

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи

Петров Дмитрий Юрьевич

**Методическое и программно-информационное обеспечение
автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью
многостадийного производства высококачественного листового стекла**

Специальность 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва - 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» и Институте проблем точной механики и управления – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук»

Научный консультант: академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ **Мешалкин Валерий Павлович**, директор Международного института Логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева, профессор кафедры логистики и экономической информатики ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор,
Темкин Игорь Олегович

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
заведующий кафедрой автоматизированных систем управления

доктор технических наук,
доцент,
Хорошева Елена Руслановна

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», профессор кафедры информационных систем и информационного менеджмента

доктор технических наук,
профессор,
Пиотровский Дмитрий Леонидович

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», профессор кафедры промышленной информатики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится 30 июня 2026 года в 11.00 на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.09 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, ауд. 443, конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» и на сайте https://www.muotr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.2.6.09, к.т.н., доцент



В.А. Василенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема рационального использования сырья и топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) особенно важна для энергоемких промышленных производств, к которым относятся многостадийные производства высококачественного листового стекла (ВЛС), представляющие собой сложные химико-технологические системы (ХТС). Качество листового стекла (ЛС) определяется как режимами функционирования сложной ХТС, так и особенностью основных химико-технологических процессов (ХТП), протекающих в взаимосвязанных стадиях производства – подсистемах ХТС: стадия приготовления шихты, стадия варки стекла, стадия формования ленты стекла методом флоат-процесса (float glass process), стадия отжига ленты стекла.

Условия обеспечения технологического лидерства РФ определяют необходимость расширения номенклатуры выпускаемого ВЛС. Нестабильность химического состава и физических свойств исходного сырья определяет необходимость выполнения затратных лабораторных исследований, в соответствии с результатами которых осуществляется изменение рецепта стекольной шихты и режимов функционирования ХТП – стадий производства ВЛС.

Применение методов инжиниринга передовых наукоемких энергоресурсосберегающих цифровизированных интеллектуальных технологий и роботизированных кибер-физических систем и использование информационных систем обработки больших массивов данных, методов машинного обучения и теории искусственного интеллекта (ИИ) имеет актуальное значение для повышения энергоресурсоэффективности отечественной стекольной промышленности и производств других строительных материалов, а также является важнейшим фактором обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

Указанные актуальные направления научно-технологического развития РФ, включая повышение энергоресурсоэффективности и уровня цифровой трансформации российской стекольной промышленности, определены в следующих федеральных и региональных нормативно-правовых документах:

— Указ Президента РФ № 145 от 28 февраля 2024 г. «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (п. 21а);

- Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. N 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» (п. 26);
- Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» (п. 2д);
- Распоряжение Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р «Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года»;
- Постановление Правительства РФ от 15.04.2023 N 603 (ред. от 06.11.2024) «Об утверждении приоритетных направлений проектов технологического суверенитета и проектов структурной адаптации экономики Российской Федерации и Положения об условиях отнесения проектов к проектам технологического суверенитета и проектам структурной адаптации экономики Российской Федерации, о представлении сведений о проектах технологического суверенитета и проектах структурной адаптации экономики Российской Федерации и ведении реестра указанных проектов, а также о требованиях к организациям, уполномоченным представлять заключения о соответствии проектов требованиям к проектам технологического суверенитета и проектам структурной адаптации экономики Российской Федерации» (приложение №1, п. 8.13);
- Постановление правительства Саратовской области от 17 августа 2015 г. № 412-П «О государственной программе Саратовской области "Развитие промышленности в Саратовской области» (с изменениями на 28 декабря 2024 г.).

В Федеральном проекте «Производительность труда», входящем в состав национального проекта «Эффективная и конкурентная экономика», определены основные показатели к 2030 году и меры государственной поддержки проектов, обеспечивающих за счет цифровой трансформации и повышения цифровой зрелости на основе использования цифровых технологий для автоматизации и управления энергоресурсоэффективностью производства повышение производительности труда – ключевого фактора экономического развития, обеспечения конкурентоспособности и технологического суверенитета и технологического лидерства России. Высокий уровень автоматизации как отдельного ХТП, так и энергоресурсоэффективных многостадийных ХТС производства ВЛС при использовании мер государственной поддержки для цифровой трансформации таких предприятий способствует достижению целей этого Национального проекта.

В распоряжении Правительства РФ от 6 ноября 2021 г. N 3142-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» от 12 ноября 2021 г. определены проекты «Умное производство» и «Цифровой инжиниринг», для реализации которых необходимо разработать методологию обеспечения цифровой трансформации промышленных предприятий с использованием инструментов промышленной революции «Индустрии 4.0».

Предприятия стекольной промышленности для разработки и реализации организационно-технических мероприятий по повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных ХТП, производительности труда и объемов производства ВЛС должны решать следующие основные научно-технологические и организационно-технические задачи:

1) снижение риска выпуска некачественного ЛС при изменении химического состава сырья; 2) оптимальное планирование производственных заказов для сокращения простоя основного технологического оборудования при изменении технологических режимов при выпуске различных типов стекла;

3) сокращение длительности хранения готового стекла на складе для повышения скорости использования оборотных средств; 4) повышение навыков и опыта у производственного персонала по предотвращению аварийных ситуаций для сокращения ущерба от аварийных ситуаций на производстве;

5) повышение уровня заинтересованности работников в интенсивном переходе к цифровой трансформации производства и использовании инструментов «Индустрия 4.0».

На основании вышеизложенного, поставленная и решаемая в настоящей диссертационной работе **новая научная проблема** разработки методического и программно-информационного обеспечения автоматизированных систем управления (АСУ) энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС как сложной ХТС **является актуальной** проблемой, успешное решение которой имеет важное экономическое значение для повышения эффективности и конкурентоспособности российской стекольной промышленности, для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

Степень разработанности темы исследования. Повышению эффективности автоматизированных многостадийных непрерывных производств на основе применения

методов системного анализа, теории анализа и оптимизации сложных ХТС посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых. К ним относятся фундаментальные научные труды академиков АН СССР В.М. Глушкова, В.В. Кафарова и В.А.Трапезникова; академиков РАН Ю.С. Васильева, С.Н. Васильева, Д.А. Новикова, В.Л. Макарова, В.П. Мешалкина и П.Д. Саркисова; членов-корреспондентов РАН Н.А. Махутова и А.Ф. Резчикова; научные работы профессоров А.А. Большакова, В.И. Бобкова, Е.М. Васильева, М.Б. Глебова, И.Н. Дорохова, А.Ф. Егорова, Э.Л. Ицковича, В.Н. Козлова, Э.М.Кольцовой, Ю.В. Литовко, М.Ю.Лившица, Р.И. Макарова, Н.В. Меньшутиной, Е.Р.Мошева, Ф.Ф. Пащенко, Н.А. Спирина, Е.Р. Хорошевой, Т.Б. Чистяковой и А.И. Шинкевича, а также зарубежных ученых В. Dwyer, В. Chen, J.O. Grady, O.S. Narayanaswamy, J.C. Principe, Н. Krallmann, J.L. Whitten и др.

Методы и алгоритмы цифрового инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС и их применение для автоматизации непрерывных сложных производств химического, строительного и нефтегазового комплекса разработаны научной школой академика РАН В.П. Мешалкина, предложившего и успешно развивающего новое направление в области цифровизированных производств химического и нефтегазохимического комплекса «Теоретические основы инжиниринга и логистики энергоресурсоэффективных экологически безопасных химико-технологических систем производства высококачественной продукции и переработки отходов».

Существенный вклад в разработку методов математического моделирования ХТП, в том числе ХТП производства ЛС, внесли советские и российские ученые: академик АН СССР В.В. Кафаров и академик АН СССР Н.Е. Кочин, академик РАН В.В. Окрепилов и академик РАН В.Л. Макаров, член-корреспондент АН СССР Н.П. Бусленко, профессора А.А. Большаков, Т.А. Барбасова, А.М. Бессарабов, В.И. Бобков, О.Б. Бутусов, Т.Н. Гартман, А.В. Борщёв, А.В. Гороховский, М.Б. Глебов, А.В. Вязьмин, И.Н. Дорохов, В.Э. Джашинов, А.Ф. Егоров, В.В. Ефременков, Э.М. Кольцова, В.А. Коваль, П.Н. Лабутин, М.Ю. Лившиц, Н.Н. Макеев, В.Е. Маневич, Н.В. Меньшутин, Н.П. Митяшин, А.С. Можаяев, В.М. Панкратов, Э.Я. Рапопорт, Я.Г. Сапунков, В.Ф. Солинов, М.Ф. Степанов, М.Г. Степаненко, К.Ю. Субботин, В.А. Твердохлебов, Ю.И. Толуев, Т.Б. Чистякова, а также зарубежные ученые R. Conradt, D. Harel, R. Hartwell, O.S. Narayanaswamy, G. Schuh и др.

Методы автоматизированного управления (АУ) качеством продукции непрерывных производств химических и нефтехимических комплексов предложены в работах отечественных и зарубежных ученых: профессоров Э.Л. Ицковича, Р.Н. Каримова, Р.И. Макарова, М.И. Смирнова, В.Д. Токарева, Е.Р. Хорошевой, F. Fiorito, E.L. Grant, X. Liu, S. Karlsson, S. Wang и др.

Важный вклад в научные исследования по разработке и применению цифровых тренажеров (ЦТ) и цифровых двойников (ЦД), а также по цифровой трансформации промышленности внесли отечественные ученые: профессора А.И. Боровков, А.Ф. Егоров, В.А. Иващенко, О.М. Проталинский, А.Н. Прохоров, А.Ф. Резчиков, М.Ф. Степанов, О.И. Седяров, Т.Б. Чистякова, Е.И. Яблочников, а также зарубежные ученые M. Azango, M. Grieves, K. Hribernik, P.C. Lopez, S. Sierla, F. Tao, I. Udugama, T. Wuest, L. Zhang и др.

Методы разработки и методики применения цифровых платформ как инструментов комплексного компьютерного АУ многостадийными химическими и металлургическими производствами предложены в работах академика РАН В.П. Мешалкина, профессоров В.И. Бобкова, О.Б. Бутусова, М.И. Дли, В.М. Дозорцева, А.Ф. Егорова, В.Л. Карлинского, Е.Р. Мошева, А.И. Шинкевича и Т.Н. Юдиной, а также зарубежных ученых J. Cheng, R. Day, M. Hause, Y. Lu, D. Liu, Z. Liu, M. Matzner, E. Negri, T. Pauli, J. Tan и др.

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

Наличие 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 АУ энергоресурсоэффективностью многостадийных

производств высококачественного листового стекла обусловило постановку цели и задачи настоящего диссертационного исследования.

Цель исследования: разработка методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла на основе применения методов принятия оптимальных решений, методов многомасштабного математического и компьютерного моделирования, методов теории искусственного интеллекта, с широким использованием современных информационно-коммуникационных технологий и инструментов «Индустрия 4.0».

