

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ  
РЕСПУБЛИКИ «ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

*На правах рукописи*

**Вишневский Дмитрий Александрович**



**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И ПРАКТИКА  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

**Алчевск – 2021**

Работа выполнена в ГОУ ВО ЛНР «ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ» Министерства образования и науки Луганской Народной Республики, г. Алчевск.

**Научный консультант:** доктор технических наук, доцент  
**Сотников Алексей Леонидович,**  
ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (г. Донецк),  
профессор кафедры механического оборудования заводов черной металлургии им. проф. В. Я. Седуша

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Артюх Виктор Геннадиевич,**  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», (г. Санкт-Петербург), профессор  
Высшей школы «Механика и процессы управления»

доктор технических наук, доцент  
**Киреев Андрей Николаевич,**  
ГОУ ВО ЛНР "Луганский государственный университет им. В. Даля" (г. Луганск),  
профессор кафедры железнодорожного транспорта

доктор технических наук, профессор  
**Паламарчук Николай Владимирович**  
ГОО ВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», (г. Донецк),  
заведующий кафедрой подвижного состава железных дорог

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк)

Защита состоится «16» декабря 2021 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, I учебный корпус, 1.203.

Тел. факс: +38 (062) 304-30-55, E-mail: uchensovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, II учебный корпус, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «    »                      2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 01.019.03



А. В. Яковченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие металлургической отрасли на современном этапе характеризуется внедрением технологий «Индустрия 4.0» (Industry 4.0). Это четыре базовых технологии, в результате внедрения которых ожидаются революционные изменения, а именно: интернет вещей (Internet of Things, IoT), цифровые экосистемы, аналитика больших данных (Data Driven Decision), сложные информационные системы, открытые для использования клиентами и партнерами (цифровые платформы).

Общеизвестно, что непрерывные технологические процессы металлургического производства обеспечиваются безотказностью технологического оборудования. Важнейшим свойством технологического процесса является надежность, которую по ГОСТ 27.002–2015 называют свойством объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, ремонтов, хранения.

Наряду с такими причинами возникновения отказов оборудования, как конструктивные, технологические и эксплуатационные дефекты, преобладающее значение приобретают отказы в результате влияния человеческого фактора в силу нарушения трудовой дисциплины и культуры производства, а также психоэмоциональной нагрузки современного общества.

Любой из этих видов отказов приводит к снижению ресурса работы, увеличению материальных затрат на изготовление, эксплуатацию и техническое обслуживание и ремонт (ТОИР) технологического оборудования.

Функционирование сложных систем, к которым относятся технологические линии и агрегаты, систем контроля, автоматизации и управления и т. д. без самого важного элемента, как человек, невозможно. Так, по разным источникам от 30–45% отказов технических систем напрямую или косвенно связаны с ЧФ или с ошибками, которые совершает человек в процессе управления, обслуживания и эксплуатации.

Таким образом, актуальной научно-технической проблемой является снижение вероятности появления отказов технологического оборудования металлургического производства и, тем самым, снижения показателей безотказности оборудования в результате минимизации человеческого фактора, который представляет совокупность эмоциональных, интеллектуальных, мотивационных, физиологических, волевых и других качеств личности, обеспечивающих адекватное восприятие ситуации, выполнение предписанных функций в заданных режимах работы человека с другими людьми и техникой в процессе выполнения трудовых обязанностей.

**Степень разработанности темы.** Развитие научных основ обеспечения надежности оборудования в металлургической отрасли было заложено в 60-е годы прошлого века, и до текущего времени они непрерывно совершенствуются, при этом к их структуре добавляются элементы автоматизации. Однако это не снижает влияния человеческого фактора (ЧФ) на надежность оборудования в целом. В связи с ростом автоматизации процессов в металлургической отрасли от-

ветственность обслуживающего персонала возрастает во много раз, и влияние ЧФ увеличивается пропорционально росту ответственности за технологические процессы на производстве. Это влечет за собой снижение надежности оборудования и повышение производственного риска обслуживающего персонала.

Вопросам безотказности механического оборудования посвящено большое количество научных и практических работ отечественных и зарубежных ученых, среди них можно выделить: Я. Б. Шора, А. М. Половко, Т. А. Голинкевича, Б. В. Гнеденко. Вопросы теоретических основ повышения надежности металлургических машин на стадии проектирования и эксплуатации рассмотрены в работах Гребенника В. М., Гордиенко А. В., Цапко В. К., Седуша В. Я., Белодеденко С. В., которые предлагают методы формирования и принципы сбора, цифрового кодирования и анализа отказов, что является хорошей базой для развития теории комплексного анализа, оценки и прогнозирования надежности оборудования металлургических предприятий.

Вопросами влияния ЧФ на надежность оборудования занимались Ю. А. Извеков, Л. А. Грачева, А. А. Пископпель, Е. И. Цибулевский и др. Работы, связанные с комплексным исследованием влияния психофизиологических параметров человека на безотказность металлургических машин, практически отсутствуют.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы являются развитие научных основ обеспечения безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов, совершенствование автоматизированной системы прогнозирования отказов машин и механизмов с учётом влияния человеческого фактора, предупреждение нештатных и аварийных ситуаций на предприятиях.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи:

1. Усовершенствовать автоматизированную систему прогнозирования отказов машин и механизмов.

2. Разработать гибридную математическую модель прогнозирования отказов машин и механизмов с учётом влияния человеческого фактора на основе представления сложной технической системы, управляемой человеком-оператором, в виде системы связанных элементов, часть из которых соответствует основным техническим узлам оборудования, а часть – характеризует оператора.

3. Выполнить экспериментальные исследования показателей травматизма на металлургических предприятиях.

4. Разработать математическую модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора металлургических машин и механизмов.

5. Разработать программный продукт для оценки условий безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов, а также производственного риска, учитывающий особенности эксплуатации технологически нового оборудования совместно с устаревшим, в том числе при внедрении новых технологий и проектировании металлургических цехов.

6. Выполнить предупреждение нештатных и аварийных ситуаций на металлургических предприятиях на базе разработанной системы мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов.

7. Разработать систему мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов на основе индивидуального устройства для снятия психофизиологических показателей и определения местонахождения работника в режиме реального времени, а также программного комплекса для ведения, обработки и анализа информации по всем работникам.

8. Усовершенствовать классификацию психофизиологических состояний человека в режиме реального времени на базе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства.

9. Выполнить внедрение системы мониторинга психофизиологического состояния оператора, автоматизированной системы прогнозирования отказов, компьютерной программы расчета показателей безотказности оборудования и производственного риска в условиях металлургических и промышленных предприятий.

**Объект исследования.** Машины и механизмы металлургического производства.

**Предмет исследования.** Показатели безотказности и ремонтпригодность металлургических машин и механизмов.

**Научная новизна полученных результатов.**

**1. Получил дальнейшее развитие метод прогнозирования отказов машин и механизмов** путём учёта показателей срока службы деталей и их принадлежности законам распределения наработок на отказ в случае малого количества численных значений выборки, а также учёта особенностей эксплуатации технологически нового оборудования совместно с устаревшим, в том числе при внедрении новых технологий и проектировании металлургических цехов.

**2. Получило дальнейшее развитие представление о распределении основных причин травматизма на металлургическом производстве:** причины организационного характера составляют 45%, комплексные – 30%, психофизиологические – 20%, остальные – 5%.

**3. Впервые разработана гибридная математическая модель прогнозирования отказов машин и механизмов с учётом влияния человеческого фактора на основе представления сложной технической системы, управляемой человеком-оператором, в виде системы связанных элементов, часть из которых соответствует основным техническим узлам оборудования, а часть – характеризует оператора.** Чувствительность модели к изменению технического и человеческого фактора составила 3,5...4,5%.

**4. Впервые разработана математическая модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора,** имеющая представление в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений или в дискретной форме в виде рекуррентных соотношений. Комплексный учёт данных показателей позволяет повысить точность прогнозирования возникновения внештатных ситуаций и выбрать рациональный режим работы оператора.

**5. Получила дальнейшее развитие классификация психофизиологических состояний человека в режиме реального времени** (на базе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства), которая включает следующие пункты: «отсутствие усталости» – допуск к работе; «незначительная усталость» – допуск к работе с ограничением; «существенная усталость» – временное отстра-

нение от работы; «критическое поведение во время работы» – полное отстранение от работы; «недопустимое психофизиологическое состояние» – недопуск к работе.

### **Теоретическая значимость работы.**

1. Получил развитие метод прогнозирования отказов машин и механизмов путём учёта особенностей эксплуатации технологически нового оборудования совместно с устаревшим, в том числе при внедрении новых технологий и проектировании металлургических цехов.

2. Разработана гибридная математическая модель прогнозирования отказов машин и механизмов с учётом влияния человеческого фактора на основе представления сложной технической системы, управляемой человеком-оператором, в виде системы связанных элементов, часть из которых соответствует основным техническим узлам оборудования, а часть – характеризует оператора. Чувствительность модели к изменению технического и человеческого фактора составила 3,5...4,5%.

3. Разработана математическая модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора. Данная модель относится к классу имитационных моделей. Комплексный учёт данных показателей позволяет повысить точность прогнозирования возникновения внештатных ситуаций и выбрать рациональный режим работы оператора.

4. Получила развитие классификация психофизиологических состояний человека в режиме реального времени (на базе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства). Оценки состояния готовности человека к выполнению работ: «отсутствие усталости» – допуск к работе; «незначительная усталость» – допуск к работе с ограничением; «существенная усталость» – временное отстранение от работы; «критическое поведение во время работы» – полное отстранение от работы; «недопустимое психофизиологическое состояние» – недопуск к работе.

### **Практическая значимость работы.**

1. Усовершенствована автоматизированная система прогнозирования отказов машин и механизмов. Система позволяет накапливать и хранить данные наработок на отказ всех элементов машин и механизмов, предупреждает на базе статистической теории надежности и экстраполяции закономерностей развития о скором выходе из строя их элементов.

2. Разработан программный продукт для оценки условий безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов, а также производственного риска. В автоматизированном режиме выполняется оценка состояния машин и механизмов, устанавливается их остаточный ресурс работы, что позволяет усовершенствовать систему технического обслуживания и ремонта путем численного моделирования наработок технических объектов на отказ, причём с учетом влияния вредных и опасных производственных факторов, и безошибочного выполнения работником функциональных действий.

3. Разработана «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов» на основе индивидуального устройства для снятия психофизиологических показателей и определения

местонахождения работника в режиме реального времени, а также программного комплекса для ведения, обработки и анализа информации по всем работникам. Система позволяет предупредить нештатные и аварийные ситуации путем временного или полного отстранения работника от выполнения должностных обязанностей.

**4. Разработано индивидуальное устройство для снятия психофизиологических показателей и определения местонахождения работника,** которое работает в комплексе с системой мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов. Устройство позволяет снимать психофизиологические показатели человека в режиме реального времени, что дает возможность оперативно реагировать в нештатной ситуации, при аварии на производстве и при резких изменениях жизненных показателей работника.

**5. Результаты диссертационной работы внедрены** на таких предприятиях, как Филиал № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (г. Алчевск), Филиал № 2 ЗАО «Внешторгсервис» (г. Енакиеве), ООО «ЛугаМаш» (г. Луганск), ЧАО «Лугцентрокуз» им. С. С. Монятовского (г. Луганск), в Научно-производственном центре «ТРАНСМАШ» (г. Луганск), ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт», что позволило усовершенствовать автоматизированные системы прогнозирования отказов машин и механизмов с учётом влияния человеческого фактора, а также выполнить предупреждение нештатных и аварийных ситуаций на предприятиях.

