



На правах рукописи

ЛУЗГАЧЕВА Надежда Валерьевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ БЕЗОПАСНОСТИ
ВЗРЫВО- И ПОЖАРООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ В
РЕГИОНАЛЬНОЙ ПРИРОДО-ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЕ**

Специальность 05.13.01

«Системный анализ, управление и обработка информации
(информационные технологии)»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

ТАМБОВ 2013

Работа выполнена на кафедре «Природопользование и защита окружающей среды» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»)

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ
Попов Николай Сергеевич

Официальные оппоненты:

Егоров Александр Федорович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в химической технологии» ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»

Кудинов Юрий Иванович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика» ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»

Ведущая организация

ОАО «Корпорация «Росхимзащита»

Защита состоится 5 декабря 2013 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 160.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ». Автореферат диссертации размещен на официальных сайтах ФГБОУ ВПО «ТГТУ» <http://www.tstu.ru> и ВАК Минобрнауки РФ <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан 2 ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Сергей Яковлевич Егоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последние десятилетия с ростом промышленного производства значительно увеличилось и количество техногенных аварий разного масштаба, влекущих за собой человеческие жертвы, материальные потери и экологический ущерб. В настоящее время в Российской Федерации функционирует свыше 3300 объектов экономики, располагающих значительными количествами опасных химических веществ; из них 70% находятся вблизи крупных городов. Вследствие этого в зоне возможного химического поражения оказываются свыше 44 млн человек. По данным МЧС России прямой ущерб от всех видов чрезвычайных ситуаций составляет свыше 100 млрд р. в год, а с учетом косвенного ущерба он может достигать 3% валового внутреннего продукта страны. На государственном уровне проблема экологической безопасности отнесена к приоритетным направлениям «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года». Ее решение отвечает интересам устойчивого развития экономики, природы и общества. Это направление исследований также закреплено в п.21 Перечня критических технологий Российской Федерации (утвержден Указом Президента РФ №899 от 7 июля 2011 г.).

В нашей стране необходимость решения проблем экологической и промышленной безопасности научно обосновал академик В. А. Легасов. Большой вклад в решение задач безопасности с применением кибернетических методов и методологии системного анализа внесли академик В. В. Кафаров и его ученики – профессора В. Л. Перов, А. Ф. Егоров, В. П. Мешалкин, Б. В. Палюх, Т. В. Савицкая. Оценке уровня риска химических аварий при хранении и переработке боеприпасов посвящены работы В. М. Колодкина. Развитию теоретических основ экологической безопасности и методов оценки аварийного риска на химических предприятиях посвящены работы профессора В. Г. Горского. Хорошо известны своими работами и зарубежные ученые – Н. Расмуссен, В. Маршалл, Э. Хенли, Д. Химмельблау.

Руководствуясь современной концепцией «приемлемого риска», основу которой составляет принцип «предвидеть и предупредить», безопасность потенциально опасных производств необходимо анализировать и обеспечивать на всех этапах их жизненного цикла: проектирования, строительства, нормального функционирования, реконструкции, консервирования и ликвидации. При этом важнейшая роль в разработке и реализации систем безопасности отведена экспертизе. По ее результатам принимают решения проектанты, строители, специалисты-эксплуатационники, ликвидаторы аварий. Сложность проведения экспертизы в практическом плане заключается в том, что эта сфера деятельности людей относится к категории высокоинтеллектуальных, основанных на глубоких профессиональных знаниях проблемы, где опыт и интуиция экспертов выполняют «сторожевую» и «эволюционную» функции в формировании решений. Однако, выбор экспертов по безопасности опасных промышленных объектов (ОПО) в реальной ситуации оказывается весьма затруднительным по целому ряду причин: отсутствия необходимых знаний об ОПО; сложности состава ОПО; множественности анализируемых переменных состояния; наличия разнородных физико-химических, технологических и иных характеристик ОПО; недостатка информации о внутреннем содержании процессов производства и их функциональных особенностях; индивидуальности каждого конкретного ОПО.

Возможным выходом в такой ситуации является разработка специального методического и программного обеспечения процесса экспертизы и его реализация в виде информационной системы поддержки принятия решений с элементами искусственного интеллекта (экспертной системы).

Настоящее исследование проводилось в соответствии с планами работ по научным проектам:

- пилотного проекта базовой системы обеспечения химической безопасности и социально-гигиенического мониторинга в крупных административно-промышленных центрах, адресованного Управлению по надзору в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, Управлению Верхне-Донского округа и Администрации Тамбовской области.

- программы НИОКР конкурса У.М.Н.И.К. при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Договор № 3 от 31.07.2012).

Тематика работы соответствует пунктам 2 – 5, 10, 11, 13 паспорта специальности.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является состояние промышленной безопасности в региональном природо-промышленном комплексе.

Предмет исследования – система принятия решений по вопросам промышленной безопасности на этапах проектирования, анализа или аудита действующих потенциально опасных производств.

Цели и задачи исследования. Цель работы – разработка методики проектирования экспертной системы оценки безопасности ОПО, входящих в состав регионального природо-промышленного комплекса, и ее программная реализация.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены научные задачи:

- анализа современного состояния теории безопасности как науки, ее возможностей при создании систем защиты ОПО от внутренних и внешних угроз;

- формализации базовых понятий теории безопасности, необходимых при разработке экспертной системы;

- описания потенциально опасных природо-промышленных систем (ПО ППС) и региональных природо-промышленных комплексов как объектов экологической безопасности;

- формализации задачи оптимального управления природо-промышленным комплексом на множестве состояний функционирования ОПО;

- проектирования экспертной системы (ЭС);

- программной реализации информационной системы оценки уровня пожаро- и взрывоопасности ОПО;

- проверки результатов работы ЭС на чувствительность к методическим погрешностям.

Научная новизна исследования.

1. Задачи экспертизы безопасности потенциально опасных производств решены для класса систем, именуемых природо-промышленными (ППС).

2. Предложена методика синтеза региональной ППС из элементов тропосферы, гидросферы, педосферы и промышленной технологии.

