

УДК 658.514

89177556981@mail.ru

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

**FORMALIZING THE PROCEDURES FOR ANALYSIS OF THE HAZARD
AND PERFORMANCE OF HUMAN-MACHINE SYSTEMS
IN THE OIL AND GAS INDUSTRY**

*Хафизов И. Ф., доктор технических наук, профессор,
Шевченко Д. И., доктор технических наук,
Кудрявцев А. А., кандидат технических наук, доцент,
Мелюсева И. А.,
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа*

*Hafizov I., Shevchenko D., Kudryavsev A., Melyuseva I.,
Ufa State Petroleum Technological University
Department of Industrial and Fire Safety, Ufa*

В статье приводится краткий анализ существующих методов анализа опасностей и работоспособности (АОР), применяемых на опасных производственных объектах (ОПО) нефтегазового комплекса. 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. В статье предложен и описан подход к автоматизированному анализу рисков на ОПО. В процессе проектирования автоматически моделируются все типовые и возможные нештатные режимы, вводятся все возможные отклонения и фиксируется выход ключевых индикаторов риска (КИР) за пределы по каждому параметру каждого элемента. В результате получен подробный план мероприятий по сокращению рисков, рассчитывающийся автоматически.

Ключевые слова: анализ опасности и работоспособности, ключевые индикаторы риска, алгоритм оценки рисков, оценка влияния человеческого фактора, потенциальный ущерб.

The article provides a brief analysis of the existing methods of hazard and operability analysis (HAA) used at hazardous production facilities (HPO) of the oil and gas complex. The solution to the problem of preventing emergency situations is hampered by significant amounts of input diagnostic and technological information due to the lack of a systematic approach to solving multifactorial safety problems, the lack of appropriate computerized information and control systems for monitoring synergistic risk and the corresponding special methodological and software data processing system, which naturally makes it difficult to adopt optimal control decisions for timely forecasting and prevention of emergencies. The article proposes and describes an approach to automated risk analysis

at HIFs. During the design process, all typical and possible abnormal modes are automatically simulated, all possible deviations are introduced, and the output of key risk indicators (KRI) beyond the limits for each parameter of each element is recorded. The result is a detailed action plan to reduce risks, calculated automatically.

Keywords: hazard and operability analysis, key risk indicators, risk assessment algorithm, human factor impact assessment, potential damage.

Для определения величины риска должны быть идентифицированы опасности, являющиеся причиной риска, а также пути, по которым эти опасности могут реа-

лизываться. Для идентификации опасностей, не учитываемых ранее при проведении анализа, как правило, применяются следующие методы (см. рис. 1).

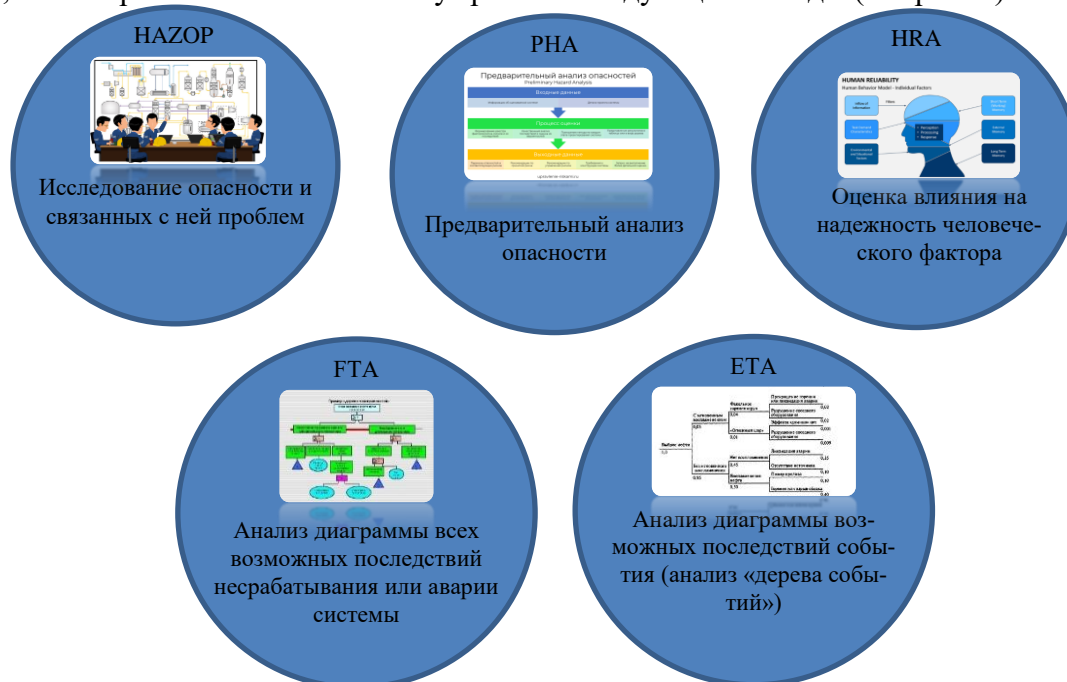


Рисунок 1. Наиболее популярные методы идентификации опасностей при проведении АОР

1. Исследование опасности и связанных с ней проблем (HAZOP). Это процедура идентификации возможных опасностей по всему объекту в целом. Она особенно полезна при идентификации непредвиденных опасностей, заложенных в объекте вследствие недостатка информации при разработке, или опасностей, проявляющихся в существующих объектах из-за отклонений в процессе их функционирования.