#### **Методология и методы исследования.**

Научной и методической основой исследований послужили современные достижения в области Internet of Things (IoT) и носимой электроники. Также применялись: теоретический и экспериментальный методы с использованием имитационного моделирования и аналогий, которые базируются на статистическом методе планирования эксперимента, системном подходе и математическом моделировании процессов с использованием программных средств; метод пассивного наблюдения за техническим состоянием оборудования и накопления количественных данных о его отказах; метод статистического определения количественных характеристик надежности технических систем и вероятностного определения характеристик и аналитических зависимостей.

**Положения, выносимые на защиту.** Следующие основные научные разработки и положения выносятся на защиту:

**1. Усовершенствованный метод прогнозирования отказов машин и механизмов** путём учёта показателей срока службы деталей и их принадлежности законам распределения наработок на отказ в случае малого количества численных значений выборки, а также учёта особенностей эксплуатации технологически нового оборудования совместно с устаревшим, в том числе при внедрении новых технологий и проектировании металлургических цехов.

**2. Индивидуальное устройство для снятия психофизиологических показателей и определения местонахождения работника,** которое работает в комплексе с системой мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов. Устройство позволяет снимать психофизиологические показатели человека в режиме реального времени, что дает воз-

возможность оперативно реагировать в нештатной ситуации, при аварии на производстве и при резких изменениях жизненных показателей работника.

**3. Гибридная математическая модель прогнозирования отказов машин и механизмов с учётом влияния человеческого фактора**, разработанная на основе представления сложной технической системы, управляемой человеком-оператором, в виде системы связанных элементов, часть из которых соответствует основным техническим узлам оборудования, а часть – характеризует оператора.

**4. Математическая модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора**, имеющая представление в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений или в дискретной форме в виде рекуррентных соотношений, используя шаг дискретизации по времени  $\Delta t = 1$  мин. Комплексный учёт данных показателей позволяет повысить точность прогнозирования возникновения нештатных ситуаций и выбрать рациональный режим работы оператора.

**5. Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов**, разработанная на основе индивидуального устройства для снятия психофизиологических показателей и определения местонахождения работника в режиме реального времени, а также программного комплекса для ведения, обработки и анализа информации по всем работникам. Система позволяет предупредить нештатные и аварийные ситуации путем временного или полного отстранения работника от выполнения должностных обязанностей.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность и новизна научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций подтверждаются корректным использованием апробированных методов исследования и научных теорий, адекватностью разработанных математических моделей, результатами экспериментальных исследований в промышленных условиях, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, эффективностью результатов промышленных испытаний на предприятиях.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Машины металлургического комплекса» ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (2014...2020 гг.) и конференциях: V всероссийская научно-практическая конференция «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы», Россия, г. Рубцовск, 26–27 ноября, 2015 г.; международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства», посвященная 50-летию кафедры «Машины металлургического комплекса», Донбасский государственный технический университет, ЛНР, г. Алчевск, 13–14 октября, 2016 г.; Четвертая международная молодежная научно-практическая конференция, Россия, Курск, 15 ноября, 2017 г.; Юбилейная международная научно-техническая конференция «60 лет ДонГТУ. Наука и практика», Донбасский государственный технический университет, ЛНР, г. Алчевск, 11 октября, 2017 г.; IV международная научно-практическая конференции «Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изгото-

товления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов», Донецкий национальный технический университет, ДНР, г. Донецк, 22–25 мая, 2018 г.; Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, «Прогрессивные технологии и процессы», Юго-Западный государственный университет, Россия, г. Курск, 27–28 сентября, 2018 г.; III международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства», Донбасский государственный технический университет, ЛНР, г. Алчевск, 17 октября, 2018 г.; Международная научно-практическая конференция «Механика и машиностроение. Наука и практика», Россия, Санкт-Петербург, 14 декабря, 2018 г.; V международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов», Донецкий национальный технический университет, ДНР, г. Донецк, 21–23 мая, 2019 г.; IV международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства», Донбасский государственный технический университет, ЛНР, г. Алчевск, 17 октября, 2019 г.; IX международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, 1 ноября, 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике», Юго-Западный государственный университет, Россия, г. Курск, 30 апреля, 2020 г.; V международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства», Донбасский государственный технический институт, ЛНР, г. Алчевск, 17 октября, 2020 г.; III всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Современная металлургия нового тысячелетия», Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк, 21–23 октября, 2020 г.; VII международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов», Донецкий национальный технический университет, ДНР, г. Донецк, 24–26 мая, 2021 г.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первый раздел «Состояние научно-технической проблемы обеспечения безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов».**

Вопросы обеспечения безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов как неотъемлемого элемента технологического процесса особый интерес вызвали в 60-х...70-х годах прошлого века. Это связано с техническим перевооружением металлургической отрасли, появлением новых технологий и разработкой уникального оборудования для реализации технологических процессов.

Надежность механического оборудования основывается на положениях классической теории надежности, исследованием которой занимались Я. Б. Шор,

А. М. Половко, Т. А. Голинкевич, описавшие основные понятия и математический аппарат. Основные положения вероятностно-статистической теории надежности приведены в монографии Б. В. Гнеденко и др. Вопросы теоретических основ повышения надежности металлургических машин на стадии проектирования и эксплуатации рассмотрены в работах С. В. Гурова, А. В. Желдубовского, В. П. Когаева. В работах Гребеника В. М., Белодеденко С. В., Сидорова В. А. предлагаются методы формирования и принципы сбора, цифрового кодирования и анализа отказов. Были разработаны классификаторы машин, узлов, деталей, видов и причин отказов.

Возникновение отказов оборудования происходит по следующим причинам: конструктивные дефекты; технологические дефекты; эксплуатационные дефекты; постепенное старение (износ); влияние человеческого фактора (в том числе нарушение правил безопасности).

Все виды отказов снижают ресурс работы оборудования, что влечет за собой финансовые затраты на обслуживание, эксплуатацию, выход годной продукции, тем самым увеличивая ее себестоимость.

На современном этапе развития науки надежность рассматривается в трех направлениях: математическая теория надежности, статистическая теория надежности, физическая теория надежности. Математическая теория надежности рассматривает вопросы, касающиеся разработки методов оценки надежности и изучения закономерностей отказов оборудования. Статистическая теория надежности рассматривает вопросы сбора, хранения и обработки статистических данных об отказах оборудования. Физическая теория надежности отвечает за физико-химические процессы, происходящие в объекте при различных видах воздействия.

Плахтин В. Д. в своих работах определяет новое направление – теротехнологию. Самые значимые факторы теротехнологии: качество оборудования, уровень эксплуатации, уровень технического обслуживания и ремонта.

Проведя анализ исследований, направленных на обеспечение безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов, на основе теротехнологии, удалось установить, что анализ отказов металлургического оборудования методом статистической теории надежности, а также учет человеческого фактора являются наименее исследованными направлениями. На основе выполненного анализа поставлена цель работы и сформулированы задачи исследований.

Второй раздел **«Методы и методики исследований, применяемые в работе»**.

Описаны особенности метода имитационного моделирования, применяемые в работе. Имитационное моделирование (simulation modeling) – метод исследования объекта-оригинала (А) на объекте-заместителе (Б), его имитирующем по определенным свойствам (характеристикам), существенным для решения поставленных задач. Главное правило при подборе имитатора Б заключается в создании такой его структуры, для которой реакция  $R = \{R_i\}$  объекта Б на входные воздействия  $V = \{V_i\}$  была бы коллинеарна реакции объекта А на аналогичные воздействия V.

Полное сопряжение объектов А и Б по всевозможным наборам (V, R) в

принципе невозможно, поскольку тогда они должны быть идентичны, то есть объект-заместитель (модель) должен полностью совпадать с оригиналом.

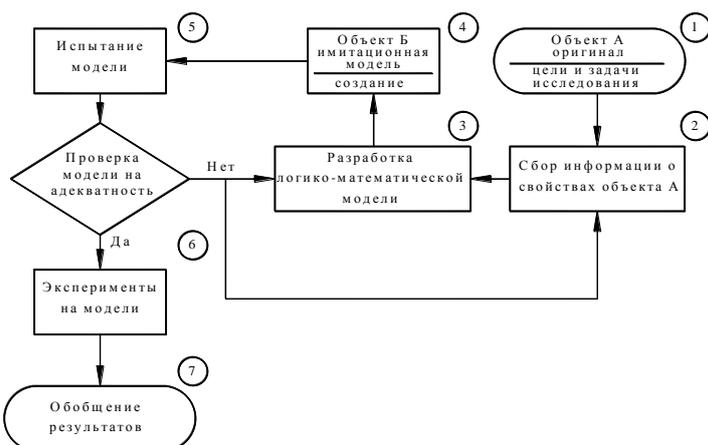


Рисунок 1. Схема разработки имитационной модели

Поэтому сходства модели и оригинала добиваются на конечном множестве входных воздействий, а затем модель (объект Б) используется по разработанной схеме в физических (натурных) испытаниях или мысленных (с помощью компьютера) экспериментах для решения поставленных задач. В данной работе физические модели не рассматриваются, а имитационное моделирование осуществляется в компьютерном виде.

Для статистического исследования работы использовался статистический метод определения травматизма. Метод основан на использовании статистической отчетности предприятий по травматизму, т. е. данных актов по форме Н-1. С целью выявления общего состояния травматизма определяют за определенный период времени следующие показатели: коэффициент частоты несчастных случаев, коэффициент тяжести несчастных случаев.

Представлены алгоритмы идентификации законов распределения наработки на отказ для описания характерных задач математической теории надежности восстанавливаемых технических систем, выбор функции распределения наработок элементом до отказа в процессе восстановления, нахождение функции восстановления и определение оптимальной стратегии эксплуатации по критерию минимума интенсивности эксплуатационных затрат. В теории надежности технических систем первичными понятиями являются случайная наработка (время) элемента (системы) до отказа и функция ее распределения. Именно они задают важнейшее понятие в теории надежности – процесс восстановления.

**Третий раздел «Обеспечение надежной эксплуатации металлургических машин и механизмов методом прогнозирования показателей безотказности».**

При эксплуатации машин и механизмов металлургической отрасли неизбежны возникновение повреждений или нарушения работоспособности их отдельных элементов, даже если отсутствуют дефекты при изготовлении и соблюдаются правила эксплуатации. Это связано с условиями эксплуатации оборудования: высокими температурами, динамическими нагрузками, высокой загазованностью и запыленностью, высокой коррозионной активностью, наличием температурных перепадов и сложного напряженного состояния материала оборудования. Все перечисленные факторы приводят к выходу из строя или отказу оборудования. Целью создания автоматизированной системы прогнозирования отказов оборудования является заблаговременное предупреждение ремонтных служб о выходе из строя детали, узла или машины, что, в свою очередь, позволит осуществить

своевременное и качественное ремонтное воздействие на эксплуатируемое металлургическое оборудование (МО).

Данная система состоит из двух крупных блоков. Первый блок – А, отвечает за накопление и хранение данных наработок на отказ всех элементов агрегата. Второй блок – Б, отвечает за расчет показателей надежности, используя статистические данные из первого блока, выдает предупреждения о скором выходе из строя элемента системы, опираясь на методику статистической теории надежности (рисунок 2). В системе предусмотрены методы расчетов показателей надежности, определяющие принадлежность законам распределения наработки на отказ при наличии малого количества численных значений выборки.



Рисунок 2. Схема описания системы прогнозирования отказа оборудования

Данная система может определить такие показатели, как: вероятность безотказной работы в течение определенного времени  $P(t)$ ; гамма-процентная наработка до отказа  $t_\gamma$ ; средняя наработка до отказа  $T_1$  (для статистических задач  $\bar{T}_1$ ); средняя наработка на отказ  $T$  (для статистических задач  $\bar{T}$ ); частота отказов  $f(t)$ ; интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ; параметр потока отказов  $\mu(t)$ .

