



Кудрявцев Александр Алексеевич

**МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР АНАЛИЗА РИСКА  
ОПАСНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ  
СИСТЕМ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Работа выполнена на кафедре «Пожарная и промышленная безопасность» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный консультант                    доктор технических наук, доцент  
**Хафизов Ильдар Фанилевич**

Официальные оппоненты:    **Никифоров Александр Леонидович**  
доктор технических наук, ст. научный сотрудник  
ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная  
академия ГПС МЧС России» / кафедра «Пожарная  
безопасность объектов защиты», профессор

**Корольченко Дмитрий Александрович**  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный  
университет» / кафедра «Комплексная безопасность  
в строительстве», заведующий кафедрой

**Иванова Мария Викторовна**  
доктор технических наук, доцент  
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.  
Губкина» / кафедра «Промышленная безопасность и  
охрана окружающей среды», доцент

Ведущая организация                ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС  
МЧС России» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «22» февраля 2024 года в 13-00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.06 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Павлова Зухра Хасановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Учитывая высокую значимость проблемы повышения пожарной безопасности при проектировании и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса (хранение, транспортирование и переработка нефти), на данный момент все большее значение приобретает решение задач, связанных с предупреждением возможных аварийных ситуаций и минимизацией технологических и экологических рисков.

Существующие в настоящее время методики оценки и декларирования пожарной безопасности эксплуатации опасных производственных объектов (ОПО) нефтегазового комплекса носят, в основном, декларативный характер, а существующий опыт использования методологии анализа опасностей и их оценки, ограниченный декларативной оценкой опасных ситуаций, зачастую не позволяет учитывать его при принятии оптимальных решений по предупреждению аварийных ситуаций ввиду отсутствия надлежащего организационного и информационного обеспечения по прогнозированию и оперативному раннему распознаванию опасных ситуаций. Учитывая технологическую сложность, распределённость и наличие большого количества составных элементов ОПО, необходимо автоматизировать процесс выявления пожароопасных мест ОПО и потенциальных условий возникновения опасности. Так-же необходимо учитывать не только технологические особенности ОПО, но и влияние человеческого фактора. Влияние человека на ОПО предлагается оценивать с помощью тренажеров.

В ряде отраслей промышленности и транспорта с высокой потенциальной опасностью аварий (авиация, морской транспорт, АЭС) одним из важных факторов снижения аварийности является использование тренажеров. Эффективность использования тренажеров в указанных отраслях доказана годами практики и статистикой снижения аварийности. Оценка эффективности применения тренажеров в нефтегазовой отрасли, опирающаяся на такую статистику, затруднительна. Для корректного использования статистических данных необходимо достаточное количество информации, причем для однотипных событий. Нефтегазовая отрасль в сравнении с указанными отраслями отличается значительно большим разнообразием технологических схем объектов с индивидуальной топографической привязкой. Поэтому необходимые для статистики однотипные аварии в нефтегазовой отрасли с участием человеческого фактора, если подробно разбирать конкретную цепочку событий с учетом особенностей объекта, редки и даже уникальны. Непосредственный

расчет эффективности внедрения тренажеров на основе общей статистики снижения аварийности неконструктивен, так как он не позволяет оценить качественное отличие одного тренажера от другого и улучшать методику проведения тренингов с учетом индивидуальных психологических особенностей обучаемых. В отсутствие научно обоснованных оценок эффективности невозможно оптимизировать процесс тренажерной подготовки специалистов нефтегазовой отрасли с учетом ограниченности ресурсов на разработку технических средств и информационное обеспечение проектов, на проведение тренингов по времени и финансовым затратам в рамках единой системы пожарной безопасности.

**Соответствие паспорту заявленной специальности.** Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.10.1 – «Пожарная безопасность (технические науки)»: «п.12. - Разработка научных основ создания систем, методов и технических средств обнаружения, предупреждения и ликвидации аварий, пожаров и взрывов», «п. 14. - Исследование условий, разработка и совершенствование методов оценки и способов снижения пожарных рисков на объектах защиты и прилегающих к ним территориях».

**Степень разработанности выбранной темы.** Используемые на данный момент методики оценки рисков показывают, что их результаты не учитывают постоянно изменяющийся во времени системные взаимосвязи. Применяемые технологии мониторинга управления рисками при эксплуатации опасных производственных объектов как статических объектов обладают значительной методической погрешностью, а принятие решений по предупреждению аварийных ситуаций не учитывает случайный нестационарный характер развития аварийных процессов.

Решение проблемы предупреждения аварийных ситуаций затрудняется значительными объемами входной диагностической и технологической информации ввиду отсутствия системного подхода к решению многофакторных задач безопасности, отсутствия надлежащих компьютеризированных информационно-управляющих систем мониторинга синергетического риска и соответствующего специального методического и программного обеспечения системы обработки данных, что естественно, затрудняет принятие оптимальных управляющих решений по своевременному прогнозированию и предотвращению аварийных ситуаций.

Проблеме повышения безопасности эксплуатации опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли посвящены работы ряда отечественных и зарубежных ученых, среди которых: Хафизов Ф.Ш., Хафизов И.Ф., Бакиев Т.А., Шевченко Д.И.,

Бурдаков Н.И., Волохина А.Т., Гендель Г.Л., Глебова Е.В., Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Никифоров А.Л., Елохин А.Н., Клейменов А.В., Козлитин А.М., Короленок А.М., Корольченко А.Я., Котляровский В.А., Кузеев И.Р., Пермьяков В.Н., Ларионов В.И., Лисанов М.В., Мартынюк В.Ф., Мاستрюков В.С., Одишария Г.Ж., Печеркин А.С., Попов А.И., Прусенко Б.Е., Сафонов В.С., Сидоров В.И., Христовуло О.И. Хуснияров М.Х., Шаталов А.А., Швырцев А.А., Шебеко Ю.Н., Haasl D., Henley E., Kumamoto H., Marshall V., Pietersen C и др.

**Цель работы.** Разработка методических подходов к формализации процедур анализа опасности и работоспособности человеко-машинных систем для повышения уровня пожарной безопасности в нефтегазовой отрасли.

**Задачи исследования.** Для решения поставленной цели были сформулированы следующие основные задачи:

1. Разработка научно-методических основ создания цифровой модели опасных производственных объектов на этапе проектирования для автоматизации анализа опасности и работоспособности и формулирование общих требований.

2. Выделение и группировка основных показателей, которые позволяют спрогнозировать и оценить вероятность реализации риска (наступления рискового события), с привязкой к количественным показателям функционирования технологической системы и ее элементов, для формирования множества потенциальных рисков.

3. На основе математических моделей технологических процессов разработка алгоритмов и методов анализа опасности и работоспособности для установок подготовки нефти.

4. Выявление методического подхода и алгоритмов к формированию плана мероприятий по сокращению рисков при проведении анализа опасности и работоспособности опасных производственных объектов.

5. Формирование требований к построению моделей прогнозирования аварийных ситуаций с учетом ресурсных ограничений, которые позволяют количественно оценивать влияние человеческого фактора.

6. Создание и научное обоснование концепции повышения пожарной безопасности нефтегазовых объектов на основе использования количественных оценок эффективности тренажерной подготовки персонала, для соответствия требованиям ПБ.

### **Научная новизна.**

1. Предложена комплексная математическая модель с параметрами динамической иерархической системы ключевых индикаторов риска с различными численными критериями, определенных как потенциальный ущерб от их превышения над допустимыми граничными параметрами, адаптированная под задачи построения тренажеров и систем подготовки оперативного персонала с применением оптимального множества тренингов.

2. Разработан алгоритм автоматизированного определения нарушения ключевым индикатором риска допустимого граничного параметра, с ранжированием по степени потенциального ущерба, на основе математической модели объекта с учетом разнородных связей технологических элементов.

3. Разработана и обоснована новая классификация последствий превышения ключевыми индикаторами риска нормативных граничных параметров и соотнесения комплекса последствий с ограниченным множеством парирующих мероприятий, реализуемых в параллельном или последовательном режиме, с ранжированием их по ресурсным затратам.

4. Предложен метод селективного выбора группы парирующих мероприятий в зависимости от множества вариантов ресурсных ограничений, рассчитанных по моделям взрыва-пожароопасных технологических объектов, позволяющий варьировать планы мероприятий по соотношению эффект/затраты.

5. На основе цифрового двойника технологического объекта нефтегазовой отрасли, разработана методика количественной оценки влияния человеческого фактора на исследуемую человеко-машинную систему и способы парирования его негативного влияния на уровень пожарной безопасности с формированием оптимального множества тренингов на основе их сортировки по удельной эффективности и выбора наиболее продуктивных тренингов с учетом общих ресурсных ограничений.

Изложенные при описании научной новизны теоретические основы, методы и результаты исследований выносятся на защиту в качестве **основных научных положений** диссертации, принадлежащих лично автору.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость диссертации заключается в методологическом обеспечении разработанных научных основ автоматизированного определения превышений ключевых индикаторов риска позволяют рассчитывать, ранжировать и собирать в

единое целое оптимальное множество рисков, возникающих из геометрических, топологических, технологических связей ОПО, включая риски человеко-машинных коммуникаций, с учетом оптимизации затрачиваемых ресурсов по времени анализа рисков и средств на снижение рисков.

Практическое значение результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Использование разработанного в нем автоматизированного определения превышений ключевых индикаторов рисков, позволило произвести детализацию и идентификацию проблем опасности и работоспособности (HAZOP) для следующих объектов:

- установок ДКС и УПГД ООО «Крус-Запад», при разработке проектной документации;
- программного обеспечения операторов НПС ООО НПП «АТП»;
- установки ЭЛОУ-АВТ ООО НПП «Автоматизация ТП»;

2. В настоящее время обучение, переподготовка и повышение квалификации специалистов с использованием разработанных методик и тренажерных комплексов ведется в следующих учебных заведениях:

- ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»;
- ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»;
- ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»;
- ФГБОУ ВО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»;
- НОУ НПО «Тюменский нефтепроводный лицей»;
- НОУ «Новокуйбышевский нефтетехнический учебный комбинат»;
- ОГБПОУ «Томский государственный промышленно-гуманитарный колледж»;
- Региональный учебный центр ОАО «Северные магистральные нефтепроводы»;
- УКК ООО «Газпром Трансгаз Саратов».

3. С использованием результатов диссертационной работы разработаны и внедрены в производство следующие тренажерные комплексы:

- Тренажер операторов нефтеперекачивающих станций и диспетчеров региональных диспетчерских пунктов;
- Тренажер магистральный транспорт газа;
- Тренажерный комплекс установки подготовки газа и дожимной компрессорной станции;

- Тренажер наземного оборудования нефтегазовых промыслов;
- Тренажерный комплекс установки первичной переработки нефти ЭЛОУ-АВТ;
- Тренажерный комплекс операторов товарных совместно с узлами учета нефти;
- Аналитический тренажерный комплекс оперативного персонала МН и Спецморнефтепорта организации системы «Транснефть»;
- Тренажерный комплекс диспетчеров Сургутского регионального диспетчерского пункта;
- Компьютерный тренажерный комплекс для тренингов и обучения персонала технологических установок АО "СИБУР-ХИМПРОМ";
- Интерактивный тренажер-полигон для имитационного моделирования разветвленной системы магистральных нефтепроводов;
- Компьютерного тренажерного комплекса проверки противоаварийных защит технологических объектов Находкинского месторождения ТПП «Ямалнефтегаз».

**Методология и методы исследования.** В основе проводимых в диссертационной работе исследований используются методы системного анализа, математического моделирования, автоматизированного компьютерного обучения, теории управления рисками и методы экспертных оценок.

**Апробация работы.** Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле – 2016» (г. Уфа, 25 марта 2016 г.), на III международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли» (г. Уфа, УГНТУ 2020г.), на «iTech Energy Summit: Digital, Robotics, AI, AR&VR, 3D» (г. Москва, 11 марта 2022 г.), на национальном нефтегазовом форуме 2022 (г. Москва, 19-21 апреля 2022 г.), на VI Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования» (г. Пенза, 5 июня 2022 г.), на всероссийской научно-практической конференции «Результаты современных научных исследований и разработок» (г. Пенза, 17 октября 2022 г.), на LXIX Международной научно-практической конференции «WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS» (г. Пенза, 30 октября 2022 г.).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 24 печатных работ, в том числе: одна монография, 17 статей в рецензируемых изданиях,

рекомендуемых перечнем ВАК, 2 статьи опубликованы в журналах, входящих в базу данных Scopus, получено 26 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 116 наименований, 4 приложения. Основное содержание диссертационной работы изложено на 345 страницах машинописного текста, иллюстрированного 131 рисунками и 12 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена цель и сформулированы основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** проведен анализ показатели, характеризующие состояние пожарной безопасности в Российской Федерации. В статистическом сборнике ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ за 2021 год отмечено 3589 случаев возникновения пожаров в зданиях производственного назначения (Таблица 1).

Таблица 1 – Распределение основных показателей обстановки с пожарами за 2017-2021 гг. по видам объектов пожаров (выдержка)

Объект пожара	Количество пожаров, ед. / % от общего количества пожаров материальный ущерб, тыс. руб. / % от общего ущерба Погибло, чел. / % от общего количества погибших									
	2017		2018		2019		2020		2021	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
Здания производственного назначения	2786	2,10	2813	2,13	3546	0,75	3438	0,78	3589	0,92
	974317	7,08	1343463	8,66	2089945	11,50	7132712	34,1	178353	10,98
	59	0,75	71	0,90	72	0,84	83	7	2 110	1,30
								1,00		

В Таблице 2 приведена статистика по местам возникновения пожаров. Как мы видим, количество пожаров, возникших из-за технических неисправностей, весьма велико. Следовательно, необходимо выявлять такие места при применении инженерных методов предварительного анализа и исследования технических систем и объектов повышенного риска с целью предупреждения аварий на этапе проектирования объекта.

