

**ОТЗЫВ****ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА****доктора технических наук, профессора****Пиотровского Дмитрия Леонидовича 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 разработке методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла как сложной химико-технологической системы.

Актуальность темы обоснована. Несмотря на многочисленные теоретико-методологические исследования по инжинирингу автоматизированных химических производств, к сожалению, до настоящего времени не предложена общая методология автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийных химико-технологических систем, которая объединяет современные методы автоматизированного управления и многомасштабного математического моделирования химико-технологических процессов с учетом особенностей цифровизации стекольной промышленности с применением инструментов «Индустрия 4.0».

Развитые диссертантом методологические основы автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства

высококачественного 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 «Индустрия 4.0» направлены на решение широкого круга нерешенных с позиции системного анализа и методологии использования разнообразных инструментов «Индустрии 4.0» научно-исследовательских проблем по методологии разработки математического, алгоритмического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийных производств высококачественного листового стекла, что определяет важность и актуальность темы диссертационного исследования.

### **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 (с.23-74, п.1.1-1.5).

Проведен анализ современного состояния научных исследований по системному подходу к повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных непрерывных промышленных производств. Делается вывод о том, что разработка многоуровневых автоматизированных систем управления энергоресурсоэффективностью и экологической безопасностью сложных технологических систем и химико-технологических систем, выпускающих высококачественную продукцию, представляет собой сложную научно-техническую проблему. Для химико-технологических систем ее

решение основано на использовании методологии системного подхода, методах и инструментах теории систем, системного анализа и системотехники.

Далее автором приводится краткая характеристика современных автоматизированных систем иерархического управления непрерывными промышленными производствами высококачественной продукции. Выполнен анализ современных методов инжиниринга цифровизированных производств и их применение для автоматизации многостадийных непрерывных технологических процессов.

Далее автором выполнен анализ методов управления качеством продукции и надежностью непрерывных производств после чего проводится общая характеристика научно-исследовательских работ по автоматизированному управлению производством высококачественного листового стекла как сложной химико-технологической системы. Проведен анализ многостадийного производства листового стекла флоат-способом, которое включает в себя ряд сложных и взаимосвязанных химических окислительно-восстановительных реакций и физических процессов тепломассопереноса.

Автор делает вывод о том, что при производстве листового стекла флоат-способом наиболее глубоко исследованными являются технологические процессы: варки стекломассы, отжига ленты стекла и оптимизации раскроя стекла. Поэтому в диссертационном исследовании диссертант наибольшее внимание уделяет технологическим процессам приготовления шихты, формования ленты стекла, контроля качества стекла, автоматической упаковки листов стекла.

В конце главы приводятся выводы, содержащие сформулированную цель диссертационного исследования и научно-технические задачи исследования

**Вторая глава** посвящена методическому обеспечению математического моделирования химико-технологических процессов многостадийного производства листового стекла как объектов управления (с.75-112, п.2.1-2.4).

Автор определил совокупность сложных химико-технологических процессов, взаимосвязанных с окислительно-восстановительными реакциями и тепломассообменами процессами из которых состоит многостадийное производство высококачественного листового стекла флоат-методом.

После проведения декомпозиции общей задачи оптимального иерархического управления химико-технологической системы в целом на совокупность взаимосвязанных задач управления с частными критериями эффективности, автором сформулированы основные цели автоматизированного управления многостадийным производством листового стекла как сложной системы.

Выделен основной показатель управления качеством стекольной шихты – соответствие химического состава требуемому рецепту. Определены основные причины отклонений в составе шихты: колебания химического состава сырья; ошибки дозирования; изменение влажности сырья и гранулометрического состава соды.

Далее автор утверждает о разработке нейросетевой модели соответствия состава и свойств стекольной шихты рецепту для автоматизированного управления составом стекольной шихты как источника возникновения дефектов листового стекла, однако в исследовании не приведена архитектура нейронной сети, а все описание сводится к четырем формулам, что не позволяет оценить научной новизны данной нейронной сети.

В предлагаемой диссертантом математической модели химико-технологического процесса формования движущейся ленты стекла рассмотрена задача о растекании расплава стекла по горизонтальной плоскости, возникающем при формовании листового стекламетодом флоат-процесса. Введены граничные условия для задачи Коши при моделировании неньютоновской жидкости с заданным законом изменения коэффициента вязкости.

**Третья глава** посвящена вопросам инжиниринга компьютерных моделей химикотехнологических процессов многостадийного производства

высококачественного листового стекла (с.113-146, п.3.1-3.4).. Представлены результаты работы нейросетевой модели автоматизированного управления составом стекольной шихты; компьютерной модели химико-технологическим процессом формования движущегося листового стекла; компьютерной модели оценки качества позиционирования робота-манипулятора для упаковки листов стекла. При этом первые две модели описаны были ранее в Главе 2, и разбиение материала на две главы крайне затрудняет восприятие материала. Об адекватности компьютерной модели оценки качества позиционирования робота-манипулятора для упаковки листов стекла сложно судить, так как приведенный в исследовании численный расчёт значения оценки повторяемости позиционирования двухзвенного плоского МР (10-13)<sup>0</sup> никак не сопоставляется с допустимыми значениями.

