УДК 658.511 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-72-78

Система оценки риска при эксплуатации технологических установок получения элементарной серы методом Клауса

Д.В. Печенкин

Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева 16, Астрахань, Россия
pechenkin1@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-6568-8446
Статья поступила 29.01.2018, принята 2.02.2018

Управление рисками развития аварийных ситуаций является неотъемлемой частью безопасного функционирования любого опасного производственного объекта (ОПО). В статье рассмотрен информатизированный подход к риск-менеджменту на производстве элементарной серы. Это обусловлено тем, что ведение технологического процесса происходит в реальном времени и сопряжено с появлением рисков, связанных не только с работой технической составляющей ОПО, но и неточностью или несвоевременностью оценок предаварийных или аварийных ситуаций со стороны обслуживающего персонала. Актуальность поставленной задачи возрастает при недостатке определенного опыта у оператора, ведущего технологический процесс. Предлагаемая модель ориентирована на технологические установки, эксплуатируемые на Астраханском газоконденсатном комплексе. Обоснована целесообразность применения методов нечеткой логики как инструментария для оценки рисков аварии, а также для управления этими рисками. Установлено, что при применении нечетких моделей появляется возможность учитывать количественные и качественные характеристики объекта управления, а также представлять нечеткие описания, используя нечеткие множества и лингвистические переменные. В ходе исследования разработана база продукционных правил для определения уровня риска с учетом выделенных экспертным методом факторов, влияющих на слабоформализуемый технологический процесс, а также их «весов». Методика оценки риска реализована в информационном поле пакета прикладных программ для моделирования MATLAB. Показана возможность разработки надлежащего алгоритма принятия управленческих решений по устранению или снижению риска развития аварийной ситуации при конкретных опасных условиях. Обосновано использование предложенного подхода как важного инструмента прогнозирования рисков и средства превентивного управления для предупреждения нештатных ситуаций на производстве элементарной серы.

Ключевые слова: риск-менеджмент; технологический процесс; оценка риска; аварийная ситуация; получение серы; метод Клауса; человеко-машинный интерфейс; опасный производственный объект; нечеткая логика; экспертная система.

The system of risk assessment in the operation of elemental sulfur processing units by the Claus method

D.V. Pechenkin

Astrakhan State Technical University; 16, Tatishcheva St., Astrakhan, Russia.
pechenkin1@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-6568-8446
Received 29.01.2018, accepted 2.02.2018

Risk management of emergencies development is an integral part of any hazardous industrial facilities safe operation. The article deals with informative approach to risk management in the production of elemental sulfur. This is due to the fact that the technological process occurs in real time and is associated with the emergence of risks related not only with the technical component of the hazardous industrial facilities, but inaccurate or untimely assessments pre-emergency or emergency by the maintenance staff. The relevance of the tasks increases with the lack of a certain experience of the operator, leading the technological process. The proposed model is oriented to the technological installations operated at the Astrakhan gas condensate complex. The expediency of using fuzzy logic methods as a tool for assessing the risks of an accident, as well as for managing these risks, is grounded. It is established that when using fuzzy models, it becomes possible to take into account the quantitative and qualitative characteristics of the control object, as well as to present fuzzy descriptions using fuzzy sets and linguistic variables. In the course of the study, a database of product rules was developed to determine the level of risk, taking into account the factors influencing the weakly formalized technological process, as well as their "weights", that were identified by the expert method. The method of risk assessment is implemented in the information field of the application package for modeling MATLAB. The possibility of developing an appropriate algorithm for making managerial decisions to eliminate or reduce the risk of developing an emergency under specific hazardous conditions is shown. The use of the proposed approach as an important tool for forecasting risks and means of preventive management to prevent abnormal situations in the production of elemental sulfur is substantiated.

Keywords: risk management; technological process; risk assessment; emergency; sulfur recovery unit; Claus method; the man-machine interface; dangerous production object; fuzzy logic; expert system.