Таблица 2 – Места возникновения пожаров на различных объектах в 2021 г.

(выдержка)

Место возникновения пожара	Количество пожаров, ед. /Количество погибших людей, чел. /Количество травмированных людей, чел.						
	Всего по данной группе	Здания производ. назначения и склады	Места открытого хранения веществ	Сельскохозяйств. здания	Строящиеся здания	Сооружения, установки и	Транспортные средства
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
Электрощитовая	421/0/2	105/0/2	9/0/0	17/0/0	5/0/0	285/0/0	0/0/0
Складское помещение, кладовая	846/10/11	769/7/11	23/0/0	35/2/0	15/1/0	4/0/0	0/0/0
Основное производственное помещение, цех	789/45/49	731/45/45	2/0/0	27/0/2	2/0/0	27/0/2	0/0/0
Подсобные и вспомог. производств. помещения	455/6/15	377/5/13	13/0/0	31/0/2	15/1/0	17/0/0	2/0/0
Помещение для хранения и ремонта транспорта (гараж)	371/8/20	340/8/18	9/0/0	2/0/0	3/0/0	0/0/0	17/0/2
Помещение котельной, теплоген. и др. установок	332/3/13	287/3/13	6/0/0	16/0/0	11/0/0	12/0/0	0/0/0
Подсобное помещение	861/27/22	535/21/11	13/0/1	63/1/3	230/4/6	18/0/1	2/1/0
Коммуникационный тоннель и коллектор	107/18/8	1/0/0	12/0/0	0/0/0	0/0/0	94/18/8	0/0/0
Кабельный тоннель и полуэтаж	13/0/0	4/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	7/0/0	1/0/0
Галерея, эстакада	25/0/0	13/0/0	1/0/0	4/0/0	1/0/0	6/0/0	0/0/0
Шахта дымоудаления, воздуховод, пневмотранспортная коммуникация	45/0/0	38/0/0	4/0/0	2/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0
Наружная технологическая установка	303/2/25	31/0/3	6/0/0	21/0/0	0/0/0	239/2/22	6/0/0
Емкость, резервуар, бункер	166/7/13	44/5/7	21/0/1	38/0/0	0/0/0	58/0/0	5/0/1

Постоянный рост промышленности привел к усложнению производственных процессов с целью достижения более высокой эффективности производства при меньших затратах. Поэтому надлежащий анализ пожарной безопасности технологических процессов стал одной из наиболее сложных задач в области устойчивого проектирования и эксплуатации установок. Несколько методов

идентификации опасности хорошо зарекомендовали себя в политике промышленных компаний, таких как анализ "Что, если", контрольный список, режимы и анализ отказов (FMEA), и исследование опасности и работоспособности (HAZOP). Тем не менее, исследование HAZOP четко определено как наиболее часто используемый и высокоэффективный метод для выявления потенциальных опасностей и проблем с работоспособностью на современных химических заводах.

В результате проведенного анализа выявлено, что негативным фактором в решении проблемы безопасности на данный момент является недостаточное внимание исследователей и разработчиков систем безопасности к превентивному организационному, техническому и информационному обеспечению при создании инженерной технологической противоаварийной защиты от аварийных ситуаций на ОПО. С развитием современных технических средств возникает необходимость автоматизировать процесс анализа опасности и работоспособности на ОПО.

При проведении методов опасности и работоспособности необходимо оценивать не только техническую составляющую ОПО, но и проводить количественное оценивание эффективности человеко-машинного взаимодействия.

Во **второй главе** предложены и обоснованы научные и теоретические основы концепции повышения уровня пожарной безопасности (ПБ) нефтегазовых объектов на основе использования на этапе проектирования математических моделей для выделения ключевых индикаторов риска. Применение математических моделей предоставляет возможность точной идентификации опасности в современных сложных нелинейных процессах, используемых в промышленности.

Получаем, что для автоматизации процедуры проведения анализа рисков нам необходимо иметь надежный конструктор математической модели. В рамках исследования был разработан программный продукт DMPipe, который также получил применение на объектах нефтегазового комплекса. Пример построения модели показан на Рисунке 1. Анализ оценки человеческого фактора предлагается проводить на тренажерах, моделирующих технологический объект, которые в свою очередь также используют в основе математическую модель.

В целях сокращения времени разработки и увеличения адекватности новых тренажеров и, тем самым, увеличения эффективности тренажерной подготовки (ЭТП) в масштабах отрасли, специально адаптирован ряд методов определения параметров моделей тренажеров путем сведения ряда процедур к линейной задаче метода

наименьших квадратов с ограничениями-равенствами и непосредственной проверкой точности в пределах оптимального множества тренингов.

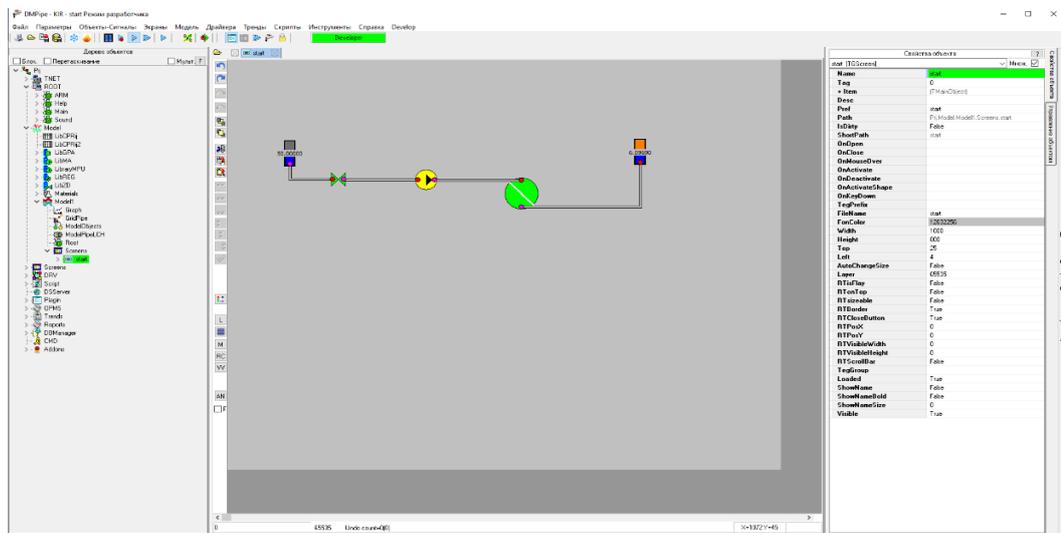


Рисунок 1 – Система автоматизированного проектирования (DMPipe)

Среди задач, решенных с помощью предлагаемого подхода, можно выделить ряд задач, на решение которых затрачивается значительная доля всего времени разработки тренажеров:

- уточнение параметров разветвленной трубопроводной системы по данным переходных процессов с учетом ограничений на иерархию контуров и подсистем путем фиксации ряда моделируемых параметров;
- идентификация матричных передаточных функций (ПФ) с учетом возможных структурных ограничений в моделируемых системах;
- аппроксимация сложных ПФ (результаты идентификации, синтеза методом пространства состояний и т.д) упрощенными;
- определение неизвестной структуры и параметров регуляторов многомерных систем с запаздыванием и другими особенностями с учетом возможных структурных ограничений моделируемой системы;
- определение материальных потоков нефти и газа, газовый фактор, физико-химических параметров потоков, давление насыщенных паров, составы газовой и жидкой фаз и учет влияния основных технологических параметров: температуры, давления, состава эмульсии;
- снижение количества итераций при расчете колонных аппаратов приводя модерирование к реальному времени. Моделирование режимов заполнения и продувки колонны.

Предложена, система уравнений, получаемая для модели определения неизвестных значений установившихся расходов по трубам в случае произвольного закона гидравлического сопротивления, представлена следующим образом:

$$\begin{aligned}
 a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n &= q_1; \\
 \dots & \\
 a_{k1}x_1 + \dots + a_{kn}x_n &= q_k; \\
 a_{k+11}\lambda_1|x_1|x_1 + \dots + a_{k+1n}\lambda_n|x_n|x_n &= h_1; \\
 \dots & \\
 a_{n1}\lambda_1|x_1|x_1 + \dots + a_{nn}\lambda_n|x_n|x_n &= h_{n-k},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где,  $x_i$  - расход по  $i$ -ой трубе;  $\lambda_i$  - коэффициент гидравлического сопротивления;  $h$  - сумма действующих напоров с учетом знака по всем дугам  $i$ -го контура;  $q_i$  – приток (отбор) в узле;  $a_{ij} = 0, 1, -1$  – коэффициенты, определяемые по первому или второму закону Кирхгофа. Для первого закона Кирхгофа втекающий в контрольную точку поток приносит коэффициент  $a_{ij}$ , равный единице; вытекающему потоку отвечает коэффициент  $a_{ij}$ , равный минус единице. Для второго закона Кирхгофа и для нелинейных уравнений  $a_{ij}$  равен  $+1, -1$  (в зависимости от направления обхода), если  $j$ -й участок входит в цикл, соответствующий  $i$ -му нелинейному уравнению, либо  $a_{ij}=0$ ,  $h$  – сумма действующих напоров с учетом знака. При формировании системы (1) необходимо следить за тем, чтобы контуры для второго закона Кирхгофа являлись бы независимыми. Для проверки этого условия и построения системы независимых контуров существует ряд известных процедур из теории графов.

Коэффициенты линейных уравнений системы (1) представляют собой матрицу  $A$  соединений графа гидравлической сети. Тогда уравнения системы (1) в векторном виде выглядят следующим образом

$$Ax = b, \tag{2}$$

где,  $A$  – матрица коэффициентов;  $b$  - вектор-столбец свободных членов;  $x$  – вектор искомых параметров.

Решение таких систем находится как предел итераций вида

$$A(\beta x_{i-1} + (1-\beta)x_{i-2})x_i = b, \tag{3}$$

где, коэффициент  $\beta$  имеет значение в пределах от 0 до 1. При каждой итерации решается система линейных алгебраических уравнений. Нелинейные элементы типа обратных клапанов приводят к необходимости вводить второй контур итераций, в результате система приобретает колебательный характер, и при этом система обладает

хорошей сходимостью. Существуют ограничения на размерность задач, связанные с тем, что при высоких размерностях матриц они могут обладать плохой обусловленностью. Кроме того, в задачах имитационного моделирования степень гидравлического сопротивления, например задвижки или крана в состоянии открытия и закрытия, может изменяться на несколько порядков, что также ухудшает обусловленность системы даже при низких размерностях матрицы  $A$ , что ограничивает непосредственное использование таких моделей в тренажерах. В данной работе предлагается решать уравнения вида (3) с использованием математического аппарата ортогональных преобразований матриц как линейную задачу метода наименьших квадратов (МНК) с ограничениями-равенствами. Преимущества такого подхода связаны с гарантированным решением плохо-обусловленных систем вида (3) на любом этапе итераций без эффекта накапливания ошибок. Простая имитация закрытия задвижки или крана увеличением гидросопротивления на несколько порядков позволяет обойтись без громоздких методов структурных преобразований и использовать такие модели непосредственно в тренажерах. Не менее важным достоинством такого подхода является возможность фиксации любого из элементов системы (1) без изменения самого алгоритма решения, так как часть расходов, давлений и расчетных гидросопротивлений для моделируемого стационарного режима могут быть известны точно, а низкая точность моделирования вне пределов оптимального множества тренингов (ОМТ) для задач построения тренажеров не существенна. Расчет стационарных режимов сам по себе является иногда достаточным для моделирования в пределах ОМТ. Постановка задачи определения потокосцепления в виде системы (1) является приближенной, так как сами коэффициенты гидравлического сопротивления зависят от расхода. Начальным этапом расчета в предлагаемой процедуре уточнения параметров является определение потокосцепления, или вектора  $x_i$ , путем решения системы (1). Параметры общих расходов и притоков, характеристик источников активной мощности (насосов, компрессоров) берутся непосредственно по справочным данным, параметры гидросопротивлений на первом этапе рассчитываются по универсальным формулам типа формул Федорова или Черчилля, а также с использованием справочников по типовым элементам и их гидросопротивлениям. Полученное решение сравнивается с рядом показаний датчиков для исследуемого режима согласно данным архивов. Наблюдается расхождение данных между расчетными параметрами расхода и давления и показаниями датчиков. Возложим

«ответственность» за эти расхождения на погрешности  $\Delta x$  в неизмеряемых компонентах вектора  $x$  и на неточности в определении гидросопротивлений  $\Delta \lambda$ . В результате получим систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} a_{11}\Delta x_1 + \dots + a_{1n}\Delta x_n &= 0; \\ \dots \\ a_{k1}\Delta x_1 + \dots + a_{kn}\Delta x_n &= 0; \\ a_{k+11}|x_1|x_1\Delta\lambda_1 + 2a_{k+11}\lambda_1|x_1|\Delta x_1 \dots + a_{k+1n}|x_n| x_n \Delta\lambda_n + 2a_{k+1n}\lambda_n|x_n|\Delta x_n &= 0; \\ \dots \\ a_{n1}|x_1| x_1 \Delta\lambda_1 + 2a_{n1}\lambda_1|x_1|\Delta x_1 \dots + a_{nn}|x_n| x_n \Delta\lambda_n + 2a_{nn}\lambda_n|x_n|\Delta x_n &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где, неизвестными выступают параметры  $\Delta \lambda_i$  и  $\Delta x_i$ , а остальные параметры известны из предыдущего «расчетного» этапа процедуры. Система не имеет тривиального решения с нулевыми искомыми параметрами, так как часть элементов  $\Delta x_i$  известна точно как расхождение между расчетными и измеренными параметрами. Система (4) является не доопределённой, так как число уравнений в общем случае меньше числа неизвестных. Добавив данные по другому режиму (или по ряду близких, по основным измеряемым параметрам, режимов) систему (4) переводим в разряд переопределенных. При этом к количеству уравнений системы первого режима добавляются  $N-1$  новых уравнений ( $N$  – общее количество рассматриваемых режимов, включая первый), а к числу неизвестных добавляются  $\Delta x_i$  для новых режимов как новые неизвестные переменные за исключением фиксированных (измеренных) значений. Так как  $\Delta \lambda_i$  остаются неизменными для всех режимов, то условием переопределенности системы (4) будет использование такого количества режимов  $N$ , что

$$N ( n(x_i \text{ фикс}) + n(p_{i\text{фикс}}) ) > n(x_i), \quad (5)$$

где,  $n(x_i)$  – общее количество веток;  $n(x_i \text{ фикс})$  – количество веток с точно измеренными  $x_i$ ;  $n(p_{i\text{фикс}})$  – количество узлов с точно измеренным давлением  $p_i$ . Если наличие реального датчика расхода приводит к фактическому уменьшению количества столбцов системы (4) на единицу, то учет показаний датчиков давления приводит к появлению дополнительных строк типа

$$a_{k1}|x_1| x_1 \Delta\lambda_1 + 2a_{k1}\lambda_1|x_1|\Delta x_1 \dots + a_{kn}|x_n| x_n \Delta\lambda_n + 2a_{kn}\lambda_n|x_n|\Delta x_n = p_k - p_0, \quad (6)$$

где,  $p_k$  – известное давление; коэффициенты  $a_{ki}$  показывают вхождение или нет ветви в цепь ветвей от некоего опорного узла с известным давлением  $p_0$  до  $k$ -го.

