

кавных фильтров с суммарной производительностью, равной расчетной производительности подключаемых агрегатов, и подача на них очищаемого газа от агрегатов через коллектор грязного газа. Такая схема похожа на предыдущую, но в этом случае каждый агрегат и каждый фильтр подключается к коллектору грязного газа через отдельный патрубок, снабженный затвором. Это позволяет при необходимости отключать либо агрегат, либо фильтр, что значительно облегчает их обслуживание. Кроме того, последствия пиковых нагрузок при такой компоновке будут сглаживаться, так как распределяться они будут на все работающие фильтры.

Поскольку вследствие перемешивания в коллекторе на все фильтры будет подаваться газ с одинаковыми свойствами (суммарный расход газов, поступающих на очистку, $605100 \text{ м}^3/\text{ч}$; температура смеси газов от всех агрегатов 144°C), то можно устанавливать однотипные фильтры и контроль температурного режима осуществляется для всей системы, а не для каждого фильтра в отдельности, как при втором варианте.

Кроме того, эта схема позволяет: во-первых, объединить при необходимости отдельные системы в одну общую и, во-вторых, наращивать систему как за счет подключения новых агрегатов, так и за счет установки новых фильтров.

Библиографический список

1. Ладыгичев М.Г., Бернер Г.Я. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов. Справочник. М.: Теплотехник, 2004. 696 с.
2. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от пыли, аэрозолей и туманов / Под ред. Л.В. Чекалова / Холдинговая группа «КОНДОР-ЭКО». Ярославль: Русь, 2004.
3. Горячев И. К., Корсаков В. П., Новиков А. Д. Рукавный фильтр для очистки газов после электродуговых сталеплавильных печей // Химическое и нефтяное машиностроение. 1987. № 1. С. 31.

УДК 614:330.131.7:622.6

Тимиргалеева Л.Ш., Сулейманов М.Г., Уржумцев В.В., Кутный С.И., Бородулин Ю.Н.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ИНЦИДЕНТОВ И УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЦЕХА УЛАВЛИВАНИЯ КХП ОАО «ММК»

В нормативных документах [1, 2] для установления уровня риска инцидентов на промышленных объектах и их анализа рекомендовано несколько методов. К ним относятся: метод «проверочного листа»; анализ вида и последствия отказов (АВПО); анализ вида, последствий и критичности отказов (АВПКО); логико-графические методы «деревьев отказов» и «деревьев событий». На основании этих исследований определяются вероятности возникновения инцидентов, степень тяжести последствий от реализации опасностей, выявляются причинно-следственные связи между опасными событиями. Это является основой для количественной оценки риска и разработки рекомендаций по повышению устойчивости работы предприятий. Таким образом, базовыми параметрами для расчета рисков являются установление вероятностей реализации опасностей и ущербов, возникающих в результате инцидентов.

Рекомендуемая в настоящее время методика определения вероятности с применением выражения $R=n/N$ является неприемлемой. Это связано со сложностью определения количества всех возможных неблагоприятных ситуаций (N). В данном

выражении n характеризует количество неблагоприятных случаев за исследуемый период. В настоящей статье предлагается методика для оценки вероятности возникновения инцидентов для цеха улавливания № 1 КХП ОАО «ММК».

Цех улавливания № 1 предназначен для выделения химических продуктов коксования, охлаждения коксового газа и выделения из него смолы, водяных паров, извлечения аммиака, фенолов, пиридиновых оснований, бензольных углеводородов, нафталина, получения чистого коксового газа. Структурная схема производства этих продуктов приведена на **рис. 1**.

В каждом отделении установлено и задействовано несколько однотипных агрегатов, предназначенных для выполнения одних и тех же операций, работающих параллельно и (или) последовательно. Некоторые отделения имеют резервное оборудование, позволяющее производить немедленное переключение в случае отказа отдельных технических устройств. Количество задействованного оборудования (**табл. 1**) зависит от объема перерабатываемого коксового газа. Переработка газа объемом до 100 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ осу-

