

Модель оценки готовности термохимических газоанализаторов

© И.В. Самарин , А.В. Крючков, А.Ю. Строгонов

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1)

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечена важность проведения мероприятий по обеспечению пожарной безопасности (ПБ) на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК), в частности, при течении непрерывных технологических процессов нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Благодаря специальному программному обеспечению в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами лица, принимающие решения, способны управлять процессами планирования и выполнения данных мероприятий. В качестве объекта исследования выбрана подсистема предупреждения пожаров и взрывов для управления процессами контроля газоанализирующего оборудования.

Теоретические основы. Процесс обеспечения ПБ на объектах нефтепереработки, составной частью которого является процесс технического обслуживания датчиков газоанализаторов, характеризуется такими случайными подпроцессами, как климатические и погодные изменения на объекте. Данный процесс предлагается разбить на два встречных подпроцесса: разрушительный и созидательный. События, связанные с проведением калибровки, поверки или замены чувствительных элементов в термохимических датчиках (ТХД), составляют суть восстановительного подпроцесса. События разрушительного подпроцесса связаны с появлением регистрируемых дежурной сменой сведений об отклонении в работе ТХД от нормированных значений. Случайность этого подпроцесса предлагается описать марковским процессом. Поведение системы датчиков моделируется в виде двух потоков. ТХД имеют два состояния: готов или не готов.

Результаты исследования. Модель готовности газоанализаторов рассчитана как отношение числа потенциально готовых к использованию в соответствии с нормативно-технической документацией ТХД к их общему числу с учетом случайности событий, которые выводят ТХД из состояния готовности. Исследован частный случай, на примере которого проиллюстрирована схема построения марковской модели. Рассчитано возможное число состояний совокупности ТХД для такой ситуации. Динамика перехода между группами состояний в совокупности ТХД подсистемы оповещения о пожаре определяется предлагаемой системой дифференциальных уравнений Колмогорова, которая для частного случая представлена пятью равенствами. Выполненный расчет может быть обобщен на любое количество выносных датчиков.

Выводы. Рассмотрен способ оценки готовности к использованию ТХД газоанализаторов на открытых площадках НПЗ. Метод может быть применен в процессе функционирования автоматизированной системы предотвращения пожаров и взрывов.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс; нефтеперерабатывающий завод; автоматизированная система управления технологическими процессами; пожарная безопасность; термохимический датчик; открытая площадка; техническое обслуживание; специальное программное обеспечение; цифровизация ТЭК; индустрия 4.0

Для цитирования: Самарин И.В., Крючков А.В., Строгонов А.Ю. Модель оценки готовности термохимических газоанализаторов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 61–74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74

 Самарин Илья Вадимович, e-mail: ivs@gubkin.ru

Thermochemical gas analyzer readiness assessment model

© Ilya V. Samarin , Alexey V. Kryuchkov, Andrey Yu. Strogonov

National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The importance of fire safety (FS) measures at fuel and energy industry facilities, in particular over the course of continuous technological processes of oil refineries (OR), is highlighted in the article. Decision makers are able to manage the process of planning and implementing these measures thanks to special software integrated into automated process control systems. The fire and explosion prevention subsystem designed for managing gas analyzing equipment and its control processes was chosen as the object of research.

Theoretical framework. The fire safety of oil refineries, that entails the maintenance of gas analyzer sensors, is characterized by such random subprocesses as climate and weather changes at refineries. It is proposed to split this process into two opposite subprocesses, destructive and productive ones. Events related to calibration, verification or replacement of sensitive elements of thermochemical sensors are at the core of the recovery subprocess. Destructive subprocess events are associated with the appearance of deviations in thermochemical sensors from nominal values as registered by a shift on duty. It is proposed to describe the randomness of this subprocess as a Markov process. The sensor system behavior is simulated as the two streams. Thermochemical sensors have two modes: ready and not ready.

Research results. The readiness model of gas analyzers is calculated as a ratio of the number of thermochemical sensors which are potentially ready for use in accordance with the regulatory and engineering documentation, to their total number, taking into account the randomness of events that make thermochemical sensors unready. A special case used to illustrate the Markov model building is studied. The possible number of modes for sets of thermochemical sensors is calculated for such a situation. The transition between modes of sets in a fire alarm subsystem is determined using the proposed system of differential Kolmogorov equations, which has five equations for a specific case. The calculation can be generalized for any number of remote sensors.

Conclusions. The readiness assessment method applied to thermochemical sensors of gas analyzers in open areas of refineries is studied. The method can be applied in the process of automated fire and explosion prevention system operation.

Keywords: fuel and energy industry; oil refinery; automated process control system; fire safety; thermochemical sensor; open area; maintenance; special software; digitization of the fuel and energy industry; industry 4.0

For citation: Samarin I.V., Kryuchkov A.V., Stroganov A.Yu. Thermochemical gas analyzer readiness assessment model. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):61-74. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.61-74 (rus).

✉ Ilya Vadimovich Samarin, e-mail: ivs@gubkin.ru

Введение

Обеспечение требований пожарной безопасности (ПБ) на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является одним из наиболее значимых вспомогательных технологических процессов. Мероприятия по обеспечению ПБ проводятся не только в соответствии с планами по линии ПБ, но и в случаях, когда встроенные средства контроля в оборудовании ПБ выдают сигналы об изменении его состояния. Например, на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в процессе разных технологических цепочек хранится и используется масса пожаровзрывоопасных продуктов и сырья, что, в свою очередь, создает существенную опасность возникновения крупных техногенных аварий и катастроф. Важно непрерывно совершенствовать методы предотвращения опасных ситуаций на протяжении всего технологического цикла НПЗ [1]. В работе рассматривается подход по оценке готовности термохимических датчиков (ТХД) газоанализаторов на открытых площадках НПЗ.

Планы обеспечения ПБ разрабатываются на основе параметров технологического оборудования и включены в состав систем стратегического планирования объекта. Принципы их разработки для проведения мониторинговых и иных мероприятий описаны в работах [2, 3]. Планы обеспечения ПБ оперативно контролируются дежурной сменой объекта, возглавляемой руководителем, — лицом, принимающим решение (ЛПР). Учитывая количество проводимых для этих целей мероприятий, как и их значимость для объекта НПЗ, в качестве вспомогательного инструмента ЛПР использует

программное обеспечение (ПО), встроенное в автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) объекта [4]. В публикации [5] представлено обоснование необходимости непрерывной диагностики оборудования АСУТП, а также перечень мероприятий по предотвращению пожаров и взрывов. Следует отметить активный рост внедрения в производственные процессы систем виртуальных производств, средств поддержки управления «Индустрии 4.0» на объектах ТЭК, в том числе на НПЗ [6–8]. Однако рост числа объектов контроля, активное применение новых информационных технологий не снимают с ЛПР ответственности за принимаемые решения. Принятие решений при управлении объектом остается за ЛПР.

Объединение ряда систем контроля ПБ в единую автоматизированную систему принято рассматривать как автоматизированную систему пожаровзрывобезопасности (АСПВБ), описанную, в частности, в труде [9]. В ее состав входит подсистема предупреждения пожаров и взрывов. Ее используют, в том числе для управления процессами контроля газоанализирующего оборудования. В свою очередь, ее составной частью является подсистема оповещения о пожаре, работа которой организована на основе данных, получаемых от газоанализаторов.

При использовании датчиков газов необходима их подготовка к эксплуатации. Такая подготовка выполняется в ходе их технического обслуживания (ТО). Мероприятия по калибровке и проверке чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков проводят по поверочной газовой смеси (ПГС), для которой

существуют государственные стандартные образцы (ГСО). Их установка регламентирована¹.

