



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРНЫХ СИСТЕМ

О. А. Коленчуков¹, А. Ю. Михайлов¹, К. А. Башмур^{*1}, В. С. Тынченко^{1,2,3},
Р. Б. Сергиенко⁴, В. В. Кукарцев^{2,5,6}, В. В. Тынченко^{3,5}

¹Институт нефти и газа, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества», МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³Институт информатики и телекоммуникаций, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

⁴Gini GmbH, Мюнхен, Германия

⁵Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

⁶Институт инженерной экономики, СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

Forecasting the technical condition of thermochemical reactor systems

O. A. Kolenchukov¹, A. Yu. Mikhaulov¹, K. A. Bashmur^{*1}, V. S. Tynchenko^{1,2,3},
R. B. Sergienko⁴, V. V. Kukartsev^{2,5,6}, V. V. Tynchenko^{3,5}

¹Institute of Petroleum and Natural Gas Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Digital Material Science: New Materials and Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Institute of Computer Science and Telecommunications, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

⁴Gini GmbH, Munich, Germany

⁵Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

⁶Institute of Engineering and Economics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

ABSTRACT

Today, thermochemical reactors are an integral element in many industries. Failure of reactor elements can lead to significant negative consequences. An analysis of the consequences of failures of thermochemical reactors containing a stirrer is presented. The FMEA method has been used to determine the main causes of failures in thermochemical reactors with agitator. When using failure statistics, the Pareto chart shows the distribution of the main causes of agitator failure. It has been established that the combination of the most significant causes leads to the failure of the bearing units and, as a result, the mixing device. A Markov model of the failure rate of bearing assemblies of a thermochemical reactor using rolling bearings, as well as magnetostatic bearings, is presented. Using the method of Markov processes, the rationale for replacing the rolling bearings of a mixing device with magnetostatic bearing assemblies is shown. The probability of failure-free operation as a result of calculations was 0.9998 for bearings based on rolling bearings and 0.9999 for magnetostatic bearings.

Keywords: failure analysis; thermochemical reactor; Markov processes; mixing device; bearing assembly; technical condition.

© 2023 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

В условиях повышенной потребности в добыче, переработке и транспортировке полезных ископаемых возникает потребность в эффективных и надежных технологических процессах и оборудовании [1-3]. Наиболее остро данная проблема связана с химическими и нефтеперерабатывающими производствами [4, 5]. Работа реакционных аппаратов происходит при высоких температурах и давлении, а также в присутствии агрессивной среды [6], что приводит к образованию аварийных ситуаций [7], связанных с пропуском и поздним обнаружением неисправностей при дефектовке и ремонте. Ввиду этого необходимо определить наиболее частые причины отказов

термохимических реакторов (ТХР) с целью их устранения путем модернизации и определение технического состояния с применением марковских процессов [8].

Обзор дефектов

Все известные причины дефектов, приводящие к отказу ТХР, можно классифицировать следующим образом [9]:

1. Дефекты производственного этапа. Возникают при проектировании конструкторской документации, изготовлении и испытании готового оборудования.
2. Дефекты эксплуатационного этапа. Причина их возникновения описывалась ранее и заключается в пропуске повреждений при обслуживании и планово-предупредительном ремонте, а также модернизации реакционной аппаратуры.

