исследования

Диссертация Дмитрия Юрьевича Петрова посвящена решению проблемы рационального использования топливно-энергетических ресурсов и сырья энергоемкого промышленного многостадийного производства высококачественного листового стекла на основе разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления его энергоресурсоэффективностью.

Для повышения энергоресурсоэффективности и конкурентоспособности отечественной стекольной промышленности существенное значение имеет применение методов инжиниринга передовых наукоемких энергоресурсосберегающих цифровых интеллектуальных технологий и кибер-физических систем на основе использования информационных технологий обработки больших массивов данных, методов машинного обучения и теории искусственного интеллекта.

Поставленная и решаемая в настоящей диссертационной работе новая научная проблема разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированных систем управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла является актуальной проблемой, решение которой имеет важное значение для обрабатывающих отраслей промышленности и обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Петрова Дмитрия Юрьевича состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем

диссертации 420 страниц машинописного текста, включая 99 рисунков, 11 таблиц, 3 приложения. Библиографический список включает 503 источника.

Первая глава посвящена анализу исследований в области автоматизированного управления непрерывными промышленными производствами. Представлен анализ научных исследований по системному подходу к повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных непрерывных промышленных производств. Дана краткая характеристика современного уровня развития автоматизированных систем иерархического управления непрерывными промышленными производствами, включая уровни автоматизации технологических процессов, производств, предприятий и групп предприятий. Выполнен анализ научных трудов, посвященных управлению качеством продукции и надежностью непрерывных производств. Приведена общая характеристика научно-исследовательских работ по автоматизированному управлению производством высококачественного листового стекла как сложной химико-технологической системы. Определена цель и научно-технические задачи диссертации.

Вторая глава посвящена методическому обеспечению математического моделирования химико-технологических процессов многостадийного производства листового стекла. Представлены результаты системного анализа химико-технологических процессов многостадийного производства листового стекла как объектов автоматизированного управления.

Определены основные причины отклонений в составе шихты: колебания химического состава сырья; ошибки дозирования; изменение влажности сырья и гранулометрического состава соды. Разработана нейросетевая модель соответствия состава и свойств стекольной шихты рецепту для автоматизированного управления составом стекольной шихты.

Разработана математическая модель процесса формования ленты стекла при ее движении по поверхности расплавленного олова в безразмерных переменных в форме Коши с учетом воздействия растягивающих усилий, создаваемых бортоформирующими машинами.

В третьей главе рассмотрены особенности компьютерных моделей химико-технологических процессов многостадийного производства листового стекла и представлены результаты разработки моделей различных типов.

Разработана структура нейросетевой модели управления составом стекольной шихты. Проверена адекватность разработанной математической модели состава шихты в виде искусственной нейронной сети с использованием сравнительного анализа технологической информации с рассчитанными в многочисленных вычислительных экспериментах значениями соответствия стекольной шихты рецепту.

На основе математической модели процесса формования ленты стекла при ее движении по поверхности расплавленного олова разработана компьютерная модель визуализации динамики растекания расплава стекла в ванне расплава, предназначенная для разработки цифрового тренажера обучения и проведения аттестации операторов формования листового стекла.

Разработана компьютерная модель робота-манипулятора, позволяющая рассчитать статистический критерий качества работы робота-манипулятора для минимизации боя листов стекла при установке их в штабель.

В четвертой главе представлены результаты разработки комплекс гибридных алгоритмов автоматизированного анализа точечных дефектов листового стекла.

Предложен вейвлетно-нейросетевой алгоритм диагностики расположения точечных дефектов листового стекла, который обеспечивает формирование электронной карты дефектов, которая необходима для эффективного функционирования системы автоматического раскроя листового стекла в реальном времени.

Разработан эвристическо-продукционный алгоритм определения видов точечных дефектов листового стекла, основанный на формализованных продукционных правилах.

Разработана архитектура оригинальной оптико-технической системы автоматической диагностики точечных дефектов в ленте стекла.

Пятая глава посвящена разработке алгоритмического обеспечения автоматизированного управления энергоэффективностью многостадийного производства листового стекла.

Предложена содержательная и математическая постановки задачи иерархического управления энергоэффективностью производства листового стекла. Выполнен системный анализ для исследования влияния на себестоимость производства высококачественного листового стекла таких параметров, как: качество сырья, состояние основного технологического оборудования, размеры складов для стекла стандартных размеров и «Джамбо». На его основе разработана стратегическая карта целей и показателей функционирования производства листового стекла.

Разработан алгоритм анализа жизненного цикла многостадийного производства высококачественного листового стекла. Рассмотрен логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла и анализа относительных затрат на резервирование элементов и показателей надежности производства листового стекла с использованием логико-вероятностного метода и программного комплекса «АРБИТР».

Для повышения энергоресурсоэффективности производства разработан алгоритм оптимизации размера партий выпуска листового стекла различных типов, за счет сокращения количества изменений технологических режимов производства листового стекла.

Разработан алгоритм моделирования организационно-технологического процесса упаковки листового стекла и многоагентная дискретно-событийная имитационная модель функционирования участка съема стекла.