2. Анализ диаграммы всех возможных последствий несрабатывания или аварии системы (анализ «дерева неисправностей») (FTA).

3. Анализ диаграммы возможных последствий события (анализ «дерева событий») (ETA).

4. Предварительный анализ опасности (РНА).

5. Оценка влияния на надежность человеческого фактора (НРА).

Среди недостатков этих методов, можно выделить следующие:

– в ходе исследований невозможно выявить все имеющиеся отклонения и ошибки, которые могут послужить причиной возникновения аварийной ситуации;

- результат исследований будет зависеть от профессионализма и способности участников совещания представлять потенциальные отклонения;

- метод предпочтителен на стадии завершения разработки проекта, когда проработаны основные конструктивные и технологические решения;

- рассматриваются только те части системы, которые указаны в описании проекта. Действия и операции, которые не указаны в описании проекта, не рассматриваются;

- детальный анализ может быть длительным по времени и поэтому дорогостоящим.

Также одним из недостатков перечисленных методов является отсутствие эффективного планирования ресурсов на саму процедуру их проведения. Например, для установки подготовки нефти, при количестве технологических объектов, скажем 600 шт. (завихжки, насосы и т. д.), рассматривая пять параметров (температура, расход, давление, уровни, электросеть) и выделяя пять минут на каждый объект, суммарно получаем 15 тыс. мин, или 31 день.

Методы анализа опасностей 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.

С учетом этого анализ причин и последствий, обладающий объективной достоверностью, невозможно провести в полном объеме без привлечения современных вычислительных средств [1]. Но даже при наличии вычислительных мощностей сама

постановка задачи обуславливает значительные методологические сложности.

Почти все объекты нефтегазовой отрасли подразумевают присутствие персонала, управляющего и обслуживающего технику. Поэтому на вероятность реализации риска и величину ущерба существенно влияет человеческий фактор.

Оценку человеческого фактора предлагается проводить на тренажерах, построенных на математических моделях объектов.

Сложность моделируемых объектов, наличие недокументированных свойств, неизвестных параметров и контрольных значений требуют использования при моделировании реальных архивных данных. Следовательно, возникает необходимость решения так называемых «обратных задач», когда неизвестные параметры определяются по характеристикам. Сами по себе эти сложные задачи в случае тренажеров становятся практически нерешаемыми ввиду многочисленных ограничений из-за полностью детерминированной, известной структуры и большого количества известных параметров. Предложены адаптированные к задачам построения тренажеров методы, которые можно охарактеризовать как новое использование известных методов. В предложенных методах решение некоторых обратных задач с ограничениями сводится к линейной задаче метода наименьших квадратов с ограничениями-равенствами и непосредственной проверкой точности в пределах заданного множества тренингов. Среди задач, решенных с помощью предлагаемого подхода, можно выделить:

- 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 передаточных функций (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 массообменных колонн, приводя моделирование к реальному времени. Моделирование режимов заполнения и продувки колонны.

Использование известных подходов, признанных в большинстве случаев неэффективными из-за вычислительных трудностей, в совокупности с известными современными вычислительными методиками может классифицироваться как новое применение известного решения или метода. Теоретическая значимость результатов заключается в принципиальной возможности решения важных для повышения адекватности тренажеров задач. Практическая значимость заключается в возможности ускорить процесс проектирования тренажеров.

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 достаточно обширного перечня оборудования и элементов [2].

Разработана и представлена классификация ключевых индикаторов риска для основных технологических узлов оборудования, применяемого на установках подготовки нефти.

Все рассматриваемые риски можно разделить на четыре основные группы.

Механические – в данную группу входят все возможные воздействия и явления механического характера, такие как износ деталей оборудования, механические поломки оборудования, поломки крепежей и фундаментов оборудования, коррозия и т. д.

Технологические – в данную группу входят все неисправности, связанные с нарушением технологии эксплуатации оборудования, такие как нарушения режимов работы оборудования, неправильная коммутация оборудования, нарушения последовательности включения (запуска, коммутации) оборудования и т. д.

Сырьевые – в данную группу можно отнести все неисправности, связанные с сырьевым потоком в технологической установке, такие как изменение транспортируемой среды, химического состава среды, электрические помехи и т. д.

Человек – в данную группу входят все неисправности, связанные с человеком и его воздействием, такие как негативные воздействия третьих лиц, ошибки обслуживающего персонала, нарушение правил эксплуатации оборудования и т. д.

Теперь для использования всей мощности современных вычислительных средств в целях минимизации рутинных процессов в АОР будем подразумевать наличие интегрированной модели процессов. Такая модель должна включать максимально адекватную имитацию технологических процессов, защитных систем и АСУТП, включая пульта операторов и оцифрованные модели поведения персонала, управляющего системой и обслуживающего ее.

