

16. On the development, approval and implementation of departmental target programs: decision of Government was the Astrakhan region of 18.04.2008 no. 169-P. Available at: <http://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc&base=RLAW322&n=22370#0> (accessed 20 October 2016).
17. On the development, approval and implementation of departmental target programs: decision of Government was the Astrakhan region of 18.04.2008 no. 169-P. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/499034090> (accessed 20 October 2016).
18. On approval of the Russian Federation food security doctrine: Presidential Decree of 30.01.2010 no. 120. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_96953/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_96953/) (accessed 20 October 2016).
19. Pirumova L. N. *Informatsionnye resursy FAO (Mezhdunarodnoy organizatsii po selskomu khozyaystvu i prodovolstviyu pri OON) spetsialistam i praktikam APK Rossii* [Information resources FAO (the International Organization for Agriculture and Food to the UN) experts and practitioners Russia AIC]. Available at: <http://www.rba.ru/content/activities/section/12/mag/mag11/18.pdf> (accessed 20 October 2016).
20. Porter M. *Konkurentsya* [Competition], Moscow, Vilyams Publ., 2005. 608 p.
21. Pshenko O. Yu. *Upravlenie sotsialno-ekonomicheskoy sistemoy agropromyshlennogo kompleksa na osnove otsenki effektivnosti gosudarstvennykh raskhodov na territorialnom urovne* [Control of social and economic system of agriculture on the basis of evaluation of the effectiveness of public expenses at the territorial level], Arhangelsk, 2009. 169 p.
22. The development of agro-industrial complex of the Astrakhan area: the decision of the Government of Astrakhan region from 9.10.2014 no. 368-P. Available at: <https://msh.astrobl.ru/sites/default/files/MSH/gsp.doc> (accessed 20 October 2016).
23. Savchenko O. F. Metodologicheskie aspekty sozdaniya informatsionnykh sistem v selskom khozyaystve [Methodological aspects of agricultural information systems]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Advances in Science and Technology AIC], 2006, no. 11, pp. 5–9.
24. Samarukha V. I. *Formirovanie klasterov v selskom khozyaystve regiona* [Forming clusters in agriculture in the region]. Available at: <http://riep.ru/upload/iblock/5fb/5fb9043b1ddf695e897f5b459dd70860.pdf> (accessed 05 March 2016).
25. Uskova T. V. *Upravlenie ustoychivym razvitiem regiona* [Control of the sustainable development of the region], Vologda, ISJeRT RAN Publ. House, 2009. 355 p.
26. Khanova A. A. Gruzovoy port kak sotsialno-ekonomicheskaya, organizatsionnaya sistema [Cargo port as a socio-economic, organizational system]. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy* [Prospects of Development of Information Technologies], 2011, no. 6, pp. 146–152.
27. Khanova A. A. *Metodologiya strategicheskogo upravleniya gruzovym portom na osnove imitatsionnogo modelirovaniya* [Methodology of strategic management cargo port-based simulation], Astrakhan, Astrakhan State Technical University Publ. House, 2013.
28. Khanova A.A., Khortonon A.S., Paramzina L.V. Sistemnye vzaimosvyazi strategicheskogo upravleniya i modelirovaniya sotsialno-ekonomicheskikh sistem na osnove sbalansirovannoy sistemy pokazateley [System of strategic management of the relationship and simulation of socio-economic systems based on the Balanced Scorecard]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics], 2014, no. 2, pp. 109–116.
29. Allen S. J., Edmund W. S. Controlling the Risk for an Agricultural Harvest. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2004, vol. 6, no. 3, pp. 225–236.
30. McPhee M. J. Mathematical modelling in agricultural systems: A case study of modelling fat deposition in beef cattle for research and industry. *Proceeding in 18th World IMACS, MODSIM Congress*, Cairns, Australia, 13–17 July 2009, pp. 59–71.
31. Vanitha G., Kalpana M. *Agro-Informatics*, New India Publishing Agency, 2011. 241 p.

УДК [661.214.232.02(470.46):81-13]:[614.8-027.21:519.2]

## МЕТОДИКА ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ СЕРЫ МЕТОДОМ КЛАУСА

Статья поступила в редакцию 01.11.2016, в окончательном варианте – 29.11.2016.

**Печенкин Денис Владимирович**, аспирант, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: [pechenkin1@gmail.com](mailto:pechenkin1@gmail.com)

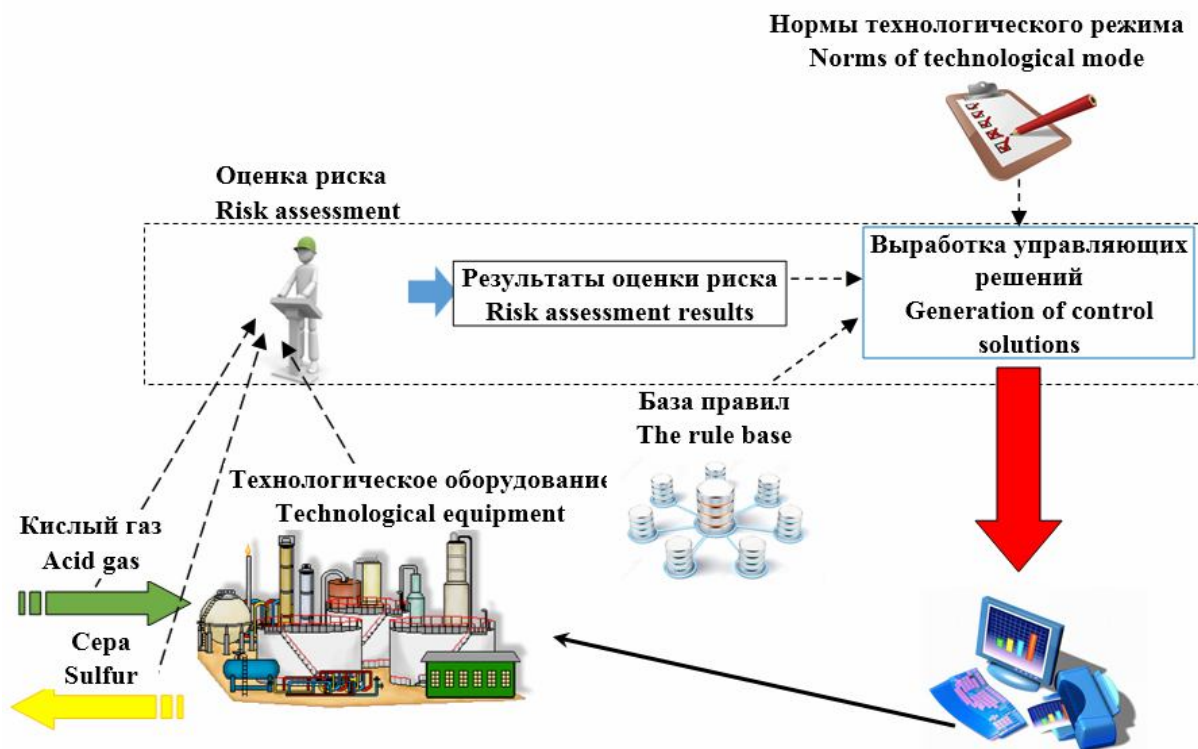
**Беспалова Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16