Системы уравнений (4) обладают плохой обусловленностью, что затрудняет непосредственное использование таких моделей в тренажерах. Заметим, что точность определения  $\lambda$  зависит от близости параметров рассматриваемых режимов, что дополнительно ухудшает обусловленность системы (4). В данной работе предлагается решать систему линейных алгебраических уравнений (4) как задачу МНК с линейными ограничениями-равенствами с использованием математического аппарата ортогональных преобразований матриц. Использование этого алгоритма имеет дополнительное преимущество. Трубопроводы могут быть неравнозначными с точки зрения проектировщика. Например, часть трубопроводов условно заменяют более простой схемой (при процедуре эквивалентирования). Поэтому при реализации реального проекта возникает необходимость последовательного уточнения групп параметров от более важных к менее важным с фиксацией удовлетворительных промежуточных результатов. При указанном подходе выполнение этого условия возможно и апробировано. В процессе решения системы (4) можно последовательно, этап за этапом, зафиксировать любое количество искомых параметров  $\Delta\lambda$  и  $\Delta x$ , что позволяет реализовать практичную интерактивную процедуру уточнения параметров сложной сети трубопроводов с выполнением условия адекватности модели тренажера в пределах ОМТ. После уточнения всех  $\lambda$  для выбранной группы близких по параметрам расхода режимов осуществляется переход к следующей группе режимов с иными параметрами расхода. В итоге строится зависимость гидросопротивления от расхода в каждой ветви разветвленного трубопровода и можно использовать данные зависимости для расчета стационарных и нестационарных моделей. Таким образом в части моделирования разветвленной системы трубопроводов в ряде случаев становится возможным удовлетворить требование адекватности модели тренажера в пределах ОМТ сравнительно несложными процедурами и за короткое время.

Разработаны новые эффективные процедуры определения неизвестной структуры и параметров модели элементов динамических систем управления нефтегазовых объектов, позволяющие осуществлять эффективное моделирование многомерных систем управления с распределенными параметрами и существенным запаздыванием.

Системы управления нефтегазовых объектов, имеющих в своем составе такие элементы, как длинные и разветвленные трубопроводы, обладают существенным запаздыванием и отдельные элементы описываются трансцендентными звеньями. В инженерной практике такие системы обычно исследуются с использованием хорошо

развитого аппарата частотных методов или приходится прибегать к аппроксимации трансцендентных звеньев и, соответственно, к квазиоптимальному решению. В то же время адекватное описание ряда нефтегазовых объектов требует описания в классе многомерных систем. Это, например, системы управления наземным оборудованием нефтепромыслов с учетом процессов поддержания пластового давления, системы управления газотурбинными приводами, электростанциями и насосными агрегатами, одновременно работающими на единую нагрузку и связанные через нее перекрестными связями. Известно, что для задач исследования многомерных систем существующие частотные методы недостаточно удобны и их использование приводит к прогрессивно возрастающей сложности полиномиальных вычислений.

В данной работе предлагается ряд практичных процедур в классе частотных методов, значительно облегчающих задачу определения неизвестных структуры и параметров элементов динамических моделей (например, регуляторов) для тренажеров. В общем случае задача определения неизвестной структуры и параметров отдельных элементов системы управления, многомерной и имеющей особенности типа трансцендентных звеньев (например, чистого запаздывания), может быть сформулирована в виде выражения

$$\begin{aligned} Y_1 * X * Y_2 &= C ; \\ X &= Y_1^{-1} * C * Y_2^{-1} , \end{aligned} \quad (7)$$

где,  $Y_1$ ,  $Y_2$  и  $C$  - комплексные матрицы, представляющие собой значения амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) или их комбинации для известных параметров и структуры системы, для конкретной частоты это просто комплексные числа;  $X$  – это искомая АФХ подсистемы с неизвестными параметрами вещественной и мнимой части  $Re_{ij} + j * Im_{ij}$  (подстрочное  $i$  – номер строки матрицы, подстрочное  $j$  – номер столбца матрицы,  $Re$  – неизвестная вещественная часть искомой частотной характеристики,  $Im$  – мнимая часть, строчная  $j$  – мнимая единица). Часть элементов матрицы  $X$  может быть фиксированной (например, известные АФХ или нулевые элементы). В этом случае предварительно система линейных алгебраических уравнений (7) становится переопределенной и решается методом наименьших квадратов относительно неизвестных комплексных значений нефиксированных элементов.

Передаточные функции неизвестных элементов матрицы  $X(s)$  будем искать в классе дробно-рациональных при ограничениях на порядки числителя  $n$  и знаменателя

т при известных (определенных по переходным процессам) передаточных функциях или частотных характеристиках матриц  $Y_1(s)$ ,  $Y_2(s)$ ,  $C(s)$

$$X_{ij}(s) = \frac{a_0 + a_1 s + \dots + a_n s^n}{b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m} = \frac{A(s)}{B(s)}, \quad (8)$$

Трансцендентные звенья, запаздывания, нелинейные и импульсные элементы могут быть отнесены к разряду гипотез и приведены к известным эквивалентным параметрам - вещественной и мнимой части матриц  $Y$ .

Задачу определения коэффициентов (8) предлагается искать путем решения систем линейных алгебраических уравнений, предварительно в частотной области  $s=j\omega$  для ряда  $k$  частот  $\omega$  рассчитав значения АФХ  $X_{ij}(j\omega) = \text{Re} + j \cdot \text{Im}$  ( $j$  - мнимая единица). Тогда, умножив (8) на знаменатель  $B(j\omega)$ , для каждой частоты  $\omega_k$  получаем:

$$\begin{aligned} a_0 - \omega_k^2 a_2 + \omega_k^4 a_4 - \dots + \text{Re}_k b_0 + \text{Im}_k \omega_k b_1 + \text{Re}_k \omega_k^2 b_2 - \dots &= 0; \\ \omega_k a_1 - \omega_k^3 a_3 + \dots - \text{Im}_k b_0 - \text{Re}_k \omega_k \cdot b_1 + \text{Im}_k \omega_k^2 b_2 + \dots &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

При наличии  $L$  полюсов в начале координат процедуре нахождения коэффициентов  $X_{ij}(s)$  должно предшествовать  $L$ -кратное умножение  $X_{ij}(s)$  на  $s$  (в частотной области  $X_{ij}(j\omega)$  необходимо  $L$  раз умножить на  $j\omega$ ). Таким образом, фиксируется наличие и порядок интеграторов в искомой ПФ. Процедурно этот вопрос решается сравнением при частоте  $\omega$ , стремящейся к нулю, модуля  $X_{ij}(j\omega) = \text{Re}^2 + \text{Im}^2$  с некоторым большим числом  $G$  (эквивалентом бесконечности для компьютерной процедуры) и, в случае превышения этой величины, последующим умножением  $X_{ij}(j\omega)$  на  $j\omega$  необходимое  $L$  число раз.

Добавив возможные ограничения-равенства (часть коэффициентов известна, например  $b_0=1$ ,  $a_0=\text{const}$ ) и решив систему (9) как задачу МНК, получаем эффективную процедуру определения неизвестной структуры и параметров матрицы  $X$ . Известная плохая обусловленность систем типа (9) приводит к необходимости использовать упомянутые выше процедуры решения задачи МНК с линейными ограничениями-равенствами, с использованием ортогональных преобразований.

Рассмотрены примеры использования указанной процедуры для определения параметров многомерной ПФ по экспериментальным частотным характеристикам, аппроксимация сложных выражений для ПФ, полученных при решении задач синтеза с использованием методов пространства состояний, более простыми выражениями, а также задача определения (например, восстановления по данным переходных процессов) структуры и параметров регуляторов сложных многомерных систем управления с трансцендентными звеньями, запаздываниями, определенным классом

нелинейностей и другими особенностями, которые могут быть выражены эквивалентными изменениями элементов матрицы АФХ.

Представим выражение для матрицы АФХ регулятора в виде:

$$R^{\text{жс}}(j\omega) = H^{-1}(j\omega) \cdot \Phi(j\omega) \cdot [E - \Phi(j\omega)]^{-1} \quad (10)$$

где,  $H(j\omega)$  – матрица АФХ объекта управления,  $\Phi(j\omega)$  – матрица АФХ замкнутой системы, полученная в результате анализа реальных процессов в моделируемой системе (в терминах задачи синтеза - желаемая матрица АФХ),  $E$  - единичная матрица (Рисунок 2).

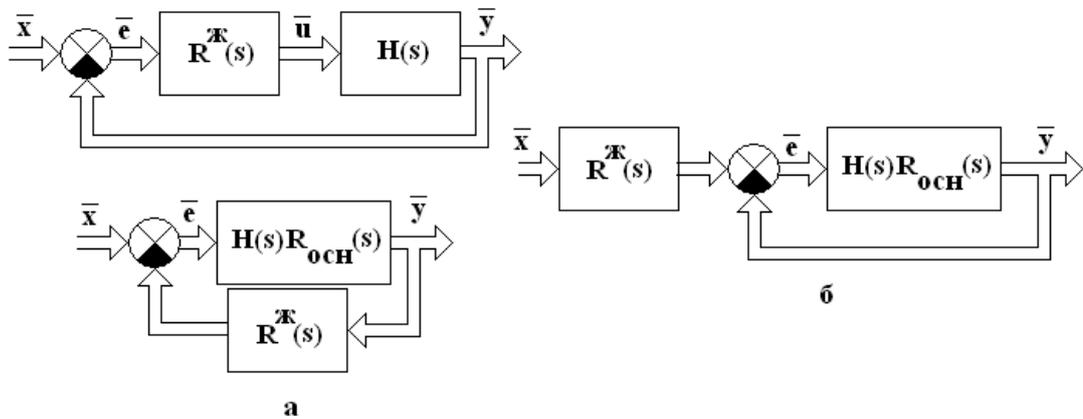


Рисунок 2 - Структура моделируемой системы

Аналогичное выражение можно записать для регуляторов систем иных структур, в частности для структуры, изображенной на Рисунке 2,а (дополнительный корректор - фильтр выходного сигнала, выражение для основного регулятора учтено в  $H$ ) выражение для матрицы АФХ желаемого регулятора будет иметь вид:

$$R^{\text{жс}}(j\omega) = \Phi^{-1}(j\omega) - H^{-1}(j\omega) \quad (11)$$

Для структуры, изображенной на Рисунке 2,б (дополнительный корректор – фильтр входного сигнала, выражение для основного регулятора учтено в  $H$ ), аналогичное выражение будет иметь вид

$$R^{\text{жс}}(j\omega) = H^{-1}(j\omega) \cdot [E + H(j\omega)] \cdot \Phi(j\omega) \quad (12)$$

Учет звеньев чистого запаздывания в многомерном объекте управления может быть произведен путем умножения каждого элемента – комплексного числа  $H_{ij}(j\omega)$  на комплексное число вида  $\cos(\omega T_{ij}) - j \cdot \sin(\omega T_{ij})$  для всех используемых в расчете частот  $\omega$ , где  $T_{ij}$  – запаздывание в прямых и перекрестных связях объекта. Далее полученное множество комплексных чисел используется в качестве  $H_{ij}(j\omega)$  для всего множества

$\omega$ . Примечательно, что подобным образом можно учитывать и параметры функций иных трансцендентных звеньев, эквивалентных звеньев существенных нелинейностей и прочих моделей, имеющих в частотной области эквивалентную фиксированную, для определенной частоты, вещественную и мнимую часть.

Выражения  $R(j\omega)$  для ряда дискретных частот  $\omega = \omega_k$  ( $k=1,2..M$ ), каждому элементу искомой матрицы ПФ регулятора можно поставить в соответствие ряд комплексных матриц, которые можно интерпретировать как значения матрицы АФХ для частот  $\omega_k$  и решать систему вида (9) с указанными ограничениями-равенствами. При значениях степени числителя и знаменателя, пониженных по отношению к требуемым из анализа степеней уравнений в расчетных соотношениях для регулятора, итоговая система не компенсирует полностью собственные движения объекта, а лишь выделяет из них те движения, которые в наибольшей мере приближают характеристики итоговой системы к эталонным.