Таблица 1									
Анализ типов, причин и последствий отказов ТХР									
Узел	Вид потенциального дефекта	Последствия дефекта	S	Потенциальная причина	O	Методы обнаружения дефекта	D	ПЧР	Рекомендация по предотвращению нежелательного дефекта
Реактор	1. Износ стенки реакционной камеры.	1. Загрязнение окружающей среды. 2. Причинение вреда здоровью персонала. 3. Повреждение облицовки реактора. 4. Возгорание и/или взрыв реактора.	9	1. Воздействие высоких температур. 2. Сенсibilизация и эрозия стали.	4	1. Визуальный осмотр. 2. Применение методов неразрушающего контроля.	2	72	1. Проведение периодической проверки на основе плана технического обслуживания. 2. Грамотное составление и контроль по осуществлению планово-предупредительного ремонта.
	2. Износ стенки топочной камеры.		10		5		2	100	
ПМУ	1. Износ подшипникового узла (ПУ).	1. Снижение эффективности работы реактора. 2. Повышение энергетических затрат ТХР. 3. Появление посторонних шумов.	7	1. Повреждение уплотнительного устройства. 2. Использование предварительно не обработанного сырья. 3. Изменение свойств смазывающего вещества. 4. Неправильная установка ПМУ	6	1. Визуальный осмотр. 2. Индикация на пульте изменений рабочих характеристик ТХР.	6	252	1. Современное обслуживание ПУ. 2. Тщательная обработка исходного сырья.
	2. Износ рабочих органов ПМУ.	1. Снижение эффективности работы либо остановка реактора. 2. Повреждение иных частей ТХР и/или вспомогательного оборудования.	7	1. Воздействие высоких температур. 2. Работа в условиях агрессивной среды. 3. Использование предварительно не обработанного сырья	5	1. Индикация на пульте изменений рабочих характеристик ТХР. 2. Стетоскопия. 3. Применение методов неразрушающего контроля.	6	210	1. Своевременная чистка органов ПМУ. 2. Тщательная обработка исходного сырья.

Примечание:
S – Severity, ранг значимости последствий отказа (диапазон от 1 до 10, где 1 – незначительные последствия, 10 – катастрофические последствия); O – Occurrence, вероятность возникновения причины отказа (диапазон от 1 до 10, где 1 – крайне маловероятно, 10 – неизбежно); D – Detection, возможность обнаружения самих отказов, их причин и их последствий (диапазон от 1 до 10, где 1 – отказ точно будет обнаружен, 10 – отказ обнаружить невозможно); RPN – Risk priority number, приоритетное число риска (ПЧР), произведение рангов S, O, D. Является количественной оценкой комплексного риска, но не может быть использовано в качестве единой оценки, так как одно и то же значение ПЧР может быть получено произведением различных чисел. Например, произведение 10·2·3 или 5·4·3, в первом случае риск будет намного выше.

С целью определения наиболее значимых причин возникновения отказов воспользуемся анализом видов и последствий отказов (метод FMEA) [10]. Сегодня аналитическая техника FMEA является количественным методом прогнозирования отказов и дефектов с целью предотвращения их возникновения, в том числе и на стадии проектирования продукции. Анализ типов, причин и последствий отказов ТХР с перемешивающим устройством (ПМУ) представлен в таблице 1.

Как видно из представленного анализа, основной причиной выхода из строя ТХР является повреждение подшипниковых узлов (ПУ) перемешивающего устройства. На втором месте по значимости выступает разрушение рабочих органов перемешивающего устройства (ПМУ), что связано, скорее всего, с необходимостью разработки новых и модернизации старых мешалок. Менее значимы

ми являются повреждения корпуса агрегата.

Для определения наиболее значимых потенциальных причин возникновения дефектов в ПУ воспользуемся методом «диаграмма Парето» [11]. С помощью данного метода удалось установить основные факторы, влияющие на возникновение дефекта в ПУ. Регистрация данных по результатам причин, приводящих к дефектам, и основные факторы, с которых нужно начать действовать с целью эффективного разрешения возникающих проблем, представлены на рисунке 1.

Для исследования вопросов надежности использовались экспериментальные данные, полученные на исследовательских образцах промышленных реакторов пиролиза, спроектированных в лаборатории биотопливных композиций. Данные причин отказов фиксировались исходя из дефектоскопии после отказа реакторного обо-

рудования (качественное изменение конечных продуктов). Перемешивающее устройство в данных реакторах играет важную роль, обеспечивая необходимое качество получаемых топлив, способствуя интенсификации протекающих в реакторе процессов [12, 13]. Повреждение узлов ПУ обусловлено высокими температурами процесса (500-550 °С) и воздействием на них агрессивной рабочей среды (сернистые углеводородные соединения). Дополнительно на надежность подшипниковых узлов оказывает тот фактор, что вал перемешивающего устройства выполнен эксцентриковым. В результате чего возникает дополнительная нагрузка на подшипниковые узлы. Общий вид реактора для получения топливных композиций представлен на рисунке 2.