3. Поставлена задача оптимального управления ППС на множестве состояний функционирования ОПО, оценка которых является объектом экспертизы.

4. Проведен семантический анализ базовых понятий теории безопасности, по итогам которого предложено использовать в ЭС их соответствующее математическое описание.

5. Разработана методика проектирования экспертной системы идентификации и оценки безопасности ОПО.

6. Предложена процедура передачи знаний от эксперта в компьютерную программу.

7. Разработан метод оценки «устойчивости» принятых штрафных баллов за отклонение характеристик ОПО от нормативов средствами имитационного моделирования.

Практическая значимость исследования.

Разработано методическое обеспечение экспертизы безопасности взрыво- и пожароопасных объектов в региональной ППС.

Создано программное обеспечение экспертной системы идентификации и оценки безопасности ОПО.

Проведено комплексное обследование двух потенциально опасных производств Тамбовской области в целях сбора и обработки информации и разработки сценария для проведения экспертизы безопасности.

Разработана инструкция по использованию рекомендаций компании Dow в экспертизе ОПО.

Апробация работы.

Программное обеспечение экспертной системы было апробировано на двух спирт-заводах ОАО «Талвис», названных в диссертации «новым» и «старым».

Предложены меры по снижению уровня их пожаро- и взрывоопасности.

Дана оценка экономической целесообразности принятых мер по повышению технологической безопасности производств.

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе шесть статей в журналах из перечня ВАК и одна монография.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 132 наименований и 4 приложений. Диссертация содержит 224 страницы текста, 61 рисунок и 23 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы, поставлены задачи, решение которых позволяет достичь цели исследования.

В **первой главе** содержится критический анализ современного состояния теории безопасности как науки на предмет поиска путей ее применения в классе потенциально опасных природо-промышленных систем. Принцип «безопасность через развитие» отмечен в качестве ведущего принципа разработки и реализации стратегии устойчивого развития России.

Анализ методологических особенностей теории безопасности показал, что они тесным образом связаны с системным подходом, теорией устойчивости, теорией катастроф, теорией управления, теорией надежности и теорией вероятностей (см. рис. 1). Ядром симбиоза знаний этих теорий стала теория безопасности, предназначенная для решения научных задач:

- анализа устойчивости и структурной целостности объектов исследования;
- изучения условий стабильности процессов и свойств материалов, определяющих жизнеспособность объектов исследования;
- моделирования поведения объектов исследования в условиях неопределенности и чрезвычайных ситуаций;

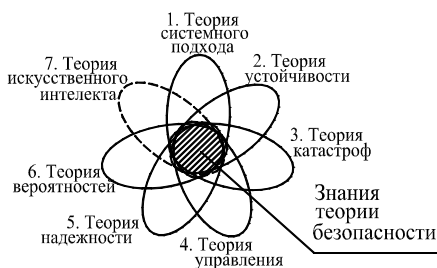


Рис. 1. Формирование области знаний теории безопасности как науки

– синтеза систем защиты объектов исследования от возникновения в процессе их функционирования критических состояний и нежелательных режимов работы с разрушительными или тяжелыми последствиями как для самих объектов, так и для их окружения.

Одно из продуктивных направлений развития фундаментальных исследований в теории безопасности должно быть связано с созданием информационных систем поддержки принятия решений с элементами искусственного интеллекта в сфере безопасности ОПО и экспертных систем оценки безопасности ОПО.

В главе I также установлено, что на сегодня теория безопасности обладает недостаточно совершенным понятийно-терминологическим аппаратом, использование которого весьма затруднительно при решении практических задач. Семантический анализ таких базовых определений как «безопасность», «промышленная безопасность» и «пожарная безопасность» привел к заключению о том, что они расплывчаты; существующие в них различия носят ведомственный характер и не способствуют пониманию того, каким образом «диагностировать» безопасность объектов, и, тем более, как ее обеспечивать. Например, в законе РФ «О безопасности» № 2446-1 от 5.03.1992 г. дано определение безопасности как состояния защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз. Поводом для критики в этом определении является следующее:

1. Под «состоянием» обычно понимается мгновенное отображение характеристик объекта в текущий или заданный момент времени. В реальности эти состояния постоянно меняются, т.е. мы всегда имеем дело с процессом. Зная характеристики этого процесса, можно прогнозировать его поведение в будущем.

2. Фраза «жизненно ...личности, общества и государства» становится конструктивной лишь в случае задания конкретных значений «параметров», обеспечивающих безопасность этих трех объектов (например, нормативов ПДК, предельных силовых нагрузок, сроков службы оборудования и т.д.).

3. Неясно, что понимать под словами «состояние защищенности» и как это состояние определять на практике, чем оно отличается от других возможных состояний – безразличия, нечувствительности или незащищенности от внутренних и внешних угроз. Другими словами, в указанном определении нет и намек на некую «границу» защищенности и на необходимость ее определения.

Логика семантического анализа термина «безопасность» показана на рис. 2.

Эта логика позволила выявить необходимость в знании состава и уровня внутренних и внешних угроз; в количественном выражении границ интересов личности, общества и государства через принятые для этого нормативы; в проверке условия «защищенности» через сравнение текущего состояния объекта с «критическим» или

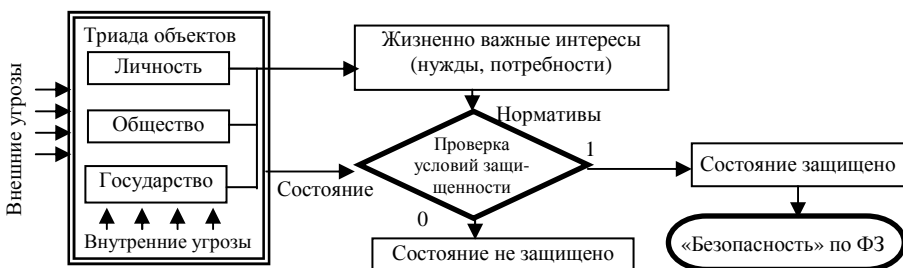


Рис. 2. Смысловой анализ термина «безопасность»

граничным (нормативным). Все пространство состояний объектов необходимо разбить на два непересекающихся подмножества состояний типа: «защищенное» и «незащищенное», с ясно определенной границей между ними. Только в таком случае возможно использование определения «безопасность» для решения практических задач.