Теоретические основы

На объектах НПЗ используются различные датчики газоанализаторов. Наиболее доступными с точки зрения цены являются термохимические датчики [10, 11]. Для них калибровка с установкой нуля и определением порогов превышения нижнего концентрационного предела распространения пламени (% НКПР) необходима гораздо чаще, чем для датчиков других типов. Они имеют в своем составе ЧЭ, устанавливаемый в выносном датчике (ВД), где требуется выполнять анализ, и блок сигнализации и питания, используемый ЛПР или ПО АСПВБ для регистрации событий. Мероприятия ТО, связанные с поверкой и калибровкой для датчиков конкретных типов, детально описаны в руководствах по эксплуатации (РЭ). Их проведение необходимо для подтверждения готовности ЧЭ.

Установленные стационарно на открытых установках ТХД подвержены влиянию окружающей среды [12]. Поэтому в процесс изменения их готовности включаются случайные подпроцессы, ни один из которых не может быть детерминированным в принципе. Это — климатические и погодные изменения [13], влияющие на объекты НПЗ. При этом характер изменения погодных условий, влияющих на состав реагента в ВД, серьезно отличается в различных регионах. Тем не менее с определенной вероятностью можно предполагать, что на дисциплину ТО, обеспечивающую надежную работу подсистемы оповещения о пожаре, группа этих параметров влияет одинаково.

Рассматривая процесс обеспечения ПБ, можно видеть, что он разбивается на два встречных подпроцесса — разрушительный и созидательный. Каждый из них состоит из событий. При этом каждое событие переводит отдельный ТХД в некоторое состояние.

Если события разрушительного подпроцесса по большей степени случайны, исключая плановые замены оборудования и моменты наступления необходимых регламентных работ, то события созидательного процесса всегда не случайны. Но случайный ход изменений в разрушительном подпроцессе, заставляя менять порядок обслуживания ВД ремонтной бригадой, привносит в созидательный подпроцесс элемент случайности.

События разрушительного подпроцесса при обеспечении надежной работы подсистемы опове-

щения о пожаре связаны с появлением регистрируемых дежурной сменой данных об отклонении в работе ВД от нормированных значений [14]. Такие отклонения могут быть вызваны разными обстоятельствами: необходимостью замены ЧЭ при незапланированном выходе его из строя, резкими изменениями влажности или температуры, приводящими к несоответствиям в показаниях % НКПР, реально регистрируемым ВД, и т.п. В этих случаях необходимы мероприятия по восстановлению устойчивой работы системы оповещения о пожаре, которые должна выполнить ремонтная бригада с применением ГСО-ПГС.

События, связанные с проведением калибровки, поверки или замены (в том числе незапланированной) ЧЭ в ВД, составляют суть восстановительного подпроцесса. Вопрос описания работы ремонтной бригады (дисциплины ТО) в условиях случайного выхода из строя отдельных ЧЭ связан с учетом событий, которые регистрируются случайным образом [15]. При этом процесс выхода из строя ЧЭ в случайном потоке разрушительного подпроцесса имеет такие вероятностные характеристики, которые зависят только от состояния ЧЭ в текущий момент времени. А так как нормированная надежность подсистемы оповещения о пожаре зависит только от текущего состояния конкретных датчиков и не зависит от того, как они оказались в таком состоянии, то эта случайная составляющая разрушительного процесса может быть описана марковским случайным процессом [16].

Рассуждая подобным образом, можно моделировать оба подпроцесса в обеспечении заданного уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре при помощи модели готовности ТХД, установленных вокруг открытой установки НПЗ. Рассчитав ее как отношение числа потенциально готовых к использованию в соответствии с нормативно-технической документацией ВД к их общему числу $N_{\text{общ}}$, можно моделировать поведение всей системы датчиков в виде двух потоков. Первый — разрушительный. Второй — созидательный. Аналогичные расчеты использовались в исследованиях [17, 18] для других целей при определении готовности пожарных автомобилей и пожарных сил и средств АСПВБ объектов ТЭК.

Будем считать, что ТХД имеют два состояния: готов или не готов. В первом случае все мероприятия калибровки, поверки и иные действия были с ним проведены, и он может быть использован как есть в течение срока $t_{\text{м. кал.}}$. Будем также считать, что события, переводящие ТХД из состояния «готов» в состояние «не готов» не связаны с плановыми мероприятиями по их обслуживанию. Переходя к формулам, можно говорить, что:

¹ Требования к установке сигнализаторов и газоанализаторов (ТУ-газ-86). М., 1986. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9177/> (дата обращения: 16.08.2020).

$$N_{\text{общ}} = n_{\text{гот}} + n_{\text{не гот}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{общ}}$ — общее количество датчиков на объекте;
 $n_{\text{гот}}$ — количество датчиков в состоянии «готов»;
 $n_{\text{не гот}}$ — количество датчиков в состоянии «не готов».

Учитывая опыт проведения оценок, в работе [18] для определения уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре, следует задать некоторую агрегированную цель. Ее достижение будет соответствовать некоторому количественному значению — критерию уровня, который можно считать агрегатным показателем качества нормированной надежности. Проиллюстрируем это на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что надежная работа каждого из ТХД, установленных вокруг открытой площадки НПЗ (и их совокупности), определяет критерий уровня готовности оборудования на первом уровне прохождения информации в подсистеме оповещения о пожаре. В свою очередь, во всей подсистеме оповещения о пожаре на НПЗ общий критерий определяется исходя из полученных сходным образом нескольких критериев для различных составных частей участков. Одной из таких частей на заданном участке НПЗ (на рис. 1 обозначен номером 2) является открытая площадка. Другой составной частью могут служить печи. Третьей — закрытые резервуары для хранения нефтепродуктов. Внося свой вклад в общую цель, готовность или неготовность каждого из ТХД, определяют значения пока-

зателя уровня надежности работы всей подсистемы. Каждому из уровней подсистемы оповещения о пожаре на НПЗ соответствует свой граф стратегического планирования [19], что позволяет агрегировать или уточнять показатели уровня готовности для каждого из элементов подсистемы.

Одним из вариантов определения значения показателя уровня готовности оборудования для определения нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре $\sigma_{\text{над}}^{(1)}$ может служить отношение, выражающее процент готовности к работе в ней используемых датчиков:

$$\sigma_{\text{над}}^{(1)} = \frac{n_{\text{гот}}}{n_{\text{гот}} + n_{\text{не гот}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $n_{\text{гот}}$ определяется исходя из действий ремонтной бригады, а $n_{\text{не гот}}$ формируется характеристиками математически случайного потока событий, моделирующего их последовательность в разрушительном подпроцессе.