Введение

Анализ крупных аварий, произошедших на промышленных предприятиях в последние десятилетия, позволяет сделать вывод о том, что человечество, двигаясь по пути технологического прогресса, подвергает себя постоянно возрастающей опасности. По данным министерства труда и соцзащиты РФ, только в нашей стране в 2016 г. зарегистрировано 6 638 несчастных случаев с тяжелыми последствиями [1]. Созданная человеком для собственной безопасности техносфера сейчас сама преобразуется в источник опасности: возрастают масштабы технологических установок, усложняются технологии, увеличивается взаимное влияние предприятий друг на друга, безопасная работа оборудования все больше зависит от точности и верных действий обслуживающего, и особенно управляющего персонала. Риски и масштабы развития аварийных ситуаций многократно возросли. Очень остро стоит вопрос о необходимости принятия своевременных защитных мер для человека и окружающей среды от опасностей, порождаемых техносферой, в частности аварий на опасных производственных объектах (ОПО). На стадии проектирования закладываются основы таких мер, и их развитие имеет значение на протяжении всего жизненного цикла ОПО, так как именно на этапе проекта возможно значительно повысить безопасность ОПО без последующих существенных финансовых вложений.

Очевидно, что ОПО, эксплуатирующийся в нормальных условиях, в соответствии с проектом, представляет опасность на порядок ниже той, которую он представлял бы, находясь в аварийном состоянии. Соответственно, оценка риска развития аварийной ситуации является наиболее подходящей для принятия ее за меру уровня опасности, исходящей от ОПО. Современное отношение к самой возможности появления аварии явно изменилось: не так давно на стадии проектирования ОПО доминировало мнение об «абсолютной безопасности», которое заключалось в стремлении создать максимально надежную технику и убеждении в полной безопасности промышленных объектов. Но если выход из строя все-таки происходил, проявлялась неготовность к такому исходу.

Рассмотрение сложной слабоформализуемой системы управления технологическим процессом (ТП) на производстве невозможно без включения человека как лица, принимающего решения (ЛПР), в состав объекта управления. Этот аспект — необходимое расширение понятия технической надежности как идеи, развившейся при непосредственном взаимодействии человека-оператора и человеко-машинного интерфейса. Нельзя не учитывать риски, продуцируемые ЛПР, наряду с рисками оборудования, кроме того, не следует забывать о преднамеренном, злоумышленном воздействии на объект управления с целью вывода его из строя.

Проблематике анализа рисков на промышленных предприятиях посвящено большое число работ, в значительной мере авторами исследуются вопросы менеджмента риска [2–5]. При этом производственные риски [6] (эксплуатация оборудования, применяемые технологии, а также квалификация персонала) зачастую не раскрываются. В этой связи задача оценки рисков производственного предприятия в описанном выше ключе является крайне актуальной.

В качестве объекта исследования в данной статье выступает крупнотоннажная установка получения элементарной серы методом Клауса. Необходимость обеспечения ее бесперебойной работы в штатном режиме, кроме очевидных требований безопасности, обусловлена влиянием возможных вредных выбросов (в случае аварии) на экологию в регионе, а также экономической эффективностью в составе предприятия, ключевым звеном которого является данная установка.

Постановка цели и задач исследования. Для слабоформализуемого ТП характерны недостаток знаний о его протекании и невозможность измерения ряда значимых параметров [7]. Именно к таким ТП относится процесс получения элементарной газовой серы методом Клауса [8]. Присутствие неопределенности обуславливает применение методов интеллектуализации и наиболее подходящей для формализации этой неопределенности теории нечетких множеств. Наличие операций с количественными и качественными параметрами в рамках одной математической модели позволяет охарактеризовать разработку как гибридную (комбинированную) [7].

Целью исследования является повышение безопасности и качества управления на производстве элементарной серы за счет разработки информатизированного механизма управления рисками развития аварии с применением экспертной системы на основе аппарата нечеткой логики. Для этого необходимо решить следующие задачи: провести анализ и выбор инструментария для решения поставленной задачи; описать методику оценки риска возникновения аварии и на ее основе разработать структуру имитационной модели; произвести настройку и проверку модели на адекватность; описать основные результаты исследования.

