

## **ОТЗЫВ**

### **ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**доктора технических наук, доцента**

**Хорошевой Елены Руслановны**

**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 сырья и топливно-энергетических ресурсов, важных для энергоемких промышленных производств, к которым относятся многостадийные производства высококачественного листового стекла представляющие сложные химико-технологические системы (ХТС). Качество листового стекла определяется как режимами функционирования сложной ХТС, так и особенностями основных химико-технологических процессов, протекающих в взаимосвязанных стадиях производства: приготовления шихты, варки стекла, формования ленты стекла на расплаве олова, отжига ленты стекла.

Актуальность темы обоснована. В работе решена новая научная проблема разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированных систем управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства выработки ленты стекла. Успешное решение проблемы имеет важное экономическое

значение для повышения эффективности и конкурентоспособности российской стекольной промышленности.

### **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 современного состояния научных исследований по автоматизированному управлению непрерывными промышленными производствами. Определена цель диссертационного исследования: разработка методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления многостадийным производством высококачественного листового стекла на основе широкого применения новых информационных технологий, разработка математических и компьютерных моделей ХТП для автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью сложных ХТС производства стекла.

Для реализации поставленной цели сформулированы научно-технические задачи:

1. Выполнение системного анализа функционирования многостадийного производства высококачественного листового стекла как объекта автоматизированного управления.

2. Разработка математических и компьютерных моделей ХТП (приготовления шихты, формования ленты стекла, упаковки листов стекла) многостадийного производства ВЛС как объектов управления.

3. Разработка интеллектуально-статистического алгоритмического обеспечения автоматизированной системы диагностики точечных дефектов высококачественного листового стекла.

4. Разработка алгоритмического обеспечения иерархического

автоматизированного управления (АУ) энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС как сложной химико-технологической системы.

5. Компьютерный инжиниринг пакетов прикладных программ (ППП) АУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС.

6. Разработка научно обоснованных рекомендаций по практическому применению ППП автоматизированного управления многостадийным производством ВЛС для повышения энергоресурсоэффективности конкурентных промышленных производств.

**Вторая глава** посвящена методическому обеспечению математического моделирования ХТП многостадийного производства листового стекла. Выполнен системный анализ ХТП многостадийного производства ВЛС как объектов автоматизированного управления. Предложен алгоритм системного анализа химико-технологического производства листового стекла как объекта автоматизированного управления. Разработана нейросетевая модель автоматизированного управления составом стекольной шихты на основе анализа отклонения от заданного химического состава: по нерастворимому остатку (оксиду кремния), по соде, по сумме карбонатов кальция и магния, по сульфату натрия. Для решения задачи моделирования технологического процесса формования ленты стекла методом флоат-процесса разработаны математические модели вязкости стекла и движения ленты стекла. Решена задача растекания расплава стекла по горизонтальной плоскости, возникающая при формовании листового стекла методом флоат-процесса. Введены граничные условия для задачи Коши при моделировании неньютоновской жидкости с заданным законом изменения коэффициента вязкости.

**Третья глава** посвящена инжинирингу компьютерных моделей ХТП многостадийного производства высококачественного листового стекла. Применение нейросетевой модели соответствия шихты рецепту позволило

осуществить непрерывный автоматический контроль качества шихты и вырабатывать управляющие воздействия, обеспечивающие соответствие режимов технологического процесса требованиям технологического регламента производства. Определены основные источники возникновения погрешностей, связанных с использованием кинематических параметров манипуляционных роботов.

**Четвертая глава** посвящена разработке статистических алгоритмов автоматизированной диагностики точечных дефектов листового стекла. Рассмотрены основные дефекты листового стекла. Предложена вейвлет-нейро-эвристическая процедура диагностики наиболее часто встречающихся типов дефектов листового стекла и формирования электронной карты дефектов, необходимой для функционирования системы автоматического раскроя листового стекла в реальном времени. Аппаратурно-техническое и алгоритмическое обеспечение составляют основу для разработки системы автоматизированного обнаружения и распознавания дефектов листового стекла.

**Пятая глава** посвящена разработке автоматизированного обеспечения иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла. Разработана стратегическая карта целей и показателей функционирования производства высококачественного листового стекла. С использованием математической модели функционирования производства выполнен анализ взаимосвязей показателей и определены допустимые значения нормальных и аварийных границ каждого из них. Результаты моделирования обеспечили решение задач многоуровневого оптимального управления энергоресурсоэффективностью и поддержку управленческих решений управления производством высококачественного листового стекла.

Разработана математическая модель состояний жизненного цикла непрерывного производства и определены их взаимосвязи. На основе анализа статистических данных о состояниях жизненного цикла производств листового стекла определены вероятности переходов между состояниями жизненного цикла производства.

**Шестая глава** содержит описание инжиниринга пакетов прикладных программ иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла.

Предложена методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС. Разработана автоматизированная система идентификации точечных дефектов листового стекла, позволяющая обеспечить идентификацию наиболее часто встречающихся типов дефектов листового стекла. Разработан цифровой тренажер для обучения операторов формования листового стекла действиям в нештатных ситуациях на основе комплексного использования подходов проектирования бизнес-процессов. Разработан пакет прикладных программ автоматизированного управления планово-предупредительными ремонтами электрического оборудования.