Управление в реальном времени технологическими процессами осуществляется в условиях рисков, связанных не только с отказами техники, но и неточностью или несвоевременностью оценок предаварийных или аварийных ситуаций со стороны человека-оператора. Для определенности в данной статье рассмотрены материалы ориентировано на процесс получения элементарной серы методом Клауса. Такой процесс используется, в частности, на Астраханском газоконденсатном комплексе. Авторы обосновывают целесообразность применения методов нечеткой логики для оценки рисков технологических процессов, управления этими рисками. Показано, что в число факторов, влияющих на эти процессы и качество принятия решений человеком-оператором, входят следующие: необходимое время для выбора оптимального управляющего воздействия при конкретных условиях (ситуации); фактически имеющееся время для принятия решения; психофизические (психофизиологические) особенности человека-

оператора, совокупность его знаний и умений, определяющие квалификацию; технологические особенности управляемого процесса. Применение нечетких моделей позволяет учитывать, как количественные, так и качественные характеристики управляемых объектов, а также представлять нечеткие описания с помощью нечетких множеств и лингвистических переменных. В статье выделены основные группы влияющих факторов, параметры техпроцесса, а также характеристики связи человека-оператора с технической подсистемой, входящей в человеко-машинную систему автоматизированного управления. Построена база нечетких производственных правил для определения (оценки) риска аварий техпроцессов, приведен расчетный пример.

**Ключевые слова:** технологический процесс, управление в реальном времени, человеко-машинные системы управления, получение серы, метод Клауса, Астраханская область, анализ рисков аварий, экспертный опрос, нечеткая логика, нечеткая модель, производственные правила, системный анализ

Графическая аннотация (Graphical annotation)



## THE METHODOLOGY FOR LINGUISTIC RISK ASSESSMENT OF EMERGENCY SITUATIONS FOR THE PROCESS OF PRODUCING ELEMENTAL SULPHUR BY THE CLAUUS

The article has been received by editorial board 01.11.2016, in the final version – 29.11.2016.

**Pechenkin Denis V.**, post-graduate student, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: pechenkin1@gmail.com

**Bespalova Yelena V.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation

The real-time control of technological processes is subject to the risks associated with not only equipment failures, but also inaccurate or untimely assessments pre-emergency or emergency situations from the human operator. For definiteness, in this article consideration of the material focus on the process of obtaining elemental sulfur by the Claus method. Such a process is using, in particular, in the Astrakhan gas condensate complex. The authors substantiate the expediency of application of fuzzy logic for risk assessment of technological processes, the management of these risks. It is shown that among the factors influencing these processes and the quality of decision making by the human operator, includes the following: the time needed to select the optimal control action under specific conditions (situations); in fact, the time available for decision-making; psychological and physical (physiological) features of the human operator, the totality of his knowledge and skills that define the qualification; technological features of a managed process. Application of fuzzy models allows to take into account both quantitative and qualitative characteristics of the managed objects and to represent fuzzy description using fuzzy sets and linguistic variables. The article highlights the main groups of influencing factors, the growth process parameters, as well as the performance of the human operator with the technical subsystem included in the human-machine system automated control. Built base of fuzzy production rules to determine (assess) the risk of accidents processes, given the current sample.

**Keywords:** technological process, real time control, man-machine control system, sulfur recovery unit, Claus method, Astrakhan region, analysis of the accidents risks, expert survey, fuzzy logic, fuzzy model, production rules, system analysis

**Введение.** Система управления может иметь множество контуров, работа которых может быть нарушена в определенных частях или даже во всей системе. Понятие надежности человека как части человеко-машинной системы автоматизированного управления [1] представляет собой продолжение понятия технической надежности, как идеи, возникшей на фоне взаимодействия человека-оператора и человеко-машинного интерфейса [16]. Конструктивные элементы такой системы: вход – обработка – выход – контуры обратной связи (feedback loops) – контуры прогнозирования (feedforward loops). Они создают взаимные связи с другими системами или отдельными элементами. Такие связи могут быть физическими или информационными. Поэтому, понятие надежности человека как подсистемы настолько тесно связано с нарушением работы определенного контура, что можно сделать вывод о необходимости идентификации рисков возникновения аварий и их оценок в условиях функционирования двух подсистем социотехнической системы: социальной (человек-оператор) и технической (система управления).