Анализ объекта управления и выбор инструментария для решения задачи. Крупнотоннажные высокопроизводительные установки получения элементарной серы методом Клауса (рис. 1) в отношении опасных параметров характеризуются прежде всего высокими значениями давления и расхода питательной воды, подаваемой в энерготехнологические котлы для охлаждения технологического газа, температура которого может достигать 1 350 ^{0}C. При этом вырабатывается пар давлением 25 кгс/см^2.

ТП преобразования содержащегося в кислом газе сероводорода в элементарную серу, т. е. конверсии, основан на реакции Клауса:

$$2H_2S + SO_2 \Leftrightarrow 3/nS + 2H_2O + X \text{ ккал/моль}, \quad (1)$$

где n — количество атомов серы в молекуле, зависящее от температуры реакции (от 2 до 8).

Эта реакция осуществляется в два этапа. На первом этапе (термическом) поток кислого газа подается в печь реакции, где смешивается с воздухом и сжигается. При этом происходит окисление примерно одной трети H_2S до SO_2 при высокой температуре (900 – 1 350 ^{0}C):

$$H_2S + 3/2\ O_2 \Leftrightarrow H_2O + SO_2 + 124–138 \text{ ккал/ч} \quad (2)$$

На втором этапе (каталитическом) газ проходит два последовательно установленных каталитических конвертора, где две трети неокисленного H_2S реагируют с образующимся SO_2:

$$2H_2S + SO_2 \Leftrightarrow 2H_2O + 3/n\ Sn + 22{,}2\ \text{ккал/моль} \quad (3)$$

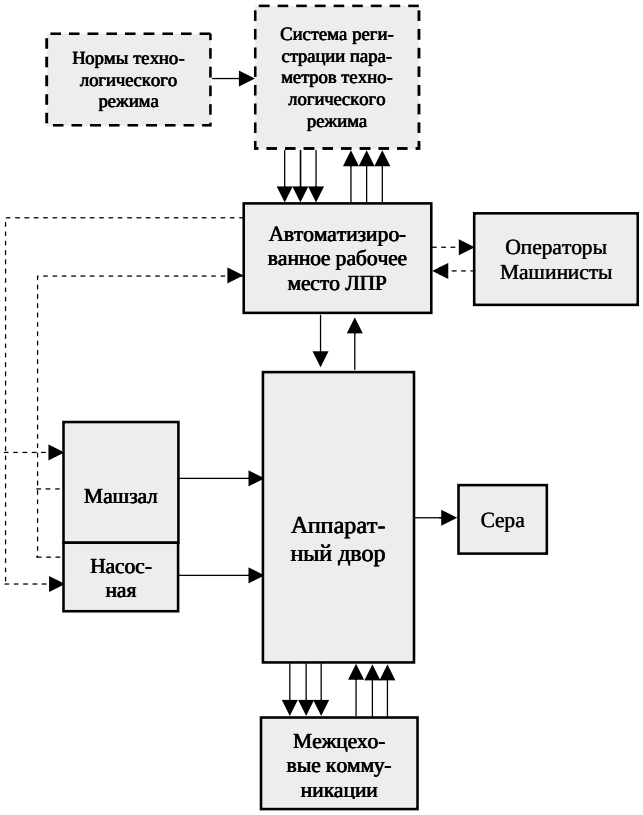

Рис. 1. Обобщенная схема рассматриваемого производства серы

Высокие значения рабочих температур, расходов и давлений в аппаратах обуславливают высокую инерционность в дистанционном управлении установкой. Так, небольшое изменение расхода воды в энерготехнологический котел влечет за собой постепенное изменение уровня в аппарате и температуры технологического газа на выходе из котла. В то же время, частые управляющие воздействия при высокой нагрузке могут «раскачать» режим и способствовать потере контроля над уровнями в аппаратах, что говорит о высокой динамике объекта в режиме предаварийной ситуации.