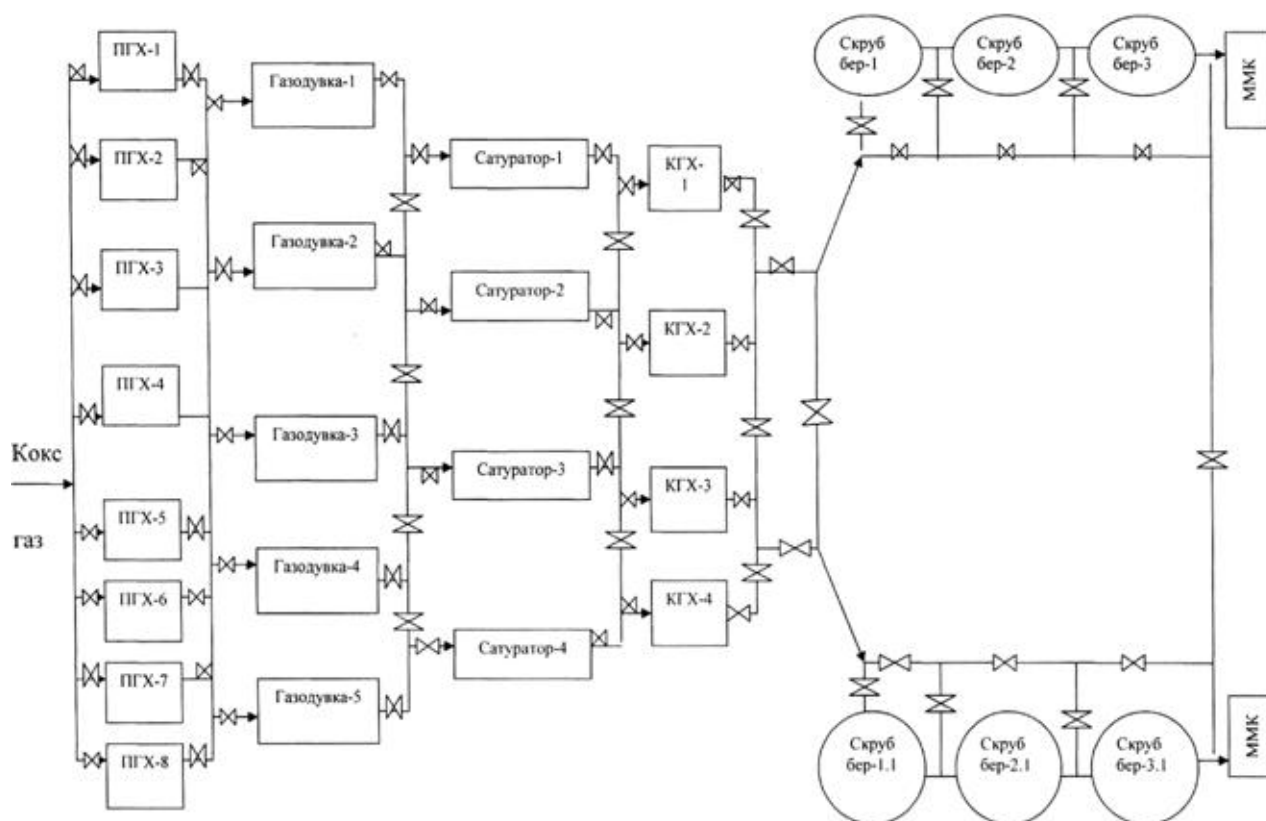


Рис. 1. Схема переработки коксового газа в цехе улавливания:
 ПГХ – первичные газовые холодильники; КГХ – конечные газовые холодильники

ществляется с использованием ненагруженного резерва, а 150 тыс. м³/ч – с нагруженным резервом. Для повышения надежности оборудования в цехе применяют прочностное, энергетическое, параметрическое, функциональное и структурное резервирование отдельных элементов.

Таким образом, при производительности 150 тыс. м³/ч машинное, сульфатное отделения и отделение конечного охлаждения коксового газа работают при наличии не менее двух резервных агрегатов. Отделение охлаждения коксового газа работает с одним резервным холодильным агрегатом. Бензольное отделение не имеет резервных агрегатов и является наиболее слабым звеном. По этой причине оно не производит полного улавливания бензольных углеводородов при подаче большого объема газов в коксовый цех.

Для оценки вероятности отказов оборудования в цехе улавливания № 1 рассмотрим варианты резервирования технических устройств.

а) В системе с ненагруженным резервом в отделении работает n рабочих и S резервных машин. Система будет высоконадежной, если количество резервных машин достаточно для замены любого из неисправных. Так как машины однотипны, то интенсивность отказов одна

Таблица 1

Количество задействованного оборудования при различных производительностях цеха

Отделение	Количество оборудования	Производительность оборудования, тыс. м ³ /ч		Количество задействованного оборудования при производительности, тыс. м ³ /ч	
		Одной ед.	Общее	до 150	
				до 100	до 150
Охлаждения коксового газа (ПГХ)	8	20	160	5	7
Машинное (газодувные машины)	5	До 80	400	2	2
Сульфатное (сатураторы)	4	До 80	320	2	2
Конечного охлаждения коксового газа (КГХ)	4	До 80	320	2	2
Бензольное (скрубберы)	6	До 40–50 на линию	До 120–150	6	6

и та же и составляет $\lambda=1/t_H$, где t_H – среднее время наработки на один отказ. Будем считать, что время восстановления вышедшей из строя машины – величина случайная, распределенная по показанному закону с параметром $\mu=1/t_{\text{обс}}$, где $t_{\text{обс}}$ – среднее время восстановления неисправного оборудования. Рассматриваемый вариант характерен при переработке прямого коксового газа объемом до 100 тыс.м³/ч (см. табл. 1).