В процессе реконструкции неизвестных параметров регуляторов структура многомерного регулятора может быть известна (например, присутствуют одноканальные промышленные ПИД-регуляторы), что накладывает существенные ограничения на процедуру синтеза.

Для расчета регуляторов с такими особенностями (ограничениями) в структуре предлагается следующая неявная процедура расчета регулятора. Будем осуществлять приближение не характеристик регулятора, а характеристик разомкнутой системы. Для этого выражения типа (10), (11), (12) предварительно умножим на  $H(j\omega)$  слева.

Можно зафиксировать (обнулить или задать фиксированные известные параметры) произвольное количество элементов матрицы регулятора. Это приводит к необходимости предварительного решения ряда систем линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров «нефиксированных» элементов матрицы регулятора (просто комплексных чисел для конкретной частоты) как задач МНК. Например, для регулятора с нулевыми недиагональными элементами («несвязанного» регулятора) для частоты  $\omega = \omega_k$  запишем:

$$\begin{bmatrix} H_{11}(j\omega_k)R'_{11}(j\omega_k) & H_{12}(j\omega_k)R'_{22}(j\omega_k) & \dots & H_{1M}(j\omega_k)R'_{MM}(j\omega_k) \\ H_{21}(j\omega_k)R'_{11}(j\omega_k) & H_{22}(j\omega_k)R'_{22}(j\omega_k) & \dots & H_{2M}(j\omega_k)R'_{MM}(j\omega_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{M1}(j\omega_k)R'_{11}(j\omega_k) & H_{M2}(j\omega_k)R'_{22}(j\omega_k) & \dots & H_{MM}(j\omega_k)R'_{MM}(j\omega_k) \end{bmatrix} = M_k, \quad (13)$$

где  $M_k$  - комплексная матрица, представляющая собой для частоты  $\omega_k$  правую часть выражения вида (10), (11), (12), умноженного на  $H(j\omega)$  слева. Теперь можно,

поставив в соответствие  $j$  - е столбцы матриц, стоящих в правой и левой частях выражения (13), получить ряд систем линейных уравнений. Решив эти системы как задачу МНК для ряда частот  $\omega_k$  можно получить ряд точек АФХ  $j$  - го элемента матрицы АФХ «несвязанного регулятора»  $R'(j\omega)$ . Процедура нахождения ПФ этого элемента аналогична описанной выше.

Приведен пример определения параметров ПФ регулятора с перекрестными связями и «несвязанного» регулятора для пятимерной линейной системы автоматического управления (САУ) со звеньями чистого запаздывания, обеспечивающего удовлетворительное совпадение АФХ рассчитанной и эталонной системы.



Рисунок 3 – Классификация ключевых индикаторов риска (КИР).

Все объекты нефтегазовой отрасли и энергетики имеют особенности: элементы обычно типовые, стандартные. Поэтому разделение системы на элементы логично формализовать, при этом можно сразу определить основные опасности и риски, что часто регламентируется, выделить ключевые индикаторы риска (КИР) и задать численные границы их нормального и аномального функционирования для обширного перечня оборудования и элементов.

Разработана и представлена классификация ключевых индикаторов риска (Рисунок 3) для основных технологических узлов оборудования, применяемого на установках подготовки нефти. Каждому КИР сопоставляется набор мероприятий, по недопущению превышения КИР.

Все рассматриваемые риски, можно разделить на 4 основные группы:

Механические – в данную группу входят параметры у технологических элементов УПН, которые оказывают воздействие механического характера: вибрация, давления, расход, температура, уровень.

Технологические – в данную группу входят параметры элементов УПН, влияющие на технологический процесс: значения уставок для регулирующих элементов, отказы управляющих воздействий (например, не прохождение команды от кнопки или контроллера на исполнительный орган).

Сырьевые - в данную группу входят параметры, относящиеся к: вязкости перекачиваемой среды и внешней температуре окружающей среды.

Человек - в данную группу входят все неисправности, связанные с управляющими воздействиями на УПН человека.

**В третьей главе** рассмотрена процедура подготовки информации для инженерных методов анализа опасности и работоспособности. Одним из недостатков перечисленных в первой главе инженерных (качественных) методов является отсутствие эффективного планирования ресурсов на саму процедуру их проведения. Методы анализа опасности и работоспособности (АОР) подразумевают, условное разделение системы на элементы и выявляют риски только в этих элементах. Но в реальных системах связи между элементами, независимо от степени условного разбиения, весьма значимы — это могут быть гидравлические связи через систему трубопроводов, электрические линии, тепловые процессы, перекрестные связи в системах регулирования, пространственная близость разных элементов и разнородных подсистем (например, силовые кабели, линии связи и трубопроводы) и т.д.

Почти все объекты нефтегазовой отрасли подразумевают присутствие персонала, управляющего и обслуживающего технику. Поэтому на вероятность реализации риска и величину ущерба существенно влияет человеческий фактор. Однако вопрос количественного измерения этого влияния, что необходимо для «цифровизации» процедур АОР, и изменения его в лучшую сторону упирается в отсутствие эффективных рейтинговых критериев.

В работе проведена формализация процедур, предшествующих инженерным методам АОР, позволяющим дать экспертам максимум действительно значимой информации в сжатой форме и с выраженным эффектом, освободив их ограниченные ресурсы от рутины и перебора малозначимых вариантов событий в ущерб

важнейшим. Для этого, прежде всего, следует условно привести все опасности и мероприятия к единому знаменателю.

Критерием оценки и оптимизации всей системы мероприятий, выработанных в процессе АОР, является экономический эффект, выраженный в реальных денежных единицах или в условных (баллах). В конечном счете, сама промышленная система создается для генерации прибыли в период всего жизненного цикла, и те или иные неблагоприятные события приводят к вычетам. Мероприятия, проводимые как следствие АОР, уменьшают эти вычеты. Это может быть предотвращенный, возможный ущерб, умноженный на его вероятность.

В инженерных АОР используют ключевые слова (ДА, НЕТ, БОЛЬШЕ...). Для сопоставления их с количественными методами рационально использовать их замену на параметры КИР и их предельные уставки ( $-\min$ , 0,  $+\max$ ).

Эта рутинная работа, может быть выполнена заранее силами проектировщиков системы автоматизированного проектирования (САПР). Такая система будет составлять проект предварительной системы мероприятий по предотвращению аварий и уменьшению потенциального ущерба, который будет важным компонентом последующих мероприятий АОР с участием группы экспертов.

При наличии САПР строится модель системы, как формализованный набор типовых элементов из САПР и их взаимосвязей.

В зависимости от этапа проводимых мероприятий АОР, такая модель может строиться с учетом или без учета тех или иных технических решений, наличия элементов защитной автоматики, элементов АСУТП, включая алгоритмы и уставки, с возможностью или без учета возможности неграмотных или злонамеренных действий. От этого зависит итоговый проект системы мероприятий – где поставить дополнительный элемент РЗА, изменить уставку в системе АСУТП или включить тот или иной тренинг в общую систему подготовки специалистов.

В процессе проектирования автоматически моделируются все типовые и возможные нештатные режимы, вводятся все возможные отклонения и фиксируется выход КИР за пределы по каждому параметру каждого элемента. Объем такого моделирования может быть весьма велик.

Автором предложен и обоснован следующий алгоритм формализации процедуры предварительной оценки рисков (Рисунок 4), что соответствует пункту 12 области исследований, определяемой паспортом специальности 2.10.1 – «Пожарная безопасность (технические науки)».

Каждому превышению КИР соответствует, с одной стороны, потенциальный ущерб, с другой стороны, набор вариантов мероприятий по сокращению этого ущерба, которые могут быть уже реализованными, могут дополнять друг друга, дублировать либо противоречить друг другу.

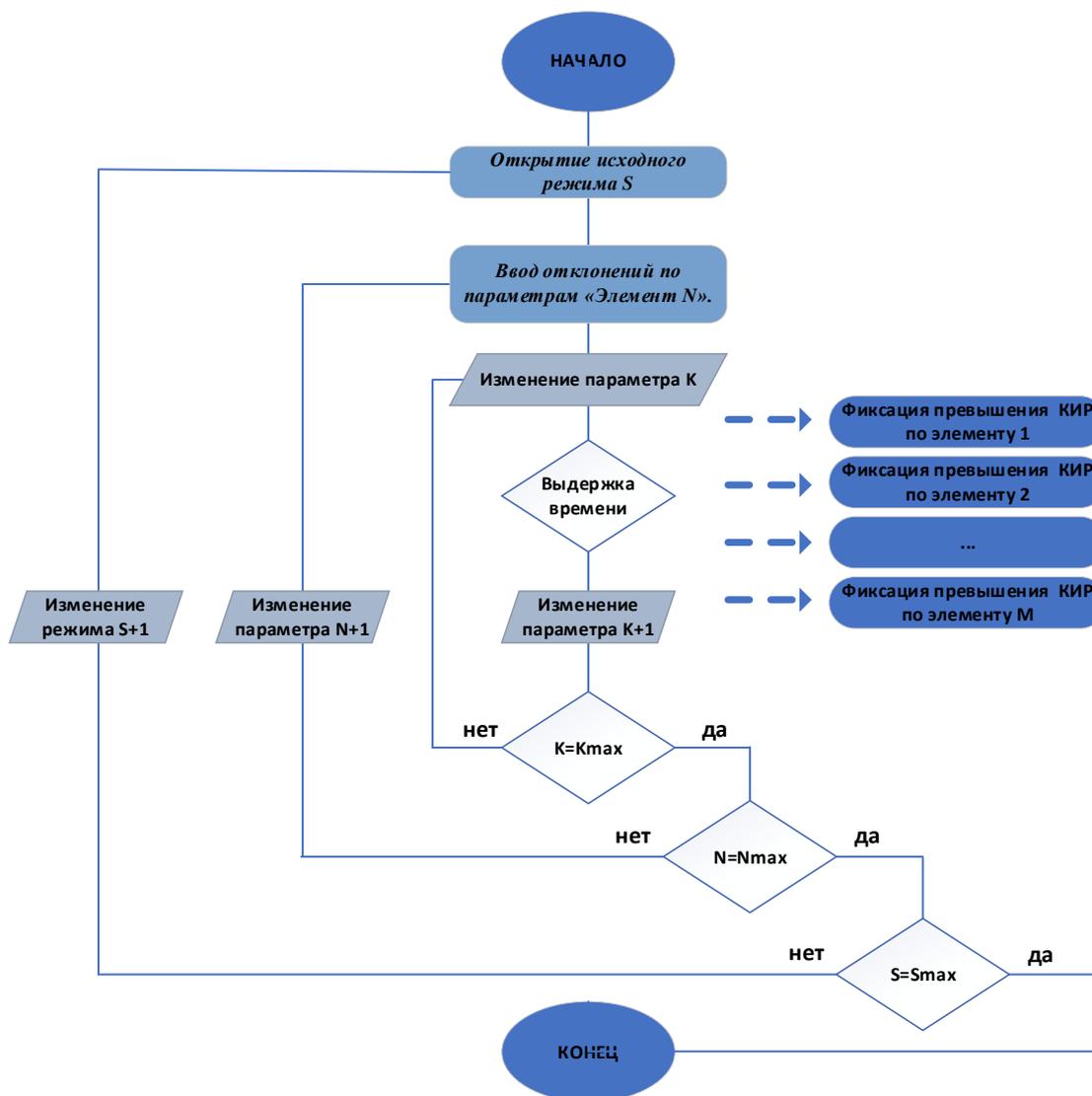


Рисунок 4 -Алгоритм определения ключевых индикаторов риска

Любой элемент может быть источником (донором) превышения КИР (например, выход параметра за пределы) в самом себе, так и во всех других элементах. Мероприятия по парированию этого превышения относятся к элементу, в котором произошло превышение – акцептору.

Как уже указывалось, мероприятия могут быть уже запланированы или реализованы, тогда нет смысла включать их в общий план.

Один и тот-же КИР на одном и том же элементе, может срабатывать (превышаться) при проигрывании разных исходных условий (состояний), Рисунок 5.

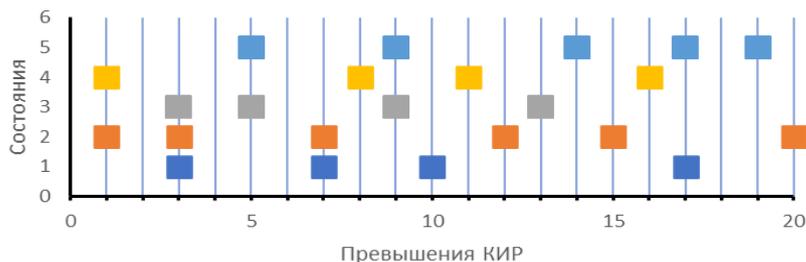


Рисунок 5 – Срабатывания КИР

Мероприятия могут дублировать друг друга, например, превышение давления на участке трубопровода может быть вызвано процессами в разных элементах, но защитный клапан может парировать все эти опасности сразу. Тогда присваиваемый эффект, например, предотвращенный ущерб, суммируется при сохранении затрат на это мероприятие (Рисунок 6), тем самым резко повышая «рентабельность» этого мероприятия.