Для реализации поставленной цели сформулированы и решены следующие взаимосвязанные **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 (АС) диагностики точечных дефектов высококачественного листового стекла.

4. Разработка алгоритмического обеспечения иерархического 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.

Объект исследования. Многостадийное производство высококачественного листового стекла, представляющего собой сложную химико-технологическую систему, как объект автоматизированного управления.

Предмет исследования. Технологические схемы; показатели энергоресурсоэффективности ХТП; бизнес-процессы; технологические режимы функционирования производственных стадий сложной ХТС производства ВЛС; техническая диагностика и управление качеством выпускаемого ЛС.

Научная новизна диссертационного исследования. Получены следующие новые научно обоснованные результаты по разработке методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС:

1. Разработана нейросетевая модель АУ составом стекольной шихты, **отличающаяся** использованием многослойной искусственной нейронной сети (ИНС) 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 (соответствует п. 4 области исследований, разделы диссертации (р.д.) 2.2, 3.1).

2. Разработана математическая и компьютерная модели ХТП непрерывного формования ленты стекла, **отличающиеся** учетом влияния напряжения растягивающих усилий бортоформирующих машин на поток жидкого 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 (соответствует п. 4 области исследований, р.д. 2.4, 3.3).

3. Предложен алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов ЛС, **отличающийся** применением процедур анализа изображения ЛС 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 ЛС, использование которой обеспечивает эффективное функционирование системы автоматического оптимального раскроя ленты стекла в реальном времени (соответствует п. 2 области исследований, р.д. 4.2, 4.3, 4.4).

4. Предложен вероятностно-статистический алгоритм анализа этапов

жизненного цикла (ЖЦ) многостадийного производства ВЛС, **отличающийся** использованием аппарата марковских процессов и графа состояний для этапов ЖЦ производства ВЛС, разработанного на **основе дополненной классификации** уровней функционирования ХТП, что **позволяет** определять вероятности нахождения производства на каждом из этапов его ЖЦ, необходимые для автоматизированного расчета показателей надежности и показателей эффективности производства ВЛС (соответствует п.7 области исследований, р.д. 5.2).

5. Разработаны архитектура и режимы функционирования ППП компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, **отличающегося** использованием компьютерных моделей прогнозирования показателей эффективности ХТП и процедур определения характеристик состояния оборудования, **что обеспечивает** уменьшение количества нерациональных проектных решений, сокращение сроков проектирования и ввода в эксплуатацию АСУ производства ВЛС (соответствует п. 12 области исследований, р.д. 6.1).

6. Разработана архитектура и режимы функционирования ППП диагностики точечных дефектов ЛС, **отличающегося** использованием оптико-вейвлетного метода локализации дефектов в ЛС и нейро-эвристического алгоритма классификации типов дефектов, **что позволяет** на основе применения серийных аппаратных средств обеспечить автоматическую диагностику наиболее часто встречающихся точечных дефектов ЛС (соответствует п. 12 области исследований, р.д. 6.2).

7. Разработаны архитектура и режимы функционирования пакета прикладных программ цифрового тренажера обучения персонала участка формования ленты стекла, **отличающегося** использованием методов системотехники для инжиниринга программного обеспечения и компьютерной модели ХТП непрерывного формования ленты стекла, **что обеспечивает** повышение квалификации рабочего персонала производства ВЛС и его обучение работе в штатных и аварийных ситуациях (соответствует п. 12 области исследований, р.д. 6.3).

Теоретическая значимость работы. Развита методологические основы автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС на основе широкого использования современных методов теории автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью сложных непрерывных

производств, методов компьютерного моделирования ХТП, методов имитационного моделирования, теории искусственного интеллекта (ИИ) и инструментов «Индустрия 4.0».

Применительно к проблематике диссертации результативно, т.е. с получением новых научных результатов, использованы методология системного анализа, функционального моделирования, методы математического и компьютерного моделирования сложных ХТС, в том числе имитационного моделирования, логико-вероятностного анализа, методов ветвей-анализа, теории ИНС, что обеспечивает достаточное научное обоснование актуальных для стекольной промышленности проектов повышения энергоресурсоэффективности в условиях цифровой трансформации обрабатывающих производств.

Разработаны математические и компьютерные модели ХТП приготовления шихты, формования ленты стекла, упаковки листов стекла, обеспечивающие повышение энергоресурсоэффективности производства ВЛС (п. 4 области исследований).

Разработано интеллектуально-статистическое алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы диагностики точечных дефектов высококачественного листового стекла (п. 2 области исследований).

Определены взаимосвязи иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью при выполнении системного анализа функционирования многостадийного производства ВЛС, что позволило реализовать вероятностно-статистический алгоритм анализа этапов жизненного цикла (ЖЦ) для автоматизированного расчета показателей надежности и алгоритм планирования выпуска партий многоассортиментного ВЛС для определения показателей эффективности многостадийного производства ВЛС (п. 7 области исследований).

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 (п. 12 области исследований).

Практическая значимость исследования. 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 ХТС.

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).

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

Методология исследования основана на использовании современных методов системного анализа, методов управления ЖЦ производства, концепции комплексной автоматизации, методов инжиниринга бизнес-процессов, методов цифрового инжиниринга, методологии принятия решений, методологии инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС для научно обоснованного решения задач автоматизации многостадийных непрерывных производств сложных ХТС.

Методы (инструменты) исследования. Методы многомасштабного математического и компьютерного моделирования ХТП; методы имитационного моделирования; методы теории ИНС; инструменты «Индустрии 4.0», алгоритмы и процедуры принятия решений по управлению ХТП и бизнес-процессами функционирования сложных ХТС для повышения энергоресурсоэффективности производства и качества готовой многоассортиментной продукции.

Методической основой исследования являются методы системного и логико-вероятностного анализа; методы анализа и оптимизации ХТС; математический аппарат марковских процессов и вейвлет-преобразований, методы ИНС, а также специальные методы синтеза организационно-технических структур производства ВЛС.

Информационную базу исследования составляют знания, изложенные в научных трудах (монографиях, научных статьях, диссертациях) отечественных и зарубежных ученых по решаемой научной проблеме; используются большие массивы статистической информации по функционированию производств ЛС; массивы данных профильных министерств и ведомств, нормативно-правовых органов, а также знания нормативно-правовых документов в области стратегии научно-технологического развития РФ, знания стратегии и программ развития обрабатывающей промышленности и программ реализации национальных проектов РФ, проектов технологического лидерства и технологического суверенитета.

На защиту выносятся следующие, имеющих научную и практическую значимость, основные результаты теоретических исследований:

1. Нейросетевая модель и алгоритм автоматизированного управления составом стекольной шихты для обеспечения заданных технологических режимов работы дозировочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья.

2. Компьютерная модель ХТП непрерывного формования ленты стекла, позволяющая анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла на расплаве олова и создать ППП для тренажеров по обучению персонала работе в штатных и аварийных ситуациях.

3. Алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов ЛС, позволяющий автоматически формировать электронную карту дефектов, используемую для эффективного функционирования системы автоматического оптимального раскроя

ленты стекла в реальном времени.

4. Компьютерная имитационная модель этапов ЖЦ производства ВЛС, обеспечивающая автоматизированные расчеты показателей надежности производства ВЛС.

5. Архитектура и режимы функционирования ППП компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, который обеспечивает сокращение числа необоснованных проектных решений, времени проектирования и ввода в эксплуатацию АСУ ТП производства ВЛС.

6. Архитектура и режимы функционирования ППП диагностики точечных дефектов ЛС, обеспечивающего автоматическую диагностику наиболее часто встречающихся точечных дефектов ЛС.

7. Архитектура и режимы функционирования ППП цифрового тренажера обучения персонала ХТП формования ленты стекла, обеспечивающего повышение квалификации персонала и обучение работе в штатных и аварийных ситуациях производства ВЛС.

8. Научно обоснованные инженерно-технологические рекомендации по практическому использованию разработанных ППП для автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС.

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 ХТС, методов системной динамики; 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.

Научные и практические результаты диссертационной работы не противоречат полученным ранее известным научно-техническим результатам других авторов в области методологии системного анализа, повышения энергоресурсоэффективности сложных ХТС и компьютерного инжиниринга АСУ многостадийными производствами.

Для сбора и обработки технологической, производственной и бизнес-информации о функционировании предприятий стекольной промышленности Приволжского федерального округа применены современные вероятностно-статистические методы накопления и обработки больших массивов данных.

Апробация работы. Результаты научно-квалификационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на следующих основных научно-технических международных и всероссийских конференциях:

«Международный год стекла в России» (Санкт-Петербург, 2022); **«Неорганическая химия - фундаментальная основа в материаловедении керамических, стеклообразных и композиционных материалов»** (Санкт-Петербург, 2016); **«Российская мультikonференция по проблемам управления»** (Санкт-Петербург, 2008); **«Математические методы в технике и технологиях – ММТТ»** (Псков, 2009; Волгоград, 2012; Нижний Новгород, 2013, 2023; Тамбов, 2014; Ярославль, 2015, 2022; Санкт-Петербург, 2017, 2021; Казань, 2024; Самара, 2025); **«Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности – ЛЭРЭП»** (Смоленск, 2015); **«Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности»** (Москва, 2013); **«International Congress on Information Technologies»** (Саратов, 2012, 2016); **«Компьютерные науки и информационные технологии»** (Саратов, 2021); **«Имитационное моделирование – ИММОД»** (Казань, 2023), **«Киберфизические системы: проектирование и моделирование»** (Ярославль, 2022); **«Системный анализ, управление и навигация»** (Евпатория, 2023) и др.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в международные базы цитирования «Web of Science» и «Scopus» и рекомендованных **ВАК РФ по специальности 2.3.3.**

Научные положения и ряд основных научно-практических результатов, полученные автором, использованы при выполнении **Институтом проблем точной механики и управления РАН государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 007-00275-18-00 «Разработка моделей и методов анализа функционирования сложных человеко-машинных систем в критических ситуациях» и № FFNM-2022-0010 «Разработка интеллектуальных моделей и методов управления сложными человеко-машинными системами в условиях критических ситуаций».**

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** 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 (см. Приложение диссертации).

Некоторые основные результаты диссертационной работы зарегистрированы в виде электронного ресурса [27] и программ для ЭВМ [23 – 26].

Публикации. По теме диссертации опубликовано **124 научных работы** общим объемом **38,15 п.л.** (личный авторский вклад **23,72 п.л.**).

Основные положения диссертации получили полное отражение в 23 статьях, из них 5 статей – в изданиях, индексируемых в международной базе научного цитирования Scopus. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и свидетельство на полезную модель. Опубликовано коллективная монография.

Структура, логика, содержание и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы; 3 приложений.

Объем диссертации 419 страниц, включая 99 рисунков, 11 таблиц, 3 приложения. Библиографический список включает 503 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность поставленной новой научной проблемы исследования; изложены цели и основные задачи исследования; изложены научная новизна теоретических исследований и практическая значимость полученных научных результатов.