Учитывая недостатки и в других терминах теории безопасности, в диссертации предложено математическое описание понятий «безопасность», «угроза», «риск» и «инцидент», что делает их однозначными, конструктивными в инженерном плане, и они могут использоваться при проектировании систем защиты, конструировании ЭС и т.д.

Во второй главе предложена методика сопряжения элементов региональной природо-промышленной системы и проводится ее анализ как объекта защиты от опасностей и угроз. На рисунке 3 приведена структура системы обеспечения региональной технико-экономической безопасности, в которой важнейшее значение имеют блоки IV и V. Их рассмотрение относится к основным целям диссертации.

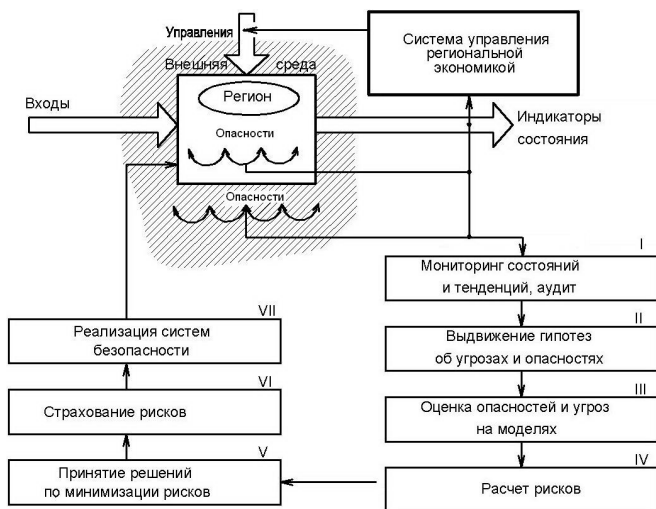


Рис. 3. Система обеспечения региональной безопасности

В формализованном виде модель региона представим в виде шестерки множеств:

$$\langle S_{\text{ППС}}, V(S_{\text{ППС}}), R, V^A, V^{\Pi}, V^H \rangle,$$

где $S_{\text{ППС}}$, $V(S_{\text{ППС}})$ – соответственно множества ППС в регионе и внутренних связей; R – множество операторов соединения $S_{\text{ППС}}$; V^A , V^{Π} , V^H – множества активных, пассивных и нейтральных контактов. Оператор R имеет вид

$$k_{y_g}^{(e)} = R(k_{x_i}^{(j)}),$$

с областью определения на множестве K_{x_i} и областью значений на множестве

$\bigcup_{g=0}^n K_{y_g}$, сопоставляющей j -му входному контакту i -го элемента e -й выходной контакт

g -го элемента ($g = \overline{0, n}$).

Структуру ПО ППС представим в виде соединения промышленной S_{Π} и экологической $S_{\mathcal{O}}$ подсистем (рис. 4). В состав S_{Π} входят ОПО.

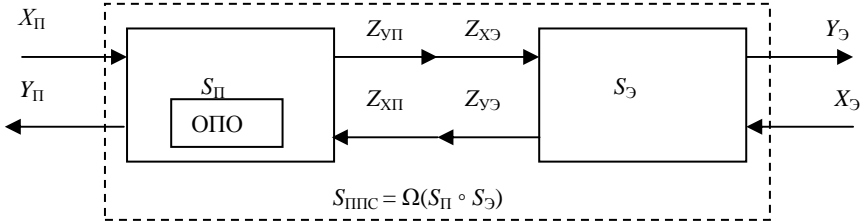


Рис. 4. Структура ППС

На рисунке X_{Π} , $Z_{X\Pi}$, $X_{\mathcal{O}}$ и $Z_{X\mathcal{O}}$ – соответственно входные, а Y_{Π} , $Y_{\mathcal{O}}$, $Z_{Y\Pi}$ и $Z_{Y\mathcal{O}}$ – выходные переменные. В записи $S_{\text{ППС}}$ символ \circ означает операцию последовательного соединения подсистем, а Ω – операцию замыкания обратной связи.

В главе II рассмотрены характерные особенности нового класса потенциально опасных природо-промышленных систем.

Допуская функциональное описание подсистем S_{Π} и $S_{\mathcal{O}}$, в диссертации показано, что модель $S_{\text{ППС}}$ можно записать в виде:

$$\begin{cases} y_{\Pi} = F_1(h)(r_{\Pi}, u_{\Pi}, z_{Y\mathcal{O}}^A, z_{Y\mathcal{O}}^B); & z_{Y\Pi} = F_2(h)(r_{\Pi}, u_{\Pi}, z_{Y\mathcal{O}}^A, z_{Y\mathcal{O}}^B); \\ y_{\mathcal{O}}^A = \Phi_1(h)(u_{\mathcal{O}}, r_{\mathcal{O}}, z_{Y\Pi}, y_{\mathcal{O}}^B); & y_{\mathcal{O}}^B = \Phi_2(h)(u_{\mathcal{O}}, r_{\mathcal{O}}, z_{Y\Pi}, y_{\mathcal{O}}^A); \\ z_{Y\mathcal{O}}^A = \Phi_3(h)(u_{\mathcal{O}}, r_{\mathcal{O}}, z_{Y\Pi}, z_{Y\mathcal{O}}^B); & z_{Y\mathcal{O}}^B = \Phi_4(h)(u_{\mathcal{O}}, r_{\mathcal{O}}, z_{Y\Pi}, z_{Y\mathcal{O}}^A), \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{\mathcal{O}} \in U_{\mathcal{O}}$, $r_{\mathcal{O}} \in R_{\mathcal{O}}$ – соответственно управляемые и наблюдаемые входные переменные в $S_{\mathcal{O}}$; $u_{\Pi} \in U_{\Pi}$, $r_{\Pi} \in R_{\Pi}$ – управляемые и наблюдаемые входные переменные в S_{Π} ; $y_{\mathcal{O}}^A$ и $y_{\mathcal{O}}^B$ – соответственно абиотические и биотические выходные переменные в $S_{\mathcal{O}}$; $z_{Y\Pi}$, y_{Π} – выходные переменные в S_{Π} ; $z_{Y\mathcal{O}}^A$ и $z_{Y\mathcal{O}}^B$ – выходные абиотические и биотические переменные в $S_{\mathcal{O}}$, воздействующие на S_{Π} .