В системе предусмотрен электронный агрегатный журнал, который выполняет те же функции, что и бумажный носитель, а именно: накапливает данные о техническом состоянии и работоспособности действующего оборудования в процессе эксплуатации; является основным исходным документом для установления характера и объема работ периодического ТО и ремонтов, сроков службы узлов и деталей оборудования, а также работ по совершенствованию оборудования. Преимущество электронного агрегатного журнала: работает по сети – можно открыть доступ для просмотра данных различным службам, установить ограничение на внесение или изменение данных согласно должностным инструкциям, и самое главное – вся база статистических данных (сроки службы деталей, узлов, сборочных единиц) по запросу передается для проведения расчетов необходимых показателей безотказности.

Разработана компьютерная программа расчета показателей безотказности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли. Данное программное обеспечение позволяет путем моделирования отказов не только основного и вспомогательного оборудования, но и человеческого фактора под сово-

Закон распределения наработок на отказ, которые использовались в системе: нормальный закон распределения – по критерию нормальности Мартинеса – Иглевича; экспоненциальный закон распределения – по критерию экспоненциальности Фроцини; распределение Вейбулла – по критерию Манна – Фертига – Шуера; равномерный закон распределения – по критерию Фроцини.

купным воздействием вредных и опасных факторов производственной среды осуществлять прогнозирование показателей безотказности как при разработке и проектировании металлургических цехов и внедрении новых технологий и оборудования, так и при их одновременной эксплуатации с устаревшим оборудованием. Рабочие окна разработанной программы представлены на рисунках 3, 4.

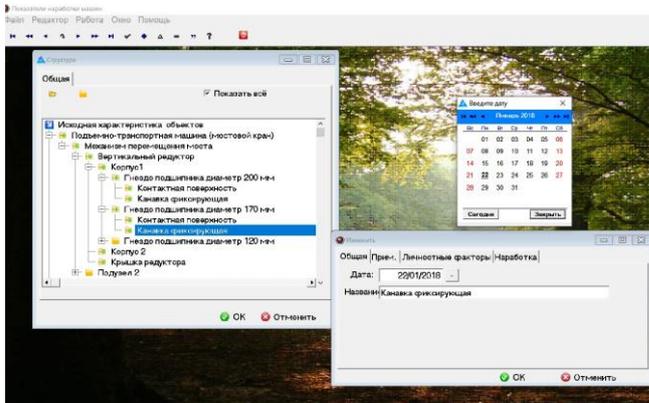


Рисунок 3. Окно введения и редактирования структуры машины и показателей негативного влияния на человека-оператора

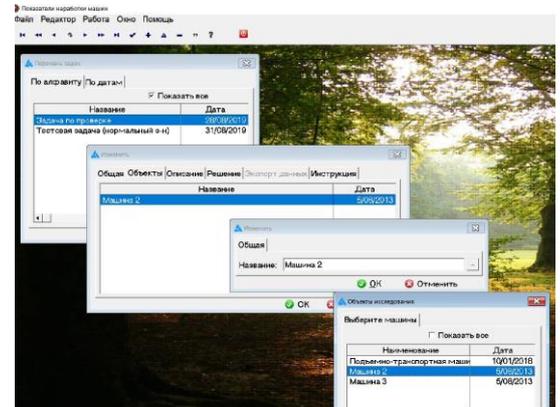


Рисунок 4. Формирование состава машин для задачи расчета

Программа позволяет выполнять определенный комплекс вычислений: показателей безотказности металлургических машин и механизмов в данный момент времени; воздействия вредных и опасных производственных факторов на человека-оператора; риска травмирования человека-оператора в зависимости от «технических» и «человеческих» отказов как на отдельных рабочих местах, так и в целом в цехах; остаточный срок службы детали или узла с учетом наработок на отказ данного оборудования.

Четвертый раздел **«Экспериментальные исследования показателей травматизма на предприятии»**. Одна из главных причин, которая привела к необходимости исследований показателей травматизма, связана с тем, что сбор статистических данных об отказах оборудования при влиянии человеческого фактора на металлургических предприятиях ранее не выполнялся. Согласно данным института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, до 40 % всех аварий на производствах металлургической отрасли происходят по вине человека. Данные ошибки преднамеренные или непреднамеренные приводят к аварийным выходам из строя сложного МО.

Данные, используемые в этом разделе, относятся к периоду с 1980 по 2004 гг., в среднем давность статистических данных – от 40 до 20 лет. Необходимость использования этих данных вызвана следующими факторами: в вышеуказанный период не скрывали несчастные случаи на производстве, данные из актов по форме Н-1 соответствовали действительности; в указанный период времени производство работало на полную мощность, что дает целостную картину при обработке данных; в настоящее время данные о травматизме на промышленных предприятиях засекречены, получить и воспользоваться современной статистикой практически невозможно.

Экспериментальные исследования факторов производственного риска на кузнечно-прессовом оборудовании были осуществлены в рамках выполнения научно-исследовательской работы ДН-50-07 «Анализ, оценка и прогноз травматизма на машиностроительных предприятиях». Результаты предоставили возможность получить данные показателей производственного травматизма и их взаимосвязи во всех подразделениях предприятия.

Анализ распределения общего количества травм в КПП по месяцам в 1985, 1987 и 1989 гг. позволяет выявить закономерности, которые заключаются в том, что во все эти годы наблюдается их уменьшение с апреля по июль с 13...23 до 9...14, затем стремительный рост в августе соответственно с 9...14 до 17...20 и такое же падение в сентябре до 9...11. Причем при почти одинаковой закономерности распределения несчастных случаев с марта по декабрь в 1987 и 1989 гг. в 1985 г. наблюдаются четыре пиковых их уровня в апреле, октябре, ноябре и декабре, которые имеют, так сказать, противофазное значение с указанными в 1987 и 1989 годах при почти абсолютном совпадении количества несчастных случаев в июне – сентябре трех исследованных лет.

Распределение основных причин травматизма в КПП, как в общем количестве НС, так и отдельно для мужчин и женщин, показанных в таблице 1 и на рисунках 5, 6, свидетельствует о том, что причины организационного характера составляют львиную долю (45%) среди других, а комплексные занимают второе место (~30%), на третьем месте психофизиологические (~22%).

Таблица 1. Распределение причин травматизма в КПП по годам

Причины травматизма	Общее количество травм среди мужчин			Общее количество травм среди женщин			Общее количество травм в КПП		
	1985	1987	1989	1985	1987	1989	1985	1987	1989
Организационные	77	71	38	15	12	12	92	83	50
Технические	8	10	20	0	1	5	8	11	25
Психофизиологические	18	24	27	7	13	4	25	37	31
Комплекс причин	40	37	36	10	8	2	50	45	38
Всего	143	142	121	32	34	23	175	176	144

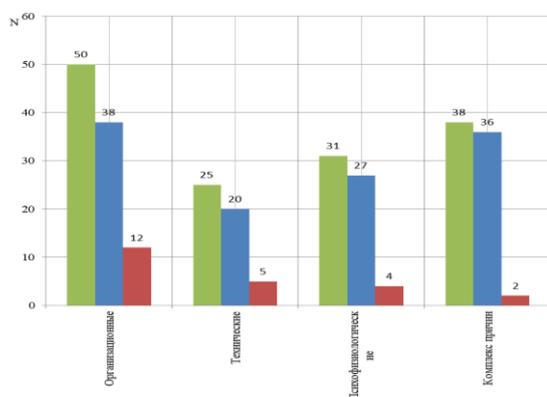


Рисунок 5. Распределение причин травматизма в КПП в 1989 г. среди мужчин и женщин: ■ - общее количество НС; ■ - НС среди мужчин; ■ - НС среди женщин

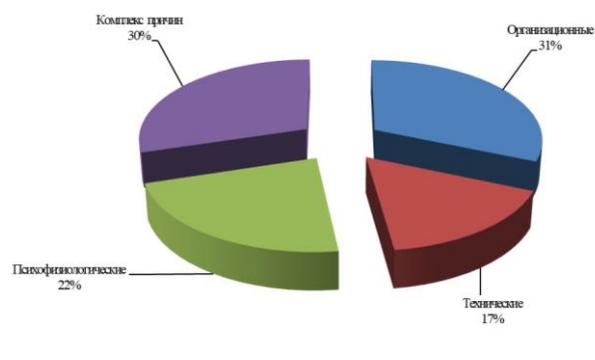


Рисунок 6. Распределение причин травматизма в КПП среди мужчин в 1989 г.: ■ - организационные; ■ - технические; ■ - психофизиологические; ■ - комплекс причин

Анализ вышеизложенного показал, что психофизиологические причины травматизма в процентах колеблются от 18 % до 27% от общего количества травм за исследуемый период (довольно высокий показатель), что позволило подтвердить необходимость дальнейшего исследования методов снижения воздействия психофизиологических факторов на обслуживающий персонал.

Пятый раздел **«Подход к оценке влияния человеческого фактора для обеспечения безотказной эксплуатации машин и механизмов»**. Как показано ранее, ЧФ оказывает значительное, а в иных случаях и определяющее влияние на создание аварийных ситуаций при эксплуатации металлургических машин и механизмов, которые в большинстве случаев представляют собой сложные технические системы (СТС).

СТС не могут нормально функционировать без такого важного звена, как человек. Около 40 % отказов различных технических систем на производствах металлургической отрасли прямо или косвенно связано с ЧФ, а 20 % – напрямую с человеком. В этой связи актуально создание моделей оценки изменения безотказности металлургического оборудования (детерминистских, статистических, вероятностных, имитационных и др.), в которых наряду с параметрами безотказности технических узлов и систем, входящих в СТС, представлены показатели, связанные с человеческими факторами, влияющими на общую надежность системы.

В применении к оценке безотказности металлургического оборудования с учетом ЧФ предлагается гибридная модель, которая реализуется как последовательная система взаимосвязанных задач, каждая из которых имеет как самостоятельное значение, так и является ступенькой для решения следующей задачи.

Влияние ЧФ на безотказность металлургического оборудования определяется путем введения в схему «дерева отказов» событий, связанных с ошибками оператора, как отдельных элементов схемы, расчетом вероятности всего устройства и выявлением в итоговой оценке роли ЧФ:

- Анализируется работа выбранного оборудования с точки зрения возможности отказа всей системы при отказе технических узлов и ошибок оператора.
- Строится «дерево отказов».
- По справочным, расчетным или экспериментальным данным устанавливаются вероятности отказов технических элементов и ошибок оператора(ов) в течение определенного времени  $T$ .

На основании теорем алгебры вероятностей определяется вероятность  $P(S)$  финального события  $S$  – «Отказ всей системы», которую представим как функцию входных вероятностей в следующем виде:

$$R = P(S) = f(P(A_{q_1}), P(A_{q_2}), \dots, P(A_{q_n}), P(A_{T_1}), P(A_{T_2}), \dots, P(A_{T_m})), \quad (1)$$

где  $P(\dots)$  – вероятность соответствующего события;

$A_{q_1}, A_{q_2}, \dots, A_{q_n}$ , – события, соответствующие ошибочным действиям человека;

$A_{T_1}, A_{T_2}, \dots, A_{T_m}$  – события, соответствующие отказам технических узлов устройства.

Исследование модели на чувствительность к изменению входных параметров. В данной работе анализируется чувствительность модели при различных ва-

риантах изменения входных параметров: 1%-ное изменение показателей, а также изменения в пределах доверительного интервала. При этом показатели изменяются как по одному, так и по группам, включая изменения всех показателей одновременно.

