



**САМАРСКИЙ  
ПОЛИТЕХ**  
Опорный университет

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Самарский государственный  
технический университет»  
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)**

ул. Молодогвардейская, 244,  
гл. корпус, г. Самара, 443100  
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846) 278-44-00  
E-mail: [rector@samgtu.ru](mailto:rector@samgtu.ru)  
ОКПО 02068396, ОГРН 1026301167683,  
ИНН 6315800040, КПП 631601001

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»  
д.т.н., доцент  
Еремин А.В.



*03.06.2026* № *01.09.05/1692*

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## **ОТЗЫВ**

### **ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский государственный технический  
университет»**

**на диссертационную работу**

**Петрова Дмитрия Юрьевича**

**«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 (ВЛС).

Для энергоёмких производств, к которым относится многостадийное производство высококачественного листового стекла, критически важна проблема рационального использования сырья и топливно-энергетических ресурсов. Производство листового стекла представляет собой сложную химико-технологическую систему, а качество конечного продукта определяется режимами её функционирования и спецификой протекающих технологических процессов: приготовления шихты, варки стекла, формования ленты флоат-методом и отжига.

Внедрение методов инжиниринга цифровизированных интеллектуальных технологий, роботизированных кибер-физических систем и применение машинного обучения и искусственного интеллекта являются ключевыми факторами повышения энергоэффективности отечественной стекольной отрасли и производств стройматериалов, а также обеспечения технологического суверенитета России.

Многочисленные исследования посвящены отдельным аспектам повышения эффективности производства высококачественного листового стекла. Работы, связанные с системным подходом, не в полной мере используют возможности комплексного компьютерного управления многостадийными дискретно-непрерывными процессами, к которым относится стекольное производство, предоставляемыми базовыми положениями концепции «Индустрия 4.0».

Актуальность диссертационной работы определяется решением научной проблемы разработки методического и программно-информационного обеспечения АСУ энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла как сложной химико-технологической системы. Успешное ее решение имеет ключевое экономическое значение для повышения эффективности и конкурентоспособности российской стекольной промышленности, а также для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

Целью работы является 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 автором сформулированы и решены 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.

## Структура и объем 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.

**В первой главе** проведен анализ текущего состояния исследований в области автоматизированного управления непрерывными промышленными производствами. Выполнен анализ научных трудов, посвященных системному подходу к оптимизации энергоресурсоэффективности технологических процессов. Показано, что создание многоуровневых систем управления эффективностью и безопасностью сложных технологических комплексов является комплексной научно-технической проблемой.

Представлен анализ современных методов управления качеством продукции непрерывных производств. Рассмотрены возможности применения цифровых платформ как инструментов автоматизированного управления многостадийными химическими и металлургическими производствами.

Определено, что производство высококачественного листового стекла относится к классу сложных динамических систем. Установлено, наличие широкого круга нерешенных научных проблем разработки математического и программно-информационного обеспечения для автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла.

В выводах по первой главе определена цель и научно-технические задачи исследования.

**Во второй главе** выполнен системный анализ многостадийного производства листового стекла как объекта автоматизации. Проведена декомпозиция общей сложной задачи оптимального иерархического управления химико-технологической системой в целом на совокупность взаимосвязанных задач управления с частными критериями эффективности. Определены комплексы задач управления (функциональные подсистемы) и предложен

алгоритм анализа многостадийного производства листового стекла. Решение задач автоматизированного управления цифровизированными организационно-техническими комплексами базируется на технологиях Индустрии 4.0, включая машинное обучение, формализацию, моделирование бизнес-процессов и развитие программно-аппаратных средств.

Разработана модель на основе аппарата искусственных нейронных сетей для автоматизированного управления составом шихты с целью предотвращения дефектов стекла, основанная на анализе отклонений химического состава (по нерастворимому остатку, соде, сумме карбонатов и сульфату натрия). Предложенная нейросетевая модель предназначена для прогнозирования и контроля качества листового стекла.

Рассмотрена гидродинамическая задача о растекании расплава жидкого стекла, как неньютоновской жидкости по плоскости с учетом растягивающих усилий, создаваемых бортоформирующими машинами. Методом итераций найдены зависимости распределения геометрических параметров потока расплава по длине ленты стекла, а также продольный профиль скорости течения стекломассы.

**Третья глава** посвящена инжинирингу компьютерных моделей химико-технологических процессов многостадийного производства высококачественного листового стекла: приготовления стекольной шихты, формования движущейся ленты стекла, оценки качества позиционирования робота-манипулятора для упаковки листов стекла.

Представлена структура искусственной нейронной сети, аппроксимирующей сложную зависимость показателей качества шихты от её химсостава, обеспечивающую среднеквадратичную ошибку не более 0,001, что приемлемо для производства листового стекла. Полученная компьютерная нейросетевая модель применялись для анализа влияния свойств сырья, а также для прогнозирования и управления качеством шихты.

Разработана компьютерная модель химико-технологического процесса формования движущейся ленты стекла в программном комплексе MathCAD. Полученная модель после формализации всех компонентов предназначена для

цифрового тренажера операторов формования листового стекла для визуализации динамики движения ленты стекла в ванне расплава.