Шестая глава посвящена инжинирингу пакетов прикладных программ иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла.

Разработана структура информационного взаимодействия цифровых платформ для реализации цифровой трансформации производств листового стекла. Предложена методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства листового стекла.

На основе модельно-управляемого проектирования с применением методологии MBSE и нотации UML/SysML разработана автоматизированная система идентификации точечных дефектов листового стекла.

Разработана архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ цифрового тренажера обучения операторов управлению химико-технологическим процессом формования листового стекла. Для описания взаимодействия участников процесса повышения квалификации разработаны логико-информационные модели бизнес-процессов в программном комплексе Business Studio. На их основе разработаны диаграммы на языке SysML в среде визуального моделирования IBM Rhapsody.

Седьмая глава посвящена результатам практического использования пакетов прикладных программ автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла: планирования выпуска партий многоассортиментного листового стекла, автоматизированного управления составом стекольной шихты, диагностики дефектов листового стекла и цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла.

Результаты диссертационного исследования использованы в учебно-методической деятельности ряда университетов:

— ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» при разработке учебных курсов повышения квалификации работников промышленных

предприятий «Разработка бизнес-процессов промышленного предприятия с использованием программного обеспечения Business Studio», «Проектирование АСУТП», «Чертежник-конструктор робототехнических систем»;

— ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при подготовке учебных дисциплин «Тепломассообменное оборудование предприятий» и «Цифровые двойники объектов теплоэнергетики» по основным образовательным программам по направлениям: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»;

— ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» при разработке программ учебных дисциплин: «АСУ», «Основы проектирования систем», «Имитационное моделирование систем» по направлениям: 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника», 27.03.03 «Системный анализ и управление» кафедры «Системный анализ и автоматическое управление».

Материалы научно-квалификационной работы были внедрены в практику для оптимизации организационно-управленческой деятельности ряда промышленных предприятий: ОА «Саратовстройстекло», ОА «Саратовский институт стекла», АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», а также в образовательной деятельности ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», что подтверждено соответствующими справками.

В заключении работы обобщаются полученные результаты, приводятся выводы по диссертационной работе.

Представленные результаты позволяют достаточно полно оценить объем и уровень сложности проведенного исследования.

Автореферат в должной мере отражает содержание диссертации.

Основные научные результаты диссертационного исследования

В процессе исследований диссертант Д.Ю. Петров получил ряд новых научных результатов, среди которых можно отметить следующие:

1. Разработана нейросетевая модель автоматизированного управления составом стекольной шихты с использованием многослойной искусственной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки при автоматическом обучении, что позволяет обеспечить требуемый технологический режим работы дозировочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья.

2. Разработана математическая модель химико-технологического процесса непрерывного формования ленты стекла с учетом влияния

напряжения растягивающих усилий бортоформирующих машин на поток жидкого стекла, что позволяет анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла.

3. Построена процедура автоматизированной диагностики точечных дефектов листового стекла с применением процедур анализа изображения листового стекла на основе метода вейвлет-преобразования для локализации дефекта, использованием искусственной нейронной сети для распознавания типа контура точечного дефекта и набора эвристических правил для классификации типа выявленного точечного дефекта, что позволяет автоматически формировать электронную карту дефектов листового стекла, используемой в системе автоматического оптимального раскроя ленты стекла в реальном времени.

4. Разработан алгоритм анализа этапов жизненного цикла многостадийного производства листового стекла с использованием аппарата марковских процессов, что позволяет определять вероятности нахождения производства на каждом из этапов его жизненного цикла, необходимые для автоматизированного расчета показателей надежности и показателей эффективности производства листового стекла.

5. Сформированы оригинальные архитектуры, определены и обоснованы режимы функционирования нескольких пакетов прикладных программ, предназначенных для решения следующих задач:

- проектирования АСУТП производства листового стекла с использованием компьютерных моделей прогнозирования показателей эффективности химико-технологических процессов и процедур определения характеристик состояния оборудования, что обеспечивает уменьшение количества нерациональных проектных решений;

- комплексного анализа точечных дефектов листового стекла на базе оптико-вейвлетного метода локализации дефектов в листовом стекле и нейро-эвристического алгоритма классификации типов дефектов, что позволяет на основе применения серийных аппаратных средств проводить автоматическую диагностику наиболее часто встречающихся точечных дефектов листового стекла.

- цифрового тренажера обучения персонала участка формования ленты стекла, отличающегося использованием методов системотехники для инжиниринга программного обеспечения и компьютерной модели химико-технологического процесса непрерывного формования ленты стекла, что обеспечивает повышение квалификации рабочего персонала производства листового стекла и его обучение работе в штатных и аварийных.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций работы

Научная обоснованность результатов диссертации базируется на применении общепринятых теоретических положений, методологии системного анализа и современных методов исследования, включая имитационное моделирование, а также теорию анализа и оптимизации химико-технологических систем. Выводы работы не противоречат известным теоретическим положениям.

Достоверность полученных автором новых теоретических научно-исследовательских результатов, научных положений, выводов и научно-технологических рекомендаций подтверждается совпадением полученных результатов многочисленных вычислительных экспериментов с достоверными экспериментальными данными.