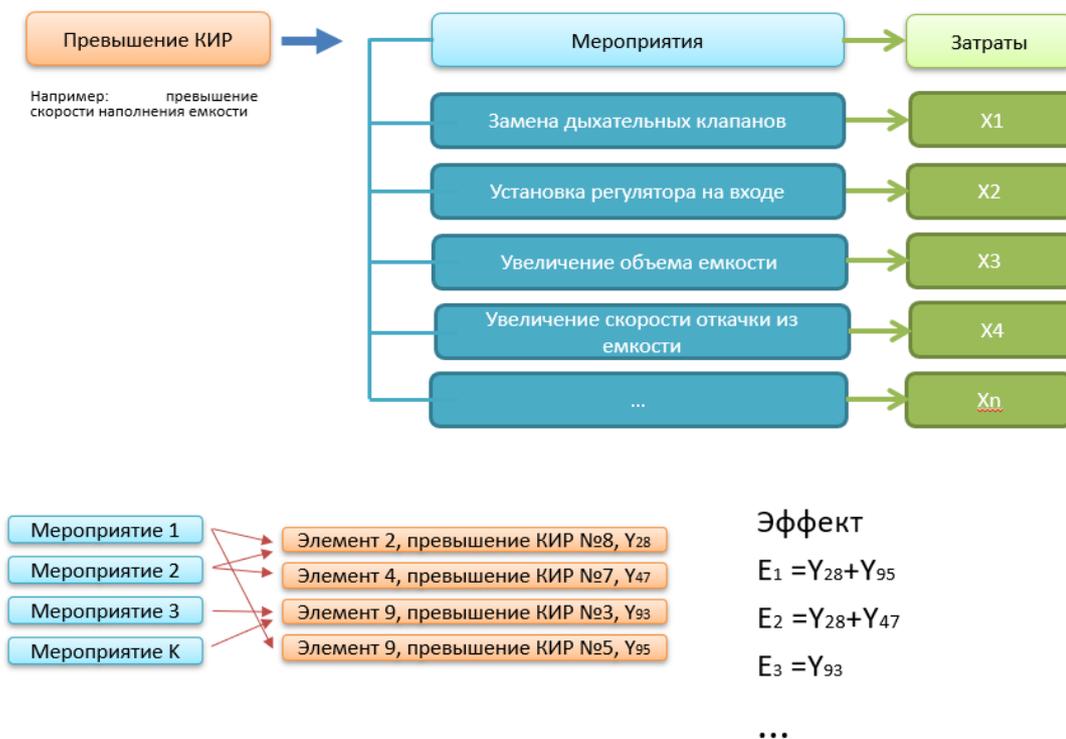


Рисунок 6 – Сортировка мероприятий

После такой «очистки» системы мероприятий, они складываются в комплекс, дополняя друг друга, при этом суммируются затраты и сравниваются с суммарным эффектом.

Величины и вероятности ущерба, их удельные величины на момент реализации мероприятий определяются по декларациям ПБ, паспортам безопасности, специализированным методикам, составленным на основе стандартов и регламентов.

Типы мероприятий также регламентированы в системе ППР, ТО и обучения. Соответственно, можно определить разные уровни по стоимости этих мероприятий.

Далее, автоматизированная система обращается к «базе возможных мероприятий», т.е. допустимых мероприятий по предотвращению/парированию риска.

Ранжируем варианты, снижающие вероятность и последствия (ущерб) от реализации события. Базовый и первый вариант – минимальные затраты на парирование риска только в месте возникновения.

Далее рассматриваются более дорогие, но и более эффективные (снижение вероятности, снижение ущерба) типовые мероприятия сначала в самом элементе – причине риска (Рисунок 7).

Это могут быть другие материалы или более дорогое оборудование, элементы дублирования, защит и автоматики. Затем рассматриваются методы снижения суммарного риска для других элементов – материалы, оборудование, защиты и автоматика существенно повышают стоимость мероприятий, но защищают другие элементы в случае реализации конкретного риска.

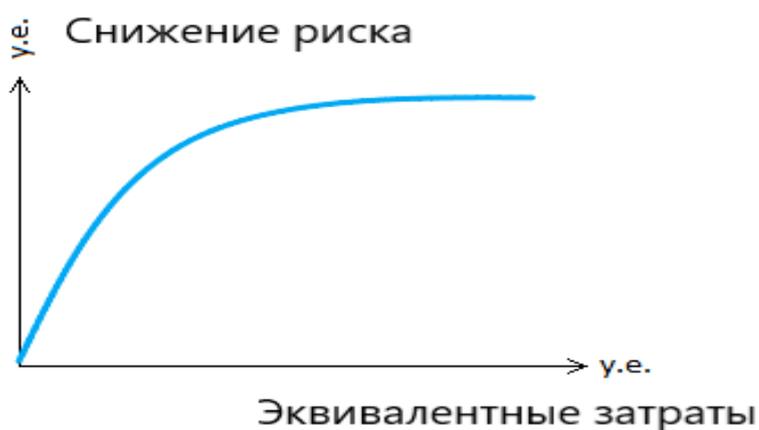


Рисунок 7 - Характер изменения риска при росте затрат на его парирование

Пройдя все КИР для 1 элемента и 1 режима, идем по алгоритму дальше. В итоге получаем набор графиков вида, Рисунок 6. Для предварительного анализа и оценки эффективности всей системы мероприятий можно просто, корректно убрав дубли, провести сортировку всех мероприятий. Однако их общее число измеряется, как

указывалось выше, огромными величинами, шаг по затратам неравномерный, процесс вычислений может быть достаточно долгим, а весь процесс итерационным.

Таблица 3 – Сортировка КИР

№ прев. КИР	№ мероприятий	Затраты	Эффект
1	1	0	0
1	2	10	100
1	3	20	200
1	4	30	150
1	5	50	250
1	6	80	380
2	1	0	0
2	2	11	100
2	3	21	200
2	4	31	150
2	5	51	250
3	1	0	0
3	2	12	100
3	3	22	200
3	4	32	150
3	5	52	250

Для упрощения расчетов можно провести сначала поэлементную сортировку мероприятий по соотношению Эффект/Затраты (Таблица 3), а затем рассматривать множество всех мероприятий, как систему, в которой каждый шаг по затратам приводит к росту эффекта. Так как эти параметры отсортированы, мы можем варьировать общий план мероприятий, сопоставляя его с теми или иными лимитами по общим затратам.

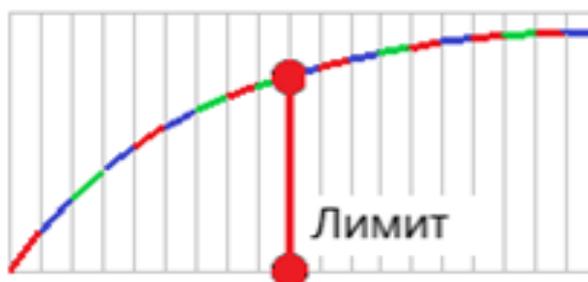
При таком подходе, можно посчитать рентабельность мероприятия для каждого элемента по формуле

$$R = \frac{D - S}{S},$$

где, D- эффект от мероприятия, S- стоимость.

В обратном порядке, перейдя от лимитированного общего графика (Рисунок 8) к его составляющим, можно сначала просчитать непрерывную величину допустимых затрат для риска, например вида (1 элемент, 1 параметр, 1 КИР), а затем перейти к ближайшему дискретному значению, не превышающему эту величину.

Суммарный  
предотвраще  
нный ущерб,  
у.е.



Суммарные затраты, у.е.

Рисунок 8 – Лимитированный график Ущерб/Затраты

Таблица 4 - Итоговый план мероприятий

Рент.	Эл.	Мер опр.	Затр аты	Общ. затр.	Эффе кт	Общ. эффект	Меро пр.	План
9.00	1	3	20	20	200	200	(1,3)	(1,3)
9.00	1	2	10	30	100	300	(1,2)	(1,3) (1,2)
8.52	2	3	21	51	200	500	(2,3)	(1,3) (1,2) (2,3)
8.09	3	3	22	73	200	700	(3,3)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3)
8.09	2	2	11	84	100	800	(2,2)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2)
7.33	3	2	12	96	100	900	(3,2)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2)
4.00	1	5	50	146	250	1150	(1,5)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2) (1,5)
4.00	1	4	30	176	150	1300	(1,4)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2) (1,5) (1,4)
3.90	2	5	51	227	250	1550	(2,5)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2) (1,5) (1,4) (2,5)
3.84	2	4	31	258	150	1700	(2,4)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2) (1,5) (1,4) (2,5) (2,4)
3.81	3	5	52	310	250	1950	(3,5)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2) (1,5) (1,4) (2,5) (2,4) (3,5)
3.75	1	6	80	390	380	2330	(1,6)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2) (1,5) (1,4) (2,5) (2,4) (3,5) (1,6)
3.69	3	4	32	422	150	2480	(3,4)	(1,3) (1,2) (2,3) (3,3) (2,2) (3,2) (1,5) (1,4) (2,5) (2,4) (3,5) (1,6) (3,4)

В результате получаем достаточно подробный план мероприятий по сокращению рисков (Таблица 4), включающий мероприятия по модификации оборудования, систем связи, коммуникаций, электрооборудования, РЗА, АСУТП, системы тренингов, причем он рассчитывается автоматически и может быть хорошим

подспорьем при проведении процедуры HAZOP, чтобы специалисты фокусировались на реальных проблемах, а не перебирали случайные варианты.

Несложно посчитать, что при количестве элементов более 100, вариантов режимов более 100, параметров и КИР более 10, мероприятий по парированию рисков в арсенале проектировщика более 10 - общее число вариантов мероприятий более 1000000.

**Четвертая глава** – посвящена формализации мероприятий, связанных с человеческим фактором. Предлагаемые методики подразумевают использование достаточно формализованных понятия риска, ущерба, вероятности. Но с так называемым человеческим фактором непосредственное использование таких понятий проблематично. Нет научно обоснованных рекомендаций, как объективно оценивать КПЭ (КРІ – ключевые показатели эффективности) операторов и обслуживающего персонала потенциально опасных объектов, как количественно оценивать и «прокачивать» эффективность человеко-машинного взаимодействия. Практически отсутствуют критерии, объективно различающие имитаторы процессов и тренажеры, нет обоснованного анализа задач тренинга, технических средств и инструкторов.

Проблему недостаточности информации для объективной количественной оценки ЭТП предлагается решать путем построения модели «Объект-Специалист», где в качестве объекта выступает тренажер, а в качестве специалиста выступает информационная модель готовности. Таким образом, можно замещать отсутствующие, по объективным причинам, данные о реальной готовности персонала моделью этих данных, полученных в результате работы специалистов на тренажере. Если функционирование реальных человеко-машинных систем нефтегазовых объектов приводит в конечном счете к реальной статистике аварийности, то функционирование человеко-машинной системы «тренажер- обучаемый» должно привести к формированию объективной модели готовности обучаемого как возможной причины расширенного модельного множества аварий (Рисунок 9).

Предложена модель готовности обучаемого специалиста, как фактора ПБ, и на ее основе предложена методология построения количественных оценок ЭТП.

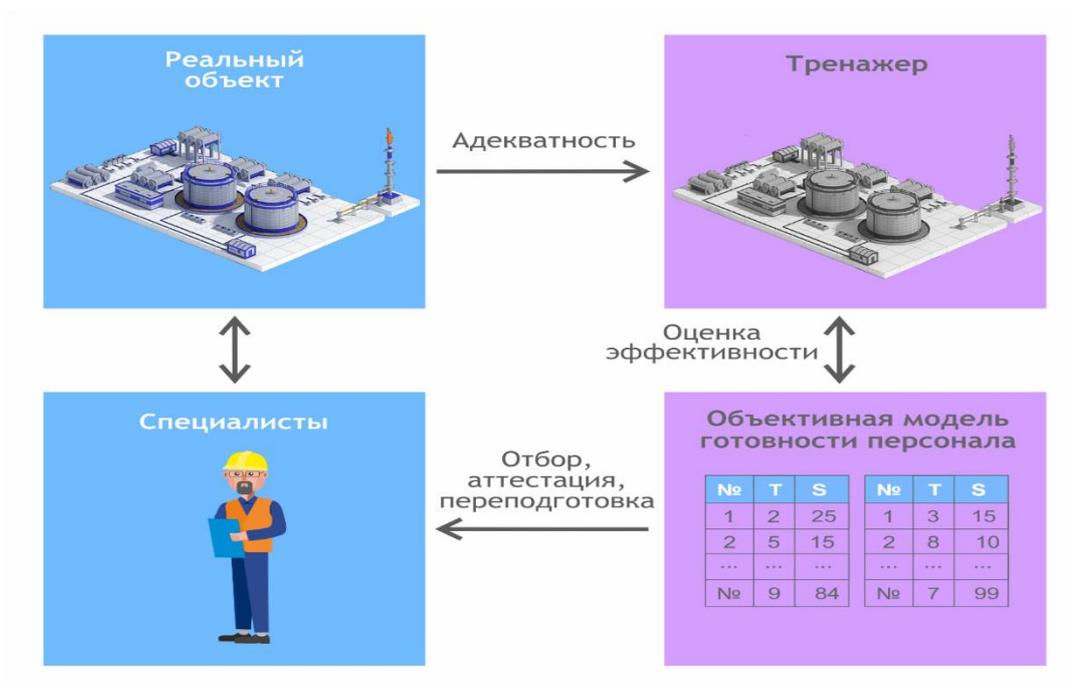


Рисунок 9 – Модель «Объект-Специалист»

Модель готовности – это изменение вероятности совершения ошибки специалистом в каждой ситуации из набора типовых ситуаций по мере обучения и после обучения. В общем случае функция вероятности является многомерной и зависит от таких факторов, как уровень стрессовой нагрузки, психофизиологическое состояние специалиста, адекватность тренажера и т.д. Тренажер обладает достаточной, для задач ПБ, адекватностью, реальная стрессовая нагрузка в процессе обучения имитируется, психофизиологическое состояние специалиста нормальное.