Наблюдение за работой наиболее опытных операторов, ведущих рассматриваемый ТП, показало, что принятие решений в процессе управления моноэргатической системой (технологическая установка и обслуживающие ее операторы аппаратного двора) происходит в условиях неопределенности. Она проявляется в невозможности точно и полно оценить такие данные о ТП, как активность катализатора в реакторах, скопление шлама в сетках гидрозатворов котлов-утилизаторов, активность адсорбента и т. д.

Неопределенность сопровождает все этапы управления ТП и определяется следующими факторами:

• невозможность точно и оперативно измерять качественные показатели сырья, используемого для получения серы;

• сложность количественного и качественного описания психофизических и сенсомоторных характеристик человека-оператора;

• наличие проблемы описания других слабоформализуемых факторов, влияющих на ТП.

Повысить качество решений, принимаемых в указанных условиях, можно с помощью применения моделей, снижающих влияние неопределенности [10–12].

В предаварийных ситуациях при оценке риска ЛПР руководствуется лингвистическим описанием ситуации с помощью таких понятий, как «малый риск», «допустимый риск», «высокий риск» и т. д. Дать соответствующую количественную оценку при этом затруднительно, что прямым образом влияет на принятие мер по локализации нештатной (опасной) ситуации. *Нештатной (опасной) ситуацией* называют режим работы оборудования, отличающийся от проектного, возникающий при отказе технического устройства, создающий опасность возникновения аварии. Применение методов и моделей, оперирующих слабоформализованными знаниями, лишено упомянутых недостатков. Они позволяют ЛПР использовать для оценки риска как количественные характеристики со свойственной некоторым из них неопределенностью, так и качественные, субъективные оценки экспертов, выраженные нечеткими понятиями на ограниченном множестве терминов естественного языка. Кроме того, эти методы позволяют формализовать описания с помощью нечетких чисел, множеств и лингвистических переменных [8, 13, 14]. Практическую реализацию предлагается привести в среде инженерных расчетов MATLAB, используя набор инструментов для построения и анализа нечетких множеств *Fuzzy Logic Toolbox*.

Описание методики оценки риска развития аварии. В рамках математической модели ТП будем производить операции как с количественными, так и с качественными параметрами, вследствие чего модель будет являться комбинированной (гибридной) [15]. Обозначим количественные входные параметры модели оценки риска как X, а качественные — как $\tilde{X}$. Тогда оценку риска в общем виде можно представить как:

$$R = F\left(X, \tilde{X}\right) \quad (4)$$

где R — *обобщенная характеристика риска*, получаемого для слабоформализуемого ТП; $F(\ )$ — оператор, реализующий комбинированную математическую модель оценки риска.

На основе сформулированных в работах [8; 9] особенностей слабоформализуемого ТП *дерево иерархии* факторов риска:

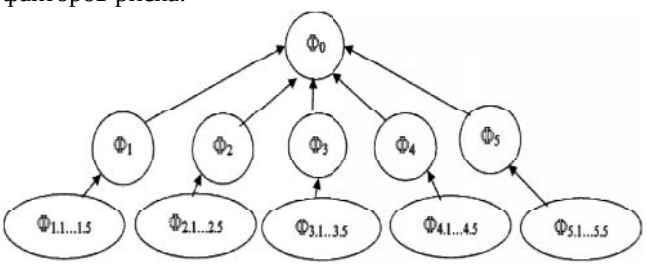

Рис. 2. Древовидная иерархия факторов риска

Здесь Φ_1 — *технологический*; Φ_2 — *параметрический*; Φ_3 — *технический*; Φ_4 — *аппаратурный*; Φ_5 — *субъективный* фактор риска. Каждый из $\Phi_i, i=\overline{1,5}$ зависит от параметров $X_{ij'}, \tilde{X}_{ij''}, j'+j''=j=\overline{1,m_i}$, где m_i — число входных переменных i-го показателя; j', j'' — число количественных и качественных переменных соответственно. Показатели риска $\Phi_1-\Phi_5$ вносят вклад в обобщенный показатель:

$$\Phi=\sum_{i=1}^{n} w_i\cdot\Phi_i, \sum_{i=1}^{n} w_i=1, n=5. \qquad (5)$$

Упрощение 1. Квалификация экспертов в области слабоформализуемого ТП позволяет ранжировать комплексные показатели $\Phi_1-\Phi_5$.