Системный подход к анализу имеет следующие преимущества:

- это средство глобального подхода к выявлению экономических, социальных, экологических и технических аспектов взаимодействия и управления процессами;
- путем математического моделирования выделяются качественные и количественные связи между компонентами технического объекта (технологической установки, производства, завода и т.д.), позволяющие найти эффективные решения сложных проблем в оперативном порядке;
- такой подход позволяет найти баланс между компонентами социотехнической системы в условиях частой изменчивости экзогенных переменных (нормы технологического процесса, нормативно-техническая документация, требования промышленной безопасности и т.д.).

Оценка рисков аварийных ситуаций для технологических процессов может производиться разными методами. Одним из наименее разработанных является подход, использующий лингвистическую оценку рисков. Авторы сочли целесообразным сделать это на примере технологического процесса получения элементарной серы методом Клауса, который используется, в частности, на Астраханском газоконденсатном комплексе.

**Постановка задачи.** Установка получения элементарной серы состоит из следующих объектов.

А. Отделения Клаус (рис. 1), где получается основной объем серы. При этом используется прямое окисление в реакционных печах сероводорода до элементарной серы и диоксида серы (термическая часть) с последующей реакцией сероводорода и диоксида серы на слое катализатора (каталитическая часть).

Б. Отделения Сульфрин, где путем доочистки хвостовых газов отделения Клаус на катализаторе в целом по установке достигается 99,6 % извлечения серы из газа.

В. Печи дожига остаточных газов, где все сернистые соединения, имеющиеся на выходе из отделения Сульфрин, преобразуются в диоксид серы перед сбросом в атмосферу через дымовую трубу.

Г. Узла дегазации жидкой серы, предназначенного для извлечения сероводорода, абсорбированного в сере, полученной в отделениях Клаус и Сульфрин.

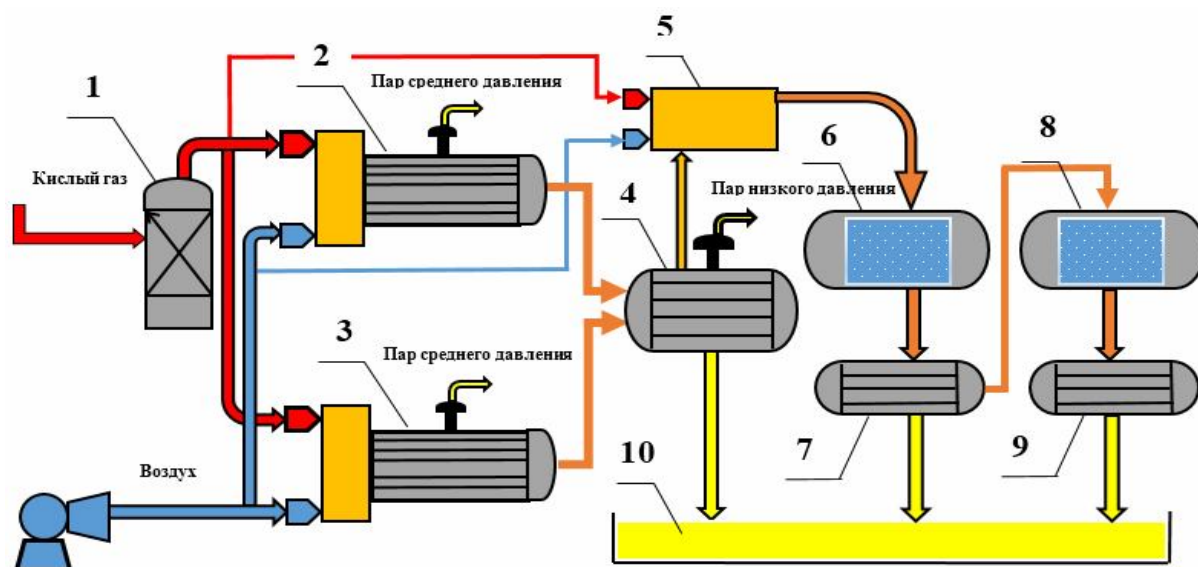
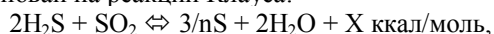


Рис. 1 – Упрощенная схема технологической установки получения элементарной серы методом Клауса

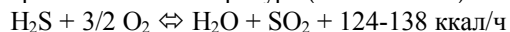
Обозначения: 1 – сепаратор кислого газа; 2 и 3 – реакционные печи со встроенными энерготехнологическими котлами); 4 – котел-утилизатор; 5 – вспомогательная печь для подогрева технологического газа; 6 и 8 – реакторы Клауса; 7 и 9 – конденсаторы серы; 10 – серная яма суточного хранения

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



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  $\text{H}_2\text{S}$  до  $\text{SO}_2$  при высокой температуре (900–1350 °C).

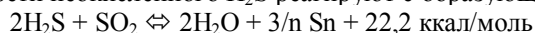


В печах реакции наряду с основными идут и побочные реакции:



Степень конверсии сероводорода на данном этапе составляет около 55 %.

На втором этапе (каталитическом) газ проходит два последовательно установленных каталитических конвертора, где две трети неокисленного  $\text{H}_2\text{S}$  реагируют с образующимся  $\text{SO}_2$ .



Полученные на первом этапе сероорганические соединения подвергаются реакции гидролиза на катализаторе:



Степень конверсии сероводорода после отделения Клаус увеличивается до 95 %.

Сера, получаемая на каждом этапе процесса, выделяется из реакционной среды путем конденсации, что позволяет перемещать равновесие реакции в направлении образования серы.

Анализ деятельности наиболее опытных операторов рассматриваемого технологического процесса показал, что принятие решений в процессе управления моноэнергетической системой (технологическая установка и обслуживающие ее люди-операторы) происходит в условиях неопределенности. Она проявляется в виде отсутствия полных и точных параметров технологического процесса, включая активность катализатора в реакторах; скопление шлама в сетках гидрозатворов котлов-утилизаторов; активность адсорбента и т.д. Неопределенность сопровождает все этапы технологического процесса управления 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;
- наличием проблемы описания других слабоформализуемых факторов, влияющих на технологический процесс.