б) При переработке коксового газа объемом до 150 тыс.м³/ч часть оборудования m может находиться в нагруженном резерве с той же опасностью отказа λ , i элементов эксплуатироваться в облегченном режиме, с интенсивностью отказа ν и S элементов – ненагруженном состоянии, которые не отказывают. Поэтому, в общем случае, каждую систему отделений ЦУ № 1 в соответствии с рис. 1 можно представить состоящей из $N = n + m + i + S$ видов оборудования. Каждое отказавшее оборудование поступает в ремонт, состоящий из z ремонтных единиц. Отказавшее оборудование заменяется из нагруженного резерва. Нагруженный резерв заменяется облегченным резервом, облегченный – из ненагруженного резерва. Система работает исправно, если количество исправного оборудования составляет не менее n единиц, $m + i + S \geq n$.

Для расчета вероятности отказов и безотказной работы систем оборудования в каждом из отделений предлагаем использовать теорию гибели и размножения [3, 4]. Она позволяет рассчитать вероятность для обоих рассмотренных вариантов.

Вероятность отказа для случая наличия ненагруженного резерва (вариант а) может быть рассчитана по формуле

$$P = \left[\left((n * \lambda) / \mu \right)^n / K! \right] * e^{(n * \lambda) / \mu}. \quad (1)$$

При этом система будет работать безотказно до момента времени t , если ни разу до этого число отказавших агрегатов не превысит $N - n = m$.

Поэтому вероятность безотказной работы системы составляет

$$P(t) = 1 - P_{N-n+1}(t) = 1 - P_{m+1}(t). \quad (2)$$

Если величина $N - n + 1$ большая, то с небольшой погрешностью можно использовать выражение

$$P(t) \approx \exp(-t / (T_{N-n+1})), \quad (3)$$

где T_{N-n+1} – среднее время безотказной работы $N-n+1$ агрегата.

На основании анализа статистических данных актов расследования инцидентов, журналов агрегатного состояния оборудования и других

документов установлено, что на практике ни разу число отказавших элементов не превысило $N - n = m$. Поэтому, можно считать, что вероятность безотказной работы близкой к единице.

$$e^{-t/(T_{N-n+1})} \approx 1. \quad (4)$$

Это условие может быть соблюдено, если T_{N-n+1} значительно превышает t . Практикой установлено, что за анализируемый период (17 лет) агрегаты системы ЦУ-1 в количестве $n+1$ единиц одновременно не отказывали. Это применимо для агрегатов: ПГХ, газодувных машин, сатураторов и КГХ.

В режиме работы по варианту б для выделения из коксового газа химических продуктов используются: восемь первичных газовых холодильников (ПГХ семь работающих и один резервный); пять газодувных машин (две находятся в работе, две машины в резерве, а одна в ремонте); четыре сатуратора (два из них в работе, один в резерве и один в ремонте); четыре одновременно работающих конечных газовых холодильника (КГХ – два работающих, один в резерве, один в ремонте); шесть скрубберов (которые работают в две нитки по три скруббера последовательно). Нарушение устойчивости отделений наступит: ПГХ – при отказе двух и более элементов, в сульфатном откажут два сатуратора одновременно, на участке охлаждения коксового газа (КГХ) при отказе двух и более элементов. В бензольном отделении отказ любого скруббера в основном повлияет на возможность получения бензольных углеводородов требуемого качества и объема.

Для рассматриваемого случая, то есть нахождения части резервных агрегатов в нагруженном режиме рекомендуется формула [5, 6]

$$P_k = (1/(n-k)! \cdot (\mu/\lambda)^{n-k}) / \sum_{c=0}^n (1/c!) \cdot (\mu/\lambda)^c, \quad (5)$$

где k – количество отказавшего оборудования; c – количество рассматриваемого оборудования.

Для расчета вероятности отказов оборудования по формуле (5) необходимо знание значений λ и μ , рассчитываемых с учетом времени наработки на один отказ t_H и среднего времени восстановления неисправного оборудования $t_{\text{обс}}$. На основании практических данных по простоям (в результате инцидентов) рассчитаны значения λ_k и μ_k , (табл. 2).

Вероятность того, что нет ни одного неисправного агрегата первичного газового холодильника определяем по формуле (5). Вероятность отказа одного ПГХ составляет 0,13.

Технические системы газодувных машин, сатураторов, конечных газовых холодильников ра-

ботаю в режиме ненагруженного резервирования. Поэтому отказы в работе этих систем наступают только при потере устойчивости работы не менее трех агрегатов в каждом из рассмотренных отделений. Следовательно, вероятность безотказной работы можно считать близкой к единице.

Для оценки вероятности безотказной работы бензольно-скрубберного отделения примем, что две линии работают параллельно. Полный отказ наступает при отказе обеих линий. Вероятность безотказной работы двух линий, согласно формуле (5), будет иметь $P_k=0,96$. Такая вероятность безотказной работы бензольно-скрубберного отделения в большей мере связана с недостатками в учете времени остановки отдельных агрегатов. Возможность отправления потребителям неочищенного или частично очищенного газа позволяет маневрировать производством ремонтных работ. В этом случае регулирование пропускной способности скрубберов происходит за счет снижения выхода сырого бензола.

Расчет устойчивости работы всего цеха производим на основании представления о том, что все отделения работают последовательно (рис. 2).

Для такой схемы очистки коксового газа воспользуемся формулой

$$P_{\text{безотк. раб. ЦУ № 1}} = P_1 * P_2 * P_3 * P_4 * P_5, \quad (6)$$

где P_1 – вероятность безотказной работы ПГХ; P_2 – вероятность безотказной работы газодувных машин; P_3 – вероятность безотказной работы сатураторов; P_4 – вероятность безотказной работы КГХ; P_5 – вероятность безотказной работы скрубберов.

Тогда

$$P_{\text{безотк. раб. ЦУ № 1}} = 0,86 * 1 * 1 * 1 * 0,96 = 0,83.$$

Для оценки вероятности отказов (инцидентов) каждого из агрегатов, задействованных в отделении охлаждения коксового газа, машинном, сульфатном отделениях, в отделении конечного охлаждения коксового газа и в бензольном отделении предлагается расчеты вести в следующей последовательности.

1. Оценивается вероятность (P_i) того, что техническое устройство исправно:

$$P_{\text{безот}} = T_{\text{раб}} / (T_{\text{раб}} + T_{\text{нерегл}}), \quad (7)$$

где $T_{\text{раб}}$ – чистое время работы рассматриваемого



Рис. 2. Схема последовательно работающих агрегатов в ЦУ-1

технического устройства, ч; $T_{\text{регл}}$ – суммарное время остановок агрегата (техническое устройство) на регламентные ремонтные работы, осмотры, обслуживание и так далее, ч; $T_{\text{нерегл}}$ – суммарное время остановок агрегата в связи с возникновением инцидентов (аварий) и необходимости проведения ремонтных работ, ч.

2. Определяется вероятность того, что техническое устройство неисправно:

$$P_i = 1 - T_{\text{нерегл}} / (T_{\text{раб}} + T_{\text{нерегл}}). \quad (8)$$

3. Устанавливаются вероятности отказов (инцидентов) параллельно работающего оборудования для каждого отделения:

$$P = (1 - P_1) * (1 - P_2) * \dots * (1 - P_n) = \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (9)$$

где n – количество оборудования одного и того

Таблица 2

Расчетные значения λ и μ для цеха улавливания № 1

Показатели	ПГХ	Газодувные машины	Сатураторы	КГХ	Скрубберы
Среднее время наработки на один отказ $t_{\text{н}}$, ч	1747	724	869	870	287
λ	0,0006	0,0014	0,0012	0,0011	0,0035
$\lambda_k = (n - k) * \lambda$	0,0042	0	0	0	0,0035
Среднее время восстановления $t_{\text{обс}}$, ч	5	6	7	6	5
μ	0,2	0,16	0,13	0,16	0,2
$\mu_k = \mu$	0,2	0,16	0,13	0,16	0,2

Таблица 3

Вероятности отказа оборудования ЦУ № 1

Вероятности отказа					
Одного ПГХ	Одной газодувной машины	Одного сатуратора	Одного КГХ	Одного скруббера	Шести скрубберов
0,0029	0,0083	0,0080	0,0069	0,0171	0,0026

же функционального назначения, работающего параллельно.

4. Рассчитывается вероятность отказов всей системы агрегатов цеха улавливания.

На основании исследований производственных данных по простоям были рассчитаны вероятности отказов каждого вида оборудования (**табл. 3**).

Анализ **табл. 3** показывает весьма высокую без-

отказность отдельных агрегатов каждого из отделений. Имеющееся структурное резервирование (то есть применение дополнительных элементов и агрегатов для замены отказавших) в значительной мере повышает устойчивость и эффективность работы цеха улавливания в результате уменьшения вероятности отказа системы на несколько порядков.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем.
2. Постановление Госгортехнадзора России от 10.07.01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. РД 03-418-01.
3. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.: ил.
4. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1987. 336 с.
5. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистики: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2000. 400 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.: ил.