Тогда *вес* соответствующего показателя может быть определен с использованием правила Фишберна [16] на основании зависимости:

$$w_i=\frac{2\cdot(n-i+1)}{n\cdot(n+1)}. \qquad (6)$$

В соответствии с подходом, основанном на применении комбинированных математических моделей, проведем преобразование для X следующим образом: $\tilde{X}'=fuz(X)$, т. е. обеспечим приведение к нечеткости всех четких переменных (на данном этапе способ фазификации не существенен). Тогда расчет показателя Φ_i будет производиться по следующей схеме:

$$\Phi_i=defuz\left[FI\left(fuz\left(X_{ij'}\right),\tilde{X}_{ij''}\right)\right], \qquad (7)$$

где $FI(\ )$ — нечеткий логический вывод; $defuz[\ ]$ — метод приведения к четкости (дефаззификации).

С учетом (2) и (4) получим:

$$\Phi=\sum_{i=1}^{n} w_i\cdot defuz\left[FI\left(fuz\left(X_{ij'}\right),\tilde{X}_{ij''}\right)\right]. \qquad (8)$$

Разработка имитационной модели экспертной системы. Описанная методика практически реализована в среде MATLAB. На рис. 3 представлен пример структуры блока, рассчитывающего значение *технологического* показателя риска.

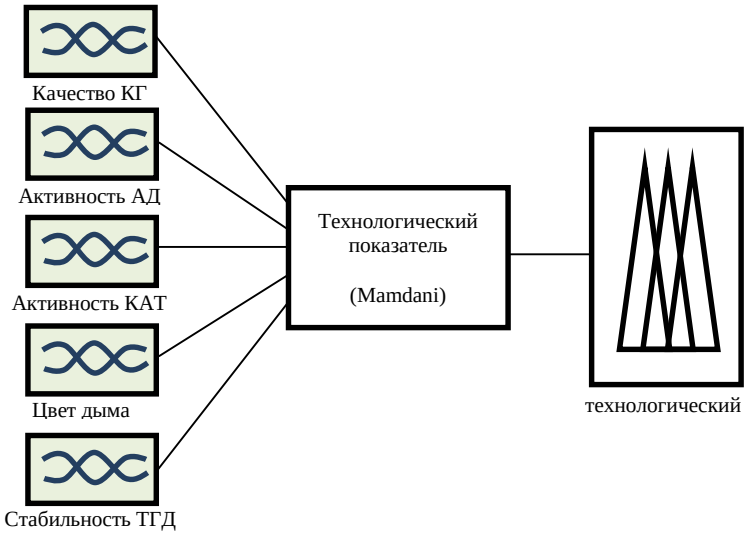

Рис. 3. Структура блока расчета Φ_1

Для формализации качественной информации о процессе установим следующие исходные данные. Зададим базовое универсальное множество U для неизмеряемых параметров на числовом отрезке вещественной оси [0;1]. Функции принадлежности нечетких чисел задаются с помощью невозрастающих на множестве неотрицательных действительных чисел функций действительных переменных $L(x)$ и $R(x)$, удовлетворяющих свойствам [17]:

$$\begin{aligned} &L(-x)=L(x), R(-x)=R(x)\\ &L(0)=R(0)\end{aligned}. \qquad (9)$$

В качестве такого числа $(L-R)$-типа выберем гауссову ФП (рис. 4):

$$\mu(u_i)=e^{-(u_i-c)^2/\lambda}. \qquad (10)$$

Принимая во внимание вид функций принадлежности, объем продукционных правил модели, вычислительную сложность и удобство программной реализации разработанных алгоритмов, выберем в качестве базового алгоритм нечеткого вывода Мамдани.

Возможность изменения значений входных переменных, мгновенное отображение работы блока на выходе и наглядность интерфейса используемого программного обеспечения позволяют убедиться в адек-

ватности построенной модели, оценить ее чувствительность и при необходимости изменить настроечные параметры [18]. Ими являются методы вычисления логического *И/ИЛИ*, операции импликации / агрегирования, а также метод дефаззификации [19] (приведения к четкости выходной переменной).