В главе 1 изложен аналитический обзор результатов современных научных исследований по АУ энергоресурсоэффективностью многостадийных химических и металлургических производств. Выполнен анализ современного состояния научных исследований по системному подходу к повышению энергоресурсоэффективности автоматизированных многостадийных непрерывных производств в РФ и за рубежом.

Приведена краткая характеристика состояния научно-практических разработок по АСУ многостадийными непрерывными производствами. Выполнен анализ современных методов инжиниринга цифровизированных производств и их применение для автоматизации многостадийных непрерывных технологических процессов и ХТС.

Выполнен анализ современных методов управления качеством продукции непрерывных производств, а также возможностей применения цифровых платформ как инструментов комплексного компьютерного АУ многостадийными химическими и металлургическими производствами.

Обосновано, что непрерывные промышленные производства относятся к классу сложных динамических систем с переменными параметрами, для изучения которых необходимо применять методы системного анализа, методы теории анализа и оптимизации ХТС.

Сформулированы основные цели функционирования цифровизированных непрерывных производств с использованием инструментов «Индустрия 4.0»: 1) снижение себестоимости и времени выпуска продукции; 2) переход к выпуску малых партий продукции с оптимальными затратами; 3) ускорение адаптации конечной продукции к потребностям индивидуального покупателя на основе инструментов цифровой трансформации. Сформулированы основные научные задачи диссертационной работы.

В главе 2 изложены результаты системного анализа ХТП – стадий производства ВЛС; разработаны нейросетевые модели АУ составом стекольной шихты; математическая модель ХТП формования ленты стекла.

Многостадийное производство ВЛС флотат-методом состоит из совокупности сложных взаимосвязанных ХТП с окислительно-восстановительными реакциями и тепломассообменами процессами (рисунок 1), в которой используются следующие иерархические уровни управления: АСУ предприятием (АСУП – ERP), АСУ производственными процессами (АСУПП – MES) и АСУ технологическими процессами (ТП) (дозировочно-смесительной линии, варки-выработки ВЛС, контроля его качества в реальном времени и упаковки).

Проведена декомпозиция общей сложной задачи оптимального иерархического управления ХТС в целом на совокупность взаимосвязанных задач управления с частными критериями эффективности.

Сформулированы основные цели автоматизированного управления многостадийным производством ВЛС как сложной ХТС.

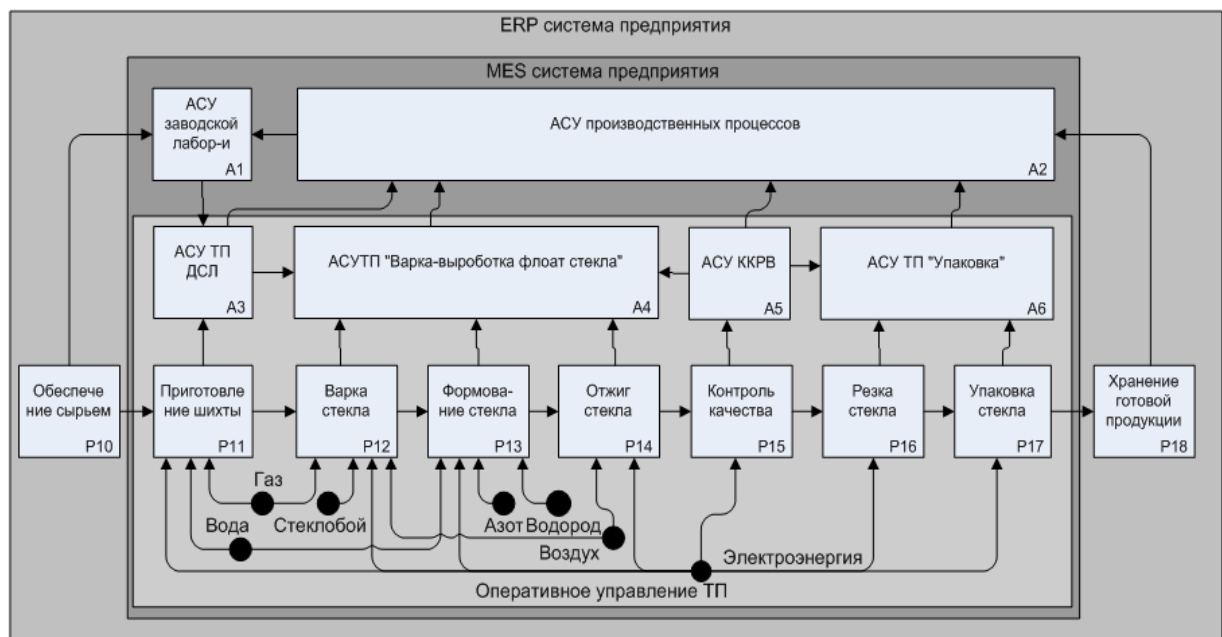


Рисунок 1 – Блок-схема функциональной структуры многостадийного производства ВЛС как сложной ХТС

Определен основной показатель управления качеством стекольной шихты – соответствие химического состава требуемому рецепту. Изложен анализ влияния незначительных отклонений от рецепта на нарушения режимов ХТП варки, формования стекла и появление дефектов в ЛС.

Определены основные причины, отклонений в составе шихты: колебания химического состава сырья; ошибки дозирования; изменение влажности сырья и гранулометрического состава (ГС) соды. Повышение влажности сырья приводит к уменьшению основного активного вещества в отвесе и, следовательно, к отклонениям от рецепта. Наличие большого числа крупных фракций соды приводит к ошибкам при проведении лабораторных анализов шихты.

Разработана нейросетевая модель соответствия состава и свойств стекольной шихты рецепту для АУ составом стекольной шихты как источника возникновения дефектов ЛС. Определены переменные входных слоев ИНС для расчета выходных значений: $S1$ – отклонение от заданного химического состава по нерастворимому остатку (оксиду кремния); где $S2$ – отклонение от заданного химического состава по соде; $S3$ – отклонение от заданного химического состава по сумме карбонатов кальция и магния; $S4$ – отклонение от заданного химического состава по сульфату натрия.

Установлено, что на ХТП формования стекла в ванне расплава как объекта управления оказывают воздействие следующие факторы: 1) вязкость стекла; 2) положение дозирующего шибера; 3) температурное поле в ванне расплава, определяемое температурой стекломассы, поступающей из стекловаренной печи, а также режимом работы системы нагревателей и холодильников; 4) количество, скорость и положение каждой из бортоформирующих машин (угол между осью бортоформирующей машины и нормалью к боковой стенке ванны расплава и глубина погружения внутрь поверхности ленты стекла); 5) скорость вытягивания ленты стекла валами печи отжига; 6) давление, состав и распределение защитной атмосферы по длине ванны расплава.

В математической модели процесса формования ленты стекла при ее движении по поверхности расплавленного олова в области 4 использована система координат $Ox^*y^*z^*$, безразмерная координата сечения ленты стекла $x = \frac{x^*}{b}$, безразмерная толщина $f(x) = \frac{y^*}{h_0}$, безразмерная полуширина $\psi(x) = \frac{z^*}{b}$ и безразмерная продольная составляющую скорости движения ленты стекла $\phi(x) = \frac{U_x}{U_0}$ в этом сечении. Разработана математическая модель движения ленты стекла в безразмерных переменных в форме Коши:

$$\begin{aligned}
\frac{d\phi(x)}{dx} &= \frac{1}{2B\eta f} \left(\frac{C_2}{\psi(x)} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} f^2(x) \right); \\
\frac{d\psi(x)}{dx} &= \frac{\psi(x)}{2B\eta f(x)\phi(x)} \left(R - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} f^2(x) \right); \\
\frac{df(x)}{dx} &= \frac{1}{2B\eta\phi(x)} \left(1 - R - \frac{C_2}{\psi(x)} - f^2(x) \right),
\end{aligned} \tag{1}$$

где $R = R(x)$ – безразмерное напряжение растягивающих усилий в направлении оси Oz^* , создаваемых бортоформирующими машинами; через $\eta = \eta(x) = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu(T(x))}{\mu(T(x_0))}$ – отношение значений коэффициента вязкости в текущем и начальном сечениях; через $B = U_0\mu_0(\gamma_c h_0 b)^{-1}$ – безразмерная постоянная, в которой γ_c – удельный вес стекломассы. Постоянная C_2 , входящая в систему уравнений (1), определяется в результате решения краевой задачи.

Для определения изменения параметров движения ленты стекла при ее формировании решена краевая задача для системы дифференциальных уравнений (ДУ) (1) с граничными условиями. Получено условие асимптотической устойчивости по первому приближению стационарного растекания расплава стекла по горизонтальной плоскости, возникающего при формировании листового стекла, на основе выполнения условия теоремы Пикара-Линделёфа для уравнения (1), которое обеспечивает существование и единственность решения задачи Коши.

Разработанная математическая модель (1) отображает различные режимы формирования ВЛС на расплаве олова и используется в цифровом тренажёре (см. р.д. 6.3).

В главе 3 разработаны нейросетевая модель АУ составом стекольной шихты; компьютерная модель ХТП формирования движущейся ЛС; компьютерная модель оценки качества позиционирования робота-манипулятора для упаковки листов стекла.

Для обучения нейросетевой компьютерной модели АУ составом стекольной шихты использовано 2188 выборок ретроспективных технологических данных. В процессе многочисленных экспериментов выбран класс ИНС «multilayer perceptron» с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки. Обучение ИНС проводилось по алгоритму Левенберга – Марквардта (TRAINLM), который реализован в среде MATLAB. Оценка качества обучения ИНС равна

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2, \tag{2}$$

где N – величина выборки; e – разность между значениями выхода функции и выхода ИНС.

В ходе проведенных экспериментов с моделью ИНС соответствия стекольной шихты рецепту наиболее эффективной оказалась ИНС, содержащая 3 слоя по 50 нейронов в первом и втором слоях. Удовлетворительное значение функционала ошибки (2) достигнуто на 6-м цикле обучения и составило 0,0004 для обучающего множества и 0,001 для контрольного.

Результаты обучения ИНС моделирования для соответствия состава стекольной шихты рецепту представлены на рисунке 2. В левой части рисунка 2 расположены графики зависимости ошибки от номера цикла обучения ИНС для обучающего, контрольного и тестового множества, а в правой части – результаты линейного регрессионного анализа для обучающего, контрольного, тестового множества и общей совокупности выборок: вид выходных значений ИНС, коэффициенты корреляции, уравнения линейной регрессии.

Проверена адекватность разработанной математической модели состава шихты в виде ИНС с использованием сравнительного анализа технологической информации с рассчитанными в многочисленных вычислительных экспериментах значениями соответствия стекольной шихты рецепту. Разработанная ИНС позволяет определить состав шихты со среднеквадратичной ошибкой не более 0,001 и анализировать влияние изменений свойств сырья на качество шихты.