**В четвертой главе** Д.Ю. Петровым представлена разработка интеллектуально-статистических алгоритмов автоматизированной диагностики точечных дефектов листового стекла (с.147-164, п.2.1-2.5). Сначала диссертант приводит классификацию видов дефектов листового стекла, а затем приводит вейвлетно-нейросетевой алгоритм диагностики расположения точечных дефектов листового стекла и эвристическо-продукционный алгоритм определения видов точечных дефектов листового стекла. Для автоматической диагностики причин возникновения точечных дефектов листового стекла Д.Ю. Петровым разработана архитектура оригинальной оптико-технической системы, которая устанавливается перпендикулярно направлению движения стекла по конвейеру. Автором приводятся результаты применения автоматизированной процедуры по идентификации точечного дефекта листового стекла типа «закрытый пузырь».

**Пятая глава** посвящена алгоритмическому обеспечению иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла (с.165-200, п 5.1-5.6). Предложена новая классификация уровней промышленной безопасности

производственных процессов с учетом этапов плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций. Определены состояния жизненного цикла непрерывного производства с учетом предложенной классификации. 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. В результате статистического анализа вероятностей переходов состояний для производства листового стекла автор принял решение использовать аппарат марковских процессов для оценки вероятности нахождения его в этих состояниях. Был выполнен расчет вероятностей для каждого состояния жизненного цикла производства листового стекла и осуществлено имитационное моделирование.

Далее автором был 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 и разработана схема функциональной целостности производства листового стекла. Результаты использования алгоритма позволили диссертанту утверждать, что алгоритм может выявить наиболее вероятные последовательности отказов, элементы, ограничивающие надежность АСУТП, а также своевременно на основе его работы можно разработать и реализовать мероприятия для выравнивания надежности участков производства. Автор заявляет, что предложенный алгоритм позволяет на стадиях проектирования и модернизации определять и обосновывать эффективные решения по повышению уровня надежности и безопасности производства листового стекла.

Также автором в пятой главе предложены алгоритм интерактивной многокритериальной оптимизации состава оборудования и структур робототехнического комплекса упаковки высококачественного листового

стекла с учетом особенностей режимов технологического процесса; алгоритм моделирования организационно-технологического процесса упаковки высококачественного листового стекла; многоагентная дискретно-событийная имитационная модель функционирования участка съема стекла.

**В шестой главе** автор рассматривает вопросы инжиниринга пакетов прикладных программ иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла (с.201 -258, п.6.1 – 6.5). В данной главе автором представлены: методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства высококачественного листового стекла; архитектура информационной системы для управления жизненным циклом непрерывного технологического процесса; автоматизированная система идентификации точечных дефектов листового стекла, позволяющая обеспечить идентификацию наиболее часто встречающихся типов дефектов листового стекла; цифровой тренажер для обучения операторов формования листового стекла действиям в нештатных ситуациях.

Разработанный пакет прикладных программ автоматизированного управления планово-предупредительными ремонтами электрического оборудования. используется в отделе главного энергетика ОАО «Саратовстройстекло» (подтверждено справкой о практическом использовании результатов диссертационной работы, с.369)

**В седьмой главе** приводятся результаты практического использования пакетов прикладных программ автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла (с.259-288, п.7.1-7.6), а именно результаты применения пакета прикладных программ автоматизированного управления составом стекольной шихты и пакета прикладных программ диагностики дефектов листового стекла. Даны рекомендации по применению цифрового тренажера для обучения операторов.

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 диссертационной работы использованы при совершенствовании организационно-управленческой деятельности ряда промышленных организаций: 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**

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

1. Разработана нейросетевая модель АУ составом стекольной шихты, отличающаяся использованием многослойной искусственной нейронной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки при автоматическом обучении, что позволяет обеспечить требуемый технологический режим работы дозирочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья).
2. Разработана математическая и компьютерная модели химико-технологического процесса непрерывного формования ленты стекла, что позволяет анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла на расплаве олова и создать программное обеспечение цифрового тренажера для обучения персонала работе в штатных и аварийных ситуациях.
3. Предложен алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов листового стекла, позволяющий автоматически формировать электронную карту дефектов листового стекла, использование которой обеспечивает эффективное функционирование системы автоматического оптимального раскрыя ленты стекла в реальном времени
4. Предложен вероятностно-статистический алгоритм анализа этапов жизненного цикла многостадийного производства высококачественного листового стекла, позволяющий определять вероятности нахождения производства на каждом из этапов его жизненного цикла, необходимые для автоматизированного расчета показателей надежности и показателей эффективности производства высококачественного листового стекла
5. Разработаны архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ компьютеризированного проектирования АСУТП производства высококачественного листового стекла, что обеспечивает уменьшение

количества нерациональных проектных решений, сокращение сроков проектирования и ввода в эксплуатацию АСУ производства стекла.