После построения диаграммы Парето применим так называемый ABC-анализ. Разделим составляющие, по которым производится анализ, на три области: А, В, С. На группу А приходится 70-80 % всех отказов, на группу В 10-25 % на группу С 5-10. Что позволяет определить наиболее значимые причины дефектов (область А).

Анализ полученных зависимостей интенсивностей отказов различных категорий указывает на возможность применения нестационарного марковского процесса. Марковские процессы высшего порядка в наибольшей степени соответствуют процессам технической эксплуатации устройства. Наглядность, высокий уровень адекватности математической модели и глубоко проработанный математический аппарат марковских процессов позволяют использовать его по различным направлениям. Данный метод хорошо зарекомендовал себя для оценки и анализа вероятностных характеристик различных систем, применяемый как на этапе оценки, так и при анализе риска [14].

Процесс эксплуатации объекта (подшипниковых узлов) как марковского процесса представляет собой последовательную смену состояний объекта и его переходов в различные состояния. Объект совершает переход из одного состояния в другое, когда значения его параметров, характеризующие состояния, сменяются другими параметрами [15].

Рассматриваемая модель имеет лишь два состояния:

- исправное;
- неисправное (неработоспособное).

Рассмотрим геометрическую схему состояния работоспособности системы в части подшипниковых узлов – графа состояния и переходов (рис. 3).

Граф состояний будет состоять из следующих процессов: устройство состоит из двух одноосно расположенных узлов, каждый из которых может выйти из строя в случайный момент времени, следом система переходит в неработоспособное состояние [16].

Зададим начальное условие при моделировании отказов (группа А, рис. 1): пренебрежём выходом из строя независимых друг от друга элементов (подшипников).

Выделены следующие состояния:

- S_0 – оба узла исправны;
- S_1 – первый узел находится в неисправном состоянии;
- S_2 – второй узел находится в неисправном состоянии;
- S_3 – оба узла вышли из строя.

Для описания вышеуказанного марковского процесса воспользуемся определением понятием – поток событий. Переход объекта из одного состояния в другое носит

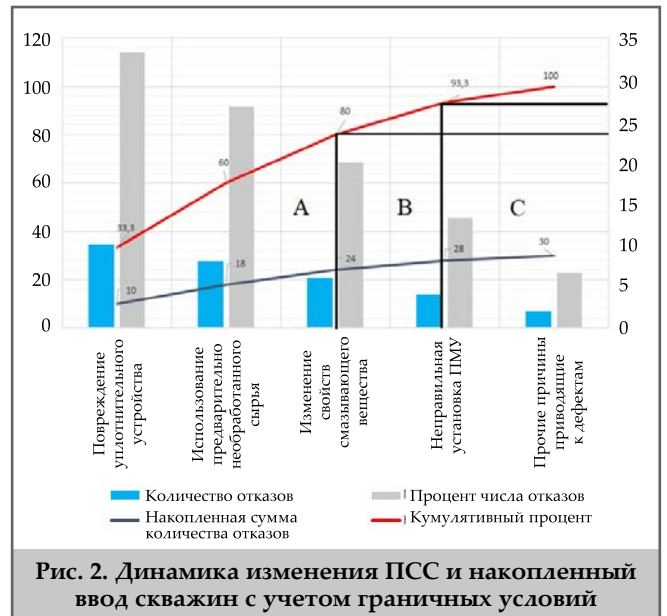


Рис. 2. Динамика изменения ПСС и накопленный ввод скважин с учетом граничных условий