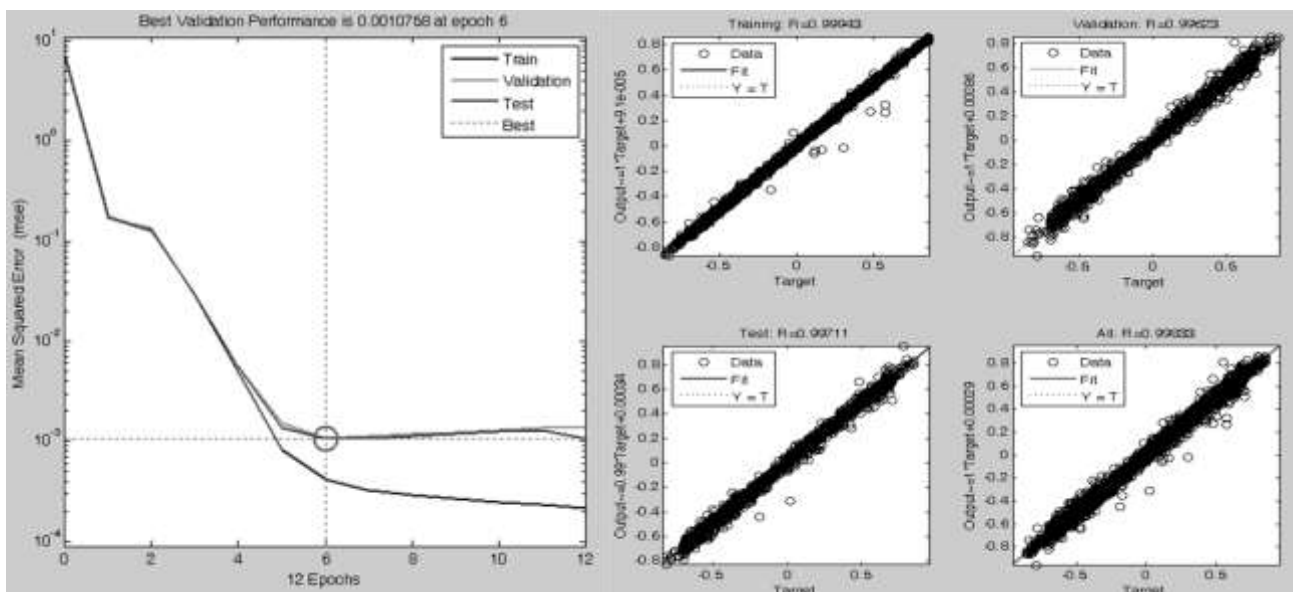


Рисунок 2 – Графики результата обучения ИНС соответствия состава шихты рецепту

На основе математической модели движения ленты стекла в среде MathCAD разработана компьютерная модель. Введены ограничения задачи Коши при

моделировании неньютоновской жидкости с заданным законом изменения коэффициента вязкости. По результатам анализа компьютерного моделирования дополнена исходная математическая модель. Компьютерная модель необходима для разработки цифровых тренажеров обучения и проведения аттестации операторов формования листового стекла для визуализации динамики процессов в ванне расплава.

В среде MathCAD разработана компьютерная модель робота-манипулятора, позволяющая рассчитать статистический критерий качества работы робота-манипулятора для минимизации боя ВЛС при установке его в штабель. Проверена адекватность разработанной математической модели позиционирования робота-манипулятора.

В главе 4 приведена классификация основных типов дефектов ВЛС; разработан вейвлетно-нейросетевой алгоритм диагностики расположения точечных дефектов ЛС; предложен эвристическо-продукционный алгоритм определения видов точечных дефектов ЛС; разработано аппаратно-техническое и программно-информационное обеспечение автоматизированной системы диагностики точечных дефектов ЛС.

Для автоматической диагностики причин возникновения точечных дефектов ЛС разработана архитектура оригинальной оптико-технической системы, которая устанавливается перпендикулярно направлению движения стекла по конвейеру. Оборудование этой системы размещено в специальном светозащищенном корпусе, в которое входит группа линейных видеокамер, установленных над лентой стекла, и блока структурированной подсветки, расположенного под ней.

Результаты применения автоматизированной процедуры по идентификации точечного дефекта ЛС типа «закрытый пузырь» показана на рисунке 3.

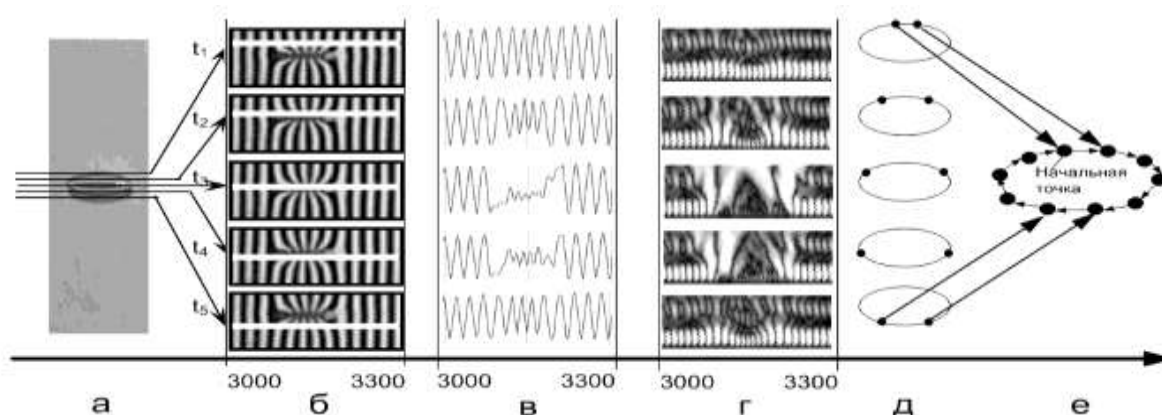


Рисунок 3 – Иконографическая модель локализации дефекта в стекле в моменты времени $t_1 - t_5$ (разработана автором)

На рисунке 3а показано изображение дефекта и его сканирование линейной видеокамерой в дискретные моменты времени t_i , $i = \overline{1,5}$.

Для определения типа контура дефекта эти 10 векторов преобразуются в 2048 скалярных значений по числу входов ИНС. В этом случае выходом ИНС является значение y_1 , соответствующее «гладкому контуру».

Набор разработанных эвристических продукционных правил позволяет анализировать геометрические характеристики дефекта, типа его контура и яркости его точек на основе правил. Пример эвристического продукционного правила для определения дефекта «Закрытый пузырь»:

ЕСЛИ (форма ядра = «круг» **ИЛИ** форма ядра = «овал») **И** (тип контура = «гладкий контур») **И** (интенсивность пропускания светового потока ядром дефекта $> 90\%$ **И** интенсивность пропускания светового потока ядром дефекта $< 100\%$) **И** (длина ядра \geq ширины ядра) **И** (наличие искажений вокруг ядра = *true* **ИЛИ** наличие искажений вокруг ядра = *false*), **ТО** дефект = «Закрытый пузырь».

Для компьютерного анализа изображений дефектов ЛС разработан комплексный вейвлет-нейро-эвристическо-вычислительный алгоритм автоматической диагностики точечных дефектов ЛС, состоящий из следующих этапов: 1) оптико-техническое сканирование, 2) локализация дефекта, 3) взаимодействие с базой данных (БД), 4) определение типа контура точечного дефекта с использованием ИНС, 5) классификация типа точечного дефекта с использованием эвристических продукционных правил, 6) диагностика причин возникновения дефекта ЛС на основе применения продукционных правил.

Предложенный комплексный алгоритм (см. рисунок 4) обеспечивает диагностику наиболее часто встречающихся экспериментально выявленных автором типов дефектов ЛС и формирование электронной карты дефектов, которая необходима для эффективного функционирования системы автоматического раскрытия ленты стекла в реальном времени. Информация о причинах возникновения дефектов ЛС используется при создании ЦТ повышения квалификации производственного персонала и при принятии решений по АУ многостадийным производством ВЛС.

Комплексный алгоритм реализован в виде ППП автоматической диагностики причин возникновения точечных дефектов ЛС (см. р.д. 6.2). Алгоритм идентификации

точечных дефектов ЛС выполняется непрерывно в режиме реального времени и взаимодействует с базой данных АСУ многостадийным производством ВЛС

В главе 5 описан вероятно-статистический алгоритм анализа этапов ЖЦ производства ВЛС; разработан логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей надежности производства ВЛС; изложен дискретно-событийный алгоритм управления организационно-технологическим процессом упаковки ВЛС.

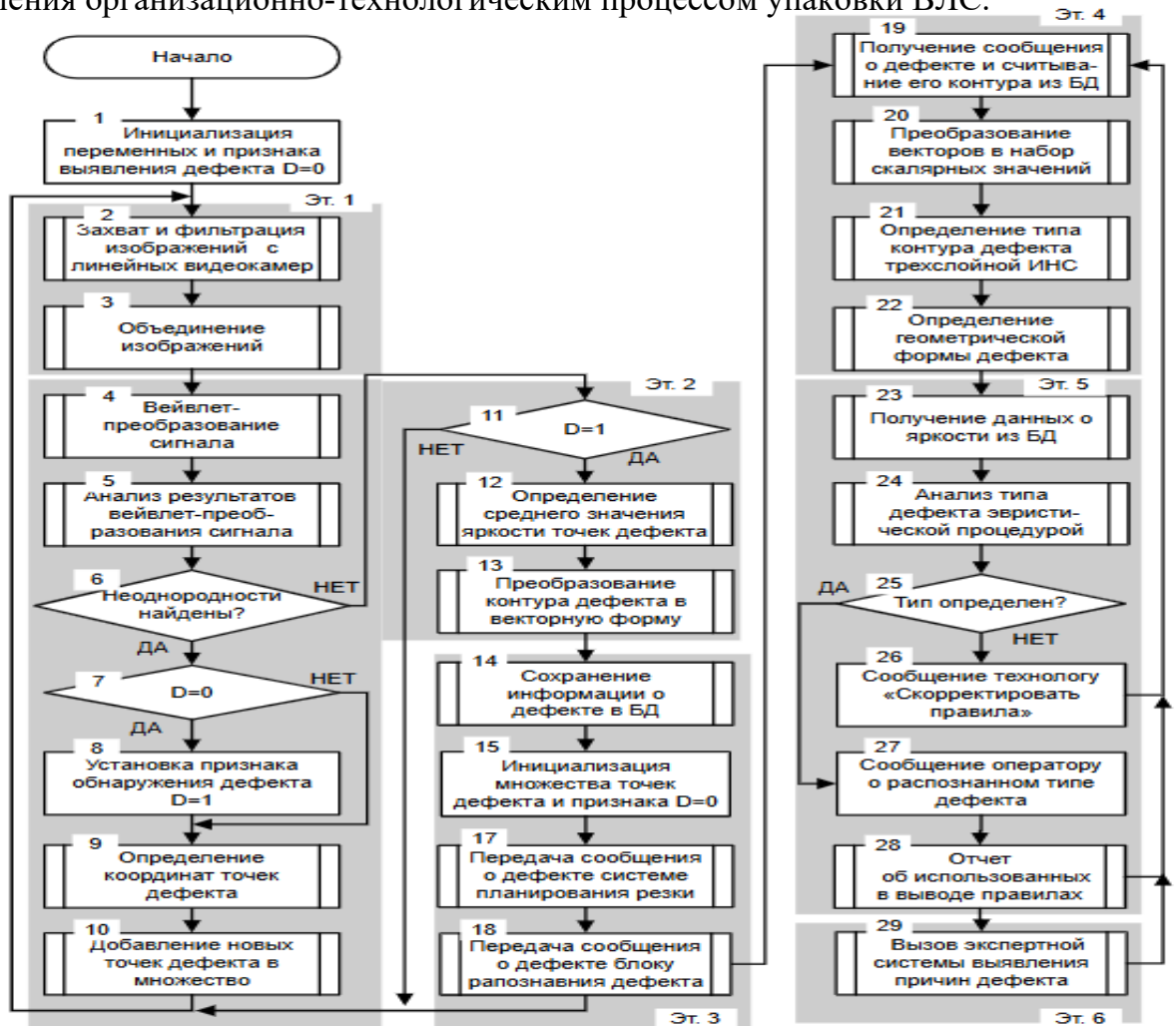


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма диагностики точечных дефектов листового стекла