Идентифицированы ключевые источники погрешностей кинематических параметров манипуляционных роботов. Используются два вычислительных метода: аналитический и метод статистических испытаний для расчета надежности повторяемости позиционирования двухзвенного манипулятора. Оценка достоверности полученных результатов основана на сравнении показателей надежности, полученных этими методами при одинаковых условиях.

**Четвертая глава** посвящена разработке интеллектуально-статистических алгоритмов автоматизированной диагностики точечных дефектов листового стекла. Разработана комплексная вейвлет-нейро-эвристическая процедура, которая обеспечивает выявление точечных дефектов листового стекла. Предложенный способ определения точечных дефектов позволяет локализовать на поверхности стекла наиболее типичные изъяны размером свыше 0,5 мм с помощью доступных по стоимости линейных видеокамер. Предложено аппаратно-техническое и алгоритмическое обеспечение, служащее фундаментом для создания отечественной системы автоматизированного выявления и идентификации дефектов листового стекла.

**В пятой главе** рассмотрено алгоритмическое обеспечение иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства высококачественного листового стекла.

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. Разработан логико-вероятностный алгоритм расчета комплекса показателей

эксплуатационной надежности производства высококачественного листового стекла. Разработана схема функциональной целостности производства листового стекла. Результаты использования алгоритма позволяют выявить наиболее вероятные последовательности отказов, элементы, ограничивающие надежность АСУТП, а также своевременно разработать и реализовать мероприятия для выравнивания надежности участков производства.

Разработана стратегическая карта целей и показателей функционирования производства высококачественного листового стекла. Разработан алгоритм планирования производства, который обеспечивает оптимизацию размера партий выпуска ВЛС различных типов и сокращение количества изменений технологических режимов производства ВЛС, что позволяет повысить энергоресурсоэффективность производства.

**В шестой главе** рассмотрен инжиниринг пакетов прикладных программ иерархического автоматизированного управления энергоресурсоэффективностью многостадийного производства листового стекла.

Предложена методика инжиниринга программно-информационного обеспечения компьютеризированного проектирования АСУ ТП производства листового стекла. Разработана архитектура информационной системы для управления жизненным циклом непрерывного технологического процесса.

Разработана автоматизированная система идентификации точечных дефектов листового стекла, построенная на основе модельно-управляемого проектирования с применением UML и алгоритмов идентификации позволяет обеспечить идентификацию наиболее часто встречающихся типов дефектов листового стекла.

Разработан цифровой тренажер для обучения операторов формования листового стекла действиям в нештатных ситуациях на основе комплексного использования подходов проектирования бизнес-процессов и разработки структуры обеспечения с использованием универсального языка моделирования SysML.

На основе цифровой платформы «1С» разработан пакет прикладных программ автоматизированного управления планово-предупредительными ремонтами электрического оборудования. Он обеспечивает анализ качества работы оборудования и формирование годовых смет на материалы, годовых и месячных графиков планово-предупредительного ремонта.

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

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 ФГБОУ ВО «СГУ имени 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» ФГБОУ ВО «СГУ имени 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.

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

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

1. Разработанную нейросетевую модель автоматизированного управления составом стекольной шихты с использованием искусственной нейронной сети на основе многослойного персептрона с двумя внутренними слоями, что обеспечивает заданный режим работы дозирочно-смесительной линии при колебаниях химического и гранулометрического состава сырья.

2. Разработанную математическую модель непрерывного формования ленты стекла с учетом влияния растягивающих усилий бортоформирующих машин на поток жидкого стекла, заложенную в основу программного обеспечения цифрового тренажера для обучения персонала работе в штатных и аварийных ситуациях.

3. Предложенный алгоритм автоматизированной диагностики точечных дефектов листового стекла с применением метода вейвлет-преобразования для локализации дефекта на ленте стекла, использованием искусственной нейронной сети для распознавания типа контура точечного дефекта и набора эвристических правил для классификации типа выявленного точечного дефекта, обеспечивающий автоматическое формирование электронной карты дефектов ленты стекла.

4. Предложенный алгоритм анализа этапов жизненного цикла многостадийного производства листового стекла с использованием аппарата марковских процессов и графа состояний производства, позволяющий определять вероятности нахождения производства на каждом из этапов его жизненного

цикла, которые необходимы для анализа показателей надежности данного производства.

5. Разработанную архитектуру программных комплексов компьютеризированного проектирования АСУТП производства листового стекла, диагностики точечных дефектов листового стекла, цифрового тренажера обучения персонала участка формования ленты стекла, обеспечивающую уменьшение количества нерациональных проектных решений при проектировании автоматизированных систем управления производства листового стекла; автоматическую диагностику наиболее часто встречающихся точечных дефектов листового стекла и повышение квалификации рабочего персонала производства соответственно.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций работы

Обоснованность научных результатов диссертационной работы подтверждается доказательной методологической базой, основанной на общепринятых апробированных научных положениях, теоретической согласованностью полученных новых данных с известными положениями фундаментальной науки, соответствием экспериментальных данных, данным, полученным из независимых источников.