Повысить качество решений, принимаемых в указанных условиях, можно с помощью применения моделей, снижающих влияние неопределенности [2, 13, 14].

В свою очередь наличие неопределенности приводит к возникновению неблагоприятных ситуаций, характеризующихся риском [9]. В работе [8] риск определяется как воздействие, которое может привести к потерям или иному ущербу.

При принятии решений в ходе анализа рисков широко применяется общеизвестный принцип лингвистического описания, в котором оценка осуществляется с помощью терминов «низкий риск», «допустимый риск» и «высокий риск». Однако оператору, принимающему решение, невозможно придать таким терминам точную количественную оценку. Это влияет на качество принимаемых им решений (включая их точность и своевременность). Повышение качества решений может быть достигнуто посредством применения методов и моделей, учитывающих имеющиеся неопределенности. В частности, широко применяются подходы, при которых учет и анализ неопределенностей и рисков производится аналитическими и экспертными методами [11, 19]. Однако аналитические методы требуют большого объема статистических данных и ориентированы, как правило, на количественные показатели. Применение только экспертных методов затруднительно при оперативной оценке неопределенностей и рисков, поскольку они требуют использования высококвалифицированных специалистов и больших временных затрат. Применение методов и моделей, основанных на слабоформализованных знаниях, лишено упомянутых недостатков. Они позволяют лицу, принимающему решения (ЛПР), использовать для оценки риска как количественные характеристики, которым объективно свойственна неопределенность, так и качественные, субъективные оценки экспертов, выраженные нечеткими понятиями. Кроме того, эти методы позволяют формализовать описания с помощью нечетких чисел, множеств и лингвистических переменных [6, 7, 12].

Для использования этих методов необходимо выделить факторы риска, построить комплексный показатель риска возникновения аварийной ситуации на основе агрегирования данных со всех уровней иерархии факторов риска, а также на основе качественных данных о «величинах» факторов и их взаимоотношениях на одном уровне иерархии.

**Разработка лингвистической модели оценки риска.** Представим значение комплексного показателя риска в виде среднего взвешенного значения, исходя из суммы произведений множества значений рискообразующих составляющих и их удельных весов [4]:

$$R_0 = \sum_{i=1}^N (R_i \times w_i), \tag{1}$$

где  $R_i$  – значение рискообразующей составляющей;  $w_i$  – ее удельный вес, причем  $\sum w_i = 1$ .

Далее необходимо ввести так называемое «дерево иерархии» факторов риска  $F$  [4] и сгруппировать их в базовые показатели  $F_i$ , предварительно обозначив искомый комплексный риск-фактор  $F_0$  (рис. 2, табл. 1). Рассмотрим предлагаемую методику на примере технологического процесса получения элементарной серы методом Клауса.

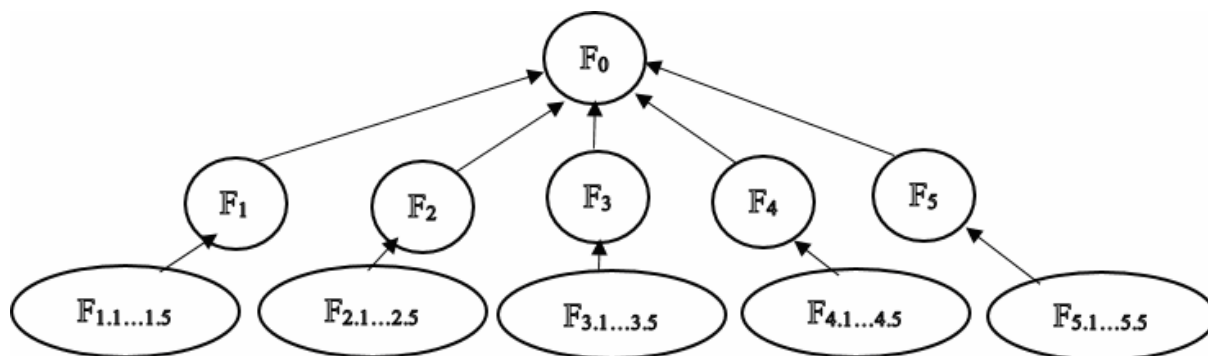


Рис. 2 – Древоидная иерархия  $F$

Таблица 1 – Факторы риска при получении серы методом Клауса

$F_0$ – моноэнергетическая система получения элементарной серы в целом				
$F_1$ – технологический показатель	$F_2$ – параметрический показатель	$F_3$ – технический показатель	$F_4$ – аппаратурный показатель	$F_5$ – субъективный показатель
$F_{1,1}$ – качество сырья (кислого газа)	$F_{2,1}$ – давление в аппаратах, трубопроводах	$F_{3,1}$ – качество материалов трубопроводов, аппаратов	$F_{4,1}$ – качество работы измерительных приборов	$F_{5,1}$ – профессионализм персонала
$F_{1,2}$ – активность адсорбента	$F_{2,2}$ – температура в аппаратах	$F_{3,2}$ – коррозионная стойкость оборудования	$F_{4,2}$ – состояние циркуляционных насосов дегазации и откачки жидкой серы на аппаратном дворе	$F_{5,2}$ – интеллектуальный капитал персонала
$F_{1,3}$ – активность катализатора	$F_{2,3}$ – уровень в аппаратах	$F_{3,3}$ – вибрация насосно-компрессорного оборудования	$F_{4,3}$ – состояние насосов и воздуходувок в машинном зале	$F_{5,3}$ – личностный фактор
$F_{1,4}$ – цветовой оттенок сжигаемых остаточных продуктов	$F_{2,4}$ – расход в трубопроводах	$F_{3,4}$ – тип оборудования	$F_{4,4}$ – бесперебойная подача аммиака при дегазации жидкой серы	$F_{5,4}$ – повышение квалификации
$F_{1,5}$ – стабильность работы технологической турбогазодувки газа регенерации отделения Сульфрин	$F_{2,5}$ – концентрация веществ в контролируемой среде	$F_{3,5}$ – проведение технического обслуживания	$F_{4,5}$ – проходимость гидрозатворов котлов-утилизаторов	$F_{5,5}$ – психофизиологическое состояние персонала

Вышеуказанное дерево факторов риска составлено с использованием специальной литературы [10–13, 17] и методов обработки экспертной информации [5, 7] (проводился опрос опытных старших операторов рассматриваемого технологического процесса на Астраханском газоконденсатном комплексе – со стажем работы более 15 лет).