Каждой типовой ситуации соответствует так называемая «Карта единичного тренинга». В соответствии с известным подходом управление процессом тренировки предложено осуществлять с использованием эталонных алгоритмов деятельности операторов при ведении нормальных и аварийных режимов. Для задач проектирования тренажера такой «эталонный алгоритм» может быть описан с использованием так называемого «дерева событий», каждая «ветка» которого может зависеть, а может и не зависеть от поведения обучаемого и подчиняться правилам развития так называемого «сценария» (кейса). В терминах проектирования тренингов такой отдельный эпизод имеет отображение в виде так называемого единичного тренинга. Фрагмент дерева событий для такого единичного тренинга, или карты тренинга, приведен на Рисунке 10.

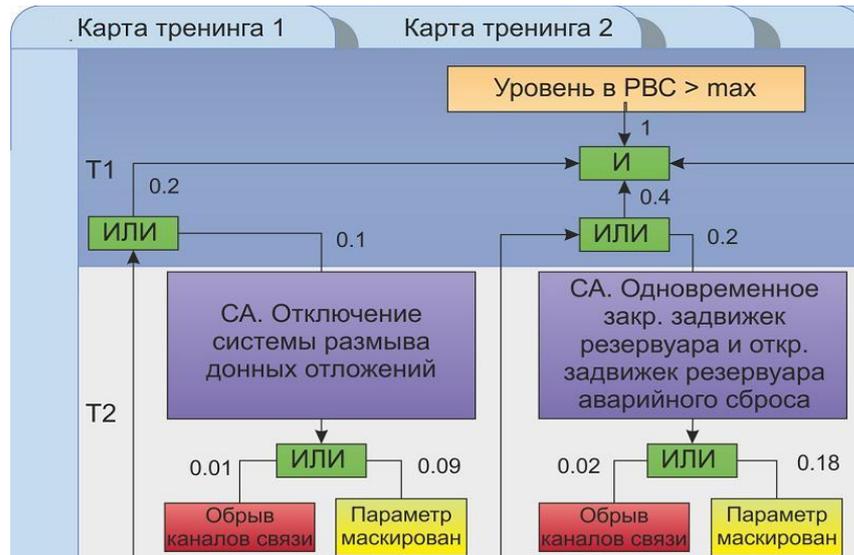


Рисунок 10 - Фрагмент карты тренинга

Можно определять модель готовности, например, в виде формул типа

$$P(t, T) = 1 - \text{EXP}(-a \cdot T) + \text{EXP}(-a \cdot t) * \text{EXP}(-b \cdot T), \quad (14)$$

где,  $P(T, t)$  – вероятность совершения неправильных действий (по теме единичного тренинга) на реальном объекте обученным в течение времени  $T$  специалистом, если после тренинга уже прошло время  $t$ , дополнительно к формуле (14)  $P(T, t)$  имеет ограничения в пределах от 0 до 1. Параметры  $a$  и  $b$  — это коэффициенты, в общем случае зависящие от особенностей производственной деятельности, уровня стрессовой нагрузки, приближенности условий тренинга к реальным условиям технологического объекта с учетом особенностей психологического обеспечения специалистов опасных профессий, индивидуальных особенностей обучаемых, психологии безопасности и поведения человека в экстремальных ситуациях, связанных с техногенными явлениями разрушительного и пожароопасного характера. Формуле типа (14) соответствуют трехмерные графики вида, изображенного на Рисунке 11.

Как уже указывалось, строгого описания для функции вероятности нет, однако косвенно судить о ее форме можно по связанной с ней функции снижения количества совершенных ошибок по мере обучения на тренажере, обладающем достаточной степенью адекватности модели и подобия рабочего места обучаемого специалиста аналогичному месту на реальном объекте.

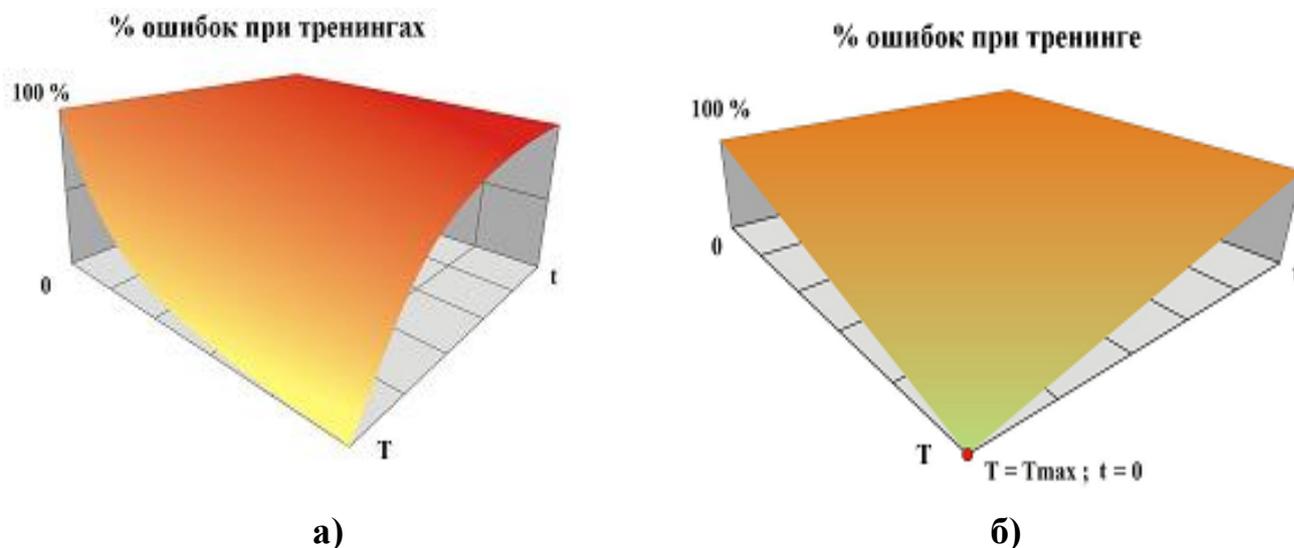


Рисунок 11 - Аппроксимация функции ошибок

Например, система прохождения единичных тренингов может быть организована следующим образом. Каждый обучаемый многократно отрабатывает каждый единичный тренинг на отдельном рабочем месте. Единичные тренинги складываются в группы (например, по три тренинга), а группы – в последовательный цикл. Единичные тренинги проводятся последовательно, после каждого единичного тренинга может производиться краткий анализ совершенных действий, правильных или неправильных, путем включения «прокрутки» сценария единичного тренинга совместно с системой подсказок (заметим, что такое проведение занятий, даже для группы, не требует обязательного присутствия инструктора на всех этапах тренинга, и может быть организовано в автономном режиме, в том числе вне пределов учебного центра). Одновременно с последовательным проведением тренинга идет фиксация совершенных ошибок. При наличии хотя бы одной ошибки или задержки с выполнением правильных действий более отведенного времени тренинг считается не выполненным (Рисунок 12).



Рисунок 12 - Результаты повторения единичного тренинга

Можно непосредственно строить аналитическую зависимость количества ошибок от времени обучения в виде сплайна или по критерию наименьших квадратов, задав эталонную зависимость, например, в виде прямой (Рисунок 13) или иной функциональной зависимости.

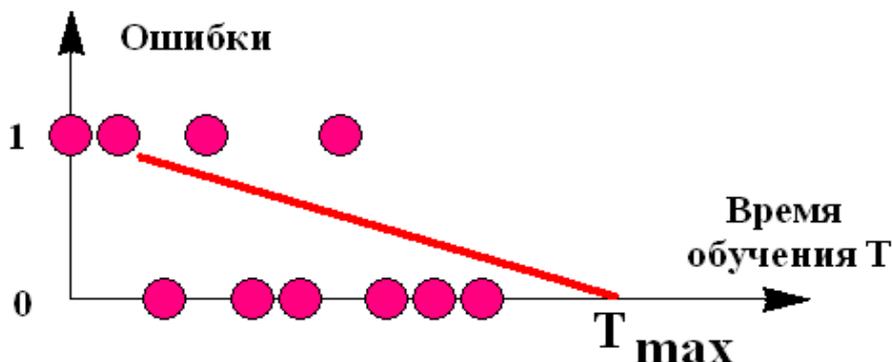


Рисунок 13 - Построение линейной функциональной зависимости

Если таким образом строить функцию ошибок в виде линейной модели (линейная аппроксимация, Рисунок 11,б) для времени окончания курса тренировок  $T = T_{\max}$  и начала «послетренингового» периода  $t=0$  функцию ошибок можно аппроксимировать в виде:

$$a_1 \cdot T + a_0 = b, \quad (15)$$

где,  $T$  - время,  $a$  - коэффициенты,  $b$  – наличие (1) или отсутствие (0) ошибки - в момент времени  $t$ . Получаем систему:

$$\begin{aligned} a_1 \cdot T_1 + a_0 &= b_1; \\ a_1 \cdot T_2 + a_0 &= b_2; \\ &\dots \\ a_1 \cdot T_N + a_0 &= b_N, \end{aligned} \quad (16)$$

где,  $T_1, T_2 \dots T_N$  - время завершения тренировок;  $b_1, b_2 \dots b_N$  - наличие или отсутствие ошибок. Система переопределена, имеет 2 неизвестных коэффициента  $a_1$  и  $a_0$  и  $N$  уравнений и решается как задача МНК (ищется  $a_1$  и  $a_0$ ). В результате определяются  $a_1$  и  $a_0$  для конкретного оператора и конкретного вида тренинга. Прямая пересекает ось абсцисс в точке  $T_{\max}$ , которая может служить условной оценкой минимальной длительности курса тренировок, обеспечивающей безошибочную работу обучаемого на тренажере. Величина  $T_{\max}$  находится из соотношения  $T_{\max} = -a_0/a_1$ .

Несмотря на отсутствие строгого статистического обоснования, можно судить о характере поведения функции ошибок. Каждый единичный тренинг имеет примерную

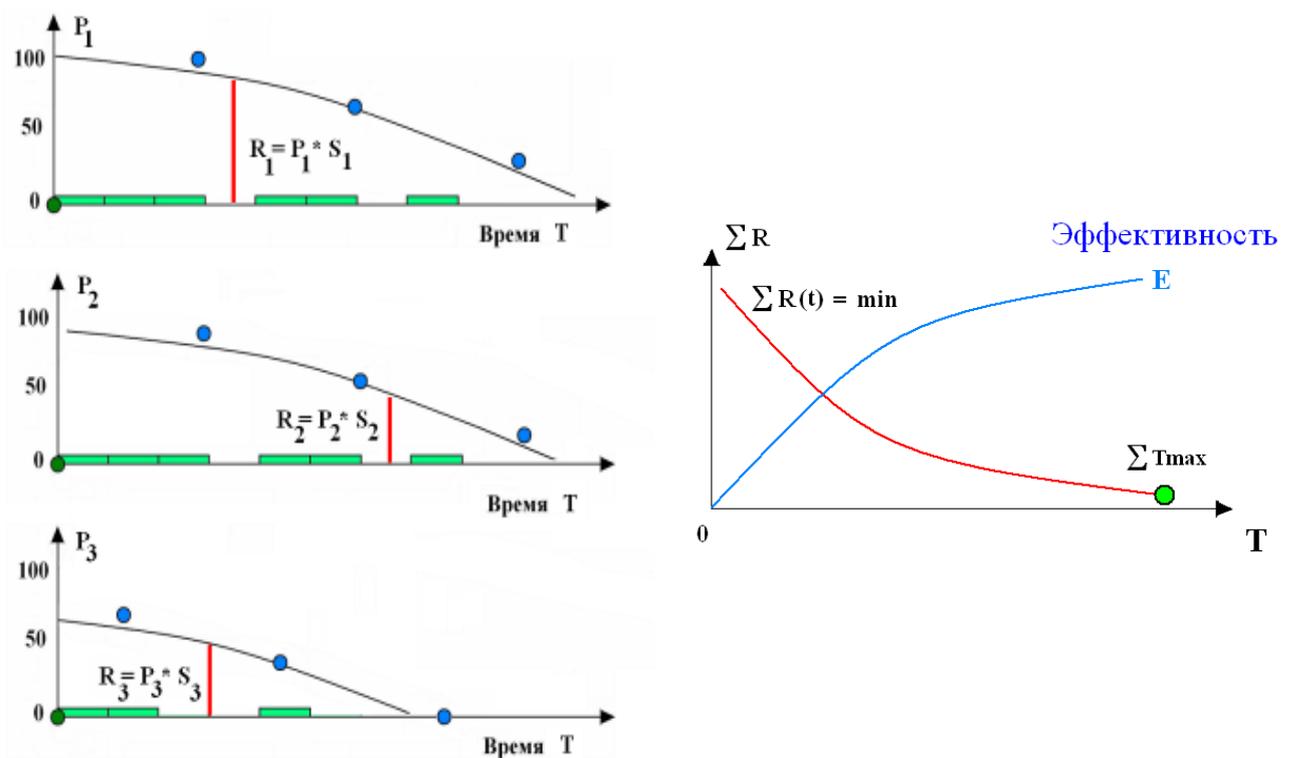
длительность согласно сценарию карты тренинга. Округленное отношение  $T_{\max}$  к длительности тренинга дает нам количество тренингов определенного типа в курсе обучения специалиста. Средние (или среднестатистические) значения  $T_{\max}$  позволяют строить групповые курсы обучения. Важно отметить, что для реального проектирования курсов количество экспериментальных тренингов может быть ограничено и время  $T_{\max}$  является прогнозом. Кстати, в начале координат  $T=0$  величина аналитической зависимости может превзойти 1, что показывает определенную приблизительность данной методики вообще, и определения времени  $T_{\max}$  в частности.

На основе полученных характеристик, задаем количественный критерий эффективности, отражающий функциональную полезность системы проводимых тренингов и технических средств тренажера.