Нами был разработан программный продукт DMPipe (см. рис. 2), в который

входит модуль конструктора моделей, позволяющий производить настройку математической модели технологического процесса. Таким образом, можно настраивать

различные параметры модели, изменять технологическую схему, параметры моделирования, характеристики оборудования и т. д.

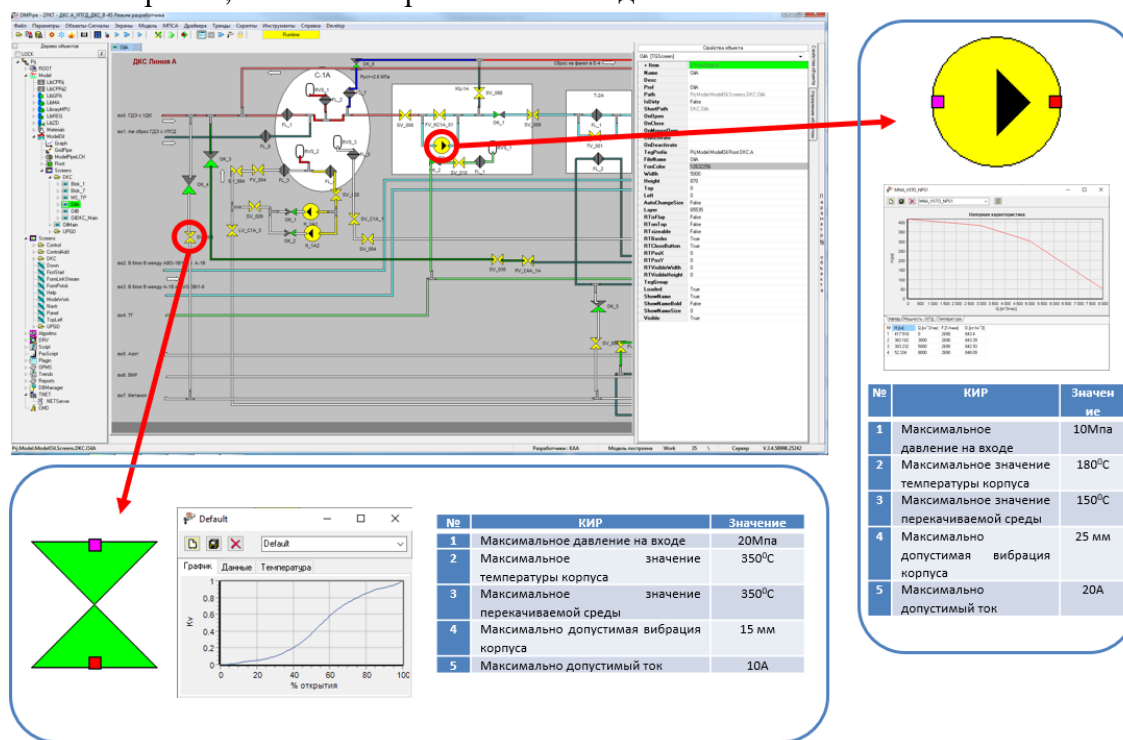


Рисунок 2. Динамическое моделирование для оценки человеческого фактора в человеко-машинных системах

Не менее важно использовать подобную модель в тренажере, оптимизируя систему тренингов и вычисляя объективные рейтинги готовности специалистов, так как строить цифровые двойники человеко-машинных систем без учета человеческого фактора малоэффективно [3].

Целесообразно выделить этап АОР для типового элемента, составить общее формализованное описание типового элемента, его модель, перечень рисков и опасностей и список возможных мероприятий для их предотвращения и уменьшения ущерба при реализации этих рисков. Одной из важнейших характеристик в данном случае является экономическая – сколько стоит то или иное мероприятие и какой ущерб оно потенциально предотвращает или уменьшает.

В инженерных АОР используется понятие ключевых слов (ДА, НЕТ, БОЛЬШЕ...). Для сопоставления их с количественными методами рационально использовать их замену на параметры КИР и их предельные величины (–min, 0, +max).

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, но вполне по силам современной вычислительной технике.

Предлагается следующий алгоритм формализации процедуры предварительной оценки рисков (см. рис. 3).