Задача оптимального управления ПО ППС в условиях частичных разрушений ОПО ставится следующим образом: будем считать заданным конечное множество H возможных альтернативных структур ОПО, входящих в состав S_{Π} . Смена состояния $h \in H$ в ОПО приводит и к смене операторов $F_1(h)$, $F_2(h)$, $\Phi_1(h)$... $\Phi_4(h)$, описывающих поведение $S_{\text{ППС}}$.

Будем считать, что $u_{\mathcal{O}}$, $r_{\mathcal{O}}$, u_{Π} , r_{Π} , $y_{\mathcal{O}}^A$, $y_{\mathcal{O}}^B$, $z_{Y\Pi}$, y_{Π} , $z_{Y\mathcal{O}}^A$, $z_{Y\mathcal{O}}^B$ принадлежат к конечномерным векторным евклидовым пространствам $U_{\mathcal{O}}$, $R_{\mathcal{O}}$, U_{Π} , R_{Π} , $Y_{\mathcal{O}}^A$, $Y_{\mathcal{O}}^B$, $Z_{X\Pi}$, Y_{Π} , $Z_{Y\mathcal{O}}^A$, $Z_{Y\mathcal{O}}^B$ соответственно.

Систему планово-технических требований и ограничений на технологические параметры и управляющие воздействия определим в виде

$$F(r_{\Pi}, y_{\Pi}, u_{\Pi}) \geq 0; \quad G(z_{Y\Pi}) \geq 0; \quad E(y_{\mathcal{O}}^A, y_{\mathcal{O}}^B, r_{\mathcal{O}}) \geq 0, \quad (2)$$

$$u_{\Pi} \in u_{\Pi}(r_{\Pi}) \subseteq U_{\Pi}, \quad u_{\mathcal{O}} \in u_{\mathcal{O}}(r_{\mathcal{O}}) \subseteq U_{\mathcal{O}}.$$

Будем считать, что каждому элементу множества H альтернативных структур $S_{\text{ППС}}$ поставлена в соответствие мера $p(h)$ – вероятность появления структуры $h \in H$. Определим частную целевую функцию как отображение:

$$Q : Y_{\Pi} \times U_{\Pi} \times R_{\Pi} \times Y_{\Xi}^A \times Y_{\Xi}^B \times U_{\Xi} \rightarrow L, \quad (3)$$

где L – множество, в общем случае упорядоченное отношением « \geq ».

Обозначая частную целевую функцию при фиксированном $h \in H$ в виде $Q_h(u_{\Pi}, u_{\Xi}, r_{\Xi})$, имеем

$$Q_h(u_{\Pi}, u_{\Xi}, r_{\Pi}) = Q(y_{\Pi}, u_{\Pi}, r_{\Pi}, y_{\Xi}^A, y_{\Xi}^B, u_{\Xi}). \quad (4)$$

Целевую функцию J , численно оценивающую эффект действия управлений u_{Π}, u_{Ξ} с учетом вероятности различных альтернативных структур, можно представить в виде

$$J(u_{\Pi}, u_{\Xi}, r_{\Pi}) = \sum_{h \in H} Q_h(u_{\Pi}, u_{\Xi}, r_{\Pi}) p(h). \quad (5)$$

В таком случае задачу управления $S_{\text{ППС}}$ сформулируем следующим образом.

Для заданных r_{Π} и r_{Ξ} найти такие значения управляющих воздействий $u_{\Pi}^* \in u_{\Pi}(r_{\Pi}) \subseteq U_{\Pi}$ и $u_{\Xi}^* \in u_{\Xi}(r_{\Xi}) \subseteq U_{\Xi}$, при которых для каждого $h \in H$ выполняются условия и ограничения (1), (2), и для всех $u_{\Pi} \in U_{\Pi}$ и $u_{\Xi} \in U_{\Xi}$, при которых для каждого $h \in H$ справедливы (1), (2), имеет место

$$J(u_{\Pi}^*, u_{\Xi}^*, r_{\Pi}) \geq J(u_{\Pi}, u_{\Xi}, r_{\Pi}). \quad (6)$$

Оценка вероятностей $p(h)$ позволяет найти оптимальные управляющие воздействия, при которых достигает максимума ожидаемое и усредненное по вероятности возникновения альтернативных структур ОПО значение целевой функции. Значения $p(h)$ находятся в результате проведения экспертизы ОПО.

Третья глава посвящена созданию экспертной системы (ЭС) оценки техногенных опасностей на этапах проектирования, анализа и аудита ОПО. Основой для методики создания ЭС являются исходные данные, гипотезы и эмпирические правила.

В диссертации предложено ввести оператор ES , отражающий смысл работы ЭС. Он имеет следующее отображение:

$$ES : X \times N \times P(X, N) \times \Xi \rightarrow I, \quad (7)$$

где X – множество данных; N – множество знаний; $P(X, N)$ – множество правил, процедур или операций с базами данных и знаний; Ξ – множество факторов неопределенности, влияющих на качество работы ЭС; I – множество итоговых оценок, выводов или резолюций эксперта, понятных пользователю ЭС; \times – знак декартова произведения.