С точки зрения авторов статьи совокупность выделенных факторов риска обладает свойством «необходимости и достаточности».

Впоследствии необходимо наложить на иерархию факторов риска систему весов  $S$ . При наличии возможности выделить более и менее значимые факторы, эксперты производят ранжирование составляющих базовых факторов в порядке убывания значения их влияния, и таким образом «вес»  $i$ -го фактора можно определить по правилу Фишберна:

$$w_i = 2(N - i + 1)/(N + 1)N, i = 1 \dots N, \quad (2)$$

где  $N$  – количество факторов.

Тогда система весов  $S$  примет вид:

$$S = \{F_i(\phi)F_j \mid \phi \in (\succ, \approx)\}, \quad (3)$$

где  $\succ$  – отношение предпочтения,  $\approx$  – отношение безразличия.

В системе, где все факторы равнопредпочтительны или системы предпочтений нет вообще, целесообразно принять:

$$w_i = 1/N. \quad (4)$$

Отметим, что используемая экспертами система предпочтений является смешанной, ввиду того, что в ее состав входят как отношения предпочтения, так и отношения безразличия. Из этого следует, что числители рациональных дробей, которые и являются коэффициентами Фишберна, необходимо определять по рекурсивной схеме. Более подробное описание и доказательство непротиворечивости данной системы предпочтений приведено в работах [3, 18, 15]. Сведем дроби Фишберна в таблицу 2 для всех смешанных систем предпочтений при  $N = 2 \dots 5$  ( $\succ$  – отношение предпочтения,  $\approx$  – отношение безразличия).

Таблица 2 – Система весов  $S$

$N$	$S$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
2	$F_1 \approx F_2$	1/2	1/2	–	–	–
	$F_1 \succ F_2$	2/3	1/3	–	–	–
3	$F_1 \approx F_2 \approx F_3$	1/3	1/3	1/3	–	–
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3$	2/4	1/4	1/4	–	–
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3$	2/5	2/5	1/5	–	–
4	$F_1 \succ F_2 \succ F_3$	3/6	2/6	1/6	–	–
	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \approx F_4$	1/4	1/4	1/4	1/4	–
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \approx F_4$	2/5	1/5	1/5	1/5	–
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \approx F_4$	2/6	2/6	1/6	1/6	–
	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \succ F_4$	2/7	2/7	2/7	1/7	–
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \approx F_4$	3/7	2/7	1/7	1/7	–
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \succ F_4$	3/8	2/8	2/8	1/8	–
5	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \approx F_4$	3/9	3/9	2/9	1/9	–
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \succ F_4$	4/10	3/10	2/10	1/10	–
	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \approx F_4 \approx F_5$	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \approx F_4 \approx F_5$	2/6	1/6	1/6	1/6	1/6
	$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \approx F_4 \approx F_5$	2/7	2/7	1/7	1/7	1/7
	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \succ F_4 \approx F_5$	2/8	2/8	2/8	1/8	1/8
	$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \approx F_4 \approx F_5$	3/8	2/8	1/8	1/8	1/8
	$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \approx F_4 \succ F_5$	2/9	2/9	2/9	2/9	1/9
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \succ F_4 \approx F_5$	3/9	2/9	2/9	1/9	1/9
	$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \approx F_4 \succ F_5$	3/10	2/10	2/10	2/10	1/10
$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \succ F_4 \approx F_5$	3/10	3/10	2/10	1/10	1/10	
$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \succ F_4 \approx F_5$	4/11	3/11	2/11	1/11	1/11	
$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \approx F_4 \succ F_5$	3/11	3/11	2/11	2/11	1/11	
$F_1 \approx F_2 \approx F_3 \succ F_4 \succ F_5$	3/12	3/12	3/12	2/12	1/12	
$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \approx F_4 \succ F_5$	4/12	3/12	2/12	2/12	1/12	
$F_1 \succ F_2 \approx F_3 \succ F_4 \succ F_5$	4/13	3/13	3/13	2/13	1/13	
$F_1 \approx F_2 \succ F_3 \succ F_4 \succ F_5$	4/14	4/14	3/14	2/14	1/14	
$F_1 \succ F_2 \succ F_3 \succ F_4 \succ F_5$	5/15	4/15	3/15	2/15	1/15	

Подчеркнем, что выбранная экспертами система предпочтений строится среди базовых показателей между их составляющими и, как условие, является единственной верной.

Анализ выделенных факторов риска в виде древовидной иерархии ставит задачу формализации рискообразующих составляющих, так как численно описать многие из них не удастся. Поэтому необходимо формирование базы нечетких продукционных правил. Последняя представляет собой формальное представление эмпирических знаний эксперта в исследуемой проблемной области по схеме «ЕСЛИ ...,

ТО ...». Нечеткий логический вывод прием по алгоритму Мамдани [10], выполняемому по следующей базе знаний:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left( \bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} \text{ с весом } w_{jp} \right) \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где  $a_{i,jp}$  – нечеткий терм, оценивающий переменную  $x_i$  в  $j$ -ом правиле,  $d_j$  – нечеткое заключение  $j$ -го правила;  $m$  – количество правил в базе знаний;  $w_{jp} \in [0, 1]$  – весовой коэффициент, отражающий адекватность  $j$ -го правила.