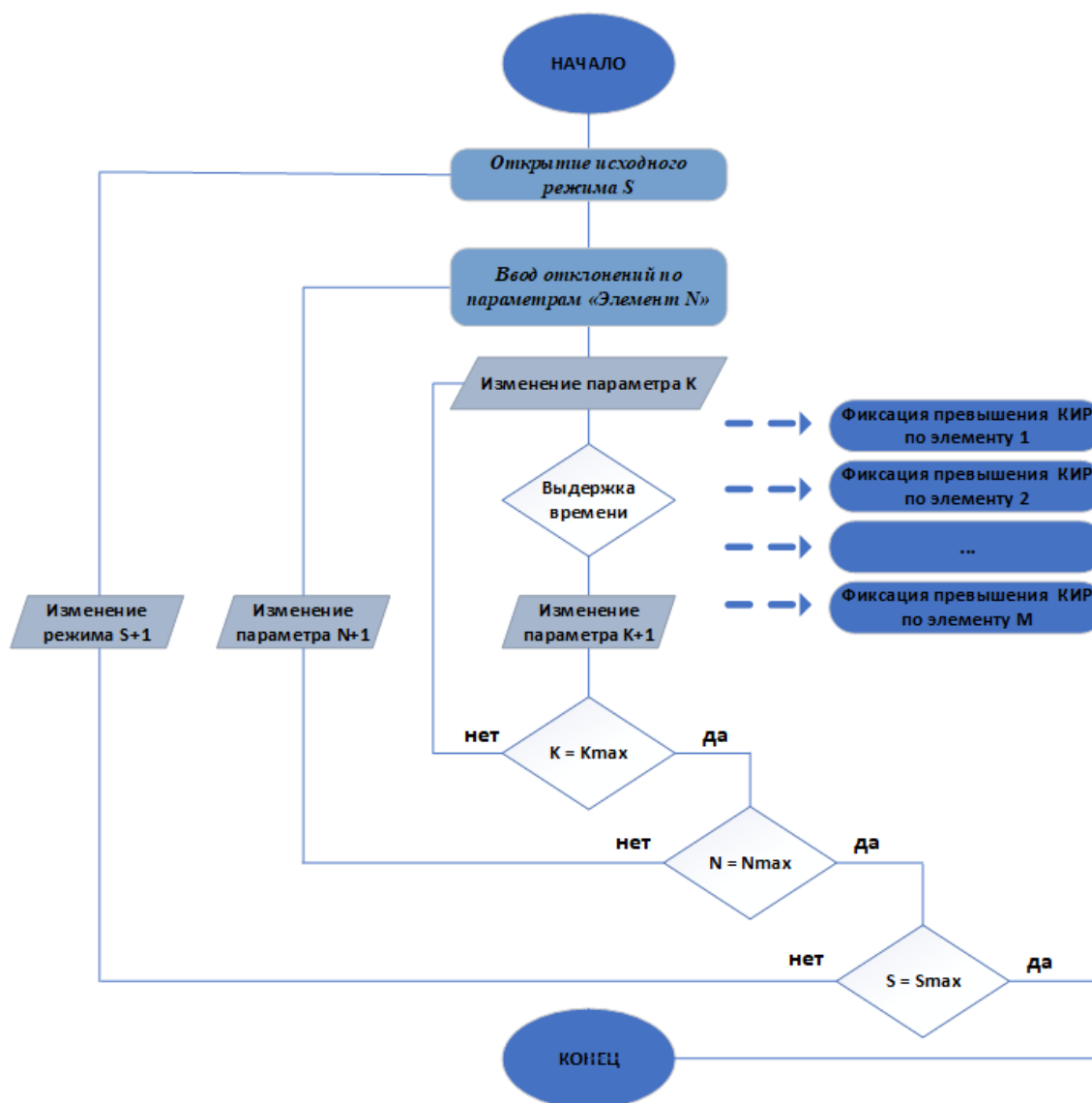


Рисунок 3. Алгоритм формализации процедуры предварительной оценки рисков

Начинаем с открытия исходного состояния моделируемой системы. Далее вводим отклонение по параметрам элемента, изменяем его, ожидаем выдержку времени. Если во время выдержки времени происходит превышение значения КИР, то выделяем его. По истечении выдержки времени переходим к следующему элементу и вводим отклонение. После чего опять ждем выдержку времени и т. д. Когда перебрали

все элементы, то открываем другое исходное состояние и все начинаем по кругу.

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.

В итоге мы получаем набор превышений (отклонений) КИР (см. рис. 4).