Действие оператора ES заключается в отображении множества возможных состояний ОПО, характеризующихся упорядоченными наборами данных и знаний, в множество экспертных оценок. Знания задаются в виде продукционных правил <ЕСЛИ (условие) ТО (действие)>, функций принадлежности, функциональных зависимостей. Оператор ES обеспечивает перенос опыта эксперта в компьютерную программу. Поэтому способ конструирования ES следует рассматривать как методику проектирования экспертной системы.

Экспертную систему оценки уровня пожаро- и взрывоопасности объектов сконструируем следующим образом. Образует вектор \mathbf{x} , компоненты которого характеризуют объекты экспертизы O_i из опросного листа, составленного на предварительном этапе работы с ОПО. Компоненты вектора \mathbf{x} могут быть количественными или качественными.

Для учета свойств вектора \mathbf{x} разобьем его на три подвектора: $\mathbf{x} = \mathbf{x}[\mathbf{x}_1 : \mathbf{x}_2 : \mathbf{x}_3]$. И пусть компоненты \mathbf{x}_1 характеризуют свойства ОПО, способные увеличить размер убытков при наступлении неблагоприятного события, компоненты \mathbf{x}_2 характеризуют свойства, увеличивающие вероятность возникновения пожара или взрыва, а \mathbf{x}_3 – энергетические потенциалы горючих или взрывчатых веществ. Так, например, для i -й компоненты \mathbf{x}_1 x_i – реакция окисления, а x_{i+1} – температура смеси. Для k -й компоненты \mathbf{x}_2 x_k – давление, превышающее атмосферное, а x_{k+d} – наличие смотрового стекла в аппарате. Для j -й компоненты \mathbf{x}_3 x_j – количество горючей смеси конкретных веществ, а x_{j+f} – объем взрывоопасного газа. В плане конструирования ES \mathbf{x} – это факты или данные, необходимые при описании состояния безопасности объекта экспертизы.

Структуру оператора ES представим в двухзвенном виде: штрафной функции (ШФ) за отклонения переменных \mathbf{x} от нормативных значений и результирующей функции (РФ), интерпретирующей значения штрафов в составе экспертного заключения (см. рис. 5).

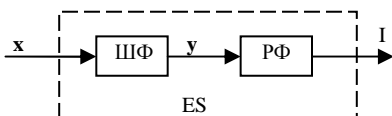


Рис. 5. Структура оператора ES

Выдвигаем гипотезу о том, что штрафной функцией объекта экспертизы O_i , $i = \overline{1, k}$, является функция

$$y_i = g_i(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad i = \overline{1, k},$$

где y_i – реакция эксперта на значения компонент x_1, x_2, \dots, x_m вектора \mathbf{x} . Функция g многих переменных обычно нелинейная. В окрестности точки экспертизы» M (точка M – это своего рода граница, от которой не должны отклоняться действительные значения характеристик объекта O_i) функцию g можно аппроксимировать линейной моделью при малых отклонениях независимых переменных. Если g является аналитической, тогда в окрестности точки M с координатами $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ она может быть разложена в ряд Тейлора:

$$y = g(x) = g(X) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial g}{\partial x} \bigg|_M (x_i - X_i). \quad (8)$$

Значения $p_{ji} = \frac{\partial g_j}{\partial x_i} \bigg|_M$, $j = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$, являются не только коэффициентами пе-

редачи информации, вычисляемыми по частным производным, но также и правилами работы с фактами и знаниями $P(X, N)$ в (7), поскольку Δx_i это факты нарушений, а функция g несет в себе знания о том, как их интерпретирует эксперт.

Итак, при малых отклонениях вблизи M система уравнений линеаризованной модели действий эксперта в векторной форме имеет вид

$$\Delta y = P \Delta x, \quad (9)$$

где матрица P является Якобианом.

Если аналитический вид функции g неизвестен, то тогда возможно ее задание в табличной форме, либо с помощью правил продукции искусственного интеллекта.

Результирующую функцию в структуре оператора ES построим на основе эвристического правила, отвечающего цели рассматриваемой экспертной системы.

Таким правилом может быть аналог закона действующих масс. В итоге, меру опасности конкретного элемента процесса в ОПО представим в записи

$$I = R \sum_{i=1}^n \Delta y_i^1 \sum_{j=1}^k \Delta y_j^2, \quad (10)$$

где $\sum \Delta y_i^1$ и $\sum \Delta y_j^2$ – суммы штрафных баллов, наложенные экспертом за нарушение предписанных нормативов компонентами векторов \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 соответственно; R – количественная мера опасности химического вещества в ОПО.

Структурная схема спроектированной ЭС показана на рис. 6.



Рис. 6. Архитектура экспертной системы

Основной проблемой построения ЭС является процедура передачи знаний от некоторого информационного источника (эксперта) в компьютерную программу. Выделим четыре категории потенциально опасных элементов ОПО x_i^j :

$i = 1$: «точечные» лингвистические переменные x^1 ;

$i = 2$: «пространственные» переменные $x^2(\epsilon, \xi, \eta)$;

$i = 3$: «нестационарные» переменные $x^3(t_i)$;

$i = 4$: «распределенные» лингвистические переменные $x^4(\epsilon, \xi, \eta, t)$, являющиеся обобщением объектов $i = 1, 2, 3$.

Последовательность экспертизы объектов O_i показана на рис. 7.

Инженер по знаниям разрабатывает и реализует сценарий интерактивной работы с экспертом (с помощью опросников, интервьюирования, мозгового штурма и других приемов). По этому сценарию все объекты O_i , $i = 1, k$ последовательно анализируются экспертом в целях сообщения о них полезных для ЭС знаний – например свойств и отношений с другими объектами.