На основе дополненной автором классификации уровней функционирования ХТП (рисунок 5) определены состояния этапов ЖЦ производства ВЛС. Низкая надежность оборудования, отсутствие своевременных регламентных работ и планово-предупредительного ремонта оборудования, низкая квалификация производственных операторов и др. приводят к возникновению нештатных ситуаций следующих уровней:

Уровень 1. Функционирование ХТП в проектном режиме.

Уровень 2. В случае, если возмущение создает превышение диапазона автоматического регулирования, следует отображение аварийных сигналов для

оператора. В этой ситуации оператор может управлять процессом вручную и перевести его в нормальное состояние на уровне 1. Оператор может задавать новые режимы функционирования ХТП. Эти два уровня обеспечивают выпуск ВЛС.

Уровень 3. При превышении критических параметров ХТП, несмотря на действия оператора, автоматически включается система противоаварийной защиты, обеспечивающая безопасную остановку процесса. Уровни 1 - 3 реализуются в АСУ ТП с использованием аппаратно-программных комплексов.

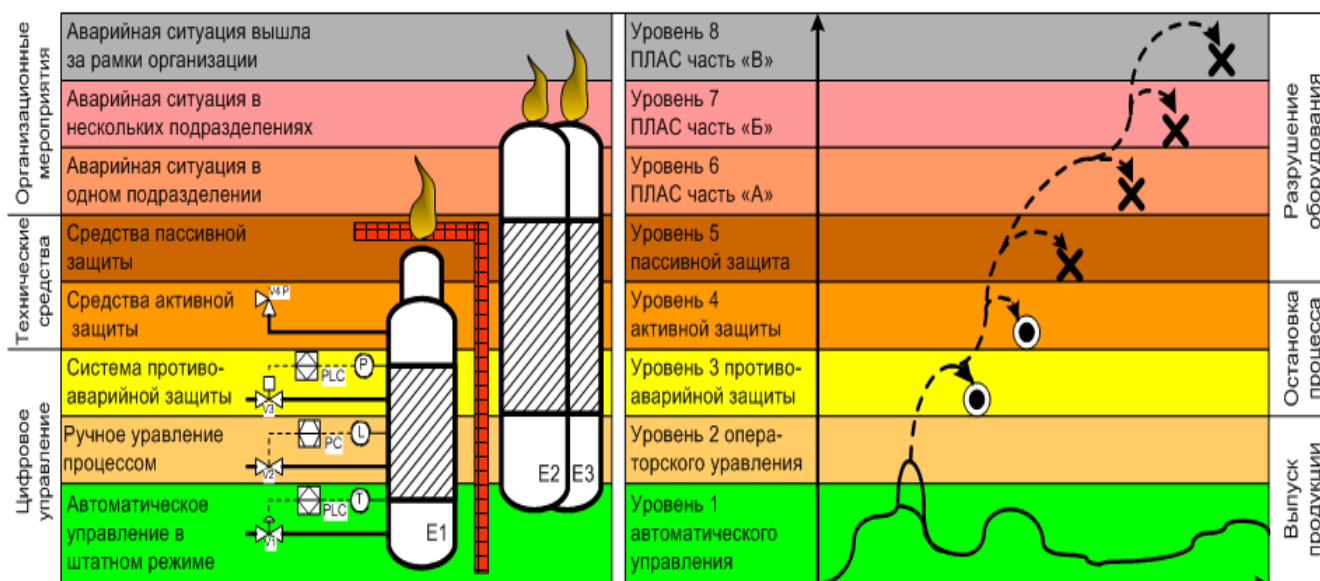


Рисунок 5 – Иконографическая модель уровней функционирования ХТП

Уровень 4 обеспечивает активную защиту на основе использования системы предохранительных клапанов, разрывных дисков и др. На уровнях 3 – 4 происходит прекращение выпуска продукции и переход оборудования в рабочее состояние, которое после проведения технического обслуживания может быть оперативно введено в эксплуатацию.

Уровень 5 – пассивная защита на базе дамб нефтяных парков и других защитных систем.

Уровень 6 – аварийная ситуация в пределах одного объекта (цеха, установки, производственного участка).

Уровень 7 – разработка системы мероприятий предприятия по подготовке к защите и по защите персонала и материальных ценностей от опасностей чрезвычайных ситуаций техногенного характера. На уровнях 5 – 8 происходит разрушение оборудования. Уровни защиты ХТП 1 - 7 реализуются на предприятии.

Уровень 8 относится к компетенциям администрации региона, где расположено предприятие, которые включают реализацию системы мероприятий по подготовке к защите и по защите населения и материальных ценностей от опасностей чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Разработан граф смены состояний этапов ЖЦ производства ВЛС (рис. 6), в котором состояния: S_{01} - монтаж заданий и сооружений для ХТП, S_{02} - монтаж оборудования ХТП, S_{03} - монтаж системы управления ХТП, S_{04} - вывод ХТП в штатный режим, S_{05} - функционирование ХТП в штатном автоматическом режиме, S_{06} - функционирование ХТП в штатном режиме ручного управления, S_{07} - функционирование ХТП в режиме противоаварийной защиты, S_{08} - функционирование ХТП в режиме активной защиты, S_{09} - функционирование ХТП в режиме пассивной защиты, S_{10} - функционирование ХТП в режиме аварийной ситуации уровня «А», S_{11} - функционирование ХТП в режиме аварийной ситуации уровня «Б», S_{12} - функционирование ХТП в режиме аварийной ситуации уровня «В», S_{13} - остановка штатного режима ХТП и выпуска качественной продукции, S_{14} - обслуживание, ремонт или демонтаж системы управления ХТП, S_{15} - обслуживание, ремонт или демонтаж оборудования ХТП, S_{16} - обслуживание, ремонт или демонтаж заданий и сооружений ХТП.

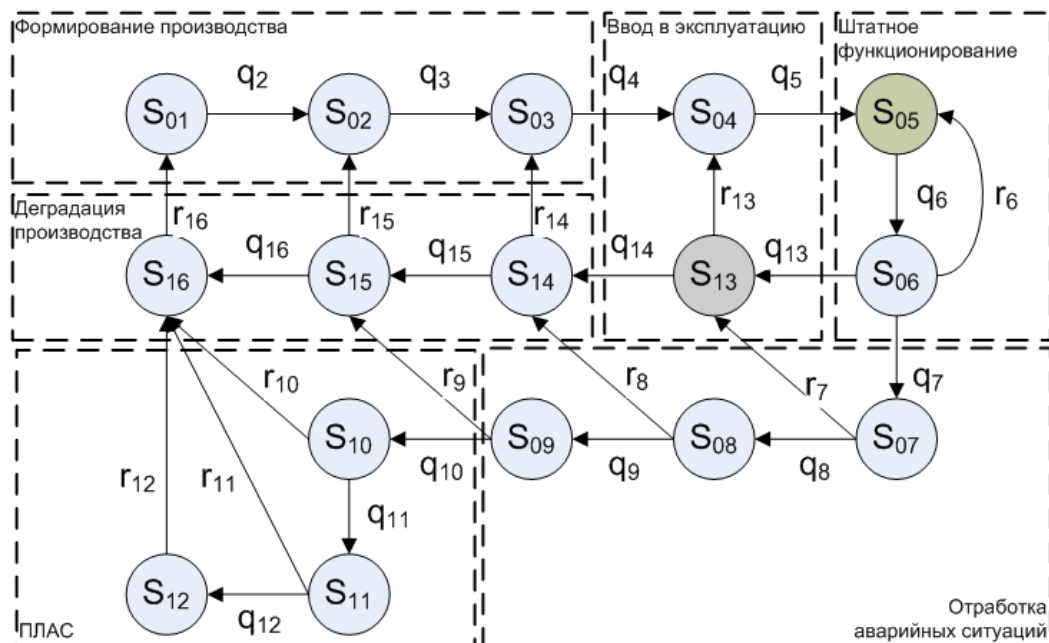


Рисунок 6 – Граф смены состояний этапов ЖЦ производства

На графе (см. рисунок 6) состояния 1-3 отображают стадии создания производства и его модернизацию, состояния с индексами 4 и 13 – ввод производства в эксплуатацию, состояния с индексами 5 и 6 – штатное функционирование производства, состояния с

индексами 7 – 12 – аварии на производстве, состояние с индексом 13 – остановку производства, состояния с индексами 14 – 17 – утилизацию ХТС. Вероятности переходов между состояниями ЖЦ производства получены на основе анализа статистических данных за период 1997-2023 гг.

Выполнено компьютерное моделирование и анализа функционирования производства ВЛС на основе применения аппарата Марковских цепей. В программной среде MathCAD рассчитаны вероятности каждого состояния ЖЦ производства ВЛС аналитическим методом с применением аппарата Марковских цепей. На основе матрицы вероятностей переходов $T(16*16)$ строится система линейных уравнений M . Такая система уравнений с нулевыми свободными членами имеет бесконечное

множество решений
$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n P_i \cdot T_{ij} + P_i \cdot (T_{ij} - 1) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n-1.$$
 Для получения

единственного решения указанное уравнение заменяется соотношением $M_{ni}=I$, где $i=1..n$. Для решения систем линейных алгебраических уравнений вида $MP=B$ в Mathcad используется стандартная функция $lsolve(M,B)$, которая возвращает вектор неизвестных P .

Сравнение результатов аналитического моделирования на основе Марковских цепей с результатами имитационного моделирования показывает, что значения вероятностей состояний совпадают с точностью до второго знака после запятой при рассчитанном количестве реализаций имитационной модели $N=20000$ с вероятностью 0,99. Получена оценка стационарных вероятностей с точностью $\varepsilon = 0.01$.