Другой вариант $\sigma_{\text{над}}^{(2)}$ — процент не готовых датчиков:

$$\sigma_{\text{над}}^{(2)} = \frac{n_{\text{не гот}}}{n_{\text{гот}} + n_{\text{не гот}}} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

В обоих случаях возможно использование полученных выше формул для расчета. При этом максимальный уровень нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре будет обеспечен при $\sigma_{\text{над}}^{(1)} = 100 \%$ и при $\sigma_{\text{над}}^{(2)} = 0$. Для реальных ус-

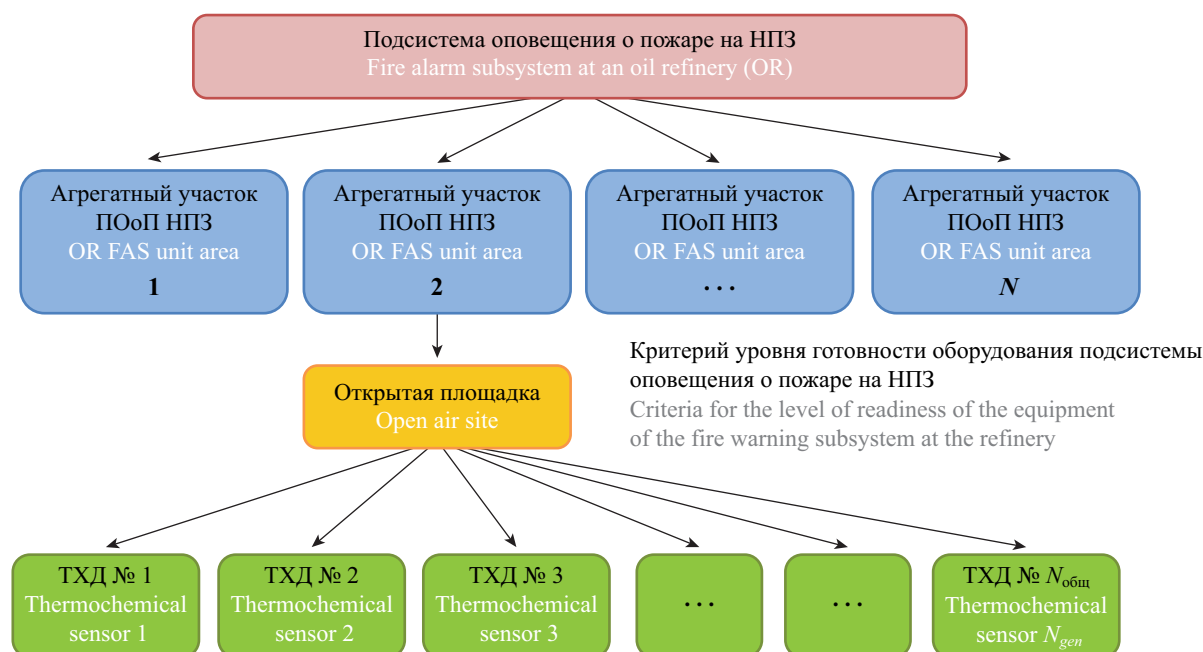


Рис. 1. Формирование агрегатной цели для критерия уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре (ПООП)

Fig. 1. Formation of the aggregate goal for the level criterion of regulated reliability of a fire alarm subsystem (FAS)

ловий всегда возможны отклонения. Учитывая требования¹, такие отклонения крайне нежелательны, так как каждый из ВД контролирует значительную территорию вокруг открытой площадки. Поэтому следует предположить, что требуемый уровень готовности оборудования оповещения не должен превышать нескольких единиц (в датчиках).

Допустив, что в состав подсистемы оповещения о пожаре включено необходимое количество датчиков $N_{\text{общ}}$, будем рассматривать оборудование открытой площадки НПЗ в качестве единого целого. Составной ее частью, как было показано выше (рис. 1), является совокупность всех установленных вокруг нее ТХД.

Датчики, перешедшие в состояние «не готов», будут переводить всю их совокупность в определенное новое состояние. Если одновременно в состоянии «не готов» находится несколько датчиков с определенными номерами, то число возможных различных состояний в подсистеме оповещения о пожаре можно определить через число размещений из $N_{\text{общ}}$ элементов по $n_{\text{не гот}}$:

$$A_{N_{\text{общ}}}^{n_{\text{не гот}}} = \frac{N_{\text{общ}}!}{(N_{\text{общ}} - n_{\text{не гот}})!}, \quad (4)$$

а их общее число $S_{\text{общ}}^{(1)}$ будет:

$$S_{\text{общ}}^{(1)} = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} A_{N_{\text{общ}}}^i = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} \frac{N_{\text{общ}}!}{(N_{\text{общ}} - i)!}. \quad (5)$$

Но если неважно, какие именно ВД перешли в состояние «не готов», а важно только их количество в состоянии «не готов», то число состояний определяется новой формулой:

$$C_{N_{\text{общ}}}^{n_{\text{не гот}}} = \frac{N_{\text{общ}}!}{n_{\text{не гот}}!(N_{\text{общ}} - n_{\text{не гот}})!}. \quad (6)$$

Общее число состояний совокупности ТХД $S_{\text{общ}}^{(2)}$ будет рассчитано, как:

$$S_{\text{общ}}^{(2)} = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} C_{N_{\text{общ}}}^i = \sum_{i=0}^{n_{\text{не гот}}} \frac{N_{\text{общ}}!}{i!(N_{\text{общ}} - i)!}. \quad (7)$$

Переход ВД в состояние «не готов» — составная часть разрушительного подпроцесса. Помимо запланированных, но пока не выполненных мероприятий поверки и калибровки (составных частей созидательного подпроцесса), на состояние ВД влияют погодные условия. Кроме того, на состояние ВД может иногда влиять изменение топологии объекта, которое может изменяться, если открытая площадка расположена на грунте. Обращая внимание на особенности применения математического аппарата теории случайных процессов марковского типа с дискретными состояниями при моделировании пожарных рисков в социотехнической системе [20], в данном случае $S_{\text{общ}}^{(2)}$ можем считать дискрет-

ной случайной величиной. Ее функция распределения показывает вероятность одного или нескольких возможных негативных событий. Интенсивность потока этих событий для каждого НПЗ своя.

Восстановительные работы при обходе ремонтной бригадой открытой площадки задают свой псевдослучайный поток событий. Псевдослучайным этот поток является в виду того, что многие мероприятия созидательного подпроцесса запланированы заранее и привязаны ко времени. Но поток случайных негативных событий приводит к корректировке этих планов, что вносит в поток восстановительных событий элемент случайности.

Исходя из логики работы бригады, нельзя говорить, что событие, соответствующее переходу из состояния «не готов» в состояние «готов» для отдельного ТХД может быть мгновенным. Однако регистрация данного события на пульте управления по окончании работы по калибровке или поверке может считаться мгновенной. Также мгновенной может считаться и регистрация перехода ТХД в состояние «не готов». Поэтому можно принять, что переходы между состояниями совокупности ТХД в случайных потоках событий разрушительного и созидательного подпроцессов происходят мгновенно.

Результаты исследования

Для получения общих формул рассмотрим сначала частный случай. На его примере покажем, как можно построить марковскую модель. Предположим, что сторона открытой площадки не превышает 30 м и по ее краю установлено 6 ВД, 3 из которых перешли в состояние «не готов» (рис. 2). На рисунке они обозначены контурно. Так как условный номер ВД в совокупности не имеет значения, как не имеет значения и то, какие ВД перешли в состояние «не го-

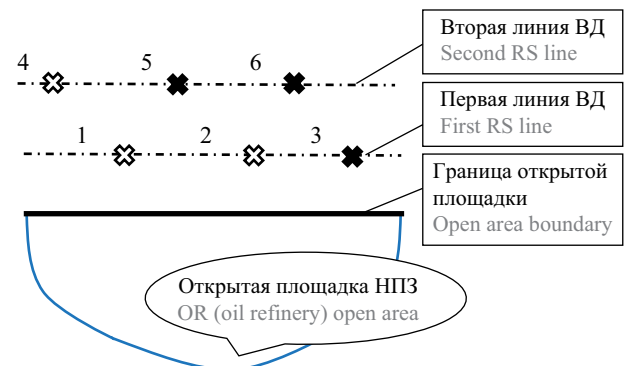


Рис. 2. Примерное расположение ВД (состояние совокупности ТХД)

Fig. 2. Approximate remote sensor (RS) location (a set of thermochemical sensors)

тов», то с точки зрения модели любые из указанных ВД могли стать не готовыми. Поэтому для расчета можно использовать формулу (6).