Аналогично разработаны системы для остальных четырех показателей риска. Провести анализ влияния определенных входных переменных на выход можно с помощью визуализации поверхности системы нечеткого вывода (рис. 5).

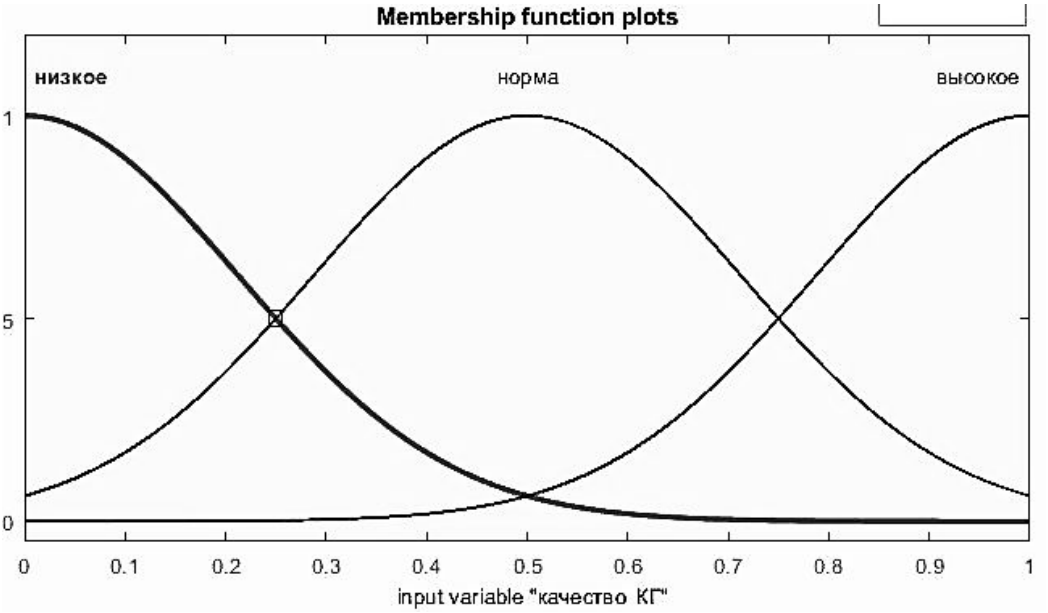

Рис. 4. Описание терм-множества переменной «качество кислого газа»

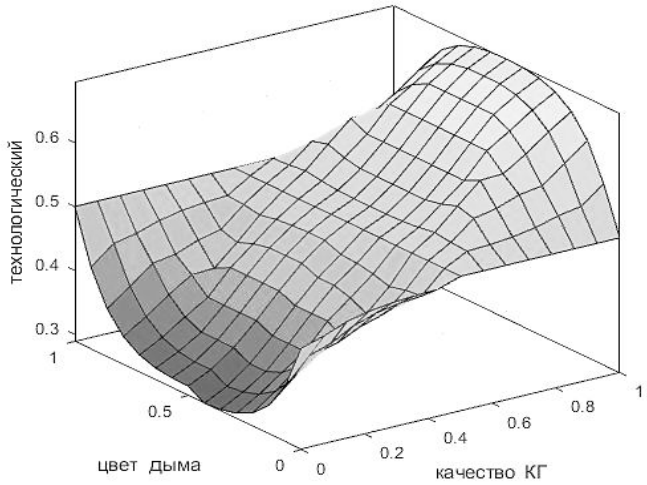

Рис. 5. Просмотр поверхности системы нечеткого вывода с выбранными осями

Например, на основании построенной выше графической зависимости можно определить, что наивысшее значение технологического показателя (меньший риск) достигается при средних значениях переменной «цвет дыма» и максимальных значениях переменной «качество кислого газа». Опытным путем при ручной настройке работы экспертной системы вычисляется переменная, имеющая наиболее значительное влияние на выход (в данном случае «качество КГ»). Далее следует генерация наиболее релевантного решения для сложившейся ситуации из базы знаний по регулировке параметров в режиме «рекомендации» (рис. 6).