**Седьмая глава** посвящена описанию результатов практического использования пакетов прикладных программ автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла. Применение предложенного в диссертационной работе многоагентного алгоритма управления планированием выпуска партий многоассортиментного ВЛС позволяет выявить потенциал энергоресурсосбережения производства и выработать решения по оптимизации его функционирования.

Предложен подход к распознаванию точечных дефектов в стекле обеспечивающий определение и локализацию наиболее часто встречающихся

дефектов на основе применения линейных видеокамер. На основе предложенного подхода разработана автоматизированная система сканирования точечных дефектов в листовом стекле, которая формирует электронную карту дефектов и обеспечивает функционирование системы автоматического раскрытия ленты стекла в реальном времени.

Предложен логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла, позволяющий на стадиях проектирования и модернизации определять и обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства высококачественного листового стекла.

Использование ППП цифрового тренажера для обучения операторов позволяет руководству предприятия решать задачу снижения количества аварийных ситуаций на ХТП формования ЛС флоат-методом и сократить значительные периоды времени простоя производства из-за «обрывов» ленты стекла.

**Основные результаты диссертации использованы в учебно-методической работе** в ряде университетов при разработке:

- авторских учебных курсов повышения квалификации работников промышленных предприятий «Разработка бизнес-процессов промышленного предприятия с использованием программного обеспечения Business Studio», «Проектирование АСУТП», «Чертежник-конструктор робототехнических систем» в СГУ им. Н.Г. Чернышевского;

- 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 «НИУ «МЭИ»;

- 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» СГУ им. Н.Г. Чернышевского.

Результаты научно-квалификационной работы использованы при совершенствовании организационно-управленческой деятельности промышленных организаций: ОА «Саратовстройстекло», ОА «Саратовский институт стекла», АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики. Ряд научных результатов диссертации используется в АО КБПА при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке АСУ техническими системами и услуг технологического инжиниринга, а также создании высокотехнологичного производства с применением инструментов «Индустрии 4.0».

Диссертация Петров Дмитрий Юрьевич вносит значимый вклад в решение научной проблемы разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированных систем управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС, являющейся актуальной, решение которой имеет важное экономическое значение для повышения эффективности и конкурентоспособности российской стекольной промышленности, обеспечивающей технологический суверенитет Российской Федерации.

#### **Основные выводы**

Применение предложенного в диссертационной работе многоагентного алгоритма управления планированием выпуска партий многоассортиментного ВЛС позволяет выявить потенциал энергоресурсосбережения стекольного производства и выработать научно-обоснованные решения по оптимизации его функционирования.

Проведен кластерный анализ номенклатуры продукции

многостадийного производства ВЛС, который позволяет выделить 4 типа листовых стекол. На основе стратегической карты целей и показателей функционирования многостадийного производства стекла разработана системно-динамическая модель выпуска четырех типов листовых стекол.

Разработана модель состояний агента «Производство» для переключения режимов производства в системно-динамической модели.

Предложена дискретно-событийная многоагентная модель формирования пакетов заказов ВЛС разных типов. Выполнены численные эксперименты и оптимизация размеров партий выпуска многоассортиментного ВЛС по критерию максимальной энергоэффективности с учетом ограничений, накладываемых сезонностью спроса на строительное ВЛС. Анализ результатов проведенных численных экспериментов позволил при заданных интенсивностях заказов определить размеры партий выпуска ВЛС различных типов, обеспечивающие сокращение количества изменений технологических режимов производства ВЛС и повышение энергоресурсоэффективности многостадийного производства ВЛС.

Разработанные нейросетевая модель и алгоритм автоматизированного управления составом стекольной шихты, а также реализующий их ППП применялся в 2007–2010 гг. при эксплуатации единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло».

Использование ППП цифрового тренажера для обучения операторов позволило руководству АО «Саратовстройстекло» решить задачу снижения количества аварийных ситуаций на стадии формования ЛС флоат-методом.

Разработана автоматизированная система сканирования точечных дефектов в листовом стекле, формирующая электронную карту дефектов для автоматического раскрытия ленты стекла.

Предложен логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства

высококачественного листового стекла, позволяющий обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства высококачественного листового стекла.

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

Автореферат в должной мере отражает содержание диссертации.

### **Основные научные результаты диссертационного исследования**

Диссертант Д.Ю. Петров в процессе исследований получил ряд новых научных результатов, среди которых следует отметить следующие:

Применение предложенного в диссертационной работе многоагентного алгоритма управления планированием выпуска партий многоассортиментного ВЛС позволяет выявить потенциал энергоресурсосбережения стекольного производства и выработать научно-обоснованные решения по оптимизации его функционирования.

Проведен кластерный анализ номенклатуры продукции многостадийного производства ВЛС, который позволяет выделить 4 типа листовых стекол. На основе стратегической карты целей и показателей функционирования многостадийного производства стекла разработана системно-динамическая модель выпуска четырех типов листовых стекол.