Изменение выходного показателя  $R$  можно оценить по абсолютной величине по формуле (2)

$$\Delta R_* = f(p_{q1}, \dots, p_* + \Delta p_*, \dots, p_{qn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}) - f(p_{q1}, \dots, p_*, \dots, p_{qn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}) \quad (2)$$

и по относительной величине по формуле (3)

$$\delta R_* = \frac{\Delta R_*}{f(p_{q1}, \dots, p_*, \dots, p_{qn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm})} \cdot 100\% \quad (3)$$

Наиболее представительной оценкой чувствительности модели является относительная оценка (3), которую и будем называть показателем чувствительности модели на изменение входного параметра  $p^*$ . Данной процедуре можно подвергнуть все входные вероятности как группы технического фактора (ТФ), так и группы ЧФ.

Ранжирование компонент вектора чувствительностей в порядке убывания позволяет выявить в системе МО наиболее значимые с позиций безотказности ТФ и ЧФ. В приоритете будут элементы с наибольшей чувствительностью.

Чувствительность модели на изменение вероятностей группы ЧФ:

$$\delta R_{q^*} = \frac{f(p_{q1} + \Delta p_{q1}, \dots, p_{qn} + \Delta p_{qn}, p_{T1}, \dots, p_{Tm}) - f(p_{q1}, \dots, p_{qn}, p_{T1}, \dots, p_{Tm})}{f(p_{q1}, \dots, p_{qn}, p_{T1}, \dots, p_{Tm})} \cdot 100\% \quad (4)$$

Чувствительность модели на изменение вероятностей группы ТФ:

$$\delta R_{T^*} = \frac{f(p_{q1}, \dots, p_{qn}, p_{T1} + \Delta p_{T1}, \dots, p_{Tm} + \Delta p_{Tm}) - f(p_{q1}, \dots, p_{qn}, p_{T1}, \dots, p_{Tm})}{f(p_{q1}, \dots, p_{qn}, p_{T1}, \dots, p_{Tm})} \cdot 100\% \quad (5)$$

Чувствительность модели на одновременное изменение вероятностей групп ТФ и ЧФ:

$$\delta R_{q+T^*} = \frac{f(p_{q1} + \Delta p_{q1}, \dots, p_{qn} + \Delta p_{qn}, p_{T1} + \Delta p_{T1}, \dots, p_{Tm} + \Delta p_{Tm}) - f(p_{q1}, \dots, p_{qn}, p_{T1}, \dots, p_{Tm})}{f(p_{q1}, \dots, p_{qn}, p_{T1}, \dots, p_{Tm})} \cdot 100\% \quad (6)$$

Сравнение результатов оценок чувствительности по формулам (4)–(6) позволит оценить роль ЧФ в безотказном функционировании сложных технических систем металлургического оборудования, а ранжирование поможет выявить приоритетные направления для улучшений характеристик надежности МО как за счет модернизации технических узлов системы, так и путем оптимизации действий и условий труда человека-оператора.

Разработка математической модели взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора металлургических машин и механизмов. Выбранные показатели  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  берутся в унифицированном виде с интервалом значений для каждого  $[0, 1]$ . Значение 0 обозначает, что описанное термином ка-

чество отсутствует; значение 1 соответствует максимально возможному состоянию описанного качества.

Модель строится на общих допущениях о характере изменения факторов со временем и по отношению друг к другу: повышение интенсивности работы приводит к увеличению утомляемости сотрудника; увеличение утомляемости оператора приводит к снижению работоспособности; ошибаемость оператора во время работы увеличивается при увеличении степени его утомляемости; изменения  $x$ ,  $y$  и  $z$  во времени без учета ограничений, накладываемых другими факторами, (внутреннее саморазвитие) подчиняется логистическому закону. Аналог такой модели в биологии – модель Ферхюльста.

Схема взаимосвязей показателей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , внешних и внутренних влияющих факторов показана на рисунке 7.

Модель, удовлетворяющая описанным выше допущениям, может быть представлена в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений (7), либо в дискретной форме рекуррентных соотношений (8).

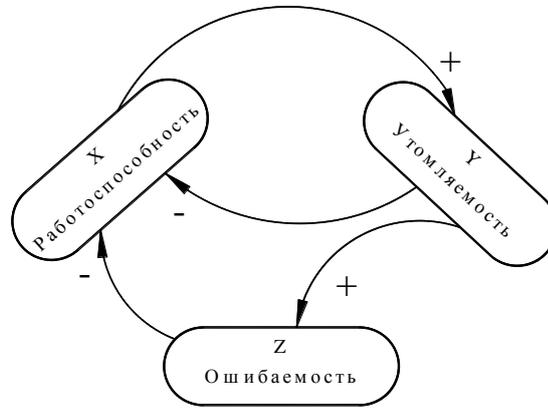


Рисунок 7. Граф связей функциональных характеристик человека-оператора

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a_1 \frac{x}{d_1 x + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{k_1}\right) - b_1 x y - h_1 x z; \\ \frac{dy}{dt} = a_2 \frac{y}{d_2 y + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y}{k_2}\right) + b_2 x y; \\ \frac{dz}{dt} = a_3 \frac{z}{d_3 z + c_3} \cdot \left(1 - \frac{z}{k_3}\right) + b_3 y z. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + a_1 \frac{x_i}{d_1 x_i + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x_i}{k_1}\right) - b_1 x_i y_i - h_1 x_i z_i; \\ y_{i+1} = y_i + a_2 \frac{y_i}{d_2 y_i + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y_i}{k_2}\right) + b_2 x_i y_i; \\ z_{i+1} = z_i + a_3 \frac{z_i}{d_3 z_i + c_3} \cdot \left(1 - \frac{z_i}{k_3}\right) + b_3 y_i z_i. \end{cases} \quad (8)$$

Начальные условия системы (7) имеют вид:  $x_0 = x(0)$ ,  $y_0 = y(0)$ ,  $z_0 = z(0)$  (9).

Параметры  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $k_i$ ,  $h_1$  определяются в результате предварительного тестирования работника, а в дальнейшем корректируются дополнительными коэффициентами, соответствующими изменениям ограничивающих факторов; параметры  $c_i$  и  $d_i$  являются параметрами формы нелинейности, используемой в правой части системы (7).

Для выполнения расчета приведем систему (7) к рекуррентной форме, используя шаг дискретизации по времени  $\Delta t = 1$  мин.

Решением системы (8) являются три сопряженных временных ряда значе-

ний показателей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , которые могут быть проиллюстрированы в графической форме на рисунке 8 (а и б – разные ситуации).

При дальнейшем развитии подхода необходимо также учесть другие ограничивающие факторы, которые предложено разделить на две группы: неуправляемые факторы внешней среды, например время суток и года, и управляемые факторы. В качестве последних в модели учитываются в виде соответствующих коэффициентов следующие факторы, представленные в таблице 2. Часть представленных факторов может быть введена в модель в виде динамических показателей психофизического состояния оператора, которые замеряются и поступают в модель в виде функций времени. Все коэффициенты, используемые в модели для корректировки исходных параметров, также приведены к унифицированным шкалам (таблица 2).

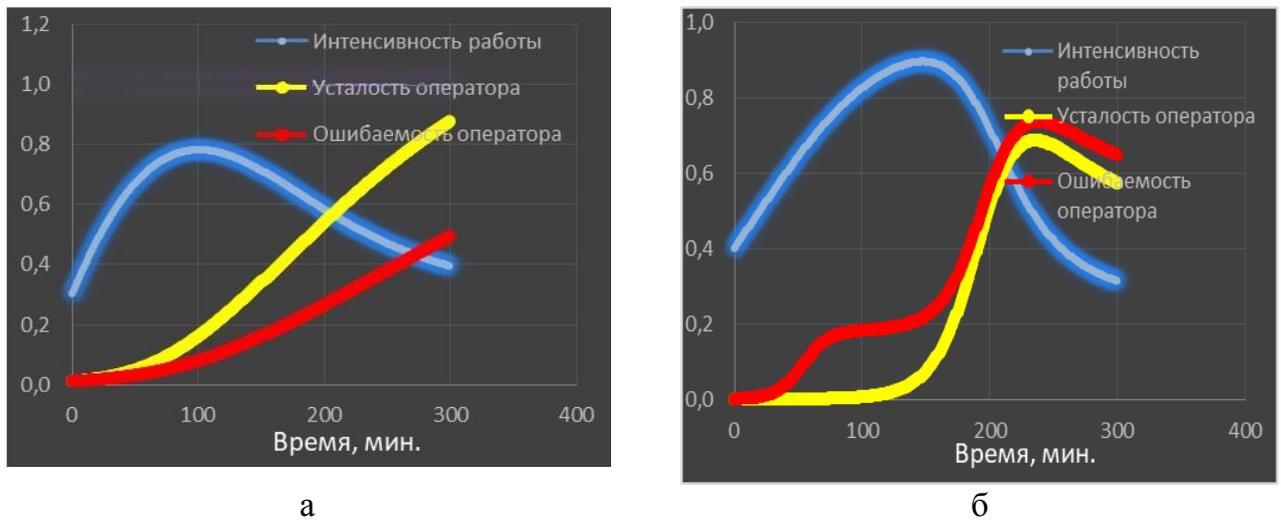


Рисунок 8. Изменение показателей работы оператора МО

Таблица 2. Шкалы оценки факторов, влияющих на качественное изменение показателей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в процессе работы оператора

Интервал всех значений фактора	Классы интервалов разбиения корректирующих коэффициентов для учета их в математической модели		
	Класс С	Класс В	Класс А
[0, 1]	[0, 0.3]	(0.3, 0.7]	(0.7, 1]
1	2	3	4
Факторы	Описание классов для данного фактора		
Е1 – психофизические факторы соответствия качеств работника требованиям профессии	Плохо соответствует	Средняя степень соответствия	Хорошее соответствие
Е2 – рациональное устройство рабочего места	Не рациональное	Рациональное	Рационально на высоком уровне
Е3 – скорость изменения производства за счет инноваций	Очень быстро	Быстро	Умеренно
Е4 – молодость работника, его физическая выносливость	Не молод, физически не вынослив	Средняя степень соответствия	Молод, физически вынослив
Е5 – опытность работника	Опыта нет или очень мало	Достаточно опытен	Очень опытен
Е6 – образовательный уровень работника	Минимальное образование	Средняя степень соответствия	Образование по профилю
Е7 – санитарно-климатические условия работы	Плохие	Нормальные	Хорошие

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4
E8 – коэффициент сезона года	Плохо способ- ствует нор- мальной работе	Средне способ- ствует нормаль- ной работе	Хорошо способ- ствует нормаль- ной работе
E9 – коэффициент времени суток	Плохо способ- ствует нор- мальной работе	Средне способ- ствует нормаль- ной работе	Хорошо способ- ствует нормаль- ной работе
E10 – рациональные условия органи- зации режима труда и отдыха	Плохо способ- ствует нор- мальной работе	Средне способ- ствует нормаль- ной работе	Хорошо способ- ствует нормаль- ной работе
E11 – степень модернизации произ- водства с уклоном в производствен- ную безопасность	Низкая степень модернизации	Средняя степень модернизации	Высокая степень модернизации
E12 – внешние факторы среды, влия- ющие на работу оператора (атмо- сферное давление, солнечная актив- ность и др.)	Плохо способ- ствует нор- мальной работе	Средне способ- ствует нормаль- ной работе	Хорошо способ- ствует нормаль- ной работе

На рисунке 9 отражено взаимовлияние показателей-переменных X, Y, Z, а также направление воздействия и точки приложения факторов организации внутренней среды производства и некоторых внешних факторов среды.