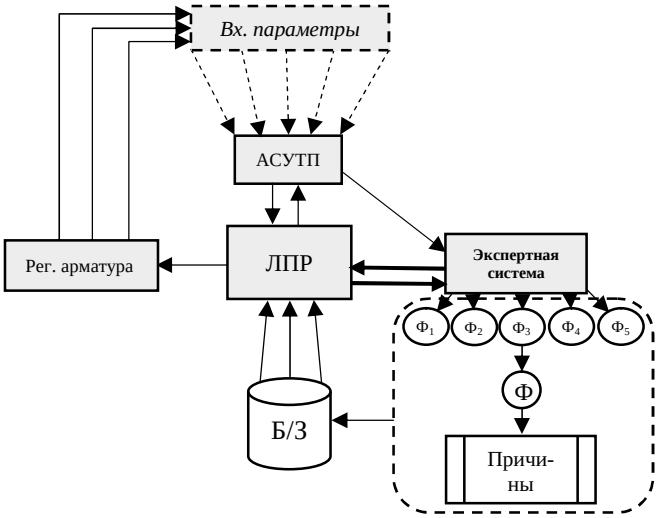

Рис. 6. Обобщенная структура поддержки принятия решений для системы риск-менеджмента

Заключение

1. Описана методика оценки риска развития аварийной ситуации на основе нечетких знаний.

2. Синтезирована структура информатизированной экспертной системы, а также необходимая для ее полноценного функционирования база продукционных правил.

3. Произведена практическая реализация в пакете прикладных программ MATLAB, при этом использован набор инструментов *Fuzzy Logic Toolbox*.

4. В результате апробации был определен наиболее значительный фактор в плане влияния на *технологический* показатель риска.

5. Объединение качественных и количественных характеристик для оценки риска аварии в одно «поле» анализа позволит учесть больше факторов риска и точнее определить вероятность наступления аварий в конкретных условиях.

6. В итоге повышается скорость оперативного принятия регламентированных мер по стабилизации технологического режима и безопасности на ОПО в целом.

Литература

1. Министерство труда и социальной защиты Рос. Федерации [Электронный ресурс]: сайт. URL: https://rosmintrud.ru/labour/safety/232 (дата обращения: 20.01.18).

2. Бочаров Е.П., Алексенцева О.Н., Ермошин Д.В. Оценка рисков промышленных предприятий на основе имитационного моделирования // Прикладная информатика. 2008. № 1 (13). С. 15-24.

3. Латыпова Р.Р., Киселевич А.Г. Анализ рисков промышленного предприятия // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. 2015. № 2 (24). С. 51-54.

4. Поскочинова О.Г. Проблемы реализации системных решений в области управления рисками предприятий / С.-Петерб. политехн. ун-т. СПб., 2013. 320 с.

5. Колесников А.М., Кандубко А.П. Виды рисков современного российского предприятия // Актуальные проблемы экономики и управления. 2014. № 1 (1). С. 14-19.

6. Хенли Э., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.

7. Проталинский О.М. Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. 183 с.

8. Печенкин Д.В., Беспалова Е.В. Методика лингвистической оценки рисков аварийных ситуаций для технологического процесса получения элементарной серы методом Клауса // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 4. С. 33-42.

9. Щербатов И.А., Печенкин Д.В. Оценивание рисков для слабоформализуемого технологического процесса // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 66-73.

10. Недосекин А.О. Нечеткие парные сравнения // Аудит и финансовый анализ. 2003. № 5. С. 53.

11. Щербатов И.А. Концепция системного анализа сложных слабоформализуемых многокомпонентных систем в условиях неопределенности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2 (38). С. 28–35.

12. Щербатов И.А., Проталинский И.А. Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы // Управление большими системами: сб. тр. 2013. № 45. С. 30–46.

13. Немчинов Д.В., Проталинский О.М. Система принятия управленческих решений по снижению влияния субъективного фактора как причины аварийной ситуации // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 2. С. 43-48.