Рассмотрим пример формализации фактора  $F_{1,1}$  «качество сырья (кислого газа)» (см. рис. 2).

Вводим лингвистическую переменную (ЛП) «качество кислого газа». В качестве источников информации выступают:  $T_G$  – температура кислого газа,  $P_G$  – давление кислого газа,  $F_G$  – расход кислого газа,  $TR$  – ЛП, характеризующая «температурный режим» в реакторе.

Для формализации качественной информации проведем следующие операции. В качестве базового универсального множества примем отрезок (диапазон) вещественной оси  $[0, 1]$ . Отметим, что любые измеримые отрезки вещественной оси могут быть приведены к диапазону  $[0, 1]$  с помощью обычного линейного преобразования, поэтому данный единичный отрезок является универсальным. Более того, классическим и наиболее распространенным методом оценки вероятности возникновения неблагоприятного события является вероятностный, при применении которого оценивание производится также на отрезке  $[0, 1]$ . Таким образом, появляется возможность сравнить результаты исследований «вероятностного характера риска» и «оценки риска на основе нечетких множеств».

Далее участвующим в опросе экспертам предлагается сформировать единственный вариант функции принадлежности (ФП) для данного значения ЛП. Этот вариант должен отражать степень уверенности в принадлежности значения ЛП тому или иному отрезку шкалы и учитывать опыт всей экспертной группы. В подавляющем большинстве случаев полученная кривая может быть аппроксимирована экспоненциальной зависимостью:

$$\mu(x) = e^{-(x-c)^2/\lambda}, \quad (6)$$

при этом параметры  $c$  и  $\lambda$  позволяют перемещать ФП относительно начала шкалы. Эти два параметра ( $c$  и  $\lambda$ ) выбираются после обработки данных по всем кривым, предложенным экспертами. Значения ФП в заранее определенных точках шкалы усредняются. Затем усредненная линия аппроксимируется гауссовой ФП. В том случае, если вид кривой одного из экспертов сильно отличается от кривых других экспертов, эту кривую из рассмотрения следует исключить. Если же таких кривых будет несколько, то экспертам предлагается в рамках совместного обсуждения, предложить единственный вариант ФП для данного значения ЛП, учитывающий опыт всей экспертной группы [7]. В качестве примера приведем значения функции принадлежности для лингвистической переменной  $T_G$  (температура кислого газа) – таблица 3.

Таблица 3 – Значения ФП ЛП  $T_G$ .

Значение	Температура (°C)								
	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Очень низкое (ОН)	1.0	0.587	0.273	0.082	0.039	0.031	0.027	0.021	0.014
Низкое (Н)	0.087	0.121	1.0	0.614	0.055	0.048	0.034	0.024	0.011
Среднее (С)	0.061	0.104	0.238	0.915	1.0	0.907	0.341	0.081	0.019
Высокое (В)	0.014	0.021	0.054	0.097	0.180	0.641	1.0	0.108	0.041
Очень высокое (ОВ)	0.01	0.004	0.007	0.009	0.011	0.017	0.218	0.547	1.0

Формирование информации о «качестве кислого газа»  $F_{1,1}$  производится в модуле (рис. 3), который реализует нечеткий логический вывод на базе продукционных правил, представленных ниже [7], – таблица 4.

Таблица 4 – Фрагмент базы правил для модуля формирования информации об  $F_{1,1}$

№	$T_G$	$P_G$	$F_G$	$TR$	$F_{1,1}$
1	Средний	Средний	Средний	Средний	Средний
2	Высокий	Средний	Средний	Средний	Средний
...	...	...	...	...	...
20	Очень высокий	Средний	Очень высокий	Очень высокий	Очень высокий
21	Средний	Очень низкий	Очень высокий	Очень высокий	Очень высокий

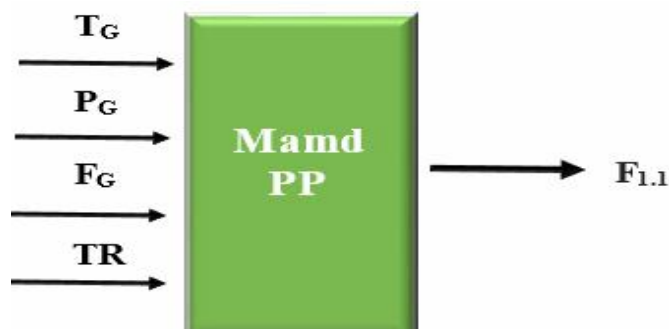


Рис. 3 – Схема входных и выходных данных для модуля, формирующего логический вывод

Правила, перечисленные в таблице, можно представить и в текстовой форме.

ПРАВИЛО 1: «ЕСЛИ  $T_G$  «СРЕДНИЙ» И  $P_G$  «СРЕДНИЙ» И  $F_G$  «СРЕДНИЙ» И  $TR$  «СРЕДНИЙ», ТО  $F_{1,1}$  «СРЕДНИЙ»;

...  
ПРАВИЛО 21: «ЕСЛИ  $T_G$  «СРЕДНИЙ» И  $P_G$  «ОЧЕНЬ НИЗКИЙ» И  $F_G$  «ОЧЕНЬ ВЫСОКИЙ» И  $TR$  «ОЧЕНЬ ВЫСОКИЙ», ТО  $F_{1,1}$  «ОЧЕНЬ ВЫСОКИЙ»;

Аналогичным образом формируются и правила для  $F_{1,2}... F_{1,5}$ ,  $F_{2,1}... F_{2,5}$ ,  $F_{3,1}... F_{3,5}$ ,  $F_{4,1}... F_{4,5}$ ,  $F_{5,1}... F_{5,5}$ . Для экономии места соответствующие фрагменты базы правил не приводятся.

Таким образом, оценка риска производится в следующей последовательности.