Анализ превышений ключевых индикаторов риска

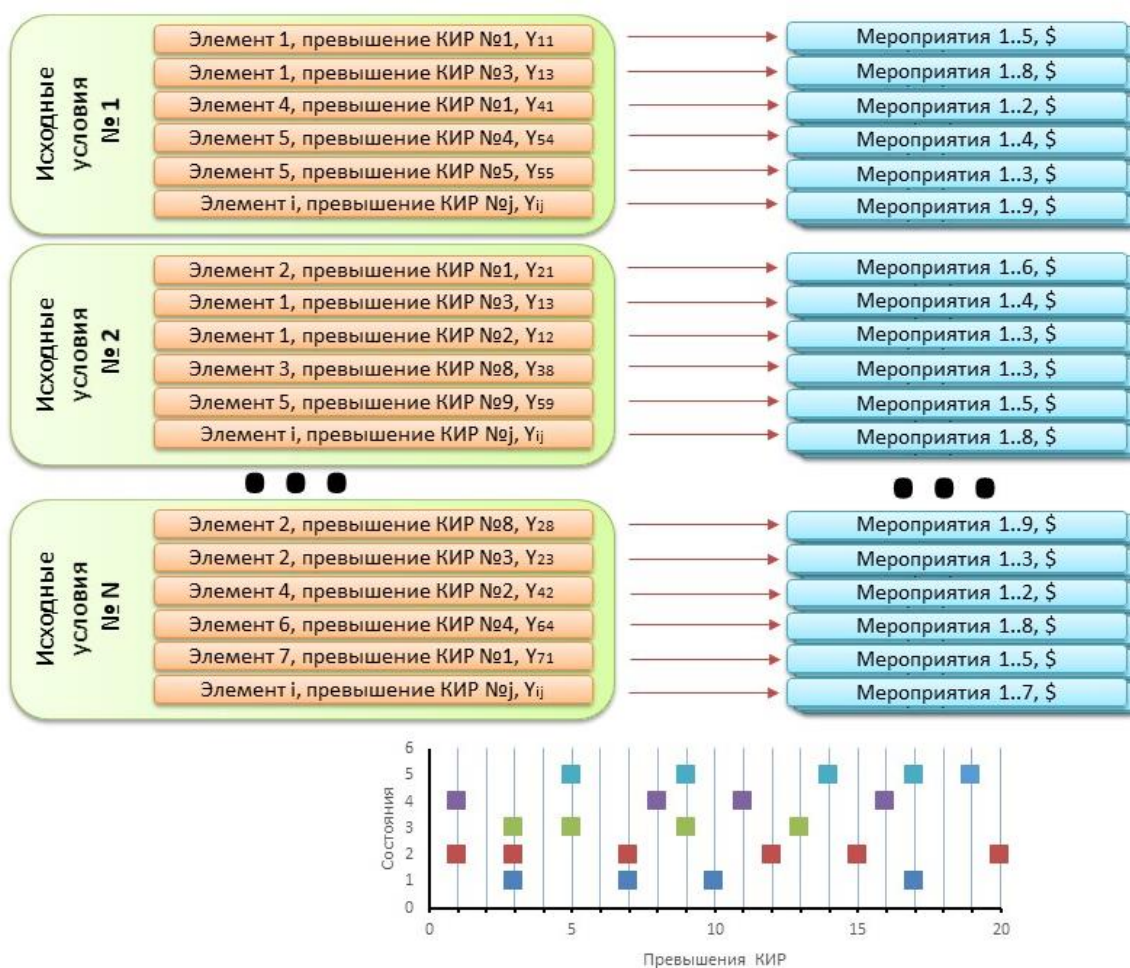


Рисунок 4. Анализ превышений ключевых индикаторов риска

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

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

Величины ущерба на момент реализации мероприятий определяются по сметам, 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.

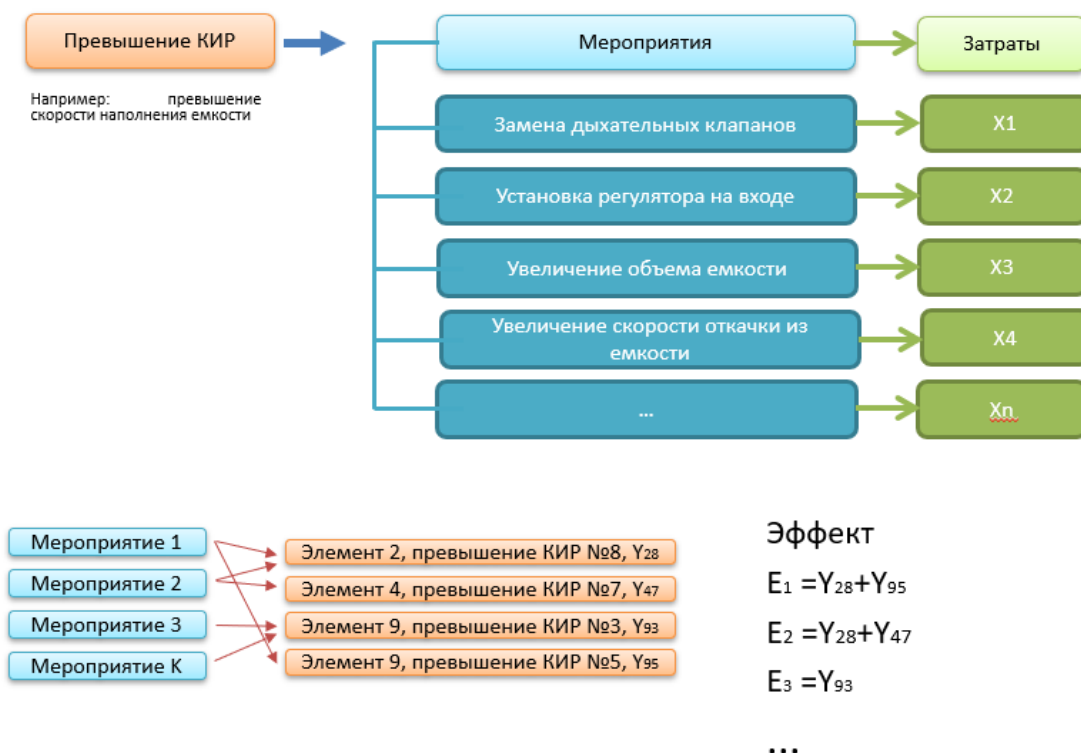


Рисунок 5. Анализ мероприятий по сокращению ущерба и определение эффекта от них

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 (см. рис. 5). Тогда присваиваемый эффект, например, предотвращенный ущерб, суммируется при сохранении затрат на это мероприятие, тем самым

резко повышая «рентабельность» этого мероприятия.