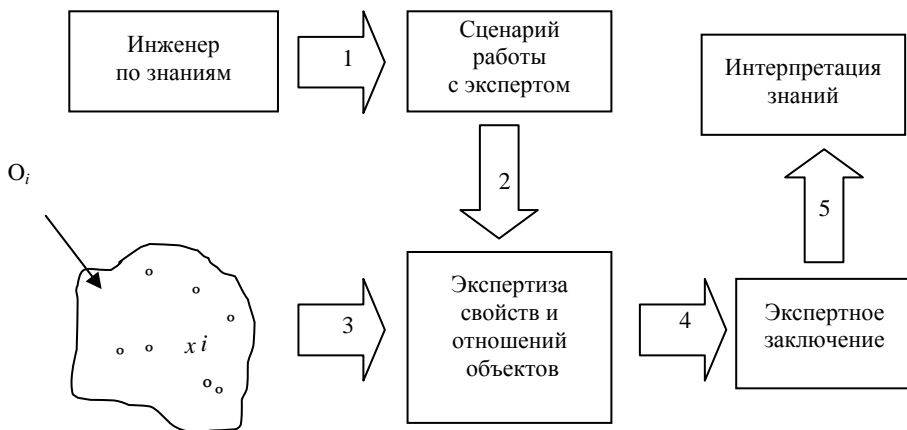


Рис. 7. Организация процедуры считывания знаний эксперта

По результатам экспертизы выдается заключение, смысловые элементы которого инженер по знаниям формализует в виде, удобном для работы компьютера (продукционные правила, функции принадлежности).

Процедуру передачи знаний от эксперта в компьютерную программу ЭС формализуем следующим образом:

1. Вводится класс объектов O_i , $i = \overline{1, k}$.
2. Определяется категория объектов $I = 1, 2, 3, 4$.
3. Организуется процедура ознакомления эксперта с объектами x^i в соответствии со сценарием.
4. Оформляется протокол экспертизы.
5. Выбирается вид функции принадлежности μ_x , адекватный результатам экспертизы.
6. Разрабатывается алгоритм обработки приобретенных знаний.

С применением разработанных методик создан программный комплекс с необходимыми элементами экспертной системы, названный FnEI Shield, позволяющий производить идентификацию и оценку пожаро- и взрывоопасности ОПО. Программа предназначена для систематизации работы инженерно-технического персонала, занятого обеспечением безопасности предприятия. Экспертная система может быть использована и агентствами по страхованию промышленных рисков.

Система обладает интуитивно понятным интерфейсом и компонентом, объясняющим принятые ею решения. Фрагмент работы с системой на этапе выбора общих опасностей процесса приведен на рис. 8. На заднем плане – поле отчетов, справа – объяснительный компонент системы. Предусмотрена работа программы в режимах: «клиент» и «эксперт». Первый позволяет пользоваться готовой системой для оценки уровня опасности ОПО. Режим «эксперт» позволяет вносить изменения в принцип расчета показателей опасности и добавлять характеристики новых опасных химических веществ из имеющихся баз данных в Интернете.

Индекс опасности

Факторы доверия

Итоговый анализ

Свойства "Процессная единица 1"

Общие опасности процесса

Общие опасности процесса (1)

Общие опасности процесса (2)

А. Экзотермическая химическая реакция (степень экзотермичности)

1 - Слабая (0,30)

В. Эндотермическая химическая реакция

Реакция отсутствует или протекает не в реакторе (0,00) >

Реакция протекает или протекает не в реакторе (0,00) >

1 - Реакция протекает без прямого нагрева пламенем (0,20)

2 - Реакция протекает с прямым нагревом пламенем (0,40)

☐ Вещества хранятся на стеллаже без системы пожаротушения (+0,20)

Д. Процессные единицы внутри помещения или отгороженные извне

Процессная единица находится в незажженной зоне (0,00) >

☐ Объем жидкости превышает 3,785 (м3) или вес превышает 4535 (кг) (*1,5)

☐ Установлена разумно спроектированная механическая вентиляция (*0,5)

Е. Доступ, подход

Зона имеет достаточное количество подходов на случай пожара (0,00) >

Ф. Дренаж и контроль утечек

Материал обрабатывается при температуре ниже точки вспышки (0,00) >

Назад

Вперед

OK

Помощь...

В. Эндотермическая химическая реакция

Штраф 0,20 принимается для любого эндотермического процесса протекающего в реакторе. Заметим, что этот штраф употребляется только к реакторам. Когда входная энергия для эндотермического процесса обеспечивается сжиганием твердого, жидкого или газообразного топлива, штраф увеличивается до 0,40.

Примеры включают:

- Кальцинацию (прокалывание) – нагрев материала для выведения химически связанной воды или другого испаряющегося материала. Она обычно требует штрафа 0,40.
- Электролиз – разделение ионов посредством электрического тока. Он требует штрафа 0,20.
- Пиролиз или крекинг – термическое разложение больших молекул на более мелкие, требующее для этого высокую температуру, давление и/или катализатор. Штраф составляет в этом случае 0,20 для электрического

0,25 – 1,05

0,25 – 0,90

0,20 – 0,35

0,25 – 0,50

0,00

0,00

0,00

0,00

штраф

Рис. 8. Окно выбора «общих опасностей» процесса

11

Четвертая глава посвящена применению разработанной экспертной системы к решению задач безопасности промышленных предприятий. В этой главе приведены результаты обследования двух спиртовых заводов Тамбовской области: «старого» и «нового», производительностью 3000 и 10000 дал/сут спирта ректификата соответственно. Потенциально опасными объектами этих заводов являются спиртохранилища, отделения ректификации, подработанные отделения и зернохранилища. Проведен анализ уровня опасности этих объектов для каждого предприятия, сформирован пакет анализа опасностей, представляющий совокупность отчетных форм для каждого ОПО и итоговую расчетную таблицу для всего предприятия. Приведен сравнительный анализ уровней опасности для спиртохранилищ и отделений ректификации (табл. 1).