Расчетные значения вероятностей каждого состояния ЖЦ позволяют использовать программный комплекс «Арбитр» для анализа стойкости, живучести, технического риска, ожидаемого ущерба и эффективности функционирования производства ВЛС. Логико-вероятностный алгоритм расчета показателей надежности производства ВЛС реализован в программном комплексе «Арбитр».

Разработана имитационная модель планирования выпуска партий многоассортиментного ВЛС. Разработан дискретно-событийный алгоритм моделирования организационно-технологического процесса упаковки ВЛС на основе компьютерной имитационной многоагентной дискретно-событийной модели в среде AnyLogic.

Разработаны компьютерная и имитационная модели упаковки листов стекла позволяющие повысить эффективность по критерию производительности циклограмм

и программ для промышленных контроллеров, обеспечивающих управление оборудованием участка съема листового стекла.

В главе 6 изложена методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС; разработаны архитектура и режимы функционирования трех ППП: 1) управления диагностикой точечных дефектов ЛС; 2) цифрового тренажера обучения персонала цеха формирования ВЛС; 3) управления планово-предупредительными ремонтами оборудования многостадийного производства ВЛС.

Разработана методика инжиниринга проектирования АСУ ТП производства ВЛС, состоящая из пяти этапов (рисунок 7).

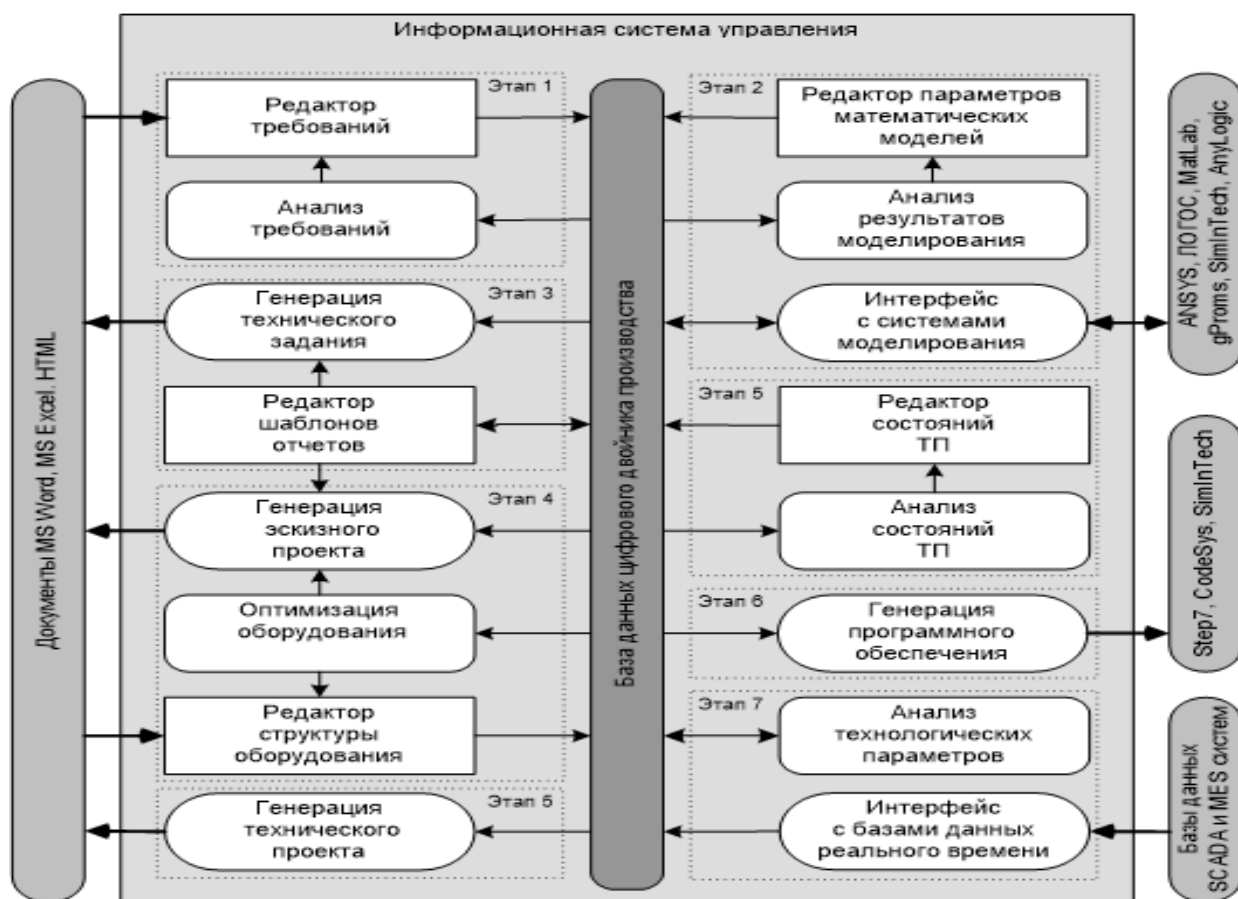


Рисунок 7 – Блок-схема методики инжиниринга АСУ ТП производства ВЛС

Основу архитектуры ППП компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства ВЛС составляет БД, в которой хранятся результаты работы подсистем.

Для реализации цифровой трансформации предприятий ВЛС и оценки информационных потоков разработана структура информационного взаимодействия цифровых платформ (ЦП) предприятия с использованием инструментов «Индустрии 4.0» (рисунок 8).

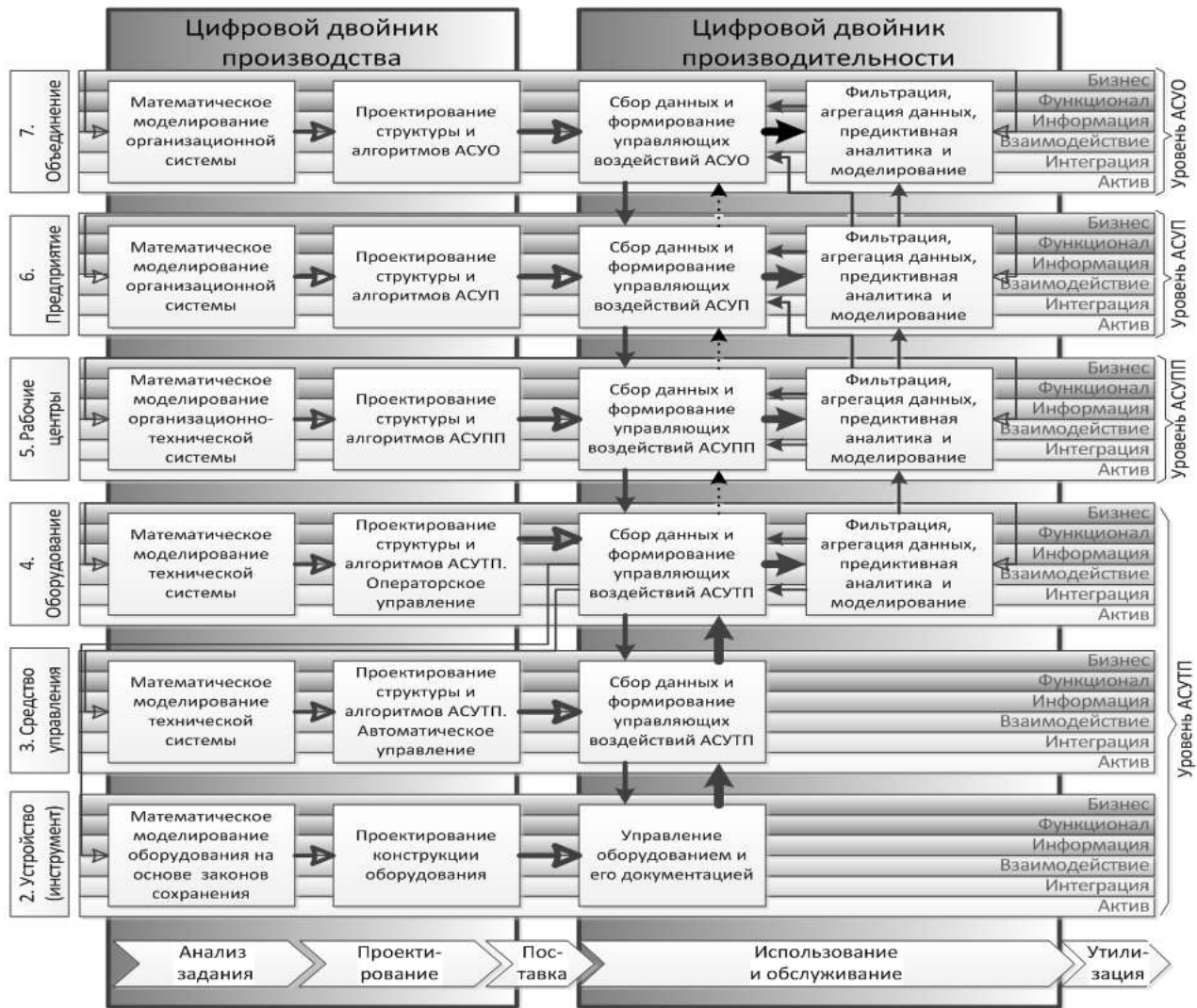


Рисунок 8 – Блок-схема структуры информационного взаимодействия цифровых платформ при цифровой трансформации предприятия

Описана архитектура и режим функционирования ППП идентификации точечных дефектов ЛС для функционирования которой используются автоматизированные рабочие места (АРМ) технолога и оператора (АРМО) (см. рисунок 9). Указанный ППП реализован с применением серийных промышленных аппаратных средств, предложенных автором оригинальных алгоритмов и сред разработки программного обеспечения MS Visual Studio, СУБД MS SQL и SCADA-системы WinCC.

Изложена методика автоматизированного инжиниринга ППП на основе анализа бизнес-процессов и разработки структуры программного обеспечения с применением универсального языка моделирования SysML, которые позволили разработать цифровой тренажер (ЦТ) для обучения операторов цеха формования ВЛС действиям в штатных и аварийных ситуациях.