14. Щербатов И.А. Снижение объемов промышленных выбросов крупнотоннажных установок с использованием экспертной информации // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 1. С. 121–125.

15. Антонов О.В., Проталинский О.М. Построение комбинированных математических моделей технологических процессов // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2003. № 4. С. 4.

16. Fishburn P., Wiley N.Y. Utility Theory for Decision-Making. New York, 1970. 234 p.

17. Щербатов И.А. Управление сложными слабоформализуемыми многокомпонентными системами: моногр. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015. 268 с.

18. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. М.: Горячая линия - Телеком, 2007. 288 с.

19. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Влияние методов дефазификации на скорость настройки нечеткой модели // Кибернетика и системный анализ. 2002. № 5. С. 169–176.

References

1. Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation [Elektronnyi resurs]: sait . URL: https://rosmintrud.ru/labour/safety/232 (data obrashcheniya: 20.01.18).

2. Bocharov E.P., Aleksentseva O.N., Ermoshin D.V. Risk assessment of industrial enterprises on the basis of simulation modeling // Applied informatics. 2008. № 1 (13). P. 15-24.

3. Latypova R.R., Kiselevich A.G. Risk analysis of the industrial enterprise // Teoriya i praktika servisa: ekonomika, sotsial'naya sfera, tekhnologii. 2015. № 2 (24). P. 51-54.

4. Poskochinova O.G. Implementation Problems of the Enterprise Risk Management / S.-Peterb. politekhn. un-t. SPb., 2013. 320 p.

5. Kolesnikov A.M., Kandubko A.P. Types of Modern Russian Enterprise Risks // Actual Problems of Economics and Management. 2014. № 1 (1). P. 14-19.

6. Khenli E., Kumamoto Kh. Reliability of technical systems and risk assessment. M.: Mashinostroenie, 1984. 528 p.

7. Protalinskii O.M. Application of methods of artificial intelligence in the automation of technological processes. Astrakhan': Izd-vo AGTU, 2004. 183 p.

8. Pechenkin D.V., Bespalova E.V. The methodology for linguistic risk assessment of emergency situations for the process of producing elemental sulphur by the Claus // Caspian journal management and high technologies. 2016. № 4. P. 33-42.

9. Shcherbatov I.A., Pechenkin D.V. Evalution of Risks for Poorly Formalized Technological Process // Modern technologies. System analysis. Modeling . 2017. № 2 (54). P. 66-73.

10. Nedosekin A.O. Fuzzy pair comparisons // Audit i finansovyi analiz. 2003. № 5. P. 53.

11. Shcherbatov I.A. The Concept of System Analysis of Complex Poorly Formalizable Multicomponent System in the Conditions of Uncertainty // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2013. № 2 (38). P. 28-35.

12. Shcherbatov I.A., Protalinskii I.A. Complex Ill-Formalizable Multicomponent Technical Systems // Upravlenie bol'shimi sistemami: sb. tr. 2013. № 45. P. 30-46.

13. Nemchinov D.V., Protalinskii O.M. Management Decision-Making System Decreasing the Influence of a Subjective Factor as an Emergency Reason // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. 2011. № 2. P. 43-48.

14. Shcherbatov I.A. Decrease in volumes of industrial emissions of large-capacity manufactures with the use of the expert information // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. 2009. № 1. P. 121-125.

15. Antonov O.V., Protalinskii O.M. Construction of combined mathematical models of technological processes // University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series. 2003. № 4. P. 4.

16. Fishburn P., Wiley N.Y. Utility Theory for Decision-Making. New York, 1970. 234 p.

17. Shcherbatov I.A. Management of complex ill-formalizable multicomponent technical systems: monogr. Rostov n/D.: Izd-vo YuNTs RAN, 2015. 268 p.

18. Shtovba S.D. Designing of fuzzy systems using Matlab. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2007. 288 p.

19. Rotshtein A.P., Shtovba S.D. The influence of defuzzification methods on the speed of tuning a fuzzy model // Cybernetics and Systems Analysis. 2002. № 5. P. 169-176.