Рис. 2. Изометрия термохимического реактора для получения биотопливных композиций:

1 – корпус реактора, 2 – комбинированное перемешивающее устройство с эксцентриковым валом, 3 – магнитостатический подшипник, 4 – страховочный радиально-упорный подшипник качения, 5 – завихритель газового потока, 6 – привод

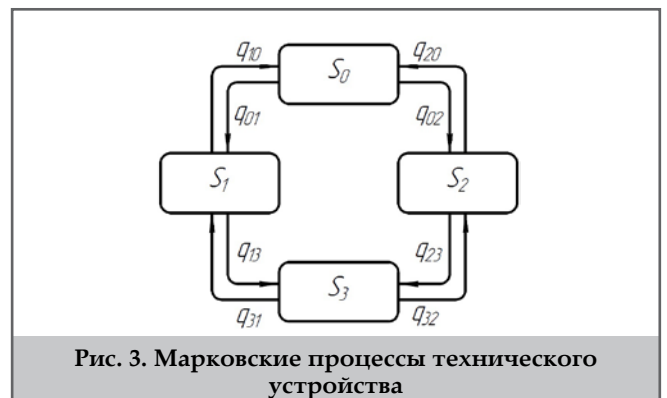


Рис. 3. Марковские процессы технического устройства

случайных во времени характер и описывается как непрерывный процесс. Под потоком событий в данном случае понимаются последовательность событий (однородных), следующих друг за другом.

Составим систему уравнений для вероятного состояния ТХР с перемешивающим устройством для предельного состояния (отказ ПУ), согласно рисунков 1 и 3 (работоспособное состояние).

$$p = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} = 0.6 \quad (1)$$

В ходе анализа причин отказов было установлено, что основной причиной выхода из строя ТХР является повреждение ПУ (метод «FMEA»), при этом наиболее значимыми причинами, приводящими к данному дефекту, являются: повреждение уплотнительного устройства, использование предварительно необработанного сырья и изменение свойств смазывающего вещества (метод «диаграмма Парето», область А). Одним из путей решения данной проблемы, приводящей к отказу, является замена радиально-упорных подшипников качения на магнитные подшипники, которые имеют множество эксплуатационных преимуществ [17-19].

В качестве обоснования замены подшипников качения (ПК) на магнитоэлектрические подшипники-демпферы (МПД) выполнен расчет вероятности безотказной работы для двух видов подшипников при равных заданных условиях. Далее, вероятность безотказной работы была принята за базисную для моделирования состояний системы в среде MS Excel на основании графа состояний и переходов.

Постановка задачи

Определить вероятность безотказной работы (P) ПК и МПД, нагруженных случайной радиальной силой, коэффициент вариации которой составляет 0.25 (V_p). Скорость вращения ротора составляет 300 мин⁻¹ (n), требуемый ресурс работы (L_3) – 10000 часов. Среднее значение приведенной нагрузки (P_n) составляет 4000 Н.

1. По каталогу-справочнику бренда NSK для подшипников качения и унифицированному ряду электромагнитных подшипников для компрессоров ГПА, была определена 90% динамическая грузоподъемность:

$$C_{90\text{ ПК}} = 25600 \text{ Н}, C_{90\text{ МПД}} = 3000 \text{ Н} \quad (2)$$

2. Вычислен номинальный ресурс по методике, описанной в ИСО 281, млн. часов. При этом в правой части введен поправочный коэффициент, разработанный компанией Timken отражающий воздействие окружающей среды, оказывающее влияние на эксплуатационные характеристики:

$$L_i = \left(\frac{C_{90i}}{P} \right)^{10/3} \cdot \left(\frac{1.5 \cdot 10^6}{n} \right) \quad (3)$$

$$L_{\text{ПК}} = \left(\frac{25600}{4000} \right)^{10/3} \cdot \left(\frac{1.5 \cdot 10^6}{300} \right) = 2.43 \quad (4)$$

$$L_{\text{МПД}} = \left(\frac{30000}{4000} \right)^{10/3} \cdot \left(\frac{1.5 \cdot 10^6}{300} \right) = 4.13 \quad (5)$$