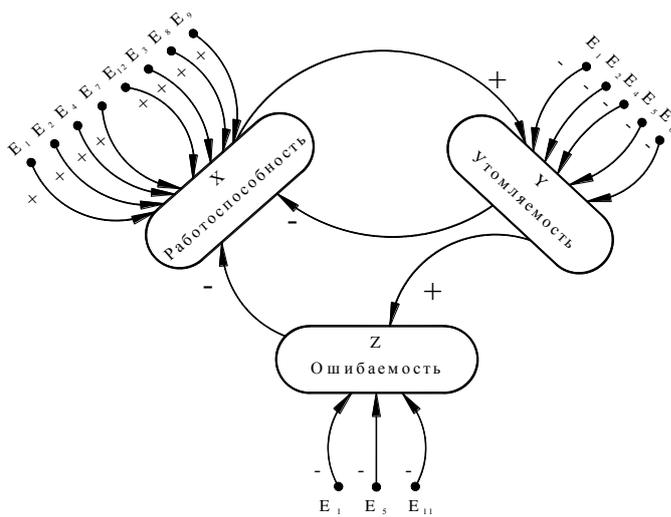


Рисунок 9. Граф связей функциональных характеристик оператора и влияющих факторов производства и внешней среды

оказывается влияние, а знак дуги отражает прямую (+) или обратную (-) связь. Параметры  $\tilde{a}_i, \tilde{b}_i, \tilde{k}_i, \tilde{h}_i$  являются скорректированными параметрами модели при помощи дополнительных коэффициентов, соответствующих текущему состоянию ограничивающих факторов (таблица 2), остальные коэффициенты системы (10) равны соответствующим коэффициентам системы (9). Общий вид перехода от параметров  $a_i, b_i, k_i, h_i$  к скорректированным представлен формулами (11–13).

Запишем вероятности ошибочных действий оператора в виде вектора:

$$\vec{P}_q = \{p_{q1}, p_{q2}, \dots, p_{qn}\}. \quad (11)$$

Модель, соответствующая схеме рисунка 9, представлена в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений (10).

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \tilde{a}_1 \frac{x}{d_1 x + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{k_1}\right) - \tilde{b}_1 xy - \tilde{h}_1 xz; \\ \frac{dy}{dt} = \tilde{a}_2 \frac{y}{d_2 y + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y}{k_2}\right) + \tilde{b}_2 xy; \\ \frac{dz}{dt} = \tilde{a}_3 \frac{z}{d_3 z + c_3} \cdot \left(1 - \frac{z}{k_3}\right) + \tilde{b}_3 yz. \end{cases} \quad (10)$$

Начальные условия системы:

$$x_0 = x(0), y_0 = y(0), z_0 = z(0).$$

Схема организована в виде ориентированного графа, где вершинами являются показатели X, Y, Z, направление дуг указывает в сторону показателя, на который

Оценка вероятности отказа МО с учетом ТФ и ЧФ определяется по формуле (1) с учетом коррекции для вероятностей соответствующих ЧФ, выполненной с использованием решений системы (13).

Для определения причин возникновения отказов на производственном оборудовании применяется анализ методом «дерева неполадок».

Оценка возможности отказа или безотказной работы отдельных элементов технических систем проводится на основе статистических данных по интенсивности их отказа.

$$\begin{cases}
 \frac{dx}{dt} = \tilde{a}_1 \frac{x}{d_1 x + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{k_1}\right) - \tilde{b}_1 xy - \tilde{h}_1 xz; \\
 \frac{dy}{dt} = \tilde{a}_2 \frac{y}{d_2 y + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y}{k_2}\right) + \tilde{b}_2 xy; \\
 \frac{dz_1}{dt} = \tilde{a}_{31} \frac{z_1}{d_{31} z_1 + c_{31}} \cdot \left(1 - \frac{z_1}{k_{31}}\right) + \tilde{b}_{31} yz_1; \\
 \frac{dz_2}{dt} = \tilde{a}_{32} \frac{z_2}{d_{31} z_2 + c_{32}} \cdot \left(1 - \frac{z_1}{k_{32}}\right) + \tilde{b}_{32} yz_2; \\
 \dots \\
 \frac{dz_n}{dt} = \tilde{a}_{3n} \frac{z_n}{d_{3n} z_n + c_{3n}} \cdot \left(1 - \frac{z_n}{k_{3n}}\right) + \tilde{b}_{3n} yz_n.
 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases}
 \tilde{a}_i = f_{a_i}(a_i, e_1, \dots, e_{12}); \\
 \tilde{b}_i = f_{b_i}(b_i, e_1, \dots, e_{12}); \\
 \tilde{k}_i = f_{k_i}(k_i, e_1, \dots, e_{12}); \\
 \tilde{h}_i = f_h(h_i, e_1, \dots, e_{12}).
 \end{cases} \quad (13)$$

$i = 1, 2, 3.$

В работе рассмотрено два механизма: манипулятора с пневмоприводом для погрузки и выгрузки заготовок из печи (структурно-логическая схема оценки отказа в зависимости от отказов технических узлов и ошибок оператора представлена в виде дерева отказов на рисунке 10); подъема и поворота свода и электродов агрегата печь-ковш (структурно-логическая схема оценки отказа в зависимости от отказов технических узлов и ошибок оператора представлена в виде «дерева отказов» на рисунке 11, вероятности отказов приведены в таблице 3).

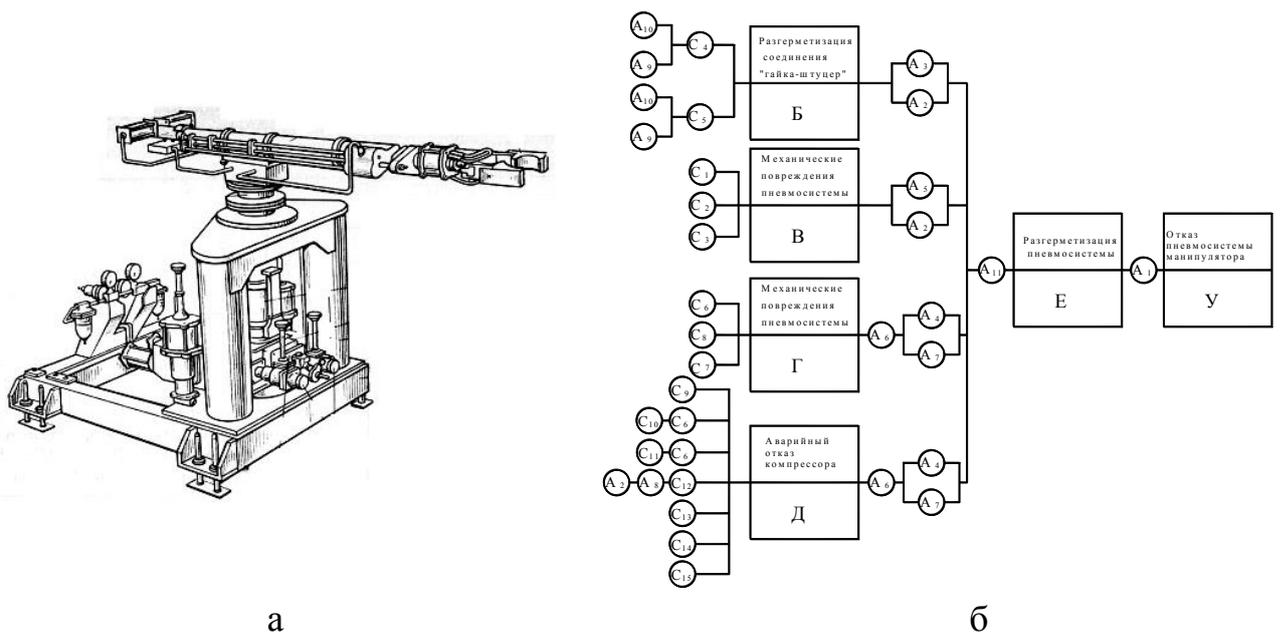
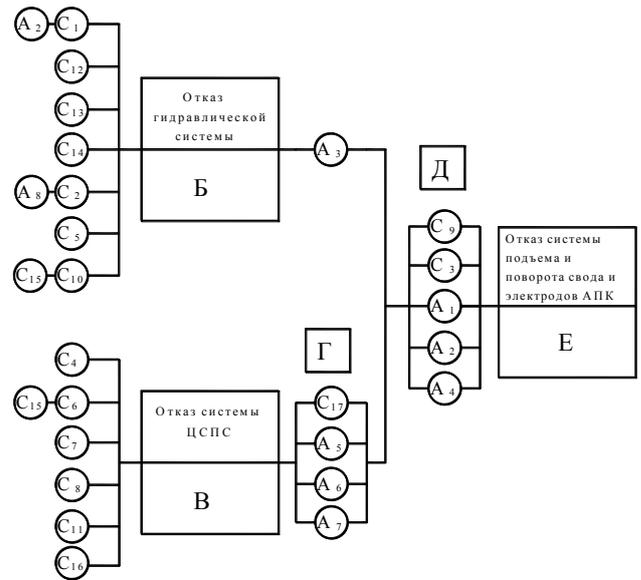


Рисунок 10. Промышленный пневматически манипулятор (а), дерево отказов пневмосистемы манипулятора (б)



а

б

Рисунок 11. Механизм подъема и поворота свода и электродов агрегата печь-ковш (а), дерево отказов механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата печь-ковш (б)

Вероятность отказа всей системы равна  $P(Y) = 5,9 \cdot 10^{-6}$ . Для выявления силы влияния ЧФ в итоговой вероятности отказа системы  $P(Y)$  проведем исследование модели на чувствительность к изменению входных параметров – вероятностей отказов (из таблицы 3).

Таблица 3. Вероятности возникновения человеческого и машинного отказа эксплуатации механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата печь-ковш

Обозначение вероятности человек/машина	Событие	Вероятность $P(A)$
1	2	3
A1	Нарушение правил безопасности	0.05
A2	Выполнение ремонта оборудования во время работы	0.004
A3	Совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия	0.039
A4	Необнаружение сигнала	0.062
A5	Невыполнение операции нажатия кнопки	0.015
A6	Невыполнение операции включения тумблера	0.01
A7	Невыполнение операции выдачи или принятия голосовой команды	0.002
A8	Некачественно выполнено действие по установке уплотнения	0.014
C1	Механическое повреждение трубопровода	0.00005
C2	Выход из строя прокладки	0.04
C3	Превышение давления в системе	0.00004
C4	Отказ электромагнитного распределителя	0.0000035
C5	Отказ предохранителя	0.000003
C6	Выход из строя подшипника электродвигателя	0.00002
C7	Выход из строя крыльчатки электродвигателя	1.1E-06

Продолжение таблицы 3

1	2	3
C8	Отказ конечного выключателя	0.00003
C9	Износ сальникового уплотнителя	0.00003
C10	Выход из строя подшипника вала насоса	0.00002
C11	Выход из строя муфты	0.000025
C12	Дефекты сварных соединений	0.000076
C13	Отказ предохранительного клапана	0.026
C14	Отказ нагнетательного клапана	0.00086
C15	Отказ датчика контроля температуры	0.029
C16	Отказ фланца	0.000086
C17	Отказ предохранительной арматуры	0.026

Показатель чувствительности, характеризующий процентное изменение итоговой вероятности отказа  $P(Y)$ , если  $i$ -тый параметр увеличился на 1%, рассчитывается для каждой вероятности отказа входных событий. На диаграмме рисунка 12 показан ранжированный по показателю чувствительности ряд отказов технических узлов и ошибок оператора, соответствующих обозначениям таблицы 3.

Изменяем входные вероятности для каждого из факторов групп ЧФ и ТФ поочередно, а затем для всех вероятностей вместе. Расчет выполняем по формулам (4)–(6). Получены следующие результаты: чувствительность модели на изменение вероятностей группы ЧФ равна 2%; чувствительность модели на изменение вероятностей группы ТФ равна 1%; общая чувствительность модели на изменение всех факторов равна 3%.

Проведя аналогичные расчеты для манипулятора с пневмоприводом для погрузки и выгрузки заготовок из печи, получили следующие показатели чувствительности: чувствительность модели на изменение вероятностей группы ЧФ равна 3,5%; чувствительность модели на изменение вероятностей группы ТФ равна 1%; общая чувствительность модели на изменение всех факторов равна 4,5%.