1. Получение значений параметров технологического процесса производства серы, которые измеряются количественно с помощью датчиков.
2. На основе них формирование значений качественных параметров (уровней риск-факторов).
3. Получение значений параметров из высших уровней системы управления (информация отдела кадров, медицинской службы и т.д.).
4. С помощью нечеткого логического вывода – получение итоговых нечетких подмножеств, соответствующих уровням базовых риск-факторов по схеме, представленной на рисунке 4.
5. Дефазификация полученных значений (методом центра тяжести).
6. Используя формулу (1) и учитывая систему весов  $S$ , получаем значение комплексного риск-фактора  $F_0$ .

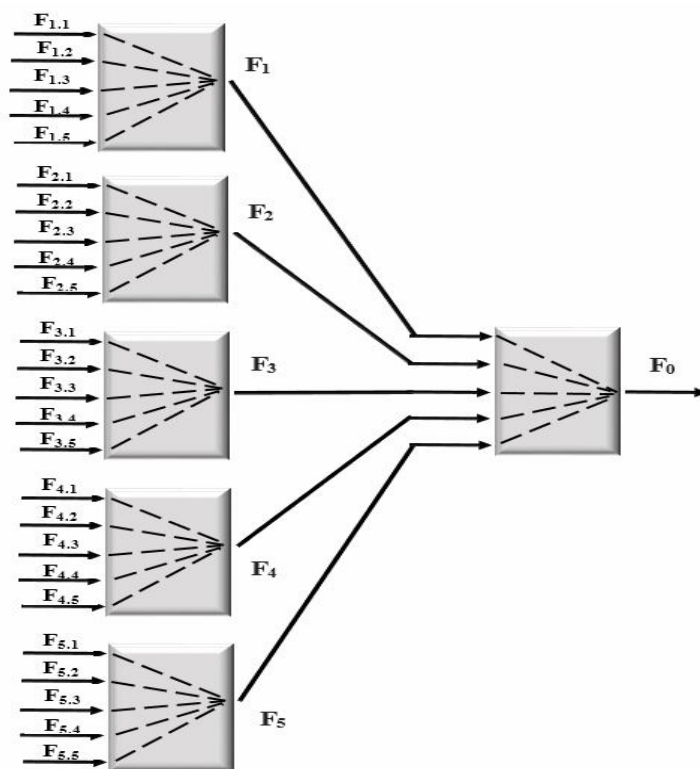


Рис. 4 – Схема оценки риска аварии на основе «дерева иерархии» факторов



**Заключение.** Предложенная методика оценки риска возникновения аварийной ситуации позволяет рационально организовать мониторинг внутренней среды моноэргатической системы, обеспечивает эффективное выявление наиболее уязвимых мест при разработке плана развития системы на ближайшую и долгосрочную перспективу. Существенным плюсом этой методики является то, что ее использование возможно и при таких обстоятельствах, когда дать точную оценку параметру, важному для принятия решения, невозможно. Объединение качественных и количественных характеристик для оценки риска аварийных ситуаций в одно «поле» анализа позволяет учитывать большее количество факторов и точнее определять вероятности наступления аварий. Как следствие, улучшается возможность оперативного принятия мер, необходимых для ее предотвращения аварийных ситуаций. Таким образом, рассмотренный подход является средством поддержания устойчивого состояния системы, инструментом прогнозирования ее поведения. В результате обеспечивается стабильное функционирование системы (технологического оборудования в сочетании с человеком-оператором); создание благоприятных условий для модернизации и развития системы в будущем.

#### Список литературы

1. Брумштейн Ю. М. О некоторых моделях управления взаимосвязанными рисками / Ю. М. Брумштейн // Известия ВолгГТУ, серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – 2015. – № 13 (177). – С. 95–100.
2. Глушенко С. А. Система нечеткого моделирования рисков инвестиционно-строительных проектов / С. А. Глушенко, А. И. Долженко // Бизнес-информатика. – 2015. – № 1 (31). – С. 48–58.
3. Недосекин А. О. Нечеткие парные сравнения / А. О. Недосекин // Аудит и финансовый анализ. – 2003. – № 5. – С. 53.
4. Недосекин А. О. Нечеткий финансовый менеджмент / А. О. Недосекин. – Москва : Аудит и финансовый анализ, 2003. – 76 с.
5. Проталинский О. М. Программный комплекс для обучения операторов технологического процесса получения серы / О. М. Проталинский, И. А. Щербатов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 2. – С. 29–34.
6. Проталинский О. М. Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов / О. М. Проталинский. – Астрахань: АГТУ, 2004. – 183 с.
7. Проталинский О. М. Гибридная модель каталитического реактора процесса Клауса / О. М. Проталинский, Ю. И. Мичуров, И. А. Щербатов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2005. – № 2. – С. 23.
8. Симонов С. В. Анализ рисков, управление рисками / С. В. Симонов // Информационный бюллетень «Jet Info». – 1999. – № 1 (68). – С. 2–28.
9. Учаев Д. Ю. Анализ и управление рисками, связанными с информационным обеспечением человеко-машинных АСУ технологическими процессами в реальном времени / Д. Ю. Учаев, Ю. М. Брумштейн, И. М. Ажмухаев, О. М. Князева, И. А. Дюдиков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 2 (34). – С. 82–97.
10. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab / С. Д. Штовба. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
11. Щербатов И. А. Классификация неопределенностей в задачах моделирования и управления сложными слабоформализуемыми системами / И. А. Щербатов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 1, № 1 (69). – С. 175–179.
12. Щербатов И. А. Концепция системного анализа сложных слабоформализуемых многокомпонентных систем в условиях неопределенности / И. А. Щербатов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 2 (38). – С. 28–35.
13. Щербатов И. А. Снижение объемов промышленных выбросов крупнотоннажных установок с использованием экспертной информации / И. А. Щербатов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 1. – С. 121–125.
14. Щербатов И. А. Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы / И. А. Щербатов, О. М. Проталинский // Управление большими системами : сборник трудов. – 2013. – № 45. – С. 30–46.
15. Fishburn P. Utility Theory for Decision-Making / P. Fishburn. – N. Y., Wiley, 1970. – 234 p.
16. Frey W. Socio-Technical Systems in Professional Decision Making / W. Frey. – Режим доступа: <http://cnx.org/content/m14025/latest/> (дата обращения 15.11.2016), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
17. Kilian M. Maximising Claus plant efficiency / M. Kilian, G. Wozny // Hydrocarbon engineering. – September 2002. – P. 1–6.
18. Nedosekin A. Fuzzy Financial Management / A. Nedosekin. – Russia, Moscow, AFA Library, 2003. – 184 p.
19. Protalinskii O. M. Analysis and Modelling of Complex Engineering Systems Based on the Component Approach / O. M. Protalinskii, I. A. Shcherbatov, V. N. Esaulenko // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 24, № 2. – P. 276–283.