3. Найдено среднее значение динамической грузоподъемности, Н:

$$\bar{C}_i = 1.46 C_{90i} \quad (6)$$

$$\bar{C}_{\text{ПК}} = 1.46 \cdot 25600 = 37376 \quad (7)$$

$$\bar{C}_{\text{МПД}} = 1.46 \cdot 30000 = 43800 \quad (8)$$

4. Определен коэффициент запаса по среднему значению:

$$\bar{n}_i = \frac{\bar{C}_i}{P L_i^{1/\bar{P}}} \quad (9)$$

$$\bar{n}_{\text{ПК}} = \frac{37376}{4000 \cdot 2.43^{1/4000}} = 9.3 \quad (10)$$

$$\bar{n}_{\text{МПД}} = \frac{43800}{4000 \cdot 4.13^{1/4000}} = 10.9 \quad (11)$$

Коэффициент вариации внешней нагрузки был принят равным коэффициенту вариации эквивалентной динамической нагрузки.

5. Найден квантиль нормированного нормального распределения:

$$U_{pi} = - \frac{\bar{n}_i - 1}{\sqrt{\bar{n}_i^2 V_c^2 + V_p^2}} \quad (12)$$

$$U_{p\text{ ПК}} = - \frac{9.3 - 1}{\sqrt{9.3^2 \cdot 0.25^2 + 0.25^2}} = -3.5 \quad (13)$$

$$U_{p\text{ МПД}} = - \frac{10.9 - 1}{\sqrt{10.9^2 \cdot 0.25^2 + 0.25^2}} = -3.6 \quad (14)$$

где V_c^2 – коэффициент вариации эквивалентной динамической нагрузки; V_p^2 – коэффициент вариации; \bar{n}_i – коэффициент запаса по среднему значению.

По таблицам нормального распределения определены вероятности безотказной работы, которые составили 0.9998 для подшипника качения, и 0.9999 для МПД, соответственно. В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчета графа состояний и переходов в среде MS Excel.

В рамках заданной графовой модели, было установлено, что от шага к шагу вероятность состояния S_0 – «оба узла исправны» уменьшается, на шестом шаге (6000 часов наработки) в заданном режиме работы останется только 19% изначального ресурса подшипников.

Вероятность состояния S_1 и S_2 – «один узел исправен, один неисправен» уменьшается, через 6000 часов наработки, этот показатель будет составлять всего 2% от изначального ресурса.

Вероятность состояния S_3 – «оба узла неисправны» уменьшается, тем не менее, к шестому шагу, есть 1% вероятности, что оба узла откажут.

В качестве МПД предлагается использовать разработанную в лаборатории биотопливных композиций Сибирского федерального университета конструкцию данного устройства [20]. Преимуществами данного устройства-демпфера являются упрощенная конструкция и отсутствие системы управления, что позволяет добиться высоких показателей надежности.

Выводы

1. С помощью метода анализа видов и последствий отказов было установлено, что наиболее слабым местом в термохимическом реакторе, требующего особого внимания, является перемешивающее устройство. Наиболее часто выход из строя перемешивающего устройства связан с отказом подшипниковых узлов ввиду использования агрессивной среды, неправильной установки вала перемешивающего устройства и потери свойств смазочного материала. С помощью более детального исследования с применением метода «диаграмма Парето» было установлено, что 70-80 % отказов связано с использованием необработанного сырья и выход из строя уплотнительных устройств. Данные причины отказов приводят к выходу из строя подшипниковых узлов, что, в свою очередь, приводит к неправильной работе перемешивающего устройства и его отказу. Именно поэтому данные