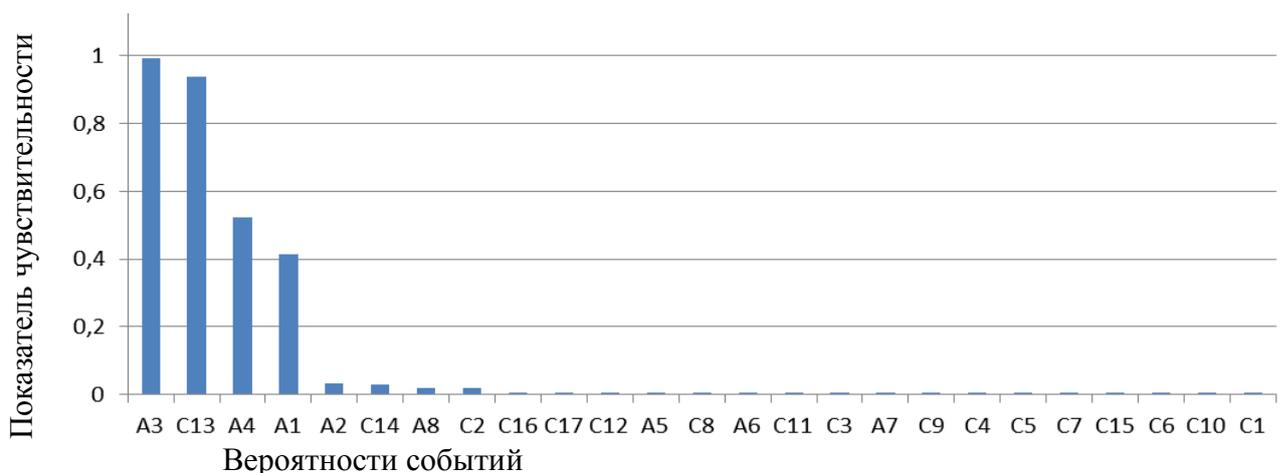


Рисунок 12. Показатели чувствительности отказов технических узлов и ошибок оператора согласно таблице 3

Отсюда видно, что ЧФ является основным фактором, влияющим на создание аварийной ситуации при эксплуатации металлургических машин и механизмов.

В работе использовалось специализированное программное обеспечение, со-

зданное для реализации задач имитационного моделирования, – AnyLogic 8 University 8.7.2. Посредством программы AnyLogic решается система (7). На первом этапе исследования модели использовалась система (8), полученная из (7) путем преобразования Эйлера, и ее параметры носили ориентировочный характер, являясь первым приближением для нахождения параметров модели по системе (7). Параметры модели берутся из откалиброванной модели. Факторы E1–E12 в проекте моделируются варьируемыми параметрами e1–e12, которые определяются на основе соотношений (7).

#### **Шестой раздел «Внедрение в металлургическое производство индивидуального мониторинга физиологических параметров работника».**

Устройство предназначено для снятия индивидуальных показаний психофизиологических реакций (пульс, кожно-гальваническая реакция (КГР)) организма сотрудника во время рабочего процесса и определения его местонахождения на территории производства в режиме реального времени. Устройство способно также зафиксировать резкое изменение положения рабочего в пространстве, что косвенно может указывать на нештатную ситуацию. Устройство снимает показатели психофизиологических реакций у рабочего, данные о расположении сотрудника на карте производства, о положении в пространстве и передвижениях в течение всей рабочей смены и передает на сервер для дальнейшей обработки, сохранения и последующего использования в конкретных ситуациях производственного процесса.

#### ***Область применения полученных данных на производстве:***

– данные, полученные с датчиков КГР и пульсометра, послужат отличным детектором психофизиологического состояния (ПФС) сотрудника, позволяя своевременно реагировать на психофизиологическое состояние рабочего, что позволит снизить вероятность возникновения нештатной ситуации или чрезвычайного происшествия по вине ЧФ;

– данные, полученные с GPS, в условиях производства помогут в режиме реального времени дать точное местоположение сотрудника на производстве, что позволит во время чрезвычайных происшествий или нештатной ситуации обеспечить в кратчайшие сроки доступ спасательной бригады к сотруднику или технического специалиста к неисправному механизму; также наличие точного позиционирования рабочего и состава структурного подразделения производства на территории производства позволит вывести контроль за проведением рабочего процесса на более совершенный уровень;

– данные от акселерометра послужат мерой физической активности рабочего, что косвенно указывает на меру его работоспособности за смену. Также данные, полученные от акселерометра, могут указать на резкое изменение положения рабочего в пространстве, что может служить показателем нештатной ситуации (падение, чрезмерное ускорение при ударе и т. д.);

– данные, полученные с датчиков устройств работников предприятия, обработанные и сохраненные на сервере за продолжительное время, послужат для оптимизации и совершенствования производственного процесса на основании статистического анализа данных (ПФС, анализ местоположения сотрудника на территории производства за смену, производительность за смену сотрудника).

Разработанное устройство состоит из двух основных частей и одной вспомогательной. Браслет, надеваемый на руку, содержит датчики измерения пульса, КГР, модули пульсометра, температурный датчик, 3-осевой акселерометр, GPS и bluetooth-модуль. При этом требуется, чтобы между расположенными в нем датчиками и кожей запястья был прямой контакт. Вторая часть устройства представляет собой карбоновый корпус со вставками из органического стекла (акрила) под вывод световой индикации (питание, предупреждение, тревога), перфорированной сетки спикера для вывода звуковой информации (тревога, внимание), внутри корпуса находится собственно контроллер, управляющий устройством, и элемент питания.

На рисунке 13 представлена блок-схема разработанного носимого устройства. Все элементы разработанного носимого устройства представлены на принципиальной схеме (рисунок 14).

Разработан программный продукт «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов» на основе индивидуального устройства для снятия психофизиологических показателей и определения местонахождения работника в режиме реального времени, а также программного комплекса для ведения, обработки и анализа информации по всем работникам.

Программное обеспечение является структурной единицей разрабатываемого устройства по индивидуальному мониторингу психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли во время выполнения рабочего процесса. Данное программное обеспечение реализовано в среде IDE Clarion (Си). Программное средство получает по беспроводному каналу связи информацию от датчиков: показатели кожно-гальванической реакции, пульса, температуру окружающей среды и тела, данные акселерометра и GPS-позиционирование работника на карте предприятия для дальнейшей обработки.

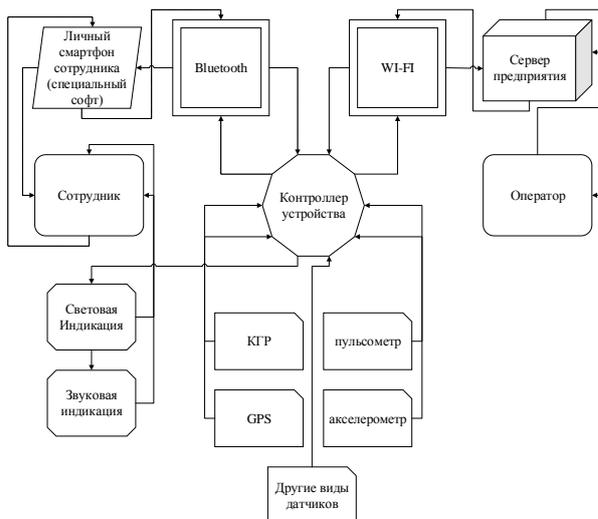


Рисунок 13. Принципиальная блок-схема разработанного носимого устройства

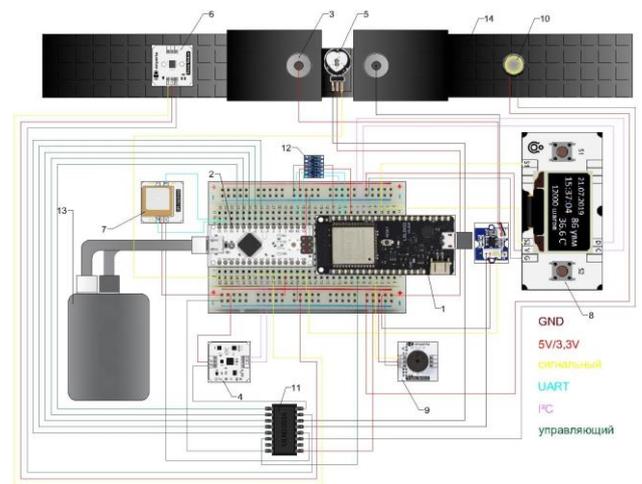


Рисунок 14. Принципиальная схема разработанного носимого устройства

Каждому работнику присвоен уникальный номер для идентификации и за-

кладываются индивидуальные характеристики уровня значений контролируемых параметров (норма, ниже нормы, выше нормы). Если полученные данные указывают на отклонение от нормальных значений, то оператор получает сигнал-оповещение и принимает решение о своевременной реакции на ситуацию, что снизит производственный риск.

На рисунке 15 представлена укрупненная блок-схема алгоритма моделирования. На рисунке 16 представлено рабочее окно программного продукта.

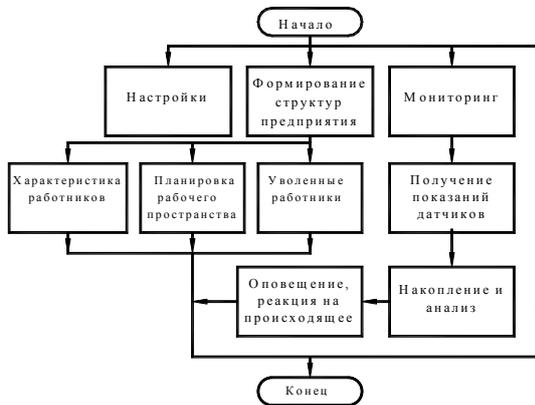


Рисунок 15. Укрупненная блок-схема алгоритма моделирования

Фамилия оператора	Дата	Время	КТР	Пульс	Темп	Коэфф	X	Y	Z
Жаминин Фадруа Полатов	29/08/2019	14:56:13	85	70	35	30	2394	4304	0
Масарюкина Эльвира Эльдаровна	29/08/2019	14:56:16	51	38	38	37	7945	7594	0
Китаринов Листок Закатов	29/08/2019	14:56:00	63	38	38	63	2348	2033	0
Оростов Орост Оростович	29/08/2019	14:55:57	148	38	36	63	8923	2246	0
Оростов Орост Оростович	29/08/2019	14:55:55	148	60	35	15	3257	7496	0
Оростов Орост Оростович	29/08/2019	14:55:40	119	38	35	53	7679	3884	0
Оростов Орост Оростович	29/08/2019	14:55:29	151	73	37	46	3150	7770	0
Оростов Орост Оростович	29/08/2019	14:55:28	123	60	37	54	3354	6780	0
Елифанцев Ефим Аллопов	29/08/2019	14:55:17	65	35	41	41	2029	6383	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:55:16	77	38	38	29	2303	8837	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:55:16	77	38	38	30	9007	4576	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:55:25	129	38	38	55	779	3400	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:55:02	119	38	38	42	4512	5092	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:24:53	148	51	38	51	3872	963	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:24:50	95	38	38	61	2071	4137	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:24:32	136	38	38	16	6264	3092	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:24:28	124	35	38	68	7142	1148	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:24:27	71	38	38	14	4537	7208	0
Курносова Марина Васильевна	29/08/2019	14:24:24	151	38	38	61	6204	1675	0

Рисунок 16. Мониторинг показаний датчиков

Программное обеспечение выполняет ряд функций: накопление показаний датчиков для каждого зарегистрированного работника; при отклонении показаний от нормы информация записывается в протокол в хронологическом порядке с указанием даты, времени и характера отклонений. Накопленная информация после анализа может быть использована для организационных и административных решений, направленных на улучшение эффективности работы предприятия с подчиненными. Программа создана для работы под управлением OS Windows. Интерфейсная часть построена на базе Graphical User Interface.