Одним из практичных подходов в данном случае является придание каждому единичному тренингу некоего численного значения, например, среднего ущерба при совершении специалистом ошибки по теме единичного тренинга на реальном объекте. Данная оценка может быть произведена в баллах или в денежных единицах, однако понятно, что ошибка, приводящая к взрыву резервуара, весит больше, чем ошибка, приводящая к поломке клапана. Данная величина также не может быть получена из статистики достаточно корректно из-за недостаточности исходной информации, однако использование метода экспертных оценок позволяет подвести под эту величину вполне обоснованную научную базу. Двукратное взвешивание по закону больших чисел (много экспертов, много тренингов) придает полученным оценкам определенную достоверность и объективность. Таким образом, имеется некоторый теоретический потенциал предотвращенного ущерба. Конечно, сложение всех ущербов от всех возможных катастроф может дать величину, многократно превышающую стоимость всего объекта. Поэтому использование подобных оценок имеет важный практический смысл. Кроме того, сопоставление общей потенциальной величины ущерба с реальной статистикой ущерба от ошибок персонала для типового (подобного исследуемому) объекта в отрасли позволит ввести поправочные коэффициенты и непосредственно прогнозировать наиболее вероятный ущерб от будущей практической деятельности конкретного специалиста. ЭТП определяется степенью уменьшения величины потенциального ущерба в процессе обучения.

Оценка ЭТП путем прямой оценки вероятного ущерба может быть произведена следующим образом. Каждому единичному тренингу ставится в соответствие

функция снижения количества ошибок по мере обучения (Рисунок 14) и экспертная оценка предотвращенного ущерба. Первоначально время обучения принимается как сумма всех значений  $T_{\max}$  для единичных тренингов и рассчитывается общий предотвращенный ущерб как сумма экспертных оценок ущерба по каждому единичному тренингу. Затем производится построение оптимального множества тренингов при ограничении курсов по времени. Примем вероятность ошибки условно равной частоте события, то есть % ошибки при данной величине времени обучения  $T$ . Рассчитывается вероятный ущерб как произведение вероятности ошибки для каждого вида единичного тренинга для ряда дискретных значений времени  $T$  на отрезке  $[0, T_{\max}]$ .



Где,  $S_i$  - экспертная оценка ущерба от ошибки по теме единичного тренинга типа  $i$ ;  
 $P_i$  - вероятность (частота появления ошибки) при повторе тренинга  $i$ ;  
 $R_i = S_i \cdot P_i$  - эффективность.

Рисунок 14 - Расчет ЭТП путем прямой оценки вероятного ущерба

Затем на каждом шаге ищется ряд пробных решений путем последовательного расчета суммы вероятного ущерба для варианта, если время  $T$  будет уменьшено на шаг  $\Delta T$ . Из пробных решений выбирается вариант с наименьшей суммой вероятного ущерба по всем единичным тренингам, данный вариант считается базовым для общего

времени обучения  $T = \Sigma T_{\max} - k \cdot \Delta T$ , и снова ищем пробные решения до момента, когда общее время обучения  $T$  станет равным нулю.

На каждом шаге значение функции эффективности принимается равной разнице между суммой экспертных оценок ущерба по всем видам тренинга и суммой вероятного ущерба при данном значении  $T$ . При  $T=0$  значение функции эффективности равно нулю, при  $T = \Sigma T_{\max}$  значение функции эффективности равняется сумме экспертных значений ущерба (Рисунок 14).

Обобщенный расчет эффективности с учетом вариабельности функций ошибок предлагается производить следующим образом.

Рассмотрим функцию прироста эффективности в зависимости от времени тренинга, которая, очевидно, будет зависеть от производной функции ошибок:

$$E'(T) = -R'(T) = -P'_{\text{ош}} S \mid T < T_{\max} \quad \text{и} \quad E'(T) = 0 \mid T > T_{\max}, \quad (17)$$

где,  $E(T)$  - эффективность в момент обучения  $T$ ;  $E'(T)$  - ее производная;  $R(T)$  - вероятный ущерб, или произведение вероятности ущерба на его величину;  $R'(T)$  - его производная;  $P_{\text{ош}}$  - функция ошибок, приведенная к значениям от 0 до 1;  $P'_{\text{ош}}$  - ее производная;  $S$  - экспертная оценка ущерба по рассматриваемому виду тренинга.

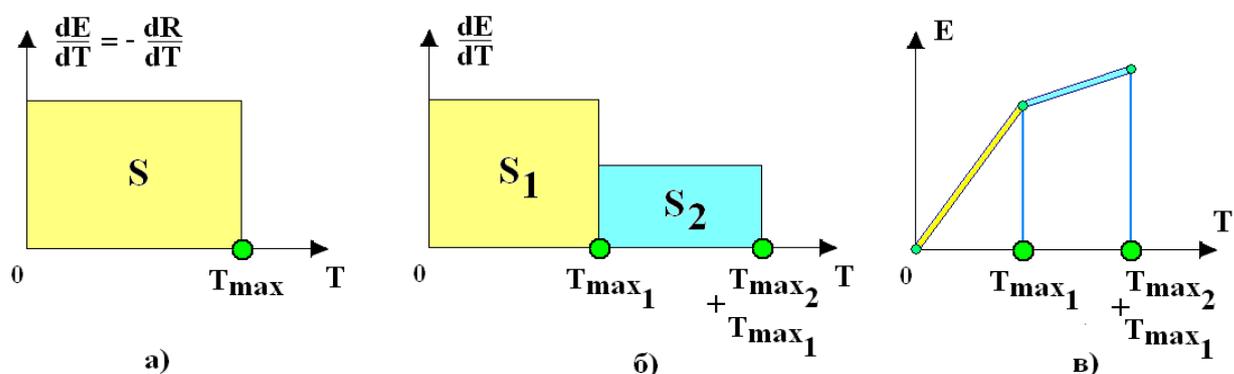


Рисунок 15 - Функция эффективности  $E$  для одного и двух тренингов

Для случая линейной аппроксимации (Рисунок 15, б) функция прироста эффективности на отрезке  $T = [0, T_{\max}]$  будет иметь вид, изображенный на Рисунке 15, а. Эффективность  $E(T)$  определяется выражением

$$E(T) = \int_0^T (-P'_{\text{ош}} S) dt = \frac{T}{T_{\max}} S, \quad (18)$$

Для двух тренингов функция прироста будет иметь вид Рисунка 15,б, а общая эффективность для двух тренингов вид Рисунка 15,в.

Методика расчета прямой оценки вероятного ущерба (Рисунок 14) в случае линейной аппроксимации, как следует из Рисунка 15,в, сводится к сортировке тренингов по удельной эффективности  $dE/dT$ . Важное примечание: из удельной эффективности можно (и даже следует) вычитать удельную стоимость тренинга. Такое представление эффективности аналогично прибыли в финансовых расчетах. А отношение удельной эффективности к удельной стоимости будет аналогично рентабельности. Сортировка тренингов в этом случае должна производиться согласно этой «рентабельности». В случае уменьшения общего времени тренингов сначала урезается время наименее значимого тренинга до его исчезновения, потом беремся за следующий и так далее (Рисунок 14).

Если учитывать неточность определения  $T_{\max}$  и общую вариабельность функции ошибок, то величину  $T_{\max}$  следует рассматривать как математическое ожидание некоторой случайной величины. Функцию прироста эффективности следует умножать на вероятность того, что время обучения не превзошло этой величины, подобно тому, как рассчитываются оптимальные портфели акций на бирже (Рисунок 16, а). Для случая линейной аппроксимации выражение (18) примет вид

$$E(T) = \int_0^T -P'_{\text{ош}} S P_{T < T_{\max}} dT = \frac{S}{M(T_{\max})} \int_0^T P_{T < T_{\max}} dT, \quad (19)$$

где,  $M(T_{\max})$  – математическое ожидание случайной величины  $T_{\max}$ ,  $P_{T < T_{\max}}$  – вероятность того, что время обучения  $T$  не превзошло  $T_{\max}$ .

При нулевой дисперсии случайной величины  $T_{\max}$  формула (19) переходит в формулу (18). Дисперсия в индивидуальных замерах может быть определена по разнице начала серии непрерывных безошибочных тренингов (или времени окончания экспериментальных тренингов) и прогноза для времени  $T_{\max}$ . Характер распределения при этом определить достаточно трудно, если количество тренингов невелико. Для средних по группе специалистов величин  $T_{\max}$  распределение будет стремиться к нормальному (Гауссову).

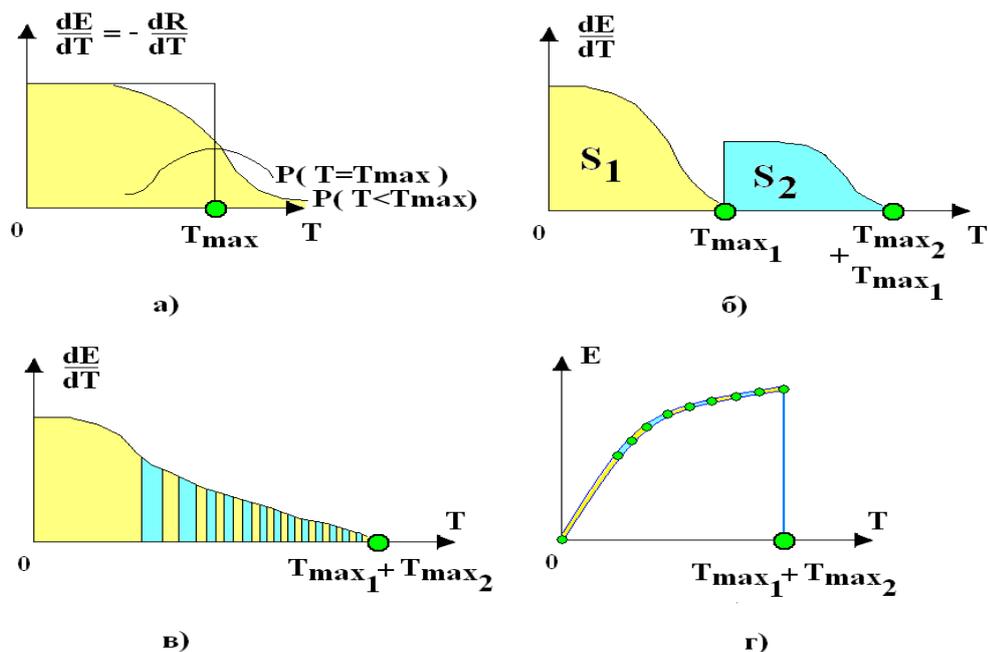


Рисунок 16 - Функция эффективности с учетом варибельности функции ошибок

Для определения общей оптимальной эффективности времени обучения при таком подходе простой сортировки тренингов недостаточно (Рисунок 16, б). В этом случае следует разбить функции эффективности разных видов тренинга на малые дискретные участки  $\Delta T$  и осуществлять сортировку этих фрагментов (Рисунок 16, в). При ограничении времени курсов  $T < \sum T_{max}$  оставшиеся «слева» от линии ограничения времени  $T$  фрагменты по каждому виду тренинга складываются обратно и так определяется общая длительность тренинга каждого вида в курсе обучения. Общая функция эффективности также состоит из отдельных фрагментов (Рисунок 16, г).

Совокупность индивидуальных результатов по всем видам  $i$  единичных тренингов дает объективную модель обучаемого и может служить как мерой объективной оценки готовности специалиста, так и основой для формирования индивидуальных планов подготовки. Это соответствует пункту 14 области исследований, определяемой паспортом специальности 2.10.1 – «Пожарная безопасность (технические науки)»

Для групп специалистов и групп тренингов - используем средние величины коэффициентов линейной аппроксимации  $a_1$  и  $a_0$ . Расчет  $T_{max}$  и функции  $dS/dT$  аналогичен.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса тренажерной подготовки, результаты автоматического определения ключевых индикаторов риска при проектировании систем.



Рисунок 17 - Примеры интегрированных обучающих систем

Пример реализации интегрированных обучающих систем (ИОС), направленных на стартовое обучение операторов нефтегазовых объектов, показан на Рисунке 17. Взаимодействие обучаемых с моделью реального объекта осуществляется с помощью автоматизированных рабочих мест, точно имитирующих реальное рабочее место специалиста, а также с помощью средств активной визуализации и гиперреальности происходящих процессов. Кроме визуальных эффектов ученик получает важнейшую образную информацию – как осуществляется процесс, как пространственно расположено оборудование и как все это связано с динамикой процессов. Ненаблюдаемые визуальными параметрами отображаются на разнообразных графиках и диаграммах, отображаемых как на внешних экранах, так и на рабочем месте ученика.

Таблица – 5 – КИРы в САПР

№	Тег	№ п/п	КИР	ед. изм.	Свойство тега	Значение
1	Prj.ROOT. Main.MA_1	1	Максимальное давление на входе	МПа	P1	70
		2	Максимальное давление на выходе	МПа	P2	100
		3	Максимальный расход	м3/ч	Q	3000
		4	Максимальная температура корпуса насоса	К	Tn	300
2	Prj.ROOT. Main.RVS_1	1	Максимальное давление на входе	МПа	Pressure	10
		2	Максимальный расход	м3/ч	Qlevel	3000
		3	Максимальная температура	К	Temp	310
3	Prj.ROOT. Main.ZD_1	1	Максимальное давление на входе	МПа	P1	100
		2	Максимальное давление на выходе	МПа	P2	100
		3	Максимальная температура	К	T1	310
4	Prj.ROOT. Main.REG_1	1	Максимальное давление на входе	МПа	P1	100
		2	Максимальное давление на выходе	МПа	P2	100
		3	Максимальная температура	К	Tn	300
5	Prj.ROOT. Main.RVS_2	1	Максимальное давление на входе	МПа	Pressure	10
		2	Максимальный расход	м3/ч	Qlevel	3000
		3	Максимальная температура	К	Temp	310

При проектировании системы установки по подготовке нефти (УПН), проводилась апробация автоматического определения ключевых индикаторов риска.