Таблица 2 Расчет графа состояний и переходов для подшипника качения			
Нулевой шаг			
$p(S_0)$	0.9998		
$p(S_1)$	0		
$p(S_2)$	0		
$p(S_3)$	0		
Переходная матрица			
0.76	0.1	0.1	0.04
0.4	0.5	0.1	0
0	0.2	0.6	0.2
0	0	0.01	0.99
Транспонированная матрица			
0.76	0.4	0	0
0.1	0.5	0.2	0
0.1	0.1	0.6	0.01
0.04	0	0.2	0.99
Первый шаг		Второй шаг	
$p(S_0)$	0.759848	$p(S_0)$	0.57748448
$p(S_1)$	0.09998	$p(S_1)$	0.0759848
$p(S_2)$	0.09998	$p(S_2)$	0.0759848
$p(S_3)$	0.039992	$p(S_3)$	0.03039392
Третий шаг		Четвертый шаг	
$p(S_0)$	0.438888205	$p(S_0)$	0.333555036
$p(S_1)$	0.057748448	$p(S_1)$	0.04388882
$p(S_2)$	0.057748448	$p(S_2)$	0.04388882
$p(S_3)$	0.023099379	$p(S_3)$	0.017555553
Пятый шаг		Шестой шаг	
$p(S_0)$	0.53501827	$p(S_0)$	0.192661389
$p(S_1)$	0.033355504	$p(S_1)$	0.025350183
$p(S_2)$	0.033355504	$p(S_2)$	0.025350183
$p(S_3)$	0.013342201	$p(S_3)$	0.010140073

Таблица 3 Расчет графа состояний и переходов для МПД			
Нулевой шаг			
$p(S_0)$	1		
$p(S_1)$	0		
$p(S_2)$	0		
$p(S_3)$	0		
Переходная матрица			
0.76	0.1	0.1	0.04
0.4	0.5	0.1	0
0	0.2	0.6	0.2
0	0	0.01	0.99
Транспонированная матрица			
0.76	0.4	0	0
0.1	0.5	0.2	0
0.1	0.1	0.6	0.01
0.04	0	0.2	0.99
Первый шаг		Второй шаг	
$p(S_0)$	0.759924	$p(S_0)$	0.57754224
$p(S_1)$	0.09999	$p(S_1)$	0.0759924
$p(S_2)$	0.09999	$p(S_2)$	0.0759924
$p(S_3)$	0.039996	$p(S_3)$	0.03039696
Третий шаг		Четвертый шаг	
$p(S_0)$	0.438932102	$p(S_0)$	0.333588398
$p(S_1)$	0.057754224	$p(S_1)$	0.04389321
$p(S_2)$	0.057754224	$p(S_2)$	0.04389321
$p(S_3)$	0.023101169	$p(S_3)$	0.017557284
Пятый шаг		Шестой шаг	
$p(S_0)$	0.025352718	$p(S_0)$	0.192680659
$p(S_1)$	0.03335884	$p(S_1)$	0.025352718
$p(S_2)$	0.03335884	$p(S_2)$	0.025352718
$p(S_3)$	0.013343536	$p(S_3)$	0.010141087

факторы являются наиболее значимыми, которые необходимо устранить в первую очередь.

2. Основные данные для исследований были получены на промышленных образцах реакторов пиролиза. Анализ полученных зависимостей позволяет нам применить марковский процесс с целью обоснования замены подшипников качения на магнитные подшипники. Данный метод может использоваться при определении надежности различных технологических систем, а также на стадии формирования технической политики предприятия при выборе и замене соответствующего оборудования. Замена подшипниковых узлов с телами качения на подшипниковые узлы с магнитоэлектрическими левитационными опорами обосновано осуществлением процессов термической деструкции в термохимическом реакторе при высоких температурах и агрессивной среде. Подшипники качения с контактным трением при данных условиях подвержены разрушению с последующим отказом перемешивающего устройства ввиду абразивного и адгезионного износа.

3. Проведенные расчеты показывают, что вероятность безотказной работы подшипника качения фирмы NSK

на нулевом шаге составляет 0.9998, а для магнитоэлектрических – