

УДК 004.8

## **МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ УПРАВЛЕНИЯ**

*Статья поступила в редакцию 12.09.2013, в окончательном варианте 18.11.2013.*

**Абзалов Альберт Вайсович**, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: aabzalov@mail.ru

**Жедунов Руслан Равкатович**, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а, e-mail: zhedunov@mail.ru

Предотвращение возникновения аварийных ситуаций является одним из важнейших направлений деятельности, связанной с управлением технологическими процессами. При этом эффективно автоматическое распознавание предаварийных ситуаций (ПАС) и оказание интеллектуальной поддержки оператору. Такая поддержка может опираться на использование современных информационных технологий и методов искусственного интеллекта. При этом достоверность идентификации ПАС во многом зависит от качества и полноты баз знаний, на основе которых функционируют распознающие ПАС экспертные системы. В рамках построения таких систем после определения проблемы и извлечения знаний проводится их структурирование, а затем формализация. Создана методика для структурирования экспертных знаний о возможных ПАС и их причинах на примере аммиачной холодильной установки. Особенность методики – наличие процедуры создания производственных правил, использующей методы системного анализа и инженерии знаний. Авторами разработаны и представлены в статье диаграммы взаимосвязей между технологическими параметрами, неисправностями, их причинами и способами устранения. Сформирован набор производственных правил для системы идентификации ПАС. Описанная методика может использоваться для диагностики ПАС различных технологических процессов.

**Ключевые слова:** предаварийные ситуации, технологический процесс, объект управления, холодильная установка, поле знаний, база знаний, производственные правила, экспертная система

## **THE TECHNIQUE OF ANALYSIS OF THE PRE-EMERGENCY SITUATIONS ON TECHNOLOGICAL OBJECTS OF THE CONTROL**

**Abzalov Albert V.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: aabzalov@mail.ru

**Zhedunov Ruslan R.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: zhedunov@mail.ru

The prevention of the arising the emergency situations is one of the most important direction of activity connected with management by technological processes. Herewith it's effective the automated recognition pre-emergency situations (PES) and rendering of intellectual support to the operator. Such support can base oneself on using the modern information technologies and methods of artificial intelligence. Herewith the truth of identification PES mainly depends on quality and fullness of knowledge bases, on the basis of which the expert systems of recognition PES function. Within the framework of building of such systems after the determination the problem and the extraction of knowledge their structuring is conducted, and then their formalization. The methods is created for structuring of the expert knowledge about possible PES and their reasons by the example of the ammonium refrigeration installation. The particularity of these methods is presence of the procedure of the making the production rules, using methods of the system analysis and knowledge engineering. The authors worked out and presented in article the diagrams of interconnections between technological parameters, the faults, their reasons and the ways of their removal. The set of the production rules is formed for the system of identification PES. The described methods can be used for diagnostics PES of different technological processes.

**Keywords:** emergency situations, technological process, object of the control, refrigeration installation, knowledge field, knowledge base, production rules, expert system

Предаварийные ситуации (ПАС) на технологическом объекте управления (ТОУ) можно трактовать как отклонения от нормального режима работы, которые при неблагоприятных условиях могут привести к аварии. Цель идентификации таких ситуаций состоит в том, чтобы обеспечить своевременное принятие оператором мер по возврату процесса в нормальный режим работы, либо своевременному останову процесса, что способствует повышению безопасности производства.

Для раннего обнаружения неисправностей оборудования в технологических процессах используются различные методы технической диагностики, которые предполагают постоянный мониторинг, диагностику и прогноз технического состояния оборудования [1, 7]. В принципе, распознавание ПАС также можно отнести к задачам технической диагностики. Отличие, скорее всего, заключается в том, что при распознавании ПАС большее внимание уделяется оценке общей ситуации на ТОУ, учитывающей взаимосвязи различных технологических параметров, и вопросам, связанным с управлением технологическим процессом при возникновении неисправностей. В рамках технической диагностики эти вопросы не всегда решены.

Задача идентификации ПАС может решаться с помощью методов, основанных на технологии экспертных систем и математическом аппарате нечетких множеств [3, 5]. В режиме реального времени осуществляется идентификация текущего состояния объекта управления и выявление причины ПАС. Для всех входных и выходных координат интеллектуальной модели используются лингвистические переменные (ЛП), представленные в виде нечетких множеств. Некоторым недостатком этого подхода является необходимость проведения большой предварительной работы по определению состояний ТОУ, а также функций принадлежности значениям ЛП «ситуация» и «причина» для каждого из состояний.

Предлагаемая методика анализа ПАС рассматривается применительно к аммиачной холодильной установке (АХУ). Такие установки используются в различных технологических процессах (в частности при охлаждении и замораживании пищевых продуктов, в химико-технологических процессах) и относятся к опасным производственным объектам (ОПО). Для обеспечения безопасности на АХУ применяется система автоматической защиты (САЗ), наличие которой является необходимым требованием. Для снижения уровня риска и повышения эффективности управления при эксплуатации АХУ целесообразно также применение информационной системы (ИС), оказывающей интеллектуальную поддержку обслуживающему персоналу в отношении идентификации аварийных и предаварийных ситуаций, так как по статистике большинство аварий на АХУ связано с человеческим фактором.

Отличительной особенностью предлагаемой методики является наличие процедуры формирования продукционных правил на основе анализа взаимосвязей между технологическими параметрами, неисправностями, их причинами и способами устранения. Для извлечения экспертных знаний о возможных ПАС на АХУ нами были использованы коммуникативные и текстологические методы, для структурирования знаний – причинный и морфологический анализ. В этом случае модель объекта исследования представляется в виде системы факторов, влияющих на возникновение и развитие ПАС.

В общем случае ситуация  $S$  на АХУ зависит от набора факторов  $F = \{F_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), измеряемых количественно и/или оцениваемых качественно ( $N$  – число факторов). Оценка ситуации  $S$  может принимать одно из следующих значений: аварийная ситуация (АС), ПАС, отклонение от нормы, нормальная ситуация.

Порядок анализа ПАС показан на рис. 1.

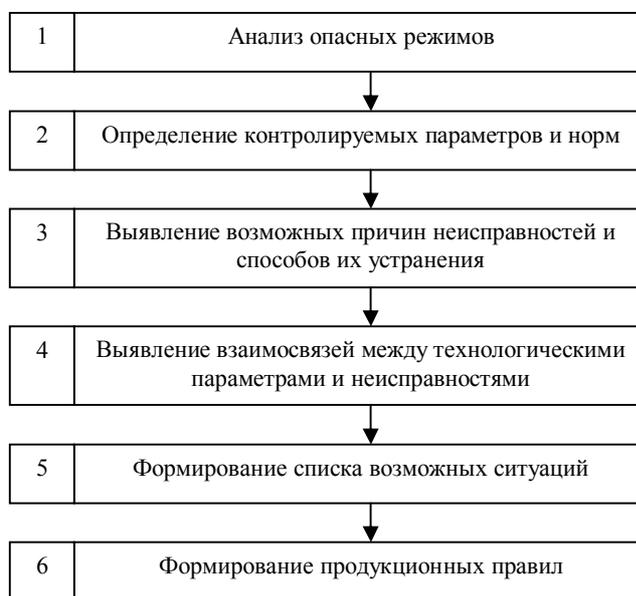


Рис. 1. Порядок анализа ПАС

Рассмотрим отдельные этапы подробнее (дальнейшая нумерация пунктов соответствует блокам на рис. 1).

1. Для формирования поля знаний  $Pz$  ( $Pz = \langle S_K, S_F \rangle$ , где  $S_K, S_F$  – соответственно концептуальная и функциональная структура предметной области (ПО) [2]) прежде всего анализируются опасные режимы, которые могут возникнуть на АХУ, а также осуществляется ее декомпозиция на технологические блоки. Определяются все элементы (т.е. машины, аппараты и другое оборудование, входящее в состав холодильной установки) и выявляются потенциально возможные неисправности для каждого элемента, а также диагностические признаки. Таким образом, используется дедуктивная стратегия проектирования концептуальной структуры ПО.

На этом этапе целесообразно использовать методы, применяемые при анализе риска ОПО, в частности HAZID (Hazard identification study – идентификация опасностей) и HAZOP (Hazard and operability studies – анализ опасностей и работоспособности) [4].

При проведении процедуры HAZID исследуются различные виды опасностей (внешние и экологические риски, опасности на технологическом объекте и др.). Процедура HAZOP основана на анализе отклонения технологических параметров по выбранному управляющему слову (табл. 1).

2. Определяются технологические параметры, которые будут контролироваться ИС в режиме реального времени. Все параметры можно разделить на две группы по степени значимости: а) параметры, контролируемые САЗ; б) другие параметры, изменение значений которых может привести к отклонению процесса от нормы или к ПАС.

Нормы для количественных параметров определяются на основе нормативных документов (технологический регламент, инструкции завода-изготовителя и др.), а также экспертных знаний.

3. Для каждой неисправности выявляются все возможные причины, которые могут вызвать данную неисправность. Каждой причине неисправности соответствует определенный способ ее устранения (или несколько способов). Здесь же определяются такие взаимосвязи:

$$C_1 \rightarrow W_1, C_2 \rightarrow W_2, \dots, C_L \rightarrow W_L,$$

где  $C$  – причина неисправности;  $W$  – способ устранения неисправности;  $L$  – общее количество причин неисправностей и соответствующих им способов устранения.

Таблица 1

**Применение управляющих слов к технологическим параметрам**

Управляющее слово	Описание
Нет	Функция элемента технологического объекта не выполняется, например, нет подачи хладагента в систему охлаждения
Больше	Количественное увеличение параметра, например, повышение температуры нагнетания компрессора
Меньше	Количественное уменьшение параметра, например, понижение давления всасывания компрессора
Обратно	Изменение значения параметра на противоположное, например, открытие клапана вместо закрытия
Иначе чем	Изменение значения параметра на другое, например, изменение состава хладоносителя в системе охлаждения
Другое	Действие, отличающееся от назначения, например, сбой в подаче электроэнергии в машинное отделение

4. Определяется характер и направление связей между технологическими параметрами и неисправностями. Для этого строятся причинно-следственные диаграммы взаимосвязей (*DV*) для каждой неисправности. Обобщенно структуру диаграммы *DV* можно представить в следующем виде:  $DV = \langle NP, X, C, W, R \rangle$ , где *NP* – неисправность (или признак неисправности);  $X = \{X_i\}$  – множество параметров, влияющих на данную неисправность или являющихся ее следствием (они могут быть как количественными, так и качественными);  $C = \{C_j\}$  – множество возможных причин, вызывающих данную неисправность;  $W = \{W_k\}$  – множество возможных способов устранения неисправности;  $R = \{R_l\}$  – множество отношений между *NP*, *X*, *C*, *W*.

В результате проведенного анализа для исследуемой АХУ (двухступенчатая установка с непосредственным охлаждением) были построены диаграммы взаимосвязей для различных неисправностей. На рис. 2 приведена диаграмма для признака «высокое давление и температура конденсации».

5. Создается список возможных ситуаций. Для каждой диаграммы определена совокупность влияющих/зависимых параметров (*n* – число параметров). Допустим, что каждый параметр  $X_i$  может принимать два значения:  $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}\}$ , где  $x_{i1}$  – положительное или отрицательное отклонение значения параметра  $X_i$  от нормы;  $x_{i2}$  – нормальное значение параметра  $X_i$ . Множество всех возможных ситуаций *MS* для данной диаграммы, можно представить в виде следующей матрицы:

$$MS = \begin{pmatrix} x_{11}x_{12} \\ x_{21}x_{22} \\ \dots\dots \\ x_{n1}x_{n2} \end{pmatrix}$$

Набор значений (по одному из каждой строки) различных параметров представляет собой возможную ситуацию. Общее число ситуаций *Q*, характерных для данной неисправности, определяется с помощью известной формулы  $Q = 2^n$ . Генерирование списка возможных ситуаций проводится для каждой неисправности.

Если при описании параметров используются ЛП, принимающие вербальные значения (например, БПО – большое положительное отклонение; ПО – положительное отклонение; Н – норма; ОО – отрицательное отклонение; БОО – большое отрицательное отклонение), то в этом случае размерность матрицы *MS* увеличивается, и общее число ситуаций определяется по формуле  $Q = m^n$ , где *m* – число значений ЛП.

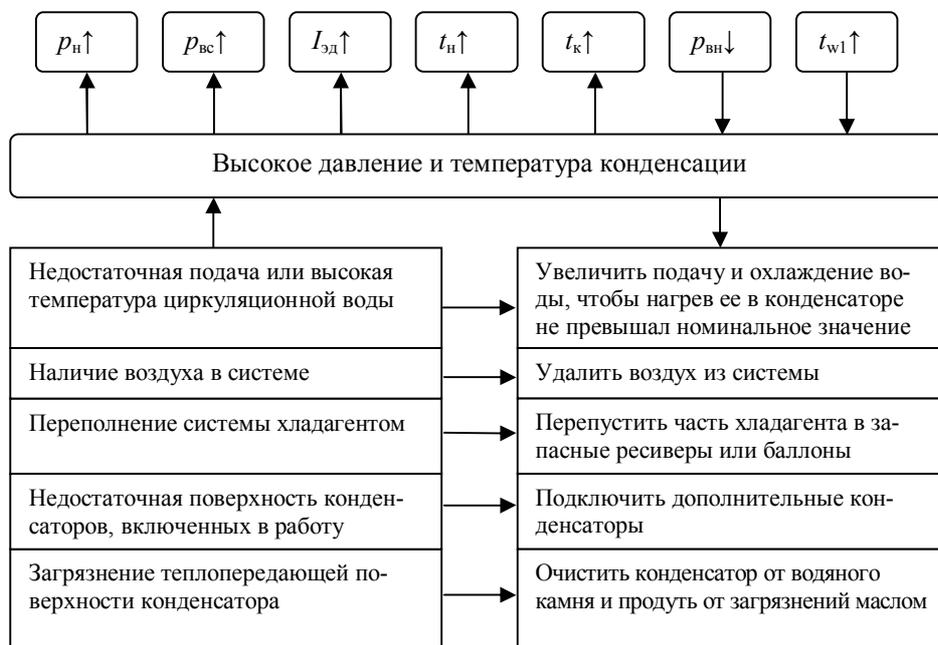


Рис. 2. Диаграмма взаимосвязей для признака неисправности «высокое давление и температура конденсации»:  $p_n$  – давление нагнетания компрессора, МПа;  $p_{vc}$  – давление всасывания компрессора, МПа;  $I_{эд}$  – сила тока в электродвигателе компрессора, А;  $t_n$  – температура нагнетания компрессора, °С;  $t_k$  – температура конденсации, °С;  $p_{вн}$  – давление водяного насоса, МПа;  $t_{w1}$  – температура воды, поступающей на конденсатор, °С; стрелки рядом с обозначением параметра показывают, увеличение или уменьшение данного параметра влияет на данную неисправность или зависит от нее

6. Процедура создания набора производственных правил заключается в следующем.

6.1. Прежде всего, формируются правила, соответствующие АС. Возможные опасные режимы на АХУ, связанные с нарушением нормальных условий эксплуатации или выходом из строя отдельных узлов или деталей холодильных машин, как правило, заранее известны. Приборы автоматической защиты воспринимают контролируемые технологические величины (температуры, давления и др.) и при достижении ими предельно допустимых значений вырабатывают аварийный сигнал. Для таких ситуаций создается отдельное правило следующего вида:

«Если Параметр  $i$  = Критическое, то Ситуация = АС»,

где «Параметр  $i$ » соответствует опасному значению.

6.2. Формируются правила, соответствующие ПАС и отклонению от нормального режима. Из созданного ранее списка ситуаций удаляются повторяющиеся комбинации. Полученные значения списка образуют antecedent производственных правил. На основе экспертного опроса определяется оценка ситуации для каждого правила.

Приведем простейший пример:

«Если Низкий Перегрев на всасывании в компрессор и Низкая Температура нагнетания компрессора, то Ситуация = ПАС».

Правила, отражающие отклонение ситуации от нормальной, отличаются тем, что ситуация не требует немедленного вмешательства обслуживающего персонала (в основном это отклонения от оптимального режима).

6.3. Формируются правила, определяющие наиболее вероятные причины неисправностей и способы их устранения. Методом экспертных оценок для каждого созданного ра-

нее правила определяется одна или несколько причин и коэффициенты уверенности для каждой причины. Смысл коэффициента уверенности можно определить как степень уверенности эксперта в том, что именно эта причина является наиболее вероятной в данной ситуации.

Значения коэффициентов уверенности  $kc$  принадлежат интервалу  $[0, 1]$  и определяются по следующей схеме с дальнейшим округлением полученных результатов:

$$kc = \sum_{i=1}^E kc_i \cdot \alpha_i / \sum_{i=1}^E \alpha_i,$$

где  $E$  – общее число экспертов;  $kc_i$  – значение  $kc$ , предложенное  $i$ -м экспертом;  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, \dots, E$ ) – веса экспертов. При отсутствии информации о компетентности экспертов можно принять  $\alpha_i = 1$ .

В результате проведенных исследований была разработана функциональная структура ПО, состоящая из продукционных правил. В качестве примера в табл. 2 приведены некоторые простые правила оценки ситуации. В табл. 3 указаны правила определения причины для ПАС «влажный ход компрессора». В столбце «Условие»:  $k$  – критическое значение параметра;  $h$  – высокое значение параметра;  $l$  – низкое значение параметра; обозначения переменных расшифрованы в табл. 4.

Влажным ходом называют режим, при котором в компрессор вместе с отсасываемым из испарителя паром частично попадает жидкий хладагент. Анализ статистических данных показывает, что основной причиной аварий на АХУ (примерно 75 % аварий) являются неправильные действия обслуживающего персонала, влекущие за собой гидравлические удары в компрессорах, которые являются следствием влажного хода компрессора. Поэтому раннее распознавание и предотвращение таких ситуаций позволит значительно сократить число аварий.

Таблица 2

**Примеры правил, оценивающих ситуацию**

№	Условие	Ситуация	Признак неисправности
1	$kTv$	АС	Влажный ход компрессора
2	$kTn$	АС	Высокая температура нагнетания
3	$lTv$ и $lTn$	ПАС	Влажный ход компрессора
4	$hPv$ и $hle$	ПАС	Высокое давление всасывания и перегрузка электродвигателя компрессора
5	$hTpo$ и $lPvn$	ОТКЛОНЕНИЕ	Высокая температура переохлаждения и низкое давление водяного насоса
6	$hTk$ и $hTw2$	ОТКЛОНЕНИЕ	Высокая температура конденсации и высокая температура воды, выходящей из конденсатора

Таблица 3

**Правила, определяющие причины для ПАС «влажный ход компрессора»**

№	Условие	Причина	$kc$
1	$lTv$ и $lTn$	Неправильное регулирование подачи хладагента в ЦР или ПС	0,9
2	$lTv$ и $lTn$	Избыток хладагента в системе	0,3
3	$lTv$ и $lTn$	Обрастание снеговой шубой батарей камер	0,2
4	$lTv$ и $lTn$	Резкое увеличение теплопритоков в камеру	0,5
5	$lTv$ и $lTn$ и $hHc$	Неправильное регулирование подачи хладагента в ЦР	1,0
6	$lTv$ и $lTn$ и $hHps$	Неправильное регулирование подачи хладагента в ПС	1,0
7	$lTv$ и $hPv$ и $hle$	Неправильное регулирование подачи хладагента в ЦР или ПС	0,8
8	$lTv$ и $hPv$ и $hle$	Резкое увеличение теплопритоков в камеру	0,2
9	$lTn$ и $hPv$ и $hle$	Неправильное регулирование подачи хладагента в ЦР или ПС	0,8
10	$lTn$ и $hPv$ и $hle$	Резкое увеличение теплопритоков в камеру	0,2

**Обозначения переменных в условиях правил**

№	Переменная	Описание
1	$Tv$	Перегрев на всасывании в компрессор, °С
2	$Tn$	Температура нагнетания компрессора, °С
3	$Hc$	Уровень аммиака в циркуляционном ресивере (ЦР), мм
4	$Hps$	Уровень аммиака в промежуточном сосуде (ПС), мм
5	$Pv$	Давление всасывания компрессора, МПа
6	$Ie$	Сила тока в электродвигателе компрессора, А
7	$Tk$	Разность между температурой конденсации в конденсаторе (КД) и температурой отходящей воды, °С
8	$Tpo$	Разность между температурой переохлаждения после переохладителя (ПО) и температурой поступающей воды, °С
9	$Pvn$	Давление водяного насоса, МПа
10	$Tw2$	Нагрев воды в конденсаторе, °С