Разработана модель состояний агента «Производство» для переключения режимов производства в системно-динамической модели.

Предложена дискретно-событийная многоагентная модель формирования пакетов заказов ВЛС разных типов. Выполнены численные эксперименты и оптимизация размеров партий выпуска многоассортиментного ВЛС по критерию максимальной энергоэффективности с учетом ограничений, накладываемых сезонностью спроса на строительное ВЛС. Анализ результатов проведенных численных экспериментов позволил при заданных интенсивностях заказов определить

размеры партий выпуска ВЛС различных типов, обеспечивающие сокращение количества изменений технологических режимов производства ВЛС и повышение энергоресурсоэффективности многостадийного производства ВЛС.

Разработанные нейросетевая модель и алгоритм автоматизированного управления составом стекольной шихты, а также реализующий их ППП применялся в 2007–2010 гг. при эксплуатации единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло».

Использование ППП цифрового тренажера для обучения операторов позволило руководству АО «Саратовстройстекло» решить задачу снижения количества аварийных ситуаций на стадии формования ЛС флоат-методом.

Предложен подход к распознаванию часто встречающихся в стекле точечных дефектов размером более 0,5 мм. На основе чего разработана автоматизированная система сканирования точечных дефектов в листовом стекле, формирующая электронную карту дефектов для автоматического раскроя ленты стекла.

Предложен логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла, позволяющий обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства высококачественного листового стекла.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций работы**

В диссертации решена задача рационального использования сырья и топливно-энергетических ресурсов, важных для энергоемких промышленных производств, к которым относятся многостадийные производства высококачественного листового стекла, представляющие сложные химико-технологические системы (ХТС). Качество листового стекла определяется как

режимами функционирования сложной ХТС, так и особенностями основных химико-технологических процессов, протекающих в взаимосвязанных стадиях производства: приготовления шихты, варки стекла, формования ленты стекла на расплаве олова, отжига ленты стекла.

Тематика работы является актуальной и значимой в которой решена новая научная проблема разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированных систем управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства выработки ленты стекла. Успешное решение проблемы имеет важное экономическое значение для повышения эффективности и конкурентоспособности российской стекольной промышленности.

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

### **Теоретическая значимость результатов и выводов**

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем развитии методологии автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС на основе использования методов теории автоматизированного управления, компьютерного моделирования ХТП, имитационного моделирования, искусственного интеллекта (ИИ) и инструментов «Индустрия 4.0».

Определены взаимосвязи автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС, реализован вероятностно-статистический алгоритм расчета показателей надежности и планирования выпуска партий многоассортиментного ВЛС.

Обоснованы технологии компьютерного инжиниринга пакетов прикладных программ (ППП) компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, диагностики точечных дефектов листового стекла, цифрового тренажера обучения персонала участка формования ленты стекла.

Разработаны математические модели ХТП приготовления шихты, формования ленты стекла, упаковки листов стекла, обеспечивающие повышение энергоресурсоэффективности производства ВЛС.

### **Практическая значимость работы**

Теоретические результаты проведенного научно-квалификационного исследования практически применены при разработке ряда проектов при реализации мероприятий и стратегий повышения энергоресурсоэффективности предприятий стекольной промышленности и других предприятий.

Разработаны и практически применены научно обоснованные предложения и рекомендации по инжинирингу АСУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС и реализации цифровой трансформации с применением инструментов «Индустрия 4.0».

Результаты диссертации использованы при выполнении научно-исследовательских работ по 10-ти хозяйственным договорам с промышленными предприятиями, в том числе: ОАО «Саратовстройстекло» (2006), «Разработка единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло»» (2007), 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).

Ряд научных результатов диссертации использованы в АО КБПА при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке АСУ техническими системами и услуг технологического инжиниринга, а также создании высокотехнологичного производства с применением инструментов «Индустрии 4.0».

Оригинальность и техническая новизна ряда предложенных в работе решений защищена свидетельствами о результатах интеллектуальной деятельности.

#### **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.
7. Теоретические основы и методы моделирования и управления организационно-технологическими системами и киберфизическими производственными комплексами.
12. Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУЦ, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

## **Замечания по работе**

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

1. При рассмотрении задач управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла остались без внимания вопросы экологического менеджмента.

2. При решении задачи моделирования технологического процесса формования ленты стекла методом флоат-процесса не рассмотрено налипание олова на нижнюю поверхность движущейся ленты стекла, что приводит к «блуждущему эффекту» и потере дорогостоящего олова.

3. Не обоснован выбор нейросетевых моделей. У них есть существенные недостатки: проблема насыщения сети, поведение прошедшей дообучение сети порой не предсказуемо и др.

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.

Профессор кафедры Информационных систем  
и программной инженерии  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный  
университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ),  
доктор технических наук, доцент

— Елена Руслановна Хорошева

«26» мая 2026 г

600000, Россия, г. Владимир,  
ул. Белоконская, д.3/7  
e-mail: isim@vlsu.ru  
+7 (4922) 47-99-77

Подпись Хорошевой Е.Р.  
ученый секретарь ВлГУ



Т.Г. Коннова