Перебираем варианты, снижающие ущерб (вероятность и последствия) от реализации события (см. рис. 6). Базовый и первый вариант – минимальные затраты на предотвращение ущерба только в месте возникновения (это крайняя левая точка на графике, рис. 6).

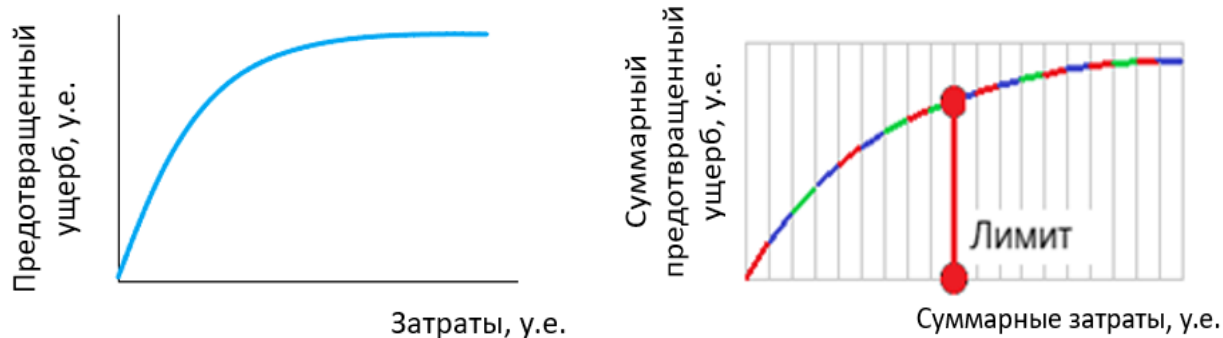


Рисунок 6. Ранжирование мероприятий

Далее рассматриваются более дорогие, но и более эффективные (снижение вероятности, снижение ущерба) типовые мероприятия сначала в самом элементе – причине риска [4] (см. табл. 1). 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.

Таблица 1
Пример расчетного множества для анализа

№ 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

Далее проводим поэлементную сортировку мероприятий по соотношению *Эффект/Затраты*, а затем рассматриваем множество всех мероприятий как систему, в которой каждый шаг по затратам приводит к росту эффекта. Так как эти пара-

метры отсортированы, мы можем варьировать общий план мероприятий, сопоставляя его с теми или иными лимитами по общим затратам (см. табл. 2).

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

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

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

Таблица 2

Пример сводной таблицы с лимитированными планами

Рент.	Элемент	Меропр.	Затраты	Общ. затр.	Эффект	Общ. эффект	Меропр.	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) Ф (3,5) (1,6) (3,4)

В результате мы получаем достаточно подробный план мероприятий по сокращению рисков, 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.

Функционирование реальных человеко-машинных систем нефтегазовых объ-

ектов приводит в конечном счете к реальной статистике аварийности, по факту недостаточной для научных прогнозов. Решать поставленную задачу предлагается на основе функционирования человеко-машинной системы вида «Объект – Специалист», где в качестве объекта выступает тренажер, а в качестве специалиста выступает информационная модель готовности [5] (см. рис. 7). Таким образом, можно замещать отсутствующие по объективным причинам данные о реальной готовности персонала моделью этих данных, полученных в результате работы специалистов на тренажере.

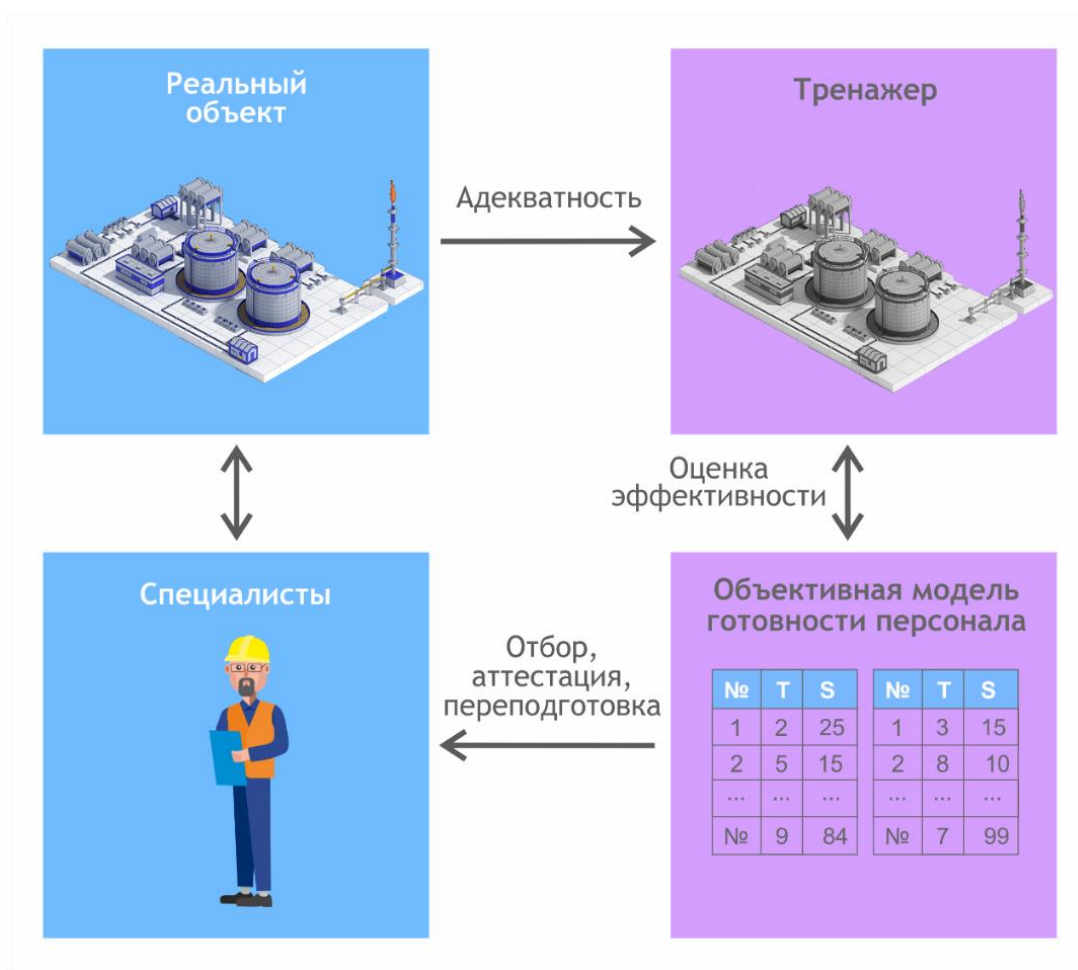


Рисунок 7. Формализация мероприятий, связанных с человеческим фактором, на основе функционирования человеко-машинной системы вида «Объект – Специалист»

Если специалист совершает ошибки на тренажере, то в реальности именно он будет «слабым звеном», поэтому задачей тренажерной подготовки в рамках предлагаемой методологии является построение объективной модели надежности (готовности) специалиста. Один из важнейших результатов предлагаемого подхода – прогнозирование времени, требуемого для исключения ошибок по всем видам заданий как минимум в условиях тренажера индивидуально для каждого специалиста.

Основой такой методологии является проектирование тренингов, отбор наиболее эффективных по выбранному критерию с учетом ограниченности времени обучения, повторение тренингов с возможностью последующего анализа пра-

вильных и неправильных действий с одновременной фиксацией результатов и динамики их улучшения.

В задачах построения тренажеров управление процессом тренировки предложено осуществлять с использованием эталонных алгоритмов деятельности операторов при ведении нормальных и аварийных режимов. Эталонные алгоритмы деятельности формируются на базе описания оперативной деятельности операторов путем достаточно глубокого и всестороннего анализа различных ветвей так называемого графа деятельности.

Для задач проектирования тренажера такая тема, или «эталонный алгоритм», может быть описана с использованием «дерева событий», каждая «ветка»

которого может зависеть от поведения обучаемого и подчиняться правилам развития так называемого «сценария» (см. рис. 8). В

терминах проектирования тренажера такой отдельный эпизод имеет отображение в виде единичного тренинга.

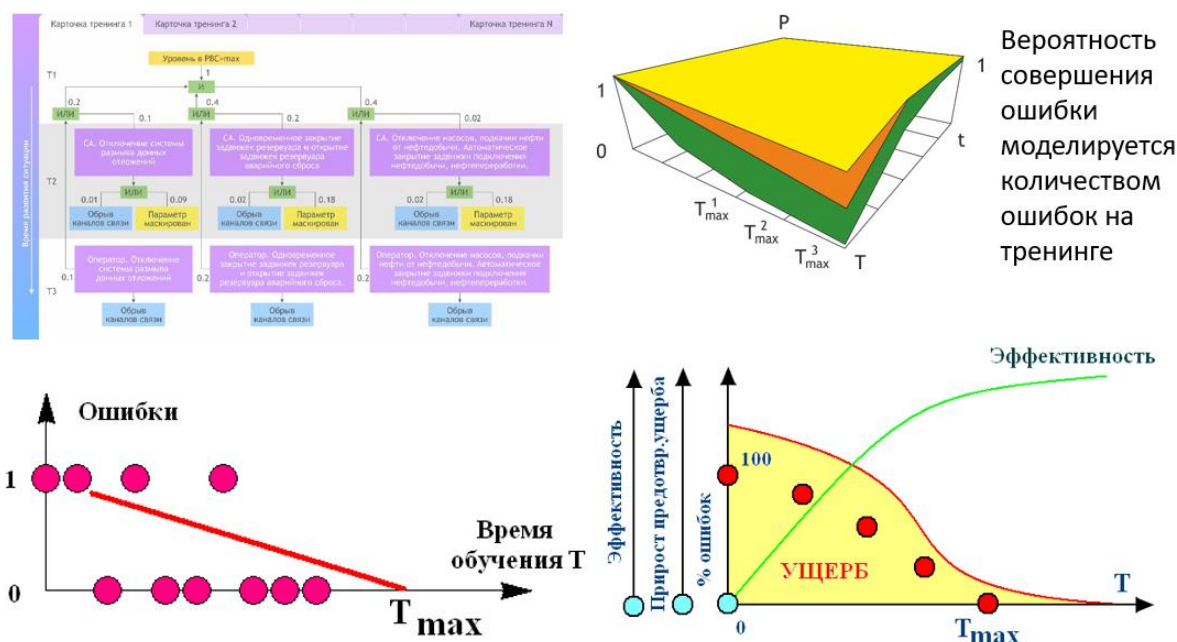


Рисунок 8. Оценка эффективности тренажерной подготовки на основе эталонных алгоритмов, описанных с использованием дерева событий

Задача тренинга – правильно диагностировать ситуацию и совершить ряд правильных действий. Тренинги повторяются сериями и фиксируется важный показатель – динамика снижения ошибок и прогноз времени прекращения ошибок T_{max} по каждому виду тренинга.