#### References

1. Brumshteyn Yu. M. O nekotorykh modelyakh upravleniya vzaimosvyazannymi riskami [On some models of interrelated risks management]. *Izvestiya VolgGTU, seriya «Aktualnye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh»* [Proceedings of the VolgGTU, Series "Actual Problems of Management, Computing Hardware and Informatics in Engineering Systems"], 2015, no. 13 (177), pp. 95–100.

2. Glushenko S. A., Dolzhenko A. I. Sistema nechetkogo modelirovaniya riskov investitsionno-stroitelnykh proektov [System of fuzzy risk modeling of investment projects]. *Biznes-informatika* [Business-Informatics], 2015, no. 1 (31), pp. 48–58.
3. Nedosekin A. O. Nechetkie parnye sravneniya [Fuzzy pairwise comparisons]. *Audit i finansovyy analiz* [Audit and Financial Analysis], 2003, no. 5, pp. 53.
4. Nedosekin A. O. *Nechetkiy finansovyy menedzhment* [Fuzzy financial management], Moscow, Audit i finansovyy analiz Publ., 2003. 76 p.
5. Protalinskiy O. M., Shcherbatov I. A. Programmnyy kompleks dlya obucheniya operatorov tekhnologicheskogo protsessa polucheniya sery [Software for training operators of technological process of obtaining sulphur]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Higher Educational Institutions. The North Caucasus Region. Technical Sciences], 2006, no. 2, pp. 29–34.
6. Protalinskiy O. M. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta pri avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Application of artificial intelligence techniques in the automation of technological processes], Astrakhan, ASTU Publ. House, 2004. 183 p.
7. Protalinskiy O. M., Michurov Yu. I., Shcherbatov I. A. Gibridnaya model kataliticheskogo reaktora protsessa Klause [Hybrid model of catalytic reactor of the Claus process]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Higher Educational Institutions. The North Caucasus Region. Technical Sciences], 2005, no. 2, pp. 23.
8. Simonov S. V. Analiz riskov, upravlenie riskami [Risk analysis and risk management]. *Informatsionnyy byulleten «Jet Info»* [Newsletter "Jet Info"], 1999, no. 1 (68), pp. 2–28.
9. Uchaev D. Yu., Brumshteyn Yu. M., Azhmukhadedov I. M., Knyazeva O. M., Dyudikov I. A. Analiz i upravlenie riskami, svyazannymi s informatsionnym obespecheniem cheloveko-mashinnykh ASU tekhnologicheskimi processami v real'nom vremeni [Analysis and management of risks associated with information security man-machine automatic control system of technological processes in real time]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technology], 2016, no. 2 (34), pp. 82–97.
10. Shtovba S. D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami Matlab* [Design of fuzzy systems by means of Matlab], Moscow, Goryachaya liniya– Telekom Publ., 2007. 288 p.
11. Shcherbatov I. A. Klassifikatsiya neopredelennostey v zadachakh modelirovaniya i upravleniya slozhnymi slaboformalizuemymi sistemami [Classification of uncertainties in modelling and control of complex poorly formalized systems]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University], 2013, vol. 1, no. 1 (69), pp. 175–179.
12. Shcherbatov I. A. Kontseptsija sistemnogo analiza slozhnykh slaboformalizuemyykh mnogokomponentnykh sistem v usloviyakh neopredelennosti [The concept of system analysis of complex poorly formalized multicomponent systems under uncertainty]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [The Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2013, no. 2 (38), pp. 28–35.
13. Shcherbatov I. A. Snizhenie obemov promyshlennykh vybrosov krupnotonnazhnykh ustanovok s ispolzovaniem ekspertno informatsii [Decrease in volumes of industrial emissions of large installations using expert information]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Control, Computer Engineering and Computer Science], 2009, no. 1, pp. 121–125.
14. Shcherbatov I. A., Protalinskiy O. M. Slozhnye slaboformalizuemyye mnogokomponentnyye tekhnicheskie sistemy [Poorly formalized complex multicomponent technical systems]. *Upravlenie bolshimi sistemami : sbornik trudov* [Managing Large Systems. Proceedings], 2013, no. 45, pp. 30–46.
15. Fishburn P. *Utility Theory for Decision-Making*, N. Y., Wiley, 1970. 234 p.
16. Frey W. *Socio-Technical Systems in Professional Decision Making*. Available at: <http://cnx.org/content/m14025/latest/> (accessed 15.11.2016).
17. Kilian M., Wozny G. Maximising Claus plant efficiency. *Hydrocarbon engineering*, September 2002, pp. 1–6.
18. Nedosekin A. *Fuzzy Financial Management*, Russia, Moscow, AFA Library, 2003. 184 p.
19. Protalinskiy O. M., Shcherbatov I. A., Esaulenko V. N. Analysis and Modelling of Complex Engineering Systems Based on the Component Approach. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 24, no. 2, pp. 276–283.