**Седьмой раздел «Дальнейшее развитие классификации психофизиологических состояний человека в режиме реального времени».**

Перед тем как приступить (перед сменой) к работе, оператор должен получить носимое устройство.

Для авторизации носимого устройства с пользователем (каким-либо из способов) необходимо произвести первичную регистрацию психофизиологических показателей работника.

Порядок принятия решений после получения данных перед каждой сменой:

- если психофизиологические показатели сотрудника в допустимой нормальной области, то следует допустить сотрудника к выполнению трудовых обязанностей;

- если психофизиологические показатели сотрудника не типичны и не входят в область допустимых нормальных значений для этого сотрудника, то следует отказать в допуске на работу до нормализации психофизиологических показателей;

- если показатели температуры сотрудника выше нормальной, то следует отказать в допуске на работу и рекомендовать посетить медпункт или медицин-

ское учреждение;

– если показатели пульса сотрудника превышают норму:

1) произвести измерения через 10–15 минут;

2) если пульс не пришел в норму, то отказать в допуске на работу и рекомендовать посетить медпункт или медицинское учреждение.

Во время штатной работы устройства по регистрации психофизиологической активности персонала в процессе трудовой деятельности необходимо:

– если психофизиологическая активность рабочего во время исполнения своих трудовых обязанностей находится в допустимой нормальной области: устройство в штатном режиме продолжает регистрировать основные тенденции в психофизиологической активности сотрудника для дальнейшего анализа на основании выработки стратегии по оптимизации рабочего процесса как лично сотрудника, так и предприятия в целом, что положительно скажется на производительности работы предприятия;

– если во время работы у сотрудника показатели психофизиологической активности изменяются с области нормальной продуктивности на показатели, не характерные для него во время работы, то программное обеспечение на сервере предприятия, работающее в комплексе с разработанным устройством, анализирует, а затем сравнивает с ранее регистрируемыми показателями конкретного сотрудника и выдает рекомендации к последующим действиям по нормализации ситуации на месте в зависимости от степени изменения психофизиологического состояния сотрудника.

Устройство также поможет определить зарождение нервного и эмоционального перенапряжения сотрудника на ранних стадиях, что может привести к возникновению стресса.

На рисунке 17 представлена шкала показателей частоты сердечного сокращения (ЧСС). Зоны разбиты по цветам: зеленый, светло-зеленый, желтый, оранжевый и красный. Согласно каждой зоне есть рекомендации, что делать с работником. Зеленый цвет и светло-зеленый благоприятны для работы; желтый цвет – сотруднику работу выполнять можно, но при этом за ним необходимо вести наблюдение; оранжевый – отстранить от работы; красный – отстранить от работы, срочно доставить в медицинское учреждение. Такой подход был предложен и для мониторинга температуры тела и показателей КГР.

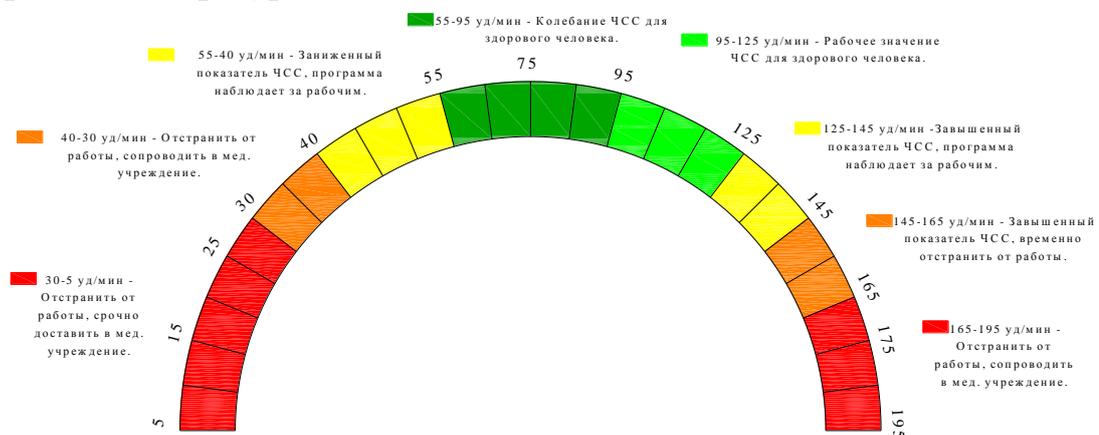


Рисунок 17 – Шкала показателей ЧСС, уд/мин

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе **решена имеющая важное хозяйственное значение** научно-техническая проблема развития научных основ обеспечения безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов на базе учета показателей безотказности оборудования и человеческого фактора, совершенствования автоматизированной системы прогнозирования отказов машин и механизмов, а также предупреждения нештатных и аварийных ситуаций на металлургических и промышленных предприятиях.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. В результате анализа исследований надежной и безотказной эксплуатации машин, агрегатов и процессов, на основании факторов теротехнологии установлено, что наименее изученным направлением является вопрос анализа отказов методом статистической теории надежности. Для сохранения работоспособного состояния оборудования возникает необходимость использования методов расчета количественных характеристик надежности, опираясь на статистические данные наработок на отказ отдельных деталей, узлов, машин и агрегатов, а также в систематизации и обработке показателей безотказности оборудования и в формировании баз данных наработок на отказ. Необходимым является рассмотрение уровня эксплуатации, куда входит дисциплина технологического персонала и учет ЧФ. При расчете показателей безотказности необходимо ввести учет влияния человека на безотказность машин и агрегатов.

2. Получил развитие метод прогнозирования отказов машин и механизмов путём учёта особенностей эксплуатации технологически нового оборудования совместно с устаревшим, в том числе при внедрении новых технологий и проектировании металлургических цехов.

3. Усовершенствована автоматизированная система прогнозирования отказов машин и механизмов. Система позволяет накапливать и хранить данные наработок на отказ всех элементов машин и механизмов, предупреждает на базе статистической теории надежности и экстраполяции закономерностей развития о скором выходе из строя их элементов.

Данная система может определять такие показатели, как: вероятность безотказной работы в течение определенного времени  $P(t)$ ; гамма-процентная наработка до отказа  $t_\gamma$ ; средняя наработка до отказа  $T_1$ ; средняя наработка на отказ  $T$ ; частота отказов  $f(t)$ ; интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ; параметр потока отказов  $\mu(t)$  и др.

4. Разработан программный продукт для оценки условий безотказной эксплуатации металлургических машин и механизмов, а также производственного риска. В автоматизированном режиме выполняется оценка состояния машин и механизмов, устанавливается их остаточный ресурс работы, что позволяет усовершенствовать систему технического обслуживания и ремонта путем численного моделирования наработок технических объектов на отказ, причём с учетом влияния вредных

и опасных производственных факторов, и безошибочного выполнения работником функциональных действий.

5. Исследование причин травматизма на предприятии показало, что в общем количестве НС и отдельно для мужчин и женщин причины организационного характера имеют большую долю среди других (45%), комплексные занимают второе место (~30%), на третьем месте психофизиологические (~20% – также немалая часть). Данные сведения подтверждают необходимость разработки методов и средств снижения влияния психофизиологических факторов на работников.

6. Разработана гибридная математическая модель прогнозирования отказов машин и механизмов с учётом влияния человеческого фактора на основе представления сложной технической системы, управляемой человеком-оператором, в виде системы связанных элементов, часть из которых соответствует основным техническим узлам оборудования, а часть – характеризует оператора. Чувствительность модели к изменению технического и человеческого факторов составила 3,5...4,5%.

7. Разработана математическая модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора. Данная модель относится к классу имитационных моделей. Комплексный учёт данных показателей позволяет повысить точность прогнозирования возникновения внештатных ситуаций и выбрать рациональный режим работы оператора.

8. Исследовано влияние ЧФ в аварийной ситуации при эксплуатации пневмосистемы манипулятора. Из анализа полученных результатов проведенных исследований видно, что по показателям чувствительности человеческих отказов из 26 вероятностей возникновения отказов в диапазоне от 1 до 0,3 пять относятся к человеческим отказам и один к отказу технических узлов. Оценка чувствительности модели к групповым изменениям входных показателей дает следующую картину: чувствительность модели к изменению вероятностей группы ЧФ составляет 3,5%; чувствительность модели к изменению вероятностей группы ТФ составляет 1%; общая чувствительность модели к изменению всех факторов равна 4,5%. Влияние ЧФ на надежность эксплуатации пневмосистемы манипулятора в 3,5 раза выше, чем ТФ.

9. Исследовано влияние ЧФ в аварийной ситуации при эксплуатации механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата печь-ковш. Расчет показал, что наиболее влияющие на вероятность отказа всей системы факторы в группе ЧФ: А3 – совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия, А4 – необнаружение сигнала, А1 – нарушение правил безопасности; в группе ТФ: С13 – отказ предохранительного клапана. Чувствительность модели к изменению вероятностей группы ЧФ равна 1,998%; чувствительность модели к изменению вероятностей группы ТФ равна 1,003%, общая чувствительность модели к изменению всех факторов равна 3,017%. Влияние ЧФ на надежность эксплуатации механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата печь-ковш в 2 раза выше технического фактора.

10. Предложен подход комбинирования вероятностных моделей оценки надежности системы «человек – машина» и имитационных моделей, позволяющих воспроизводить различные ситуации изменения характеристик человека как элемента СТС и их влияния на надежность системы в целом.

11. Разработана «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов» на основе индивидуального устройства для снятия психофизиологических показателей и определения местонахождения работника в режиме реального времени, а также программного комплекса для ведения, обработки и анализа информации по всем работникам. Система позволяет предупредить нештатные и аварийные ситуации путем временного или полного отстранения работника от выполнения должностных обязанностей.

12. Разработано индивидуальное устройство для снятия психофизиологических показателей и определения местонахождения работника, которое работает в комплексе с системой мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургических машин и механизмов. Устройство позволяет снимать психофизиологические показатели человека в режиме реального времени, что дает возможность оперативно реагировать в нештатной ситуации, при аварии на производстве и при резких изменениях жизненных показателей работника.

13. Получила развитие классификация психофизиологических состояний человека в режиме реального времени (на базе данных, поступающих с датчиков индивидуального устройства). Оценки состояния готовности человека к выполнению работ: «отсутствие усталости» – допуск к работе; «незначительная усталость» – допуск к работе с ограничением; «существенная усталость» – временное отстранение от работы; «критическое поведение во время работы» – полное отстранение от работы; «недопустимое психофизиологическое состояние» – недопуск к работе.

14. Внедрения автоматизированной системы прогнозирования отказов оборудования, системы мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами и носимого индивидуального устройства, компьютерной программы расчета показателей безотказности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли выполнено на таких-то предприятиях: ЗАО «Внешторгсервис» Филиал № 12 (г. Алчевск), ЧАО «НПЦ «Трансмаш» (г. Луганск), ЗАО «Внешторгсервис» Филиал № 2 (г. Енакиево), ООО «Лугамаш» (г. Луганск), ЧАО «Лугцентрокуз» им. С.С. Монятовского (г. Луганск). Внедрение на участке непрерывной разливки стали кислородно-конвертерного цеха ЗАО «Внешторгсервис» Филиала №12 позволило увеличить безотказность машины непрерывного литья заготовок № 1 на 21,81%. Фактический экономический эффект от внедрения составил 153935025,78 руб., что подтверждено расчетом от предприятия, долевое участие автора составляет 35% или 53877259,023 руб.