6. Разработана архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ диагностики точечных дефектов листового стекла, что позволяет на основе применения серийных аппаратных средств обеспечить автоматическую диагностику наиболее часто встречающихся точечных дефектов.

7. Разработаны архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ цифрового тренажера обучения персонала участка формования ленты стекла, что обеспечивает повышение квалификации рабочего персонала производства высококачественного листового стекла и его обучение работе в штатных и аварийных ситуациях.

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

Обоснованность научных результатов диссертационной работы подтверждается использованием общепринятых апробированных научных положений, методологии системного анализа, научных методов экспериментальных исследований; применением методов системного анализа, методов имитационного моделирования, методов теории анализа и оптимизации химико-технологических систем; подтверждается согласованностью полученных новых научных результатов с известными теоретическими положениями.

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**

Теоретическая значимость заключается в разработке нейросетевой модели автоматизированного управления составом стекольной шихты, позволяющей определить заданный технологический режим работы дозирочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья; разработке компьютерной модели химикотехнологического процесса непрерывного формования ленты стекла, позволяющей анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла на расплаве олова; разработке алгоритма автоматизированной диагностики точечных дефектов листового стекла, обеспечивающего автоматическое формирование электронной карты дефектов, которая необходима для функционирования системы автоматического оптимального раскроя листового стекла в реальном времени; разработке компьютерной имитационной модели этапов жизненного цикла производства листового стекла, которая необходима для определения вероятностей нахождения производства на каждом из этапов жизненного цикла при автоматизированных расчетах показателей надежности производства листового стекла.

### **Практическая значимость работы**

Теоретические результаты проведенного научно-квалификационного исследования практически применены при разработке ряда проектов, при реализации мероприятий и стратегий повышения энергоресурсоэффективности как предприятий стекольной промышленности, так и ряда других непрерывных сложных многостадийных химикотехнологических систем.

Прикладные исследования, разработки и расчеты выполнены с использованием достоверных данных и материалов стекольных предприятий Приволжского федерального округа. Разработаны и практически применены научно обоснованные предложения и рекомендации по инжинирингу АСУ

энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС и по 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: «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).

### **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, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

### **Замечания по работе**

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

1. Крайне формально выполнен литературный обзор. Представлен просто перечень научных работ без критического анализа. Стиль изложения и содержание раздела 1 соответствует учебному пособию, но никак не диссертационному исследованию. В списке литературы нет ни одного патента. Автор ссылается на ГОСТы, не действующие в настоящее время. Кроме того, сформулированные в п.1.5 научно-технические задачи никак не коррелируются с приведенной в разделе 1 информацией
2. В работе отсутствует детальный анализ архитектуры нейронной сети, недостаточно обоснован выбор параметров обучения модели, отсутствуют оценка устойчивости модели к шумовым воздействиям и сравнение с альтернативными подходами к моделированию.
3. Для модели формования ленты стекла не представлена верификация модели на реальных производственных данных, отсутствуют результаты тестирования в нештатных режимах, нет анализа влияния принятых допущений на точность результатов.
4. Для алгоритмов, приведенных в разделе 4 отсутствует анализ влияния шума на точность диагностики, не представлены результаты тестирования алгоритмов в нештатных режимах, отсутствует сравнительный анализ с существующими системами диагностики, не представлены статистические характеристики точности определения дефектов.
5. В работе рассматриваются вопросы оптимального управления, однако выражения для целевых функций и критериев оптимальности в работе практически отсутствуют.

6. В выводах по главам и в целом по диссертации полностью отсутствуют какие-либо количественные оценки результатов работы. Отсутствуют показатели экономической эффективности внедрения результатов исследования.

7. В работе очень много стилистических, грамматических, пунктуационных ошибок, затрудняющих восприятие текста. В качестве отдельных примеров подобных замечаний можно привести следующее:

- на страницах 148 и 149, а также на страницах 192 и 195 представлены одни и те же фрагменты текста;
- на стр. 216 ссылка на другие рисунки,
- некорректно сформулирован объект исследования;
- имеются не совсем некорректные, а на рис.1.7 – неправильные переводы иностранных терминов на русский язык;
- в блок-схемах алгоритмов (рис.4.2, 4.3) отсутствует блок КОНЕЦ, что недопустимо;
- диаграммы нотации IDEF0 выполнены с ошибками.

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 Промышленной  
Информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский  
Технологический университет»,  
доктор технических наук,  
профессор

Дмитрий Леонидович Пиотровский

«22» Мая 2026 г  
119454, Россия, г. Москва,  
Проспект Вернадского, д. 78  
e-mail [piotrovskij@mirea.ru](mailto:piotrovskij@mirea.ru)

+ 9

Подпись Пиотровского Д.Л. заверяю

Начальник  
Управления кадров

М.М. Буханова