1. Сравнение степени опасности спиртзаводов по основным показателям

	Спирто-хранилище (100 т/сут)	Спирто-хранилище (30 т/сут)	Браго-ректификационное отделение (100 т/сут)	Браго-ректификационное отделение (100 т/сут)
Категория опасности	легкий	промежу-точный	промежу-точный	промежу-точный
Оценка опасности	56,24	114,8	99,76	118,56
Фактор опасностей процессной единицы	1,90	7,175	4,3	7,41
Фактор доверия к системе контроля потерь	0,36	0,83	0,34	0,72
Фактор ущерба	0,42	0,64	0,58	0,63
Ценность площади экспозиции, млн. р.	0,5	3	25	13
Площадь экспозиции, м ²	651	2552	2058	2803
Базовая стоимость, млн р.	0,21	1,92	14,5	8,19
Действительная стоимость, млн р.	0,11	1,61	4,93	5,88
Количество дней простоя	30	30	60	60
Потери от остановки производства, млн р.	40,5	13,5	81	27

Фактор опасности спиртохранилища нового предприятия снижен почти в 3,5 раза, а для брагоректификационного отделения – почти в 2 раза. Новый завод имеет также большее доверие к базовым защитным и профилактическим характеристикам, которые позволяют предотвратить и снизить опасность инцидента. Такое доверие отличается в 2 раза.

Такая разница показателей объясняется отсутствием потенциально опасных стеклянных элементов в аппаратах, установкой современных средств контроля и управления, а также наличием современной системы пожаротушения.

Методом имитационного моделирования проведена оценка погрешностей, которые могут возникнуть вследствие ошибок проектировщиков и неправильного назначения штрафов. Эти значения по всем категориям случайным образом генерировались в диапазоне $\pm 30\%$ от номинальных. Коэффициенты вариации для этих условий не превысили 11%, что свидетельствует о достаточной устойчивости системы.

Разработанная информационная система применима для поиска оптимального комплекса мероприятий по уменьшению уровня опасности предприятия с учетом его экономических возможностей. Пример поиска для спиртохранилища «старого» завода показан в табл. 2.

В результате проведенных исследований была получена оценка пожаро- и взрывоопасности для этого объекта. Она составила 114,8, что соответствует категории промежуточной степени опасности. Такое значение индекса получено из-за штрафов, назначенных за следующие факторы опасностей:

- 1) переработка и транспортировка материалов – 0,85;
- 2) ограниченный доступ и подход – 0,2;
- 3) температура выше точки воспламенения – 0,5;
- 4) объем хранения – 0,4;
- 5) коррозия основных аппаратов – 0,1;
- 6) наличие стеклянных смотровых окон в мерниках – 1,5.

2. Характеристики мероприятий по уменьшению опасности

Мероприятия	Оценка опасности	K_i , р.	Z_i , р./год	Φ_i , р./год
1. Не проводятся	114,8	0	0	0
2. Уменьшение объема хранения в 2 раза	113,6	0	0	0
3. Продувка инертном	108	30 000	0	4200
4. (2)+(3)	106,6	30 000	0	4200
5. Охлаждение спирта	98,4	50 000	18 000	25 000
6. (2)+(5)	96,76	50 000	18 000	25 000
7. Удаление смотровых стекол	65,6	80 000	0	11 200
8. (3)+(7)	59,04	110 000	0	15 400
9. (2)+(3)+(7)	57,4	110 000	0	15 400
10. (5)+(7)	49,2	130 000	18 000	36 200
11. (2)+(5)+(7)	47,56	130 000	18 000	36 200

Анализ возможных вариантов снижения уровня опасности в табл. 2 показывает, что возможно уменьшение штрафа за температуру спирта в хранилище (п. 3), за объем хранения (п. 4) и наличие смотровых окон в мерниках (п. 6). Использование остальных пунктов не представляется возможным в существующих условиях производства. Обозначения вида (2) + (3) соответствуют одновременному проведению мероприятий (2) и (3). Заметим, что одновременная реализация мероприятий (3) и (5) нецелесообразна, так как они изменяют величину штрафа в одной категории (температура выше точки воспламенения).

Для принятых вариантов рассчитаны значения уровня пожаро- и взрывоопасности, указаны ориентировочные затраты: капитальные вложения (K_i , р.), текущие затраты на эксплуатацию хранилища (Z_i , р./год) и приведенные затраты (Φ_i , р./год, $\Phi_i = Z_i + K_i E_H$, $E_H = 0,14$). Варианты мероприятий отсортированы в порядке уменьшения индекса опасности.

Значения рисков и затраты на реализацию вариантов мероприятий по снижению уровня опасности из табл. 1 показаны на рис. 9. Заслуживают внимания варианты, при которых значение уровня опасности соответствует легкой (1 – 60) и умеренной (61 – 96) категориям опасности. Этому условию удовлетворяют варианты (7) – (11). Варианты (5) и (6) не соответствуют общей концепции снижения риска при увеличении затрат, что свидетельствует об их нецелесообразности.

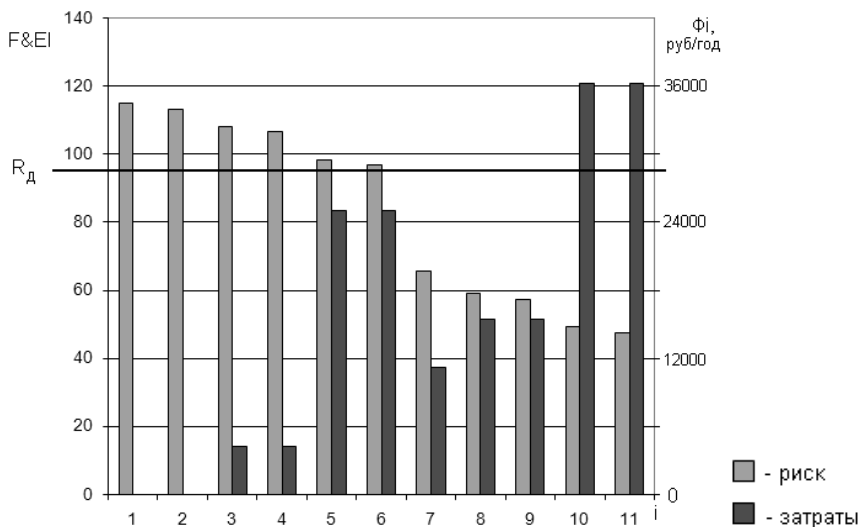


Рис. 9. Диаграмма: риски и затраты для рассматриваемых вариантов защиты

Пары вариантов ((10)–(11)) и ((9)–(8)) отличаются друг от друга тем, что в одной из них предусмотрено уменьшение объемов хранения в два раза, которое несущественно влияет на уровень опасности, но ограничивает деятельность предприятия. Эти варианты могут рассматриваться как эквивалентные.