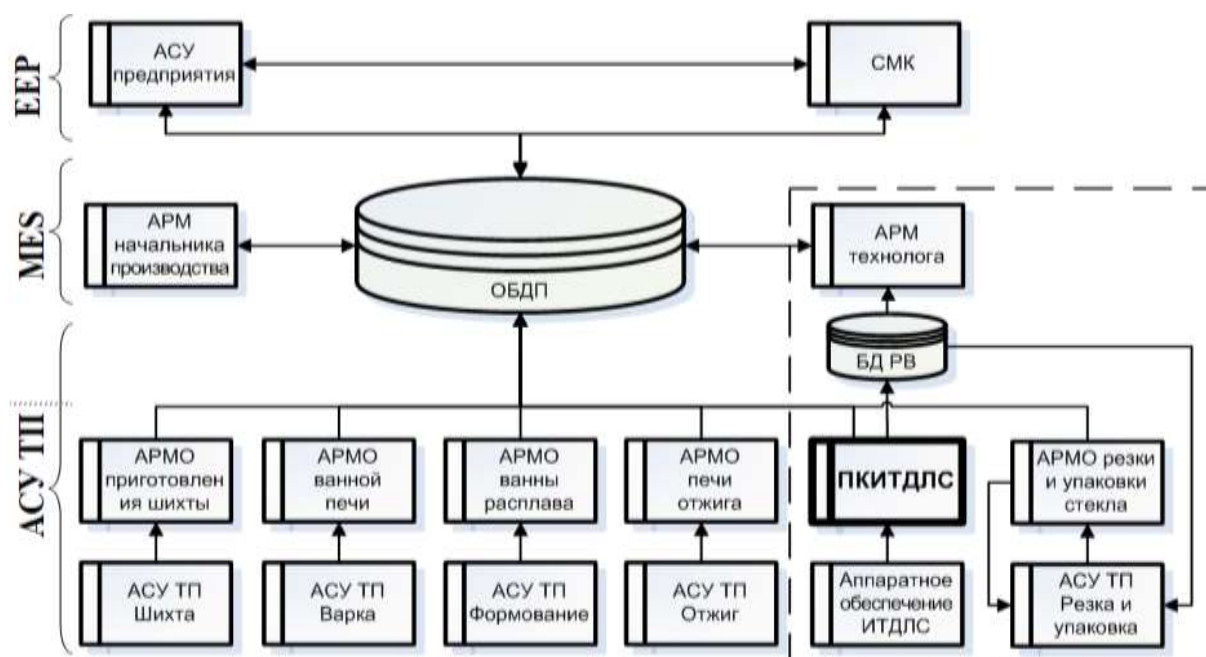


Рисунок 9 – Блок-схема архитектуры ППП идентификации точечных дефектов ЛС

Для описания взаимодействия участников процесса обучения разработаны компьютерные модели бизнес-процессов в программном комплексе Business Studio. Эти модели в нотации BPMN 2.0 стали основой для разработки диаграмм вариантов использования в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на языке SysML. Разработанный ЦТ является важным компонентом в составе единой информационной системы цифровизированного предприятия по производству ВЛС.

Разработанный ЦТ может использоваться для обучения операторов аналогичных промышленных производств различных листовых материалов: полимерной пленки, линолеума, бумаги и др.

С использованием цифровой платформы «1С.Предприятие» для ОАО «Саратовстройстекло» разработан ППП управления планово-предупредительными ремонтами оборудования производства ВЛС, обеспечивающий формирование годовых планов проведения планово-предупредительных ремонтов при минимизации простоев технологического оборудования.

В главе 7 изложены результаты применения ППП автоматизированного управления составом стекольной шихты; даны научно-обоснованные рекомендации по применению ППП диагностики дефектов ЛС; описаны научно-обоснованные рекомендации по оптимизации показателей надежности производства ВЛС; приведены научно-обоснованные рекомендации по применению ЦТ для обучения операторов.

Разработанные модель и алгоритм автоматизированного управления составом стекольной шихты (см. р.д. 3.1), а также реализующий их ППП (см. р.д. 7.2), практически применялся в 2007 – 2010 гг. при эксплуатации единой информационной системы предприятия ОАО «Саратовстройстекло» и позволил повысить на 6% точность состава стекольной шихты.

Прототип аппаратурно-технического и программно-информационного обеспечения ППП АС диагностики точечных дефектов ЛС (см. р.д. 6.2) практически использовался для оценки её эффективности при идентификации дефектов стекла на АО «Саратовский институт стекла» в 2015-2017 гг. Установлено, что этот ППП обеспечил устойчивую диагностику только точечных типов дефектов ЛС. Время локализации дефектов в кадре составляет то 0,1 до 1 с в зависимости от длины области дефекта, что в 20-200 раз меньше времени перемещения анализируемого участка ВЛС на участок резки. Для оптимизации раскроя ленты стекла с учетом производственного задания и размещения на ленте стекла выявленных дефектов требуется не более 5 с. Дальнейшее развитие этого ППП обеспечит идентификацию и других наиболее часто встречающихся типов дефектов ЛС.

Разработанный ППП цифрового тренажера (см. р.д. 6.3) используется на АО «Саратовстройстекло». Этот ЦТ прошел путь развития от «Компьютерного тренажера для обучения операторов в аварийных ситуациях» (2001) до «Программного обеспечения для обучения персонала выполнению штатных операций в различных режимах при варке стекла и формовании ленты стекла флоат-методом и действиям по устранению нештатных ситуаций и дефектов стекла» (2006) и продолжает совершенствоваться.

Использование методики системотехники на основе модели «Model-based system engineering», реализованной в среде визуального моделирования IBM Rhapsody на основе нотаций UML и SysML при разработке архитектуры и режимов функционирования ППП цифрового тренажера позволило упростить его модернизацию с учетом требований заказчика.

Технологами регулярно проводится анализ качества и режимов формования ВЛС и доопределяются параметры нештатных ситуаций ХТП с использованием **теоретико-множественной** модели (см. р.д. 6.3); постоянно адаптируются к изменяющимся условиям производства модели бизнес-процессов обучения и аттестации операторов. При подготовке исходной информации об аварийных ситуациях ХТП для наполнения БД

цифрового тренажера специалисты предприятия дополнительно решают важную задачу – задачу анализа и более полного понимания истинных причин возникновения опасных ситуации, а значит и разработки новых менее затратных способов их устранения.

Использование ППП цифрового тренажера для обучения операторов обеспечило руководству на АО «Саратовстройстекло» возможность снизить количество аварийных ситуаций на ХТП формования ленты стекла, обладающую большим экономическим эффектом за счет увеличения выпуска ВЛС и сокращения значительного времени простоя производства из-за «обрывов» ленты стекла.

Ряд основных научных результатов практически используется в АО КБПА при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по инжинирингу АСУ техническими системами и услуг технологического инжиниринга, а также создания высокотехнологичного производства с применением инструментов «Индустрии 4.0».

Все результаты практического применения научных разработок автора подтверждены справками различных предприятий (см. приложения 2.1 -2.7).

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана нейросетевая модель автоматизированного управления составом стекольной шихты, позволяющая определить заданный технологический режим работы дозировочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава и влажности сырья.

2. Предложена компьютерная модель ХТП непрерывного формования ленты стекла, позволяющая анализировать различные штатные и аварийные режимы формования ленты стекла на расплаве олова и создать ППП для цифрового тренажера по обучению персонала.

3. Предложен алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов ЛС, обеспечивающий автоматическое формирование электронной карты дефектов, которая необходима для функционирования системы автоматического оптимального раскроя ЛС в реальном времени.

4. Разработана компьютерная имитационная модель этапов ЖЦ производства ВЛС, которая необходима для определения вероятностей нахождения производства на каждом из этапов ЖЦ при автоматизированных расчетах показателей надежности производства ВЛС.

5. Разработаны архитектура и режимы функционирования ППП компьютеризированного проектирования АСУТП производства ВЛС, применение которого исключает необоснованные проектные решения, сокращает время проектирования и ввода в эксплуатацию АСУТП производства ВЛС.

6. Предложена архитектура и режимы функционирования ППП диагностики точечных дефектов ЛС, применение которого позволяет на основе использования серийных аппаратных средств автоматически диагностировать наиболее часто встречающиеся точечные дефекты ЛС.

7. Разработаны архитектура и режимы функционирования ППП цифрового тренажера обучения персонала ХТП формования ленты стекла, применение которого обеспечивает обучение и повышение квалификации персонала производства ВЛС.

8. На основе предложенных теоретических и практических результатов диссертации разработаны руководящие технические материалы по повышению надежности и эффективности производства ВЛС, которые могут быть применены при разработке цифровых двойников, обеспечивающих решение задач повышения энергоэффективности автоматизированных многостадийных химических и металлургических производств на основе оценки проектных решений, процедуры оптимального управления ХТП в реальном времени, прогнозирования аварийных ситуаций и обучения производственного персонала.

9. Разработанное методическое и программно-информационное обеспечение на основе использования современных методов математического моделирования ХТП, теории ИИ и инструментов «Индустрия 4.0», обеспечивает успешное решение актуальных задач иерархического управления энергоэффективностью и надежностью многостадийного производства ВЛС, прогнозирование режимов функционирования производства, что является важнейшим фактором обеспечения технологического лидерства Российской Федерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенных научно-практических результатов можно обоснованно утверждать, что содержание представленной диссертационной работы полностью соответствуют паспорту научной специальности 2.3.3. «Автоматизированное управление технологическими процессами и производствами».

Планируемые дальнейшие направления научных исследований соискателя будут направлены на разработку специальных экспертных систем поддержки принятия научно обоснованных решений по оптимальному управлению ХТП и ХТС производства ВЛС в реальном времени, а также методологию оптимального управления промышленных производств различных листовых материалов: полимерной пленки, линолеума, бумаги и др.; разработку интеллектуальных вычислительных методов управления ремонтами и техническим обслуживанием непрерывных химико-технологических систем; разработку отечественного программно-информационного обеспечения цифровых производственных систем; разработку методического и программно-информационного обеспечения автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийных производств ВЛС, практическое использование которого обеспечит реализацию проекта технологического лидерства Российской Федерации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Yakovlev, D. Modeling the Operation of a Digital Twin of a Conveyor Line / D.Yakovlev, **D.Petrov**, A.Kosterev / Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control. 2024. Vol. 554. P. 105-115. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67685-7_7 (**Scopus**)
2. **Petrov D.Yu.** A System Dynamics Model for Float Glass Production Management // Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control. 2023. Vol. 437. P. 227-240. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35875-3_18 (**Scopus**)
3. **Petrov D.Yu.** Assessment of the protection level of continuous production based on the Markov life cycle model / D.Yu. Petrov // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. – 2022. – Vol. 22, No. 3. – P. 393-400. – DOI 10.18500/1816-9791-2022-22-3-393-400 (**Scopus**)
4. Meshalkin V.P. Wavelet-neuro-heuristics complex procedure of diagnostics of point defects of sheet glass / V.P. Meshalkin, **D.Yu. Petrov** // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 48, No. 3. – P. 301-305. – DOI 10.1134/S0040579514030129 (**Scopus**)
5. Meshalkin V.P. Algorithms and software system for controlling the quality batch using artificial neural networks / V.P. Meshalkin, A.A. Bolshakov, **D.Yu. Petrov**, O.A. Krainov //

Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2012. Vol. 46, No. 3. P. 284-287.– DOI 10.1134/S0040579512030062 (Scopus)

Публикации в рецензируемых изданиях:

1. Мешалкин В.П. Оптимизация планирования выпуска партий многоассортиментного высококачественного листового стекла / В. П. Мешалкин, А. А. Большаков, **Д. Ю. Петров** // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2025. № 74. С. 66-72. – DOI 10.36807/1998-9849-2025-74-100-66-72.

2. Резчиков А.Ф. Алгоритм оптимизации структур робототехнических сборочных комплексов / А. Ф. Резчиков, А. А. Большаков, **Д.Ю. Петров**, Д. Д. Яковлев // Автоматизация в промышленности. 2025. № 5. С. 3–10.

3. Мешалкин В.П. Инжиниринг цифрового тренажера для обучения операторов формования листового стекла / В.П. Мешалкин, Т.Б. Чистякова, **Д.Ю. Петров** // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 2. С. 213-220. – DOI 10.15827/0236-235X.146.213-220.

4. **Петров Д.Ю.** Модельно-управляемое проектирование автоматизированной системы идентификации дефектов листового стекла // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 4. С. 41-48. – DOI 10.24143/2072-9502-2023-4-41-48.

5. Мешалкин В.П. Цифровые платформы для автоматизированного управления химико-технологическими системами / В.П. Мешалкин, А.А. Большаков, **Д.Ю. Петров** // Автоматизация в промышленности. 2023. № 8. С. 45-48. – DOI 10.25728/avtprom.2023.08.09.

6. **Петров Д.Ю.** Архитектура информационной системы управления жизненным циклом цифрового двойника для непрерывного производства / **Д.Ю. Петров** // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 57 (83). С. 98-104. – DOI 10.36807/1998-9849-2020-57-83-98-104.

7. **Петров Д.Ю.** Комплекс программ идентификации точечных дефектов листового стекла / В.П. Мешалкин, **Д.Ю. Петров**, В.А. Иващенко, И.В. Ефимов // Программные продукты и системы. 2014. № 3. С. 147-152.

8. Ефимов И.В. Автоматизированная нейронно-эвристическая процедура распознавания точечных дефектов в листовом стекле / И.В. Ефимов, **Д.Ю. Петров**,

В.А. Иващенко, В.П. Мешалкин // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 8. С. 500-504.

9. Ефимов И.В. Аппаратурно-техническое и алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы локализации точечных дефектов в листовом стекле / И.В. Ефимов, **Д.Ю. Петров**, В.А. Иващенко, В.П. Мешалкин // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 2. С. 122-128.

10. Ефимов И.В. Алгоритмическое обеспечение классификации точечных дефектов листового стекла / И.В. Ефимов, В.А. Иващенко, **Д.Ю. Петров**, В.П. Мешалкин // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 1-6.

11. Большаков А.А. Программный комплекс управления жизненным циклом мехатронных систем / А.А. Большаков, **Д.Ю. Петров** // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 20-26.

12. Домнич В.С. Автоматизация поиска причин аварийных ситуаций при формовании листового стекла / В.С. Домнич, В.А. Иващенко, **Д.Ю. Петров** // Проблемы управления. 2011. № 5. С. 52-58.

13. Причинно-следственный подход для системного анализа производства листового стекла / Ю.А. Аветисян, В.С. Домнич, **Д.Ю. Петров** // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2010. N 4 (50). С. 75-79.

14. Крайнов О.А. Модели анализа качества стекольной шихты на основе искусственных нейронных сетей / О.А. Крайнов, **Д.Ю. Петров**, П.А. Король // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 4 (50). С. 79-82.

15. **Петров Д.Ю.** Построение автоматизированной системы управления производством шихты / О.А. Крайнов, **Д.Ю. Петров** // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. №4 (43). Вып. 2. С. 105-108.

16. **Петров Д. Ю.** Надежность манипуляционных роботов / Д. Ю. Петров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007.Т. 3, № 1(26). С. 71-82.

Публикация в рецензируемом издании по специальности 2.6.14 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

1. **Петров Д.Ю.** Математическое моделирование процесса формования листового стекла как объекта автоматизированного управления // Химическая промышленность сегодня. 2024. № 2. С. 55-64.

Публикация в прочих изданиях

1. Применение гибридной цифровой платформы для обработки больших массивов данных химических производств / Н. А. Куцевич, Д. Х. Михайлиди, **Д. Ю. Петров**, А. Г. Бубнов // Российский химический журнал. 2023. Т. 67, № 3. С.77-83.

Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619943 Российская Федерация. Программа для моделирования растекания расплава стекла при его формировании методом флоат-процесса: № 2023618403: заявл. 28.04.2023: опубл. 17.05.2023 / Ю.А. Захаров, **Д.Ю. Петров**, В.Ю. Мусатов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619944 Российская Федерация. Программа для обучения персонала выполнению штатных операций в различных режимах при варке стекла и его формовании и действиям по устранению нештатных ситуаций и дефектов стекла: №2023618401: заявл. 28.04.202: опубл. 17.05.2023 / В.П. Мешалкин, А.Ф. Резчиков, **Д.Ю. Петров**, В.Ю. Мусатов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664748 Российская Федерация. Программная модель системной динамики функционирования многостадийного производства листового стекла методом флоат-процесса: № 2023663928: заявл. 03.07.2023: опубл. 07.07.2023 / А.А. Большаков, **Д.Ю. Петров**, В.Ю. Мусатов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

4. Патент на полезную модель № 29158 U1 Российская Федерация, МПК G05B 19/43, С02F 1/00, С02F 9/00. Система управления подготовкой котловой воды: № 2003102173/20: заявл. 30.01.2003: опубл. 27.04.2003 / С.П. Подопригора, В.Н. Федонин, **Д.Ю. Петров**, Д.М. Бекасов.

Монография

1. Системы искусственного интеллекта в мехатронике / А. А. Большаков, М. Б. Бровкова, В. П. Глазков [и др.]. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2014. – 252 с. – ISBN 978-5-7433-2690-7 (личное участие **Петрова Д.Ю.** – раздел 1.4. Мобильные мехатронные комплексы и управление их жизненным циклом).

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах):

1. **Петров Д.Ю.** Оценка повторяемости позиционирования робота для съёма листов стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2025. № 10. С. 67-71.

2. **Петров Д. Ю.** Анализ проблем цифровизации непрерывных производств / Д. Ю. Петров // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов XXVII научной конференции, Евпатория, 02–09 июля 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Буки Веди", 2023. С. 63-65.

3. **Петров Д. Ю.** Структура комплексной модели изменения режимов функционирования производства листового стекла / Д. Ю. Петров // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 8. С. 82-85. – DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2023_8_82.

4. **Петров Д. Ю.** Структура цифрового двойника предприятия непрерывного производства / Д. Ю. Петров // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 9. С. 102-105. DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2023_9_102.

5. **Петров Д. Ю.** Стратегическая карта целей производства листового стекла / Д. Ю. Петров // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 10. С. 133-139. DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2022_10_133.

6. **Петров Д. Ю.** Разработка модели состояний жизненного цикла непрерывного производства / Д. Ю. Петров // Компьютерные науки и информационные технологии: Материалы Международной научной конференции, Саратов, 18–20 ноября 2021 года. Саратов: ООО "Издательство "Научная книга", 2021. С. 108-110.

7. **Петров Д. Ю.** Системный анализ функционирования непрерывного производства / Д. Ю. Петров // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 6. С. 113-118. DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2021_6_113.

8. Мешалкин В.П. Энергоресурсоэффективные автоматизированные многостадийные производства высококачественного листового стекла с применением цифровых двойников / В.П. Мешалкин, **Д.Ю. Петров** // Международный год стекла в России. Материалы научной конференции – СПб.: АИР. 2022. – 189 с. – ISBN 978-5-906224-14-9 – С. 68-82.

9. Мешалкин, В. П. Архитектура иерархической автоматизированной системы управления многостадийным производством высококачественного конструкционного стекла / В. П. Мешалкин, **Д. Ю. Петров** // Неорганическая химия – фундаментальная основа в материаловедении керамических, стеклообразных и композиционных материалов : материалы научной конференции, Санкт-Петербург, 04–05 марта 2016 года. – Санкт-Петербург: Издательство "Лема", 2016. С. 143-146.

10. **Петров Д.Ю.** Анализ показателей надежности производства листового стекла // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2014. № 8 (67). С. 260-263.

11. Быков, Р. С. Разработка систем диспетчерского управления и сбора первичной информации для производства стекла / Р. С. Быков, В. П. Мешалкин, **Д. Ю. Петров** // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности : V Международная конференция Российского химического общества им. Д.И. Менделеева : тезисы докладов, Москва, 29–30 октября 2013 года. – Москва: Общероссийская общественная организация "Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева", 2013. С. 62-63.

12. **Петров Д. Ю.** Оптимизация функционирования участка съёма листового стекла // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-6-2012»). Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции, 11 – 13 декабря 2012 года / Отв. ред.: А.А. Большаков, В.П. Мешалкин. – Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2012. С. 205-207.

13. Лалыкин Н.В. Стратегия повышения техногенной безопасности на предприятиях с непрерывным производством / Н.В. Лалыкин, А.Ф. Резчиков, **Д.Ю. Петров** // Высокие технологии – путь к прогрессу: Сборник научных трудов – Саратов: «Научная книга», 2003. ISBN 5-93888-309-1. С. 133-135.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность своему научному наставнику и учителю, научному консультанту по диссертационной работе – академику РАН, заслуженному деятелю науки РФ, директору Международного Института Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева, профессору, д.т.н. **Валерию Павловичу Мешалкину** за многолетнюю поддержку, неоценимую помощь и неустанное внимание, ценные научно-методические рекомендации и советы.

Автор благодарит сотрудников лаборатории «Системный анализ и управление» Института проблем точной механики и управления РАН; преподавателей факультета компьютерных наук и информационных технологий СГУ им. Н.Г. Чернышевского; преподавателей кафедры «Системотехника» Института электронной техники и приборостроения СГТУ им. Гагарина Ю.А.; научных сотрудников Института прикладной математики и механики; преподавателей и научных сотрудников кафедры «Логистика и экономическая информатика» и Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ имени Д.И. Менделеева за важные методические рекомендации, постоянную организационную и техническую поддержку на протяжении всего периода работы.

Автор выражает особую благодарность и признательность сотрудникам Института проблем точной механики и управления РАН: член-корреспонденту РАН, профессору, д.т.н. **Резчикову Александру Федоровичу** и доценту, д.т.н. **Иващенко Владимиру Андреевичу** за формирование со студенческих лет интереса к научным исследованиям и техническим разработкам автоматизированных систем управления, важные научно-методические рекомендации по результатам научных исследований докторанта; профессору, д.ф.-м.н. **Макееву Николаю Николаевичу** и профессору, д.т.н., профессору СПбГПУ им. Петра Великого **Большакову Александру Афанасьевичу** за постоянное внимание, методическую поддержку, организационную помощь, ценные научные консультации, советы и рекомендации.

Автор благодарит членов экспертно-аналитического комитета Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях» за многолетнее внимательное обсуждение научных докладов соискателя и важные организационно-методические рекомендации и советы по содержанию научных исследований докторанта.

Автор благодарен всем инженерно-техническим работникам АО «Саратовстройстекло», АО «Саратовский институт стекла» и АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики» за консультации по различным аспектам производства листового стекла, за поддержку и внимание к его научно-исследовательской работе, за помощь в реализации на производстве основных результатов научных разработок автора.