Структурная схема системы идентификации ПАС (СИПАС) представлена на рис. 3. СИПАС входит в состав автоматизированной системы управления АХУ [6]. Она работает в сопряжении с датчиками, с помощью которых информация о технологических параметрах поступает на вход в систему через определенные промежутки времени  $T$ , равные периоду опроса датчиков ( $T$  является настраиваемым параметром). На основе этой информации можно оценивать состояние АХУ и проводить диагностику неисправностей во время ее

В блоке 1 (рис. 3) осуществляется ввод информации от технологических датчиков:  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ , где  $i$  – отличительный номер параметра;  $n$  – количество параметров. Затем, в блоке 2 производится определение динамических характеристик технологического процесса (скорости изменения параметров):  $V_{xi} = (x_i^k - x_i^{k-1}) / T$ , где  $k$  – порядковый номер такта опроса датчиков;  $T$  – период опроса датчиков, с.

В блоке 3 определяются прогнозируемые значения параметров методом экстраполяции. Блок 4 предназначен для сравнения текущих и прогнозируемых значений параметров с нормативными данными и определения признаков отклонения технологического процесса от нормы. В блоке 5 производится обработка правил и формируется оценка текущего состояния АХУ. Эта оценка предоставляется ЛПР (лицо, принимающее решение) (блок 6). Если была идентифицирована ПАС (или отклонение от нормы), то осуществляется поиск причины ее возникновения (блок 7). Список возможных причин выводится на экран монитора (блок 8). Рекомендуемые действия, которые необходимо предпринять ЛПР определяются в блоке 9. Эта информация также выводится на экран монитора (блок 10). На основе этой информации ЛПР оказывает управляющие воздействия на объект управления (блок 11). Если система оценивает ситуацию как аварийную, требующую немедленной остановки компрессора, то прямые воздействия на объект управления производятся в блоке 12. В любой момент времени ЛПР может ввести качественную информацию о состоянии оборудования (в блоке 13). В случае необходимости эксперт или инженер по знаниям могут соответствующим образом скорректировать



6. Шуршев В. Ф. Система идентификации предаварийных ситуаций на аммиачной холодильной установке / В. Ф. Шуршев, А. В. Абзалов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2008. – № 1. – С. 56–59.

7. Hasebo Magne K. The Key to Successful Implementation of New Process Technology / Hasebo Magne K. // *Scandinavian Oil-Gas*. – 2005. – Vol. 33, no. 11–12. – P. 86–87.

#### References

1. Bashirov M. G., Prakhov I. V. Sovremennyye metody otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniya resursa bezopasnoy ekspluatatsii nasosno-kompressornogo oborudovaniya s elektricheskim privodom [Modern methods of technical state assessment and prediction of safe service life of the compressor equipment with electric drive]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2010, no. 3, pp. 7–13

2. Gavrilova T. A., Khoroshevskiy V. F. *Bazy znaniy intellektualnykh sistem* [The knowledge bases of intellectual systems]. Saint Petesburg, 2001. 384 p.

3. Zhedunov R. R. Sistema identifikatsii predavariynykh situatsiy tekhnologicheskogo protsessa, ispolzuyushchaya apparat nechetkoy logiki i dannye veroyatnykh otkazov [Identification system preemergencies of technological processes using fuzzy logic and data of probable refusals]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Astrakhan State Technical University], 2007, no. 3, pp. 169–173.

4. Lisanov M. V., Simakin V. V., Makushenko A. I., Dvornichenko P. I., Yermeev-Raykhert A. V. Primenenie metodov analiza opasnostey HAZID i HAZOP pri proektirovanii gazotransportnogo terminala [Application of methods of HAZID and HAZOP danger analysis in the design of gas-transport terminal]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti* [Labour Safety in Industry], 2008, no. 8, pp. 63–70.

5. Protalinskiy O. M. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta pri avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov* [The using of methods of artificial intelligence when automating the technological processes]. Astrakhan, Astrakhan State Technical University Publ., 2004. 184 p.

6. Shurshev V. F., Abzalov A. V. Sistema identifikatsii predavariynykh situatsiy na ammiachnoy kholodilnoy ustanovke [Identification system preemergencies at ammonia refrigeration system]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2008, no. 1, pp. 56–59.

7. Hasebo Magne K. The Key to Successful Implementation of New Process Technology. *Scandinavian Oil-Gas*, 2005, vol. 33, no. 11–12, pp. 86–87.