Теоретическая значимость результатов и выводов

Развиты методологические основы автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла на основе широкого использования современных методов теории автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью сложных непрерывных производств, методов компьютерного моделирования химико-технологических процессов, методов имитационного моделирования, теории искусственного интеллекта и инструментов «Умного производства».

Разработаны математические и компьютерные модели химико-технологических процессов приготовления шихты, формования ленты стекла, упаковки листов стекла, диагностики дефектов стекла, оптимизации размера партий выпуска листового стекла, обеспечивающие повышение энергоресурсоэффективности производства листового стекла.

Практическая значимость работы

Теоретические результаты исследования были практически применены при разработке проектов и реализации мероприятий по повышению энергоресурсоэффективности на предприятиях стекольной промышленности и в других промышленных предприятиях.

Результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении научно-исследовательских работ по 10 хозяйственным договорам с промышленными предприятиями: «Разработка программного обеспечения для обучения персонала выполнению штатных операций в различных режимах при варке стекла и его формовании методом флоат-процесса и действиям по устранению нештатных ситуаций и дефектов стекла» ОАО

«Саратовстройстекло» (2006); «Разработка единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло»» (2007); «Создание программно-математического обеспечения экспериментальной системы автоматического управления» АО КБПА (2015); «Разработка концепции создания высокотехнологичного производства с применением технологий Industry 4.0 (разработка АС)» АО КБПА (2021); «Разработка организационной системы управления обслуживанием оборудования на основе системного анализа бизнес-процессов и использования отечественного программного обеспечения Business Studio» АО КБПА (2024) и др..

Соответствие результатов заявленной научной специальности

Научные результаты соответствуют следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»:

2. Автоматизация контроля и испытаний.

4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами.

12. Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

Замечания по работе

По работе Д.Ю. Петрова можно сделать следующие замечания:

1. Теоретико-множественная модель многостадийного производства листового стекла, связывающая технологические процессы и потребляемые ресурсы (стр.76 и далее) требует дополнительных пояснений и уточнений. Не понятно, как правильно трактовать, образуемые декартовыми произведениями кортежи и все ли эти кортежи релевантны решаемым в диссертационной работе задачам? Возможно, формулы записаны не совсем корректно?

2. В главе 3 (стр.113) предлагается для аппроксимации зависимостей, описывающих связь состава шихты с рецептурными параметрами, использовать ИНС персептронного типа (FFBP). Это надежный, десятилетиями используемый инструмент, который, однако, имеет доказанные недостатки. В первую очередь, это проблемы с перенастройкой модели в случае изменения условий (иногда неконтролируемых) функционирования технологических процессов. В диссертации эта проблема не рассматривается. Кроме того, учитывая, что физико-химические основы

рассматриваемых процессов достаточно хорошо изучены было бы неплохо проверить возможность использования нейросетевых моделей с другой архитектурой, которая позволяет не только обрабатывать экспериментальные значения, но и имплантировать в процесс обучения определенные аналитические зависимости (PINN-модель).

3. Важное место в диссертации занимает решение задачи детекции и идентификации стекла. Автором предложен оригинальный гибридный подход, однако, из текста диссертации не ясно, какими метриками подтверждается его эффективность.

4. В диссертационной работе практически не рассматриваются особенности функционирования аппаратных средств АСУТП производства листового стекла, и следовательно, не учитывается влияние их характеристик на качество продукции, надежность функционирования и на жизненный цикл рассматриваемых производств.

5. В качестве общего замечания следует отметить, что в выводах по главам автором не представлены количественные оценки результатов выполненных в рамках главы исследований. Также не приведены и какие-либо ориентировочные показатели экономической эффективности от внедрения предложенных решений.

6. Некоторые рисунки трудночитаемы, что не позволяет их анализировать и интерпретировать. Это касается, например, рисунков 3.4 и 3.5 в диссертации, а также рисунка 2 в автореферате. При оформлении диссертации и автореферата автору следовало бы это учесть.

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Считаю, что цель и задачи диссертации обусловлены актуальными проблемами науки и практики. Поставленная цель исследования достигнута, а соответствующие задачи решены на достаточно высоком научном уровне.

На основе анализа содержания диссертации, автореферата, опубликованных автором работ можно сделать следующее заключение: диссертация Петрова Дмитрия Юрьевича на тему «Методическое и программно-информационное обеспечение автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла» является законченной, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, в которой изложена совокупность новых научно обоснованных инженерно-технических

и программно-информационных решений по интеллектуальному иерархическому управлению производством высококачественного листового стекла, реализация которых внесет значительный вклад в развитие обрабатывающей промышленности страны.

Диссертация отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД.

Автор диссертации, Петров Дмитрий Юрьевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Заведующий кафедрой

«Автоматизированные системы управления»

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский

технологический университет «МИСИС»,

доктор технических наук,

профессор

Игорь Олегович Темкин

«8» июня 2026 г

119049, Москва,

Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.

e-mail ex.ru

+7(

Подпись Темкина И.О. заверяю:

ПОДПИСЬ
Проректор по
образованию
НИТУ МИСИ

гров