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

Теоретическая значимость результатов и выводов

Теоретическая значимость заключается в разработанных математических и компьютерных моделях управления составом стекольной шихты и диагностики дефектов листового стекла с использованием искусственных нейронных сетей. Разработаны новые и модифицированы известные аналитические методы для создания математических моделей растекания ленты стекла при ее движении по поверхности расплавленного олова и расчёта статистического критерия качества работы робота-манипулятора для упаковки листов стекла.

### Практическая значимость работы

Полученные в диссертации результаты имеют широкие перспективы внедрения, что подтверждается соответствием работ по теме диссертации распоряжениям и постановлениям Правительства РФ.

Теоретические результаты, полученные в диссертации, были практически применены при разработке проектов, реализации мероприятий и стратегий по повышению энергоресурсоэффективности на предприятиях стекольной промышленности и других промышленных предприятиях. Результаты диссертации использованы при выполнении научно-исследовательских работ по 10 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. В задаче Коши (2.6)-(2.7) для системы дифференциальных уравнений первого порядка не могут одновременно устанавливаться граничные условия (2.7) и (2.9). Это противоречит требованиям корректности решения по Адамару. Возможно, выполнение условия (2.9) достигается определением напряжений  $R(x)$ , создаваемых бортоформирующими машинами, но из текста диссертации это неясно. Кроме того, неясно, как эта процедура, если она заложена, вписывается в алгоритм Пикаро-Линделефа и каким образом гарантируется выполнение условия  $R(x) \neq 0,5$ .

2. Следовало бы обосновать метод итерационного решения задачи (2.6)-(2.7) с точки зрения скорости его сходимости по сравнению с известными методами: Ньютона, «предиктор-корректор» и т.п., т.к. сходимость метода Пикаро-Линделефа зависит от величины константы Липшица и шага итерационной процедуры. Из текста диссертации неясно, как оценивалась константа Липшица и выбирался шаг итерационной процедуры в условиях широкого диапазона температур и вязкости.

3. Неясно, какой физический смысл имеет константа  $C$  в формулах на стр.122. Непонятно, как удалось установить, что значение  $C=0,5$  необходимо для сходимости процесса с минимальной толщиной превышения  $\epsilon$  расплава стекла над номинальной  $h_0$ , чтобы  $f=1$ .

4. Следовало бы обосновать выбор нейросетевого способа анализа химсостава шихты. Следовало бы сравнить нейросетевой способ получения зависимости функций  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  от своих аргументов, например с обычной полиномиальной регрессией по методу наименьших квадратов, по затратам ресурса, необходимого статистического материала и т.п.

5. Из текста диссертации неясно, как рассчитанные значения оценки вероятности  $W$  влияют на настройку контроллера, допуски на позиционирование и т.д.

6. Следует пояснить, каков объем и структура обучающей выборки для искусственной нейронной сети в алгоритме диагностики дефектов. Как обеспечивается репрезентативность выборки для реальных дефектов (пузырь, включения и т.п.).

7. В расчете вероятности безотказной работы в разделе 5.3 предполагается независимость отказов между элементами (стр.184-185). Однако в столь сложной технологической схеме отказы могут быть зависимыми (общий источник питания, персонал и т.п.). Как учесть отклонение потока отказов от простейшего, например, зависимость между отказами варочной печи и ванны расплава.

8. Следовало бы уточнить процедуру идентификации цифровых двойников в главах 6 и 7, т.к. эта процедура представляет собой обратную задачу, которая в силу своей математической природы нуждается в анализе корректности и, возможно, в регуляризации.

9. Несмотря на грамотный и технически выверенный язык изложения диссертации в тексте встречаются стилистические неточности и грамматические ошибки. В частности, цель работы многократно повторяется на стр.11, 73,96, причем формулировки и задачи для ее достижения несколько отличаются друг от друга. Многие формулы, особенно 2-й главы не пронумерованы, хотя имеют существенное значение для восприятия текста диссертации. Имеются ошибки в оглавлении по номерам страниц и в списке литературы по соответствующим ссылкам. Имеются пунктуационные ошибки на страницах 27,30,69,87,88-90.

Перечисленные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

### **Заключение**

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

Автореферат и публикации в достаточной степени отражают содержание диссертации. Диссертация и автореферат не содержат некорректных заимствований.

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 ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Отзыв на диссертацию одобрен после ее обсуждения на заседании кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Протокол №9 от 18.05.2026г.

Заведующий кафедрой

«Управление и системный анализ

теплоэнергетических и социотехнических комплексов»

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,

Почетный работник высшего

профессионального образования РФ,

д.т.н., профессор

Михаил Юрьевич Лившиц

Подпись Лившица Михаила Юрьевича удостоверяю:

Ученый секретарь

ФГБОУ ВО «Самарский

государственный технический

университет»

(должность)



Малиновская Ю.А.

(Ф.И.О.)

Адрес электронной почты: [usat@samgtu.ru](mailto:usat@samgtu.ru)

Тел.: +7(846)278-43-11

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Почтовый адрес организации: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»: <https://samgtu.ru/>

Адрес электронной почты организации: [rector@samgtu.ru](mailto:rector@samgtu.ru)