Для количественной оценки надежности персонала и риска возникновения аварийной ситуации вводится понятие вероятности совершения ошибки специалистом. Назначение тренажера при таком подходе – максимально снизить вероятность совершения обучаемым специалистом ошибки по каждому эпизоду или теме из всего множества действий в поле профессиональной деятельности. Соответственно, задачей системы тренингов является проведение единичных тренингов по каждой теме из полного списка до полного исключения ошибок.

Впервые дано определение эффективности тренинга как интеграла от удельной величины вероятного ущерба. Эта

удельная величина, в свою очередь, зависит от времени обучения и экспертной оценки значимости темы для промышленной безопасности. Данная величина может быть определена экспериментально и поддается статистической оценке.

Она может служить основой алгоритмов для научно обоснованного проектирования системы повторяющихся тренингов разного типа. Так могут быть построены индивидуальные планы обучения и групповые курсы в учебных центрах.

Каждому виду тренинга присваивается вес по методу экспертных оценок (ошибка, приводящая к взрыву резервуара, весит больше, чем ошибка, приводящая к поломке клапана). К концу обучения T_{max} по отдельному виду тренинга этот вес переходит в разряд «предотвращенного ущерба». По всем видам тренингов такой предотвращенный ущерб является мерой эффективности тренажерной подготовки. Имея такие данные, можно анализировать

индивидуальные данные и определять уровень готовности специалиста, по групповым данным строить наиболее эффективные курсы в пределах ограниченного времени (оптимальное множество тренингов), проводить функционально-стоимостный анализ технических средств тренажеров и давать научно обоснованные рекомендации по их оптимальному составу.

Разработанные методики и алгоритмы применялись при проектировании установок ДКС и УПГД ООО «Крус-Запад» при разработке проектной документации. Что позволило проанализировать конструктивные особенности и выработать подход к функциям системы противоаварийных защит.

Методология количественной оценки готовности и эффективности персонала на основе тренажерной подготовки применяется в разработках компьютерных тренажерных комплексах ряда компаний и внедрена в различные нефтегазовые вузы России.

Было разработано программное обеспечение DMPipe, включающее в себя конструктор математической модели, с технологическими элементами, применяемыми в УПН, для которых были определены КИР и мероприятия по предотвращению ущерба.

Литература

1. Озден И. В. и др. Совершенствование условий безопасности и охраны труда на производственных объектах // Техносферная безопасность. 2018. № 4 (21). С. 158–164.
2. Дьяков А. Ф. и др. Оценка противоаварийных тренировок оперативно-диспетчерского персонала энергосистем // Электрические станции. 1997. № 2. С. 2–7.
3. Мугаллимов Ф. М., Кудрявцев А. А. Инновационные разработки в области технических средств обучения специалистов трубопроводного транспорта // Нефтегазовое дело. 2013. № 4. С. 475–487.
4. Кудрявцев А. А. и др. Оптимизация системы тренингов операторов нефтеперерабатывающих установок с использованием тренажера «ЭЛОУ-АВТ» // Мат. III Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2020.
5. Хафизов И. Ф. и др. Модель обучаемого в имитационных тренажерных комплексах для обучения оперативного персонала объектов нефтегазового сектора // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2016: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию филиала. Уфа, 2016. С. 369–374.

References

1. Ozden I. V. i dr. Sovershenstvovanie uslovij bezopasnosti i ohrany truda na proizvodstvennyh obektah // Tehnosfernaya bezopasnost. 2018. № 4 (21). S. 158–164.
2. Dyakov A. F. i dr. Ocenka protivooavarijnyh trenirovok operativno-dispatcherskogo personala energosistem // Elektricheskie stancii. 1997. № 2. S. 2–7.
3. Mugallimov F. M., Kudryavcev A. A. Innovacionnye razrabotki v oblasti tehniceskikh sredstv obucheniya specialistov truboprovodnogo transporta // Neftegazovoe delo. 2013. № 4. S. 475–487.
4. Kudryavcev A. A. i dr. Optimizaciya sistemy treningov operatorov neftepererabatyvayushih ustanovok s ispolzovaniem trenazhera «ELOU-AVT» // Mat. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ufa, 2020.
5. Hafizov I. F. i dr. Model obuchaemogo v imitacionnyh trenazhernyh kompleksah dlya obucheniya operativnogo personala obektov neftegazovogo sektora // Sovremennye tehnologii v neftegazovom dele – 2016. Ufa, 2016. S. 369–374.