В указанном случае несоответствие заданному выше значению уровня нормативной надежности совокупности ТХД равно 50 %. И, значит, необходимо срочно восстанавливать совокупность ТХД или останавливать производственный процесс на данном производственном участке ввиду отсутствия требуемых средств контроля пожарной обстановки.

Рассчитаем возможное число состояний совокупности ТХД для такой ситуации. Примем, что установленные в первой линии ВД (рис. 2) являются началом отсчета и нумеруются слева направо. Тогда зафиксированная ситуация фиксирует, что неисправны ВД с номерами {1, 2, 4}. А, значит, вся их совокупность может содержать шесть (формула (6)) возможных состояний, которые можно записать в виде:

$$S_{124} = \{s_{[124]}, s_{[142]}, s_{[214]}, s_{[241]}, s_{[412]}, s_{[421]}\}. \quad (8)$$

Эти различные состояния совокупности ТХД соответствуют различному времени их перехода в состояние «не готов». Состояние $s_{[124]}$ означает, что первым в это состояние перешел ВД с номером 1, вторым — ВД с номером 2, третьим — ВД с номером 4. Другое состояние (вариант для расчета) данной совокупности ТХД с тремя ВД в состоянии «готов» из общего числа ТХД, равного шести, показано на рис. 3. Обозначения на нем такие же, как и на рис. 2.

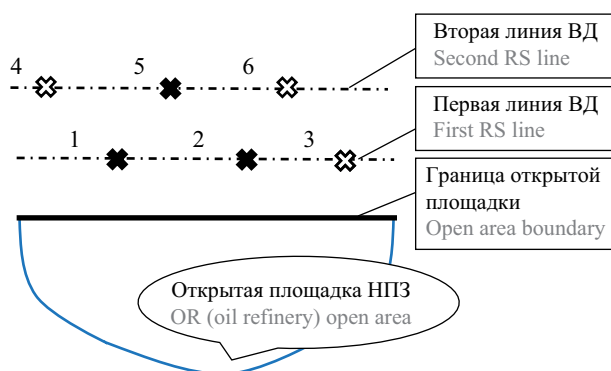


Рис. 3. Другое расположение ВД в состояниях «готов»/«не готов» (другое состояние совокупности ТХД)

Fig. 3. Alternative RS arrangement in ready/not ready modes (a different set of thermochemical sensors)

Ремонтная бригада будет стремиться сделать так, чтобы как можно меньше ВД оказывались в состоянии «не готов» одновременно. Но при этом ситуация с различными условиями эксплуатации и реалиями работы ремонтной бригады делает возможным возникновение таких состояний совокуп-

ности ТХД, при которых в какой-то момент времени в состоянии «не готов» окажутся все датчики или их произвольное число. Расчеты показывают, что, если не учитывать условный номер ВД (см. рис. 2, 3), общее число возможных состояний для всей совокупности ТХД в данном конкретном случае по выражению (7) будет равно 64.

В случае, когда датчики пронумерованы и имеет значение порядок их перехода в состояние «не готов», число таких состояний будет определяться формулой (5). Расчет показывает, что для данного конкретного случая это число равно 1957. Учитывая разницу в таких деталях, следует рассматривать состояния совокупности ТХД в данном случае в неупорядоченном виде, а варианты состояний совокупности ТХД, изображенные на рис. 2 и 3, а также все иные с такими же данными (3 ВД в состоянии «не готов», 3 ВД в состоянии «готов»), как одно состояние совокупности ТХД. Исходя из логики калибровки или поверки ВД по ГСО-ПГС, можно говорить, что состояния совокупности ТХД на рис. 2 и 3 — только варианты некоторой реальной ситуации. При этом, с точки зрения принятого выше правила о значении для расчета только количества ВД в состоянии «не готов», а не их номера в совокупности, оба состояния (рис. 2, 3) одинаковы для модели. В этом случае можно говорить о группе состояний, содержащей элементарные состояния совокупности ТХД (формула (8)). Чтобы отличать их друг от друга, будем далее называть различные состояния совокупности ТХД, где ВД пронумерованы «элементарным состоянием совокупности ТХД» или просто элементарным состоянием. А набор состояний совокупности ТХД, включающий в себя несколько вариантов ВД в состоянии «не готов» с одинаковым их количеством, «кластером состояний совокупности ТХД» или просто кластером состояний.

Для каждого из таких кластеров можно посчитать количество различных состояний совокупности ТХД, которые будут им соответствовать. Разбивая эти 64 состояния совокупности ТХД на кластеры состояний, можно посчитать по выражению (6) число состояний в зависимости от того, сколько ВД будут в состоянии «не готов». Занесем эти данные в табл. 1.

Кластер состояний № 4, к которому относятся оба состояния совокупности ТХД, показанные на рис. 4 и 5, содержит 20 состояний совокупности ТХД:

$$S_{124} = \left\{ \begin{array}{l} s_{[123]}, s_{[124]}, s_{[125]}, s_{[126]}, s_{[134]}, \\ s_{[135]}, s_{[136]}, s_{[145]}, s_{[146]}, s_{[156]}, \\ s_{[234]}, s_{[235]}, s_{[236]}, s_{[245]}, s_{[246]}, \\ s_{[256]}, s_{[345]}, s_{[346]}, s_{[356]}, s_{[456]} \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Таблица 1. Виды и число состояний совокупности ТХД**Table 1.** Types and number of sets of thermochemical sensors

Номер кластера состояний Mode cluster no.	Расшифровка состояния Mode description	Количество состояний совокупности ТХД Number of modes of sets of thermochemical sensors	Уровень нормативной надежности, % Standard reliability level, %
1	Все в состоянии «готов» / Every RS ready	1	100
2	«Не готов» 1 ВД / 1 RS not ready	6	83,33
3	2 ВД в состоянии «не готов» / 2 RS not ready	15	66,67
4	3 ВД в состоянии «не готов» / 3 RS not ready	20	50
5	4 ВД в состоянии «не готов» / 4 RS not ready	15	33,33
6	5 ВД в состоянии «не готов» / 5 RS not ready	6	16,67
7	Все ВД в состоянии «не готов» / Every RS not ready	1	0

Можно задать общий характер динамики изменения состояний как самих ВД, так и всей их совокупности, как функцию групп параметров. Приняв, что поток перехода каждого i -го ВД в состояние «не готов» ε_i есть функция ряда групп некоторых параметров, можно записать:

$$\varepsilon_i = \{\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}, \varepsilon_{3i}, \varepsilon_{4i}\}, \quad (10)$$

где i — номер ВД;

ε_{1i} — специфические параметры данной модели ТХД;

ε_{2i} — параметры климата и топологии открытой площадки НПЗ;

ε_{3i} — параметры, связанные с ограничениями на работу персонала;

ε_{4i} — прочие параметры.

Первая группа параметров определяется нормативным временем проведения калибровочных и поверочных процедур по РЭ². Данная группа значений детерминирована и связана только с конструктивными особенностями конкретного ТХД.

Вторая группа параметров связана с особенностями погодных условий и расположения открытой площадки НПЗ. В формировании их значений большую роль играет статистика наблюдений и вероятностные меры тех или иных особенностей конкретного НПЗ.

Третья группа параметров относится к внутренним процедурам, которые регламентируются на конкретном объекте организационно-распорядительной документацией (ОРД). Впрямую на интенсивность собственно отказов данные значения не влияют. Но косвенно значения этих параметров

определяют, например, как часто закупается необходимое оборудование для проведения соответствующих работ. Это влияет на время, в течение которого отдельные ВД будут находиться в состоянии «не готов». В данную категорию «влияния» можно отнести события, связанные с человеческим фактором при проведении производственных операций [4]. Подобные события могут повлиять на состояние реагента ЧЭ. Данные значения также, как и предыдущая группа параметров, определяются статистическим путем.

Последняя группа параметров, которая влияет на интенсивность потока отказов, — это особенности основного производства, которые на конкретном НПЗ могут приводить к появлению агрессивных веществ или каталитических ядов.

Переход между кластерами состояний происходит в результате мгновенных событий разрушительного и созидательного процессов. Их моментальность обоснована выше. Иными словами, когда один из ВД совокупности ТХД подсистемы оповещения о пожаре перешел в состояние «не готов» («планово» или по другой причине), совокупность ТХД переходит в другой кластер, если изменяется их число в состоянии «не готов». Последнее замечание важно, так как ремонтная бригада в тот же (или близкий к моменту регистрации данного события) момент времени может закончить перевод другого ВД в состояние «готов».

После попадания совокупности ТХД подсистемы предупреждения о пожаре на НПЗ в очередной кластер состояний, отличный от первого (табл. 1), следуют немедленные действия ремонтной бригады для восстановления работы совокупности ТХД НПЗ. Их действиями формируется дискретный поток ТО. Его интенсивность может определяться статистически.

² Сигнализаторы СТМ-10, Руководство по эксплуатации, Альбом приложений, АПИ2 840.069 РЭ1. URL: http://www.analitpribor-smolensk.ru/products/bezopasnost_gazoanalizatory/stacionarnye_gazoanalizatory/signalizator_stm10/ (дата обращения: 22.08.2020).

Количество ВД вокруг открытой площадки НПЗ и порядок их перевода из состояния «не готов» в состояние «готов» определяет то, какие приоритеты необходимы ремонтной бригаде. При этом ей постоянно требуется сверка очереди проводимых мероприятий с состоянием остальных ТХД. Иногда, например, в случае появления незапланированных выбросов агрессивных веществ, ей следует с одного ТХД переключиться на другой. Попарное сравнение параметров значимости конкретного ТХД для всей системы оповещения о пожаре позволяет увидеть ТХД с максимальным приоритетом. Для каждого из них темп работы сотрудников бригады можно приравнять к некоторому значению v_i , где i — номер ТХД.

Для каждого конкретного состояния совокупности ТХД внутри одного из кластеров состояний можно посчитать интенсивность потока восстановления. Она будет определяться не только v_i , но и также тем, какие работы по восстановлению ВД были проведены до этого.

Наиболее очевидной причиной выбора приоритета в потоке восстановления ВД (перевода их из состояния «не готов» в состояние «готов») является положение ВД. ВД в первой линии необходимо обслуживать «скорее», чем ВД во второй и третьей. Поэтому данную причину следует рассматривать, как первую в общей структуре приоритетов работы ремонтной бригады.

Далее необходимо учитывать наличие ГСО-ПГС, возможность быстрой закупки требуемых заменяемых компонентов и расходных материалов, а также условия работы бригады и т.п. Примерные данные о таких приоритетах приведены в табл. 2.

Приоритеты задают интенсивность потока событий в созидательном подпроцессе. При этом для

переходов между кластерами состояний в разрушительном подпроцессе можно утверждать, что их интенсивность ε_i точно не зависит от событий, случившихся при таком переходе ранее. Но в событиях созидательного подпроцесса совокупность ТХД в каждом конкретном элементарном состоянии может иметь свои особенности.

Поэтому приоритеты в нем для ремонтной бригады будут зависеть от событий и их интенсивности на предыдущем шаге ее деятельности. Учет переходов совокупности ТХД между кластерами ее состояний при проведении работ в восстановительном процессе можно определить в виде группы зависимостей следующего вида [21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{i/ij} = v_i D_i^{(j)}; \\ v_{i/ijk} = v_i D_i^{(jk)}; \\ v_{i/ijkl} = v_i D_i^{(jkl)}, \\ \dots \\ \text{и т.д.} \end{array} \right. \quad (11)$$

где i — номер ВД;

v_i — интенсивность потока событий по переводу i -го ВД в состояние «готов»;

$v_{i/ij}$, $v_{i/ijk}$, $v_{i/ijkl}$ — интенсивность потока событий по переводу i -го ВД в состояние «готов» с учетом восстановления до этого ВД с номерами j , k и l соответственно;

$D_i^{(jk)}$ — приоритет перевода i -го ВД в состояние «готов» перед j -м и k -м ВД.

Моделирование переходов между кластерами состояний совокупности ТХД в разрушительном подпроцессе можно выполнить с помощью графа (см. рис. 4). Последние 3 кластера состояний

Таблица 2. Возможные приоритеты восстановления совокупности ТХД

Table 2. Possible recovery priorities of a set of thermochemical sensors

Номер приоритета Priority no.	Причина, обуславливающая выбор приоритета ремонтной бригадой The reason for its selection by the maintenance team
1	Работы по ВД в первой линии вокруг открытой площадки RS work within the first line surrounding the open area
2	Наличие ГСО-ПГС на НПЗ позволяет провести необходимые восстановительные работы The presence of State Standard Sample calibration gases at the OR allows for the necessary recovery work to be performed
3	Наличие заменяемых компонентов на НПЗ позволяет провести необходимые восстановительные работы (закупка не требуется) The availability of replaceable components at the OR allows for the necessary recovery work to be performed (no procurement required)
4	У ВД истекает срок поверки или калибровки / RS verification and calibration period is about to expire
5	У членов ремонтной бригады истекает срок разрешения на работу с данным оборудованием, требуются экзамены Members of the maintenance team have an expiring work permit for this equipment. Exams are to be taken

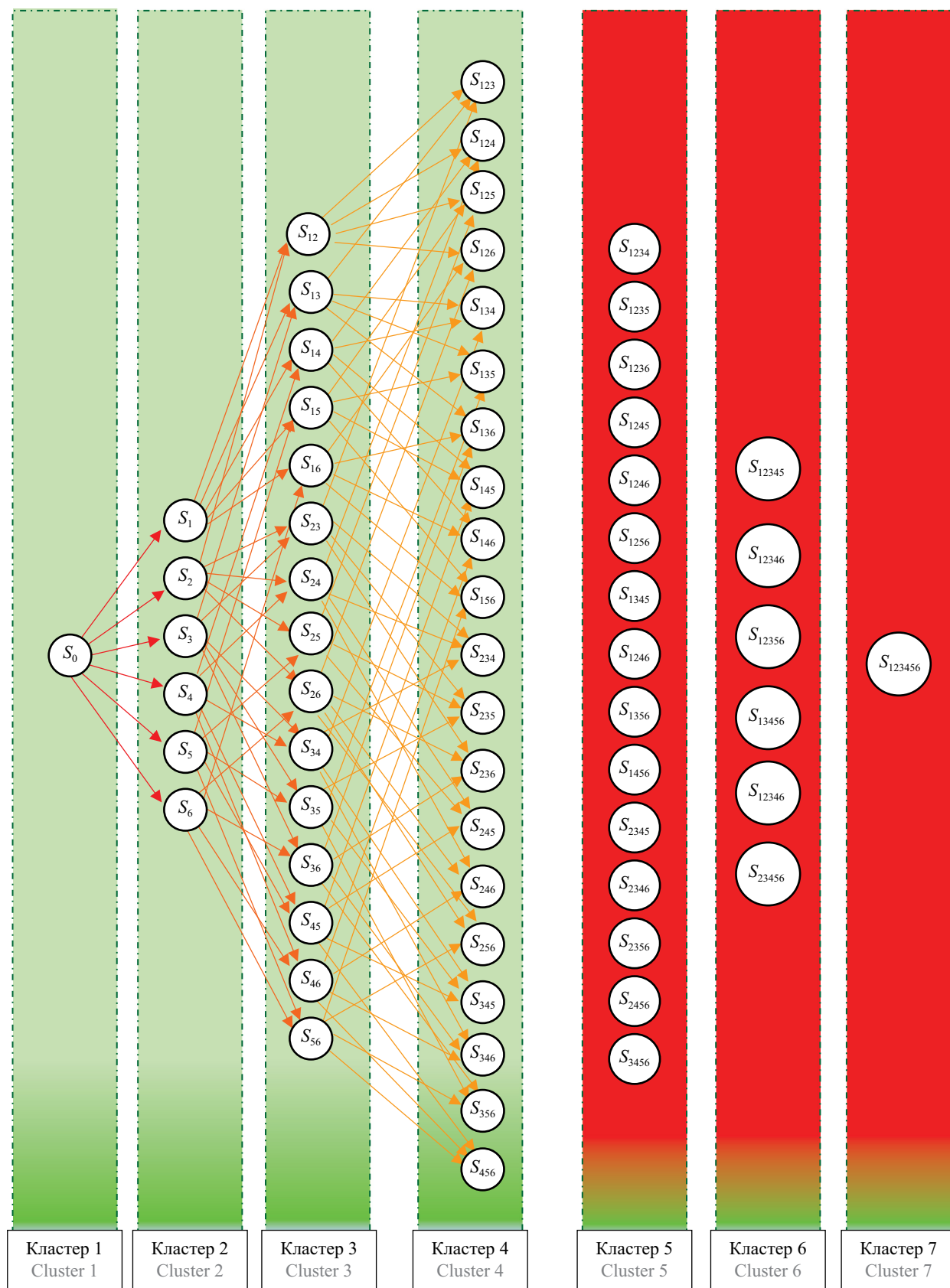


Рис. 4. Переходы совокупности ТХД между состояниями «готов» и «не готов» (при увеличении количества ВД в состоянии «не готов»)

Fig. 4. Transitions of sets of thermochemical sensors from/to ready and not ready modes (when the number of RS in the “not ready” mode increases)

ТХД рассматривать нецелесообразно ввиду низкого уровня нормированной надежности подсистемы оповещения о пожаре. Интенсивность переходов между элементарными состояниями равна ε_i .

Обратный процесс может также быть представлен в виде графа (см. рис. 5). Кластеры состояний ТХД с номерами 5, 6, 7 из рассмотрения также исключены, так как уровень нормативной надежности подсистемы оповещения о пожаре в них ниже 50 %.

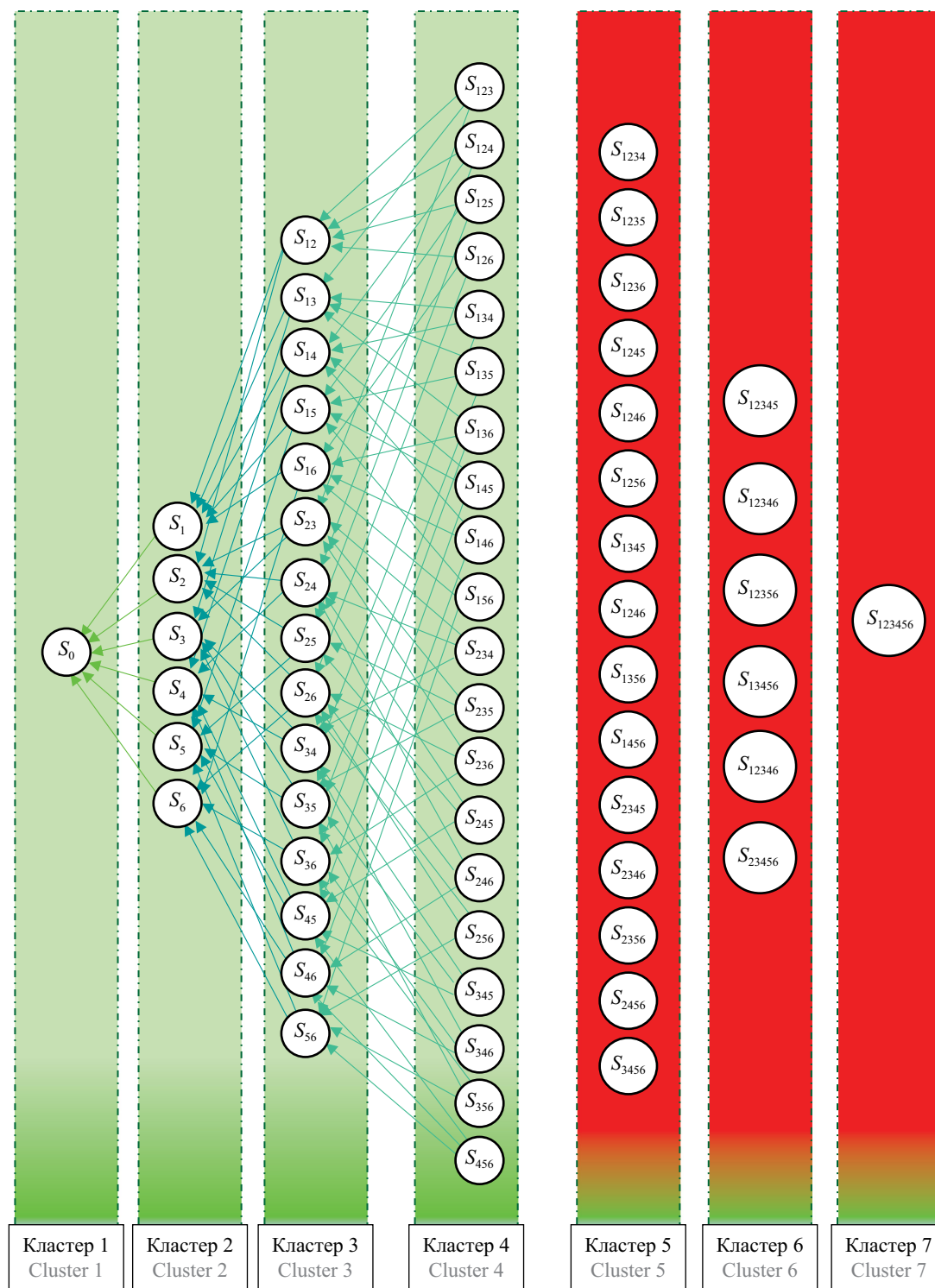


Рис. 5. Переходы совокупности ТХД между состояниями «не готов» и «готов» (при уменьшении количества ВД в состоянии «не готов»)

Fig. 5. Transitions of sets of thermochemical sensors from/to ready and not ready modes (when the number of RS in the “not ready” mode reduces)

Переходы между состояниями совокупности ТХД в созидательном подпроцессе имеют интенсивность $v_{i/ijk}$ в зависимости от номера предыдущего ВД, переведенного в состояние «готов». Ввиду большого объема информации часть весов в ориентированном графе не показана.

Исходя из представленных рассуждений, можно говорить о вероятностном векторе динамики изменения уровня нормативной надежности совокупности ТХД, установленных вокруг открытой площадки НПЗ, через кластеры состояний этой совокупности в подсистеме оповещения о пожаре в конкретный момент времени:

$$P(t) = \{P_1(t), P_{ij}(t), P_{ijk}(t), P_{ijkl}(t), 0, 0, 0\}, \quad (12)$$

с начальным состоянием:

$$P(0) = \{P_1(0), P_{ij}(0), P_{ijk}(0), P_{ijkl}(0), 0, 0, 0\}, \quad (13)$$

где $P_1(t)$, $P_{ij}(t)$, $P_{ijk}(t)$, $P_{ijkl}(t)$ — вероятности того, что совокупность ТХД подсистемы оповещения о пожаре на открытой площадке НПЗ находится в кластерах с номерами 1, 2, 3, 4 (соответственно, вероятность того, что уровень нормативной надежности данной составной части подсистемы будет равен, соответственно 100; 83,33; 66,67; 50 %).

Три последних нуля в формуле соответствуют возможным событиям в совокупности ТХД, при которых они переходят в элементарные состояния последних трех кластеров с недопустимым уровнем нормативной надежности. Предполагается, что ремонтная бригада должна работать так, чтобы не допустить снижения этого уровня ниже 50 %. Иными словами, совокупность ТХД никогда не перейдет в аварийные с точки зрения ПБ состояния.

Динамика перехода между кластерами состояний в совокупности ТХД подсистемы оповещения о пожаре на открытой площадке НПЗ для обеспечения ее уровня нормативной надежности в пределах от 50 до 100 % может моделироваться уравнениями Колмогорова. При этом заданные начальные состояния данной совокупности будут определяться либо нормативно и планоно (детерминированные величины) с учетом специфических параметров данной модели ТХД, либо статистически исходя из климата и топологии открытой площадки НПЗ, а также конкретных условий и ограничений в работе персонала ремонтной бригады. Особенности основного производства, которые могут приводить к появлению агрессивных веществ или каталитических ядов, на данном НПЗ обычно хорошо известны ЛПР. Но регистрируемые им проявления таких событий — величина случайная. Поэтому они могут быть учтены как в статистическом, так и в детерминированном виде.

Если не указывать зависимость вероятностей из формулы (11) от времени, то система дифференциальных уравнений Колмогорова для варианта расположения ВД (шесть ВД для открытой площадки НПЗ длиной менее 30 м) (см. рис. 2 и 3) должна иметь восемь равенств. Но, принимая во внимание, что три кластера состояний совокупности ТХД (с номерами 5, 6, 7) в данной постановке не задействованы, искомые уравнения можно записать таким образом [22]:

$$\left\{ \begin{aligned} dP_1/dt &= -P_1 \sum_{i=1}^6 \varepsilon_i + \sum_{i=1}^6 P_i v_i \\ dP_i/dt &= P_1 \varepsilon_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 P_{ji} v_{i/ij} - P_i \left(v_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 \varepsilon_j \right); \\ dP_{ij}/dt &= P_j \varepsilon_i + P_i \varepsilon_j + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^6 P_{jik} v_{i/ikj} - \\ &\quad - P_{ij} \left(v_{i/ij} + v_{j/ji} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, j}}^6 \varepsilon_k \right); \\ dP_{ijk}/dt &= P_{ij} \varepsilon_k + P_{ik} \varepsilon_j + P_{jk} \varepsilon_i + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i, j, k}}^6 P_{jilk} v_{i/ikjl} - \\ &\quad - P_{ijk} \left(v_{i/ijk} + v_{j/jik} + v_{k/kij} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i, j, k}}^6 \varepsilon_l \right); \\ P_1 + \sum_{i=1}^6 P_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 \sum_{i=1}^6 P_{ij} + \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq k \neq i, j}}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^6 P_{ijk} + \\ &\quad + \sum_{\substack{l=1 \\ k \neq l \neq j \neq k, l \neq i \neq j, k, l}}^6 \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^6 P_{ijkl} + P_{1234} = 1, \end{aligned} \right. \quad (14)$$

где P_{1234} — вероятность того, что совокупность ТХД не «выйдет» из первых четырех кластеров своих состояний.

Пятый член системы уравнений показывает, что совокупность ТХД должна находиться в одном из кластеров своих состояний.

Расчет, выполненный на примере шести установленных вдоль открытой площадки ВД, может быть обобщен на любое их количество. В этом случае вместо цифры 6 в суммах будет фигурировать значение $N_{\text{общ}}$. Количественные расчеты для данной величины в зависимости от формы открытой площадки будут определены отдельно на конкретном НПЗ.

Число уравнений Колмогорова в системе расчета динамики переходов между состояниями для случая с $N_{\text{общ}}$ ВД будет определяться по числу кластеров состояний. Для шести кластеров их восемь. Для $N_{\text{общ}}$ их будет: $N_{\text{общ}} + 2$.

Заключение

Следует заметить, что представленный выше расчет, выполненный на основе частного примера,

может быть обобщен в виде модели оценки готовности ТХД, установленных вокруг открытой установки НПЗ, с учетом проводимых мероприятий калибровки. В этом случае будут откорректированы (рассмотрены в виде функций) v_i , $v_{i/j}$, $v_{i/jk}$, $v_{i/jkl}$. Рассматриваемая модель оценки готовности совокупности ТХД, которая является составной частью подсистемы оповещения о пожаре на НПЗ, может применяться не только для ТХД, но и для других типов датчиков с незначительными изменениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kidam K., Hussin N.E., Hassan O., Ahmad A., Johari A., Hurme M. Accident prevention approach throughout process design life cycle // *Process Safety and Environmental Protection*. 2014. Vol. 92. No. 5. Pp. 412–422. DOI: 10.1016/j.psep.2014.05.006
2. Самарин И.В., Орлов А.И. Стратегическое планирование на предприятии: основные закономерности среднесрочных бюджетных планов деятельности предприятия // *Естественные и технические науки*. 2014. № 5. С. 125–133.
3. Самарин И.В., Фомин А.Н. Стратегическое планирование на предприятии: применение метода анализа иерархий для анализа системы целевых установок // *Инновации и инвестиции*. 2014. № 6. С. 132–141.
4. Топольский Н.Г., Белозеров В.В., Крючков А.В., Мокишанцев А.В., Михайлов К.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами пожаровзрывоопасных объектов : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 189 с.
5. Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю. Модель оценки обеспечения комплексной безопасности в АСУТП с применением диагностики пожарных извещателей для построения автоматизированной системы поддержки управления пожаровзрывобезопасностью // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 11. С. 15–22. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22
6. Prakash J. Digital twins define oil & gas 4.0. URL: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (дата обращения: 25.08.2020).
7. Joly M., Odloak D., Miyake M.Y., Menezes B.C., Kelly J.D. Refinery production scheduling toward Industry 4.0 // *Frontiers of Engineering Management*. 2018. Vol. 5. No. 2. Pp. 202–213. DOI: 10.15302/J-FEM-2017024
8. Zezulka F., Marcon P., Vesely I., Sajdl O. Industry 4.0 — An Introduction in the phenomenon // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49. No. 25. Pp. 8–12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002
9. Абросимов А.А., Топольский Н.Г., Федоров А.В. Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. М. : МИПБ МВД России, 1999. 239 с.
10. Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al. Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research // *Faraday Discussions*. 2016. Vol. 189. Pp. 85–103. DOI: 10.1039/C5FD00201J
11. Szulczyński B., Gębicki J. Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air // *Environments*. 2017. Vol. 4. No. 1. P. 21. DOI: 10.3390/environments4010021
12. Korotcenkov G. Handbook of gas sensor materials: Properties, advantages and shortcomings for applications. Volume 1: Conventional Approaches. New York : Springer, 2013. 442 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
13. Sekhar P.K., Brosha E.L., Mukundan R., Garzon F. Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security // *Electrochemical Society Interface*. 2010. Vol. 19. No. 4. Pp. 35–40. DOI: 10.1149/2.F04104if
14. Shrivastava N., Shukla V. Fire detection & alarm system in oil & gas refinery // *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*. 2019. Vol. 5. Issue 1. Pp. 26–31. URL: https://ijsret.com/wp-content/uploads/2019/01/IJSRET_V5_issue1_106.pdf
15. Namuduri S., Narayanan B.N., Davuluru V.S.P., Burton L., Bhansali S. Review — Deep learning methods for sensor based predictive maintenance and future perspectives for electrochemical sensors // *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167. No. 3. P. 037552. DOI: 10.1149/1945-7111/ab67a8

16. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М. : Высшая школа, 2006. 575 с.
17. Прус Ю.В., Крючков А.В., Самарин И.В., Строгонов А.Ю. Методика прогнозирования готовности единиц противопожарного оборудования АСУТП на предприятиях ТЭК // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 3–2. С. 96–103. URL: <http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2019/%E2%84%9603-2/a0696071-aaa8-44dd-8de1-4b1b00665b25>
18. Сатин А.П., Ле Тхань Бинь, Прус Ю.В. Прогнозирование готовности пожарной техники на основе марковской модели поломок и восстановления // Технологии техносферной безопасности. 2012. № 5 (45). Ст. 17. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-5/17-05-12.ttb.pdf>
19. Самарин И.В., Строгонов А.Ю. Модель оценки пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса с помощью их временных характеристик на графах стратегического планирования в составе автоматизированной системы поддержки управления // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2018. № 4 (293). С. 143–154. URL: <http://article.gubkin.ru/index.php?lang=ru&page=file&id=2089>
20. Прус Ю.В., Колесникова А.Р., Кленко Е.А., Шановалов В.М. Моделирование структуры и динамики техногенных и пожарных рисков в социотехнических системах // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 4 (56). С. 16. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/07-04-14.ttb.pdf>
21. Гельфанд И.М. Лекции по линейной алгебре. М. : Добросвет ; Издательство «КДУ», 2006. 320 с.
22. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. М. : Наука, 1996. 400 с.

REFERENCES

1. Kidam K., Hussin N.E., Hassan O., Ahmad A., Johari A., Hurme M. Accident prevention approach throughout process design life cycle. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014; 92(5):412-422. DOI: 10.1016/j.psep.2014.05.006
2. Samarina I.V., Orlov A.I. Strategic planning at the enterprise: the main patterns of medium-term budget plans of the enterprise. *Natural and technical sciences*. 2014; 5:125-133. (rus).
3. Samarina I.V., Fomin A.N. Strategic planning at the enterprise: application of a method of the analysis of hierarchies to analyze target system installations. *Innovation & Investment*. 2014; 6:132-141. (rus).
4. Topolsky N.G., Belozero V.V., Kryuchkov A.V., Mokshantsev A.V., Mikhailov K.A. *Automated control systems of technological processes of fire-explosive objects*. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2019; 189. (rus).
5. Topolskiy N.G., Samarina I.V., Stroganov A.Yu. Model of evaluation of comprehensive safety in the APCS with the use of diagnostic fire detectors for the construction of automated systems of support of management of fire and explosion safety. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(11):15-22. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.15-22 (rus).
6. Prakash J. *Digital twins define oil & gas 4.0*. URL: <https://www.arcweb.com/blog/digital-twins-define-oil-gas-40> (Accessed August 25, 2020).
7. Joly M., Odloak D., Miyake M.Y., Menezes B.C., Kelly J.D. Refinery production scheduling toward Industry 4.0. *Frontiers of Engineering Management*. 2018; 5(2):202-213. DOI: 10.15302/J-FEM-2017024.
8. Zezulka F., Marcon P., Vesely I., Sajdl O. Industry 4.0 — An introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*. 2016; 49(25):8-12. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.12.002
9. Abrosimov A.A., Topolskiy N.G., Fedorov A.V. *Computer-aided fire and explosion safety systems of petroleum refineries*. Moscow, State Fire Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 1999; 239. (rus).
10. Lewis A.C., Lee J.D., Edwards P.M., Shaw M.D., Evans M.J., Moller S.J. et al. Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research. *Faraday Discussions*. 2016; 189:85-103. DOI: 10.1039/C5FD00201J
11. Szulczyński B., Gębicki J. Currently commercially available chemical sensors employed for detection of volatile organic compounds in outdoor and indoor air. *Environments*. 2017; 4(1):21. DOI: 10.3390/environments4010021
12. Korotcenkov G. *Handbook of gas sensor materials: Properties, advantages and shortcomings for applications. Volume 1: Conventional Approaches*. Springer, New York, 2013; 442. DOI: 10.1007/978-1-4614-7165-3
13. Sekhar P.K., Brosha E.L., Mukundan R., Garzon F. Chemical sensors for environmental monitoring and homeland security. *Electrochemical Society Interface*. 2010; 19(4):35-40. DOI: 10.1149/2.F04104if

14. Shrivastava N., Shukla V. Fire detection & alarm system in oil & gas refinery. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*. 2019; 5(1):26-31. URL: https://ijsret.com/wp-content/uploads/2019/01/IJSRET_V5_issue1_106.pdf
15. Namuduri S., Narayanan B.N., Davuluru V.S.P., Burton L., Bhansali S. Review — Deep learning methods for sensor based predictive maintenance and future perspectives for electrochemical sensors. *Journal of the Electrochemical Society*. 2020; 167(3):037552. DOI: 10.1149/1945-7111/ab67a8
16. Wentzell A.D. *Probability theory*. Moscow, Higher school Publ., 2006; 575. (rus).
17. Prus Yu.V., Kryuchkov A.V., Samarin I.V., Strogonov A.Yu. Forecasting technique of readiness of units of fire-fighting equipment of APCS at enterprises of fuel and energy complex using strategic planning. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2019; 3-2:96-103. URL: <http://www.nauteh-journal.ru/index.php/3/2019/%E2%84%9603-2/a0696071-eea8-44dd-8de1-4b1b00665b25> (rus).
18. Satin A.P., Le Thanh Bin, Prus Yu.V. Forecasting of readiness of fire equipment based on the Markov model breakdowns and recovery. *Technology of Technosphere Safety*. 2012; 5(45):17. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-5/17-05-12.ttb.pdf> (rus).
19. Samarin I.V., Strogonov A.Yu. Model of evaluation of fire safety at fuel and energy complex facilities using temporal characteristics from graphs of strategic planning using automated control system. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2018; 4(293):143-154. URL: <http://article.gubkin.ru/index.php?lang=ru&page=file&id=2089> (rus).
20. Prus Yu.V., Kolesnikova A.R., Klepko E.A., Shapovalov V.M. Modeling the structure and dynamics of anthropogenic and fire risk in socio-technical systems. *Technology of Technosphere Safety*. 2014; 4(56):16. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/07-04-14.ttb.pdf> (rus).
21. Gelfand I.M. *Lectures on linear algebra*. Moscow, Dobrosvet Publ., 2006; 320. (rus).
22. Wentzell A.D. *Course in the theory of stochastic processes*. Moscow, Nauka Publ., 1996; 400. (rus).

Поступила 07.09.2020, после доработки 28.10.2020;

принята к публикации 09.11.2020

Received September 7, 2020; Received in revised form October 28, 2020;

Accepted November 9, 2020

Информация об авторах

САМАРИН Илья Вадимович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

КРЮЧКОВ Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности критически важных объектов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1047095; ORCID: 0000-0002-5665-7058; e-mail: kruchkov.a@gubkin.ru

СТРОГОНОВ Андрей Юрьевич, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 936562; ORCID: 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru

Information about the author

Ilya V. SAMARIN, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation; ID RISC: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

Alexey V. KRYUCHKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Security of Critical Facilities, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation; ID RISC: 1047095; ORCID: 0000-0002-5665-7058; e-mail: kruchkov.a@gubkin.ru

Andrey Yu. STROGONOV, Graduate Student of Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation; ID RISC: 936562; ORCID: 0000-0001-7994-5987; e-mail: strogonov.a@gubkin.ru