Для апробации исследований были разработаны:

- САПР моделирования процессов и автоматики DMPipe.
- База элементов, из которых состоит УПН (задвижки, насосы т .д.);
- Дополнительная подсистема САПР моделирования рисков (генератор событий);
- Дополнительная подсистема САПР оптимизации системы тренингов.
- САПР системы мероприятий по снижению рисков.

Для каждого технологического элемента в САПР были определены КИРы (пример показан в таблице 5).

По результатам автоматического определения ключевых индикаторов риска была получена выходная документация с отображением превышений КИР при каждой прогонке, и сформирован оптимальный план мероприятий.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

На основании результатов, выполненных автором исследований, разработаны научные основы методов создания цифровой модели опасных производственных объектов на этапе проектирования и анализа опасности и работоспособности установок подготовки нефти с учетом влияния человеческого фактора.

В работе предложена классификация ключевых индикаторов риска для объектов подготовки нефти ориентированная на системы динамического моделирования технологического процесса, позволяющая задавать численные границы таких рисков, их нормального и аномального функционирования для обширного перечня оборудования и элементов.

Для целей определения ключевых индикаторов риска разработан методический подход и алгоритм их определения, на основе математической модели технологического объекта, позволяющий выявлять их в автоматическом режиме. Такой методический подход позволяет охватывать все типовые и возможные нештатные режимы, вводить всевозможные отклонения и фиксировать выходы ключевых индикаторов риска за пределы по каждому параметру каждого элемента.

Предложен метод автоматического формирования плана мероприятий по сокращению рисков, на основе полученных ключевых индикаторов риска, позволяющий варьировать допустимый риск исходя из ресурсных ограничений. Данный метод позволяет учитывать эффект от мероприятий и рассматривать множество всех мероприятий, как систему, в которой каждый шаг по затратам приводит к росту эффекта.

На основе моделирования на тренажере функции ошибок предложена количественная оценка готовности персонала, выраженная в баллах потенциального ущерба при неправильных действиях, и определена эффективность тренинга как изменение этой оценки. Разработан метод формирования оптимального множества тренингов на основе их сортировки по удельной эффективности и выбора наиболее эффективных с учетом общих ресурсных ограничений в рамках единой системы мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Предложена и научно обоснована концепция совершенствования методологии количественной оценки готовности и эффективности персонала на основе тренажерной подготовки, позволяющая рассчитать состав и продолжительность курса обучения с учетом лимитов на продолжительность курсов в условиях учебного заведения, а также составить курс дистанционного доучивания, как разницу между оптимальным ограниченным курсом и максимальным курсом, в котором время тренингов и их повторов превосходит  $T_{max}$  по всем рекомендованным видам тренинга.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

#### **Ведущие рецензируемые научные журналы**

1. А.А. Кудрявцев, И.А. Мелюсёва, М.В. Озден, Д.И. Шевченко. Разработка тренажерных установок для подготовки персонала нефтеперерабатывающих предприятий. //Безопасность Труда в Промышленности, Москва, 2021, №10, с. 82-87.
2. Кудрявцев А.А., Подходы к объективной оценке качества подготовки персонала и эффективности учебного процесса при использовании тренажеров для специалистов опасных промышленных объектов. Нефтегазовое дело. Уфа, 2022. № 2. С. 61–79.
3. Кудрявцев А.А., Хафизов И.Ф., Садыков Н.Х. Опыт внедрения тренажерных комплексов на объектах газовой промышленности территориально-производственного предприятия «Ямалнефтегаз»// Безопасность Труда в Промышленности, Москва, 2023, №7(23), с. 79-84.
4. Кудрявцев А.А., Хафизов И.Ф., Шевченко Д.И., Мелюсёва И.А., Васильев Д. В., Озден И. В. Количественная оценка риска оперативного персонала на тренажерах. Нефтегазовое дело. 2022. № 4. С. 69–82.
5. Кудрявцев А.А., Хафизов Ф.Ш., Шевченко Д.И. Интегрированные обучающие системы для специалистов трубопроводного транспорта нефти // Научно-производственный журнал «Безопасность труда в промышленности». – Москва: - 2011. - №1 – С. 30-38.
6. Мугаллимов Ф.М., Кудрявцев А.А. Интегрированные обучающие системы для обучения специалистов магистрального трубопроводного транспорта газа//Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», Уфа, 2012, №6, с. 620-628.

7. Мугаллимов Ф.М., Кудрявцев А.А., Инновационные разработки в области технических средств обучения специалистов трубопроводного транспорта// Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», Уфа, 2013, №4, с. 475-487.
8. Ф.Ш. Хафизов, Д.И. Шевченко, А.А. Кудрявцев. Снижение пожарной и промышленной опасности технологических процессов нефтегазовой отрасли путем сокращения временных затрат на разработку новых тренажеров // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012, - №2. - С. 228-244.
9. Хафизов И.Ф., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Мелюсёва И.А. Озден И. В. Современные тренажерные системы для оперативного персонала в нефтегазовой области. Нефтегазовое дело. Уфа, 2022. № 3. С. 46–61.
10. Хафизов И.Ф., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Мелюсёва И.А. Формализации процедур анализа опасности и работоспособности человеко-машинных систем в нефтегазовой отрасли. Техносферная безопасность. Екатеринбург, 2022 № 2 (35). С. 3-15.
11. Хафизов Ф.Ш., Арсланов А.Р., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А. Оптимизационный подход к разработке современных технических средств обучения для специалистов нефтегазового комплекса. // Научно-производственный журнал «Безопасность труда в промышленности». – Москва: - 2011. - №6 – С. 10-15.
12. Хафизов Ф.Ш., Арсланов А.Р., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А. Цели, требования и практические аспекты разработки современных технических средств обучения для специалистов трубопроводного транспорта// Трубопроводный транспорт: теория и практика, Москва, 2011, №1(23), с. 32-39.
13. Хафизов Ф.Ш., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Снижение пожарной и промышленной опасности технологических процессов в нефтегазовой отрасли путем разработки методологии оценки эффективности тренажерной подготовки персонала //Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», Уфа, 2012, №2, с. 204-227.
14. Шарафутдинов А.А., Хафизов И.Ф., Кудрявцев А.А., Зубов В.С. Подготовка личного состава пожарной охраны с помощью ситуационных тренингов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, Тюмень, 2015, №4, с. 131-136.
15. Шарафутдинов А.А., Хафизов Ф.Ш., Кудрявцев А.А. Внедрение автоматизированных систем оперативного управления и виртуальных

- тренажерных комплексов, как способ минимизации ошибок личного состава пожарных подразделений// Нефтегазовое дело, Уфа, 2014, тот.12, №3, с. 160-169.
16. Шарафутдинов А.А., Хафизов Ф.Ш., Кудрявцев А.А., Каримов Р.Р. Применение автоматизированной системы связи и оперативного управления подразделениями пожарной охраны государственной противопожарной службы при тушении крупных пожаров// Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», Уфа, 2015, №1, с. 345-363
  17. Шарафутдинов А.А., Хафизов Ф.Ш., Хафизов И.Ф., Кудрявцев А.А. Основы построения интегрированных тренингов для специалистов пожарной безопасности// Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, Тюмень, 2015, №2, с. 120-126.

#### **Прочие печатные издания**

18. Kudryavsev A.A., Shevchenko D.I. The “Oil and Gas Enterprise” Integrated Training System // OIL GAS European Magazine, - ISSN 0342-5622, - URBAN-VERLAG Hamburg/Wien GmbH, - 4, - 2012. - Volume 38 . - P. 218-219.
19. Кудрявцев А.А., Мелюсёва И.А., Озден М.В., Шевченко Д.И. Оптимизация системы тренингов операторов нефтеперерабатывающих установок с использованием тренажера «ЭЛОУ-АВТ», Материалы III международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли», г. Уфа, УГНТУ 2020г.
20. Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И., Мелюсёва И.А., Фалалеев А.А. Modern requirements for simulation systems for the main gas transport. Материалы LXIX Международной научно-практической конференции «WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS», 2022 г. в г. Пенза.
21. Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И., Хафизов И.Ф. The “oil and gas enterprise” integrated training system. Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Результаты современных научных исследований и разработок», 2022 г. в г. Пенза.
22. Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И., Хафизов И.Ф. Практические аспекты и функционал обучающих тренажеров оперативного персонала магистрального транспорта газа. Материалы VI Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования», 2022 г. в г. Пенза.

23. Хафизов И.Ф., Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И., Шарафутдинов А.А. Модель обучаемого в имитационных тренажерных комплексах для обучения оперативного персонала объектов нефтегазового сектора. // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2016. (Сборник трудов Международной научно-технической конференции посвященной 60-летию филиала. 2016), Уфа, 2016, Страницы: 369-374 (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26084599>)
24. Хафизов И.Ф., Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И., Шарафутдинов А.А. Проектирование технических средств обучения для специалистов нефтегазового комплекса на основе оптимального множества тренигов.// Современные технологии в нефтегазовом деле – 2016, Уфа, (статья в сборнике трудов конференции), Страницы: 366-369. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26084394>)

#### **Свидетельство об регистрации программы для ЭВМ**

25. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017615928. Тренажерный комплекс диспетчерского управления магистральными нефтепроводами. // Земенков Ю.Д., Подорожников С.Ю., Некрасов В.О., Земенкова М.Ю., Дудин С.М., Петряков В.А., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Нугуманов В.Г., Данилюк И.В., Тарасова Д.А.. – Заявка №2017610311 от 11.01.2017 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 26.05.2017г.
26. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017616534. Программа для обучения «Сценарии и действия эксплуатационного персонала при локализации и ликвидации аварийных ситуаций на нефтеперекачивающей станции и нефтепроводе». // Земенков Ю.Д., Подорожников С.Ю., Некрасов В.О., Земенкова М.Ю., Дудин С.М., Петряков В.А., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Нугуманов В.Г., Данилюк И.В., Тарасова Д.А.. – Заявка №2017610310 от 10.01.2017 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 08.06.2017г.
27. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613204. Тренажерный комплекс «Транспорт нефти и газа. Обслуживание трубопроводов». // Земенков Ю.Д., Подорожников С.Ю., Чекардовский С.М., Земенкова М.Ю., Дудин С.М., Петряков В.А., Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Нугуманов В.Г., Данилюк И.В., Тарасова Д.А. – Заявка №2018610092 от 09.01.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 05.03.2018г.
28. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613724. Программа моделирования газодинамических процессов в трубопроводных сетях

- (DMPipe-Gas). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018610868 от 01.12.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
29. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613725. Программа моделирования гидравлических процессов в трубопроводных сетях (DMPipe-Oil). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018613725 от 01.02.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
30. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613727. Программа моделирования работы микропроцессорных систем автоматизации (DMPipe-MPSA). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018610904 от 01.02.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
31. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613723. Формирование курса обучения (DMPipe-Course). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018610866 от 01.02.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
32. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613728. Программа генерации событий для обучения специалистов нефтегазовой сферы (DMPipe-Event). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018610903 от 01.02.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
33. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613722. Программа для моделирования работы энергосетей предприятий (DMPipe-Energy). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018610865 от 01.02.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
34. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613730. Построение системы карт тренингов (DMPipe-CardTraining). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018610896 от 01.02.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
35. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018613729. Программа обучения оперативного электротехнического персонала (TransNNP ZRU). // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018610900 от 01.02.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.03.2018г.
36. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018665262. Аналитический тренажерный комплекс обучения оперативного персонала магистральных нефтепроводов, нефтебаз и спецморнефтепорта. // Кудрявцев

- А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018662487 от 08.11.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.12.2018г.
37. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018665260. Тренажерный комплекс обучения специалистов на базе 3D-модели нефтеперекачивающей станции. // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018662492 от 08.11.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.12.2018г.
  38. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018665261. Тренажер для обучения товарных операторов. // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018662490 от 08.11.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.12.2018г.
  39. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018664672. Тренажер для обучения операторов нефтеперерабатывающих станций и диспетчеров региональных диспетчерских пунктов. // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018662479 от 08.11.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.11.2018г.
  40. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018664813. Тренажерный комплекс обучения диспетчеров магистрального транспорта газа. // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018662474 от 08.11.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 22.11.2018г.
  41. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018616578. Интерактивный инструктаж для трубопроводчика линейного. // Шевченко Д.И., Данилюк И.В., Калмыков Д.А., Кудрявцев А.А., Феоктистов А.М., Нугуманов В.Г., Тарасова Д.А.. – Заявка №2018614145 от 20.04.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 04.06.2018г.
  42. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2019612005. Тренажерный комплекс обучения электротехнического персонала «Тренажер ЗРУ 6(10) Кв». // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018662488 от 08.11.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.02.2019г.
  43. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2021613244. DMPipe-Mess. // Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А. – Заявка №2021612263 от 24.02.2021 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 04.03.2021г.

44. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2021613113. DMPipe-Trends. // Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А. – Заявка №2021612308 от 24.02.2021 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 02.03.2021г.
45. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2021613455. DMPipe-TimerUst. // Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Нугуманов В.Г – Заявка №2021612229 от 24.02.2021 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 09.03.2021г.
46. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2021613293. DMPipe- AnUst. // Шевченко Д.И., Кудрявцев А.А., Нугуманов В.Г – Заявка №2021612283 от 24.02.2021 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 04.03.2021г.
47. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2019612006. Тренажерный комплекс обучения специалистов на базе 3D-модели магистрального транспорта газа. // Кудрявцев А.А., Шевченко Д.И. – Заявка №2018662485 от 08.11.2018 г.: зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.02.2019г.