15. Дальнейшее исследование будет направлено на повышение безотказности машин и механизмов металлургической отрасли, а также совершенствование системы технического обслуживания и ремонта. Сбор и обработка полученных данных от внедренного в производство программного продукта «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами» и разработанного носимого устройства позволит усовершенствовать технологические карты на ряд операций.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях*

1. Features of mathematical modelling of mechanical processes of metallurgical machines / E.P. Levchenko, **D.A. Vishnevsky**, D.A. Vlasenko, B.B. Moroz, O.I. Pavlinenko // Modern problems of theory of machines / SEC "MS". – North Charleston: CreateSpace, 2016. – № 4 (1). – P. 14-17 (*обоснована рациональность решений математических уравнений проводить согласно плану центрального композиционного ротатабельного униформ-планирования второго порядка*).

2. Анализ применения экспертных систем для диагностики и ремонта на металлургических предприятиях с полным циклом / **Д.А. Вишневский**, Р.Ю. Коробов // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. – Вып. 5 (48). – С. 161-167 (*выполнено исследование применения экспертных систем для диагностики на металлургических предприятиях*).

3. **Вишневский, Д.А.** Расчет надежности металлургического оборудования и производственного риска // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ", 2017. – Вып. 7 (50). – С. 139-145.

4. Improving the reliability of metallurgical equipment through the introduction of Realtime Location Systems technologies and Internet of Things / **D.A. Vishnevsky**, B.A. Sakharov // Journal of Advanced Research In Technical Science. – 2018. – Issue 12. – P. 74-77 (*выполнено исследование области применения перспективных технологий из сферы носимой электроники и IoT*).

5. Разработка алгоритма и компьютерной программы для расчета надежности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли / А.П. Жильцов, **Д.А. Вишневский**, В.А. Козачишен, А.В. Бочаров // Черные металлы. – 2018. – № 11. – С. 27-33 (*разработан алгоритм моделирования прогнозирования отказов машин и механизмов*).

6. Анализ влияния «человеческого фактора» на надежность металлургического оборудования / **Д.А. Вишневский**, Б.А. Сахаров // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. – Вып. 12 (55). – С. 97-104.

7. **Vishnevsky, D.A.** Reliability calculation for metallurgical equipment considering the probability of operator's error // Journal of Advanced Research in Natural Science. – 2019. – Issue 8. – P. 21-26.

8. **Вишневский, Д.А.** Влияние человеческого фактора на надежность металлургического и машиностроительного оборудования // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. – Вып. 15 (58). – С. 87-93.

9. Improving the reliability of metallurgical equipment parts via thermal spraying and ways to control coating properties / A.P. Zhiltsov, Y.A. Kharlamov, **D.A. Vishnevsky** // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. – 55, 1 – P. 140-147 (*выполнено исследование областей применения газотермических покрытий для повышения ресурса и восстановления деталей машин металлургического комплекса*).

10. Assessment of the psychophysiological state of the metallurgical operator during the working process in real time / **D.A. Vishnevsky**, A.L. Sotnikov // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2020. – Issue 21. – P. 49-53 (*разработана классификация психофизиологических состояний человека в режиме реального времени*).

11. Испытания носимого устройства для определения психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли / **Д.А. Вишневский**, Н.А. Бондарь, А.Л. Сотников // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института. – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2020. – Вып. 63 (20). – С. 80-85 (*выполнены экспериментальные исследования на действующем предприятии носимого устройства и программного продукта «Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами», которые показали повышение безотказности машины непрерывного литья заготовок на 21,81%*).

12. Mathematical modeling for human factor influence on the equipment reliability in the machine building shops of metallurgical enterprises / **D.A. Vishnevsky**, A.L. Sotnikov // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2021. – Issue 24. – P. 41-46 (*разработана гибридная математическая модель прогнозирования отказов машин механизмов с учетом влияния человеческого фактора*).

13. Повышение безопасности труда рабочих металлургических предприятий методами контроля психофизиологических параметров работника в режиме реального времени / **Д.А. Вишневский**, А.П. Жильцов, А.В. Бочаров А.Л. Сотников // Безопасность труда в промышленности. – 2021.– № 5. С. 53-58. (*разработано носимое устройство измерения индивидуальных психофизиологических реакций в режиме реального времени*).

#### **Свидетельства о государственной регистрации программ для электронно-вычислительных машин и базы данных**

14. Свидетельство о государственной регистрации Программы для ЭВМ № 2018617723 Российская Федерация. Компьютерная программа для расчета надежности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли / **Вишневский Д.А.**, Жильцов А.П., Козачишен В.А.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU). – № 2018614946; заявл. 15.05.2018; опубл. 28.06.2018 (*разработан алгоритм моделирования расчета надежности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли*).

15. Свидетельство о государственной регистрации Программы для ЭВМ № 2019616921 Российская Федерация. Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами / **Вишневский Д.А.**, Жильцов А.П., Козачишен В.А., Сахаров Б.А.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU). - № 2019615644; заявл. 20.05.2019; опубл. 30.05.2019 (*разработан алгоритм моделирования системы мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли*).

### ***Научные работы в материалах конференций***

16. **Вишневский, Д.А.** Расчет надежности оборудования и производственного риска причинения вреда здоровью кузнеца-штамповщика // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. 26-27 ноября 2015 года / Рубцов. индустр. ин-т (филиал) ФГБОУ ВПО «Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова». – Рубцовск, 2015. – С. 102-111.

17. Исследование моделей представления знаний в экспертных системах, используемых в металлургической отрасли / **Д.А. Вишневский**, Р.Ю. Коробов // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 3-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф., (Курск, 17-18 нояб. 2016 г.) / отв. ред. Е.В. Павлов. – Курск: Университетская книга, 2018. – Т. 1. – С. 165-168 (*проведен анализ моделей представления знаний в области искусственного интеллекта и экспертных систем*).

18. Анализ применения экспертных систем диагностики и ремонта на металлургических предприятиях с полным циклом / **Д.А. Вишневский**, Р.Ю. Коробов // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию кафедры "Машины металлургического комплекса", 13-14 октября 2016 г. / ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ". – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ", 2016. – С. 33-34 (*проведен анализ практического применения искусственного интеллекта на металлургических предприятиях, основанных на экспертных системах*).

19. **Вишневский, Д.А.** Расчет надежности металлургического оборудования и производственного риска // Сборник тезисов и докладов Юбилейной международной научно-технической конференции «60 лет ДонГТУ. Наука и практика», 11 окт. 2017 г. / ДонГТУ. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. – С. 104-106.

20. **Вишневский, Д.А.** Влияние организационных факторов на надежность металлургического оборудования // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. науч. тр. 4-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф., (Курск, 15 нояб. 2017 г.) / отв. ред. Е.В. Павлов. – Курск: Университетская книга, 2017. – Т. 1. – С. 146-149.

21. Определение основных показателей надежности шпиндельной клетки / Б.А. Сахаров, Ю.В. Изюмов, **Д.А. Вишневский**, Э.П. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Донецк, 24-25 мая 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – С. 72-78 (*проведены исследования и обработка статистических данных об отказах универсальных шарниров с подшипниками качения шпинделей, расположенных со стороны двигателей (шарниры с подшипниками качения) и со стороны рабочих валков (шарниры с бронзовыми вкладышами) клетки 1300 металлургического комбината «АрселорМиттал Кривой Рог»*).

22. Повышение надежности металлургического оборудования путем контроля за вегетативной нервной системой обслуживающего персонала в реальном времени / **Д.А. Вишневский**, Б.А. Сахаров // Механика и машиностроение. Наука и практика: материалы междунар. науч.-практ. конф. № 1, (Санкт-Петербург, 14 дек. 2018 г.). – СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2018. – С. 86-90. (*предложен метод контроля, за вегетативной нервной системой человека, что снизит ошибочные действия персонала во время трудового процесса*).

23. **Вишневский, Д.А.** Экспериментальные исследования распределения количества несчастных случаев (НС) в кузнечно-прессовом производстве (КПП) // Прогрессивные технологии и процессы: сб. науч. ст. 5-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (27-28 сент. 2018 г.) / Юго-Запад. гос. ун-т. – Курск: Университетская книга, 2018. – С. 53-58.

24. Влияние человеческого фактора на надежность металлургического оборудования / **Д.А. Вишневский**, Б.А. Сахаров, Н.А. Бондарь // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тез. докл. III междунар. науч.-техн. конф., 17 окт. 2018 г. / под ред. Д.А. Власенко; ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ". – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ", 2018. – С. 22-25 (*выполнен анализ особенностей трудовой деятельности в современных условиях управления технологическими процессами*).

25. Система мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли программными средствами / **Д.А. Вишневский**, Б.А. Сахаров, Н.А. Бондарь // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – С. 143-146 (*выполнена разработка алгоритма модели прикладной компьютерной программы для мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли*).

26. Внедрение на производство решений из сферы интернета вещей, как один из способов увеличить эффективность производства / **Д.А. Вишневский**, Б.А. Сахаров // Сборник тезисов докладов IV междунар. науч.-техн. конф. "Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства", 17 окт. 2019 г. / ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ". – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ", 2019. – С. 14-16 (*выполнен аналитический обзор применяемых*

*технологий по оптимизации и повышению производительности сложных технических систем человек-машина.)*

27. Направление совершенствования надежности оборудования с учетом "человеческого фактора" / **Д.А. Вишневский**, Н.А. Бондарь // Сборник тезисов докладов IV междунар. науч.-техн. конф. "Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства", 17 окт. 2019 г. / ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ". – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ", 2019. – С. 18-20 (*выполнен анализ зависимостей появления ошибок от действующих нагрузок на человека оператора.*)

28. Контроль температуры работников как фактор промышленной безопасности предприятий и организаций / А.Л. Сотников, **Д.А. Вишневский**, Б.А. Сахаров // Сборник научных трудов 2-й Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в управлении, автоматизации и мехатронике» (30 апр. 2020 г.) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Запад. гос. ун-т. – Курск: Юго-Запад. гос. ун-т, 2020. – С. 181-185 (*разработан метод измерения температуры тела работника промышленных предприятий с помощью носимого индивидуального устройства в течении всей рабочей смены.*)

29. Надежность человека-оператора в системе "человек-машина" / **Д.А. Вишневский**, Н.А. Бондарь, А.Л. Сотников // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сборник тезисов докладов V Междунар. науч.-техн. конф., 15 окт. 2020 г. / редкол.: С.В. Куберский и др.; ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ». – Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2020. – С. 38-40 (*выполнено обоснование необходимости при расчете показателей надежности металлургического оборудования рассматривать систему "человек-машина" как взаимосвязанную систему, в которой безотказность машины и безотказность человека представляют безотказность данной системы.*)

30. Повышения безотказности металлургического оборудования методами контроля психофизиологических параметров работника в режиме реального времени / **Д.А. Вишневский**, А.П. Жильцов, А.Л. Сотников, Н.А. Бондарь // Современная металлургия нового тысячелетия, посвящается 10-летию Металлургического института ЛГТУ: сб. науч. тр. III Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием), 21-23 окт. 2020 г., Липецк. – Липецк: Изд-во Липец. гос. техн. ун-та, 2020. – С. 45-50 (*разработан алгоритм программы мониторинга психофизиологического состояния оператора металлургической отрасли.*)

31. Математическое моделирование взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости человека-оператора при эксплуатации металлургических машин и агрегатов / **Д.А. Вишневский**, А.Л. Сотников, Н.А. Бондарь // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Донецк, 24-26 мая 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – С. 107-112 (*выполнена разработка математической модели взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора с учетом разработанной классификации психофизиологических состояний человека в режиме реального времени.*)

Подписано в печать 30.08.2021 г., тираж 100 экз.  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> Бумага офс. Печать RISO.  
Издательство не несет ответственность за содержание  
материала, предоставленного автором к печати.

Изготовитель:  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»  
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР, 94204  
(ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР, ауд. 2113, т/факс 2-58-59)  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя  
средства массовой информации МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016.