Таким образом, в рассмотрении остаются три разумные альтернативы, варианты (7), (8) и (10), которые образуют множество Парето. В дальнейшем выбор оптимального варианта зависит от конкретных значений разрешенного риска R_d и допустимых затрат.

Предлагаемый метод позволяет получать количественные оценки риска, обоснованно выбирать мероприятия по предотвращению опасностей, которые были бы приемлемы по эффективности и по стоимости для потенциально опасного производства.

Основные выводы и результаты работы:

1. Проведенный обзор современного состояния теории безопасности выявил необходимость создания методического и программного обеспечения экспертизы ОПО.
2. Семантический анализ основных терминов позволил выявить недостатки понятийного аппарата теории безопасности и произвести их математическую формализацию в целях использования при построении экспертной системы.
3. Потенциально опасная природо-промышленная система представлена в виде двух взаимодействующих подсистем: промышленной (с содержанием ОПО) и экологической. Разработанная методика синтеза ППС из набора элементов позволяет построить модель ППС регионального уровня. Поставлена задача оптимального управления ПО ППС с учетом ее альтернативных состояний функционирования, связанных с возможными инцидентами в ОПО.
4. Разработана методика конструирования ЭС в области оценки уровня опасности ОПО на основе оператора ES, исходных данных, гипотез и эмпирических обобщений.
5. Разработана методика передачи знаний от эксперта в информационную систему по четырем категориям объектов.
6. С использованием ЭС проведены обследования двух промышленных предприятий, предложены мероприятия по уменьшению уровня опасности. Их реализация позволяла снизить уровень опасности «старого» и «нового» спиртовых предприятий на 50 и 35% соответственно.
7. Методом имитационного моделирования проведено исследование чувствительности оценки степени опасности ОПО к возможным методическим ошибкам.
8. Решена задача оптимизации комплекса мероприятий по уменьшению уровня опасности ОПО с учетом его экономических возможностей.

В приложениях приведены справки о внедрении результатов диссертационного исследования, договор на выполнение НИОКР по программе У.М.Н.И.К от 2012 г., а также вспомогательные материалы, не вошедшие в основной текст диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Попов, Н. С. Оценка уровня пожаро- и взрывоопасности промышленных объектов. Методика. Программа. Примеры : монография / Н. С. Попов, В. А. Лузгачев, Н. В. Лузгачева. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена : Нобелистика, 2009. – 104 с.

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Попов, Н. С. Методологические основы теории безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, А. Хайри // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 10 – 12(31). – С. 10 – 28.

2. Попов, Н. С. О некоторых результатах семантического анализа терминов теории безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, В. А. Лузгачев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 4 – 6(29). – С. 30 – 38.

3. Попов, Н. С. Формализация базовых понятий теории безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 10 – 12(31). – С. 29 – 37.

4. Попов, Н. С. Процедура передачи знаний в сфере техногенной безопасности от эксперта в компьютерную программу / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, А. Хайри // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – № 2. – С. 304 – 312.

5. Попов, Н. С. Методика построения схемы взаимодействия элементов в природо-промышленных системах / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 52 – 63.

6. Попов, Н. С. К методике конструирования экспертной системы оценки промышленной безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – № 1. – С. 43 – 51.

Прочие публикации:

1. Лузгачева, Н. В. Обоснование уровня безопасности промышленного объекта с учетом экономических возможностей / Н. В. Лузгачева, Н. С. Попов // Международная научная конференция ММТТ-24 : сб. тр. – Саратов, 2011. – Т. 4. – С. 37 – 39.

2. Попов, Н. С. Исследование чувствительности оценки индекса пожаро- и взрывоопасности к погрешностям штрафных баллов / Н. С. Попов, В. А. Лузгачев, Н. В. Лузгачева // Международная научная конференция ММТТ-23 : сб. тр. – Саратов, 2010. – Т. 4. – С. 10 – 11.

3. Лузгачева, Н. В. Экспертная система поддержки принятия решений в области техногенной безопасности / Н. В. Лузгачева // Решение региональных экологических проблем : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2011. – С. 154 – 157.

4. Лузгачева, Н. В. Разработка автоматизированной системы анализа опасностей предприятия спиртовой промышленности с использованием методики компании DOW CHEMICAL / Н. В. Лузгачева, Н. С. Попов // Инновационные проекты по экологической и промышленной безопасности : II Молодежный форум в рамках III Междунар. науч.-техн. конф. «Безопасность. Технологии. Управление». – Тольятти, 2009. – С. 120 – 126.

5. Лузгачева, Н. В. Способ передачи знаний об опасном промышленном объекте от эксперта в компьютерную программу / Н. В. Лузгачева, Н. С. Попов // Планета – наш дом: сб. ст. Междунар. молодежная науч. конф. – Алчевск, 2011. – С. 102 – 107.

6. Кунь Юэ. Экономическое обоснование выбора уровней безопасности опасных промышленных производств / Юэ Кунь, Н. В. Лузгачева, Н. С. Попов // Энергетика: экология, надежность, безопасность: тр. XI Всерос. студенческого науч.-техн. семинара : в 2 т. Т. 2. Теплоэнергетическое, экологическое и гуманитарное направления. – Томск, 2009. – С. 393 – 397.

7. Лузгачева, Н. В. Представление понятий «безопасность» и «риск» в аналитическом виде / Н. В. Лузгачева // Дальневосточная весна – 2011 : материалы 11 науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Комсомольск-на-Амуре, 2011. – С. 95 – 99.

Подписано в печать 31.10.2013.
Формат 60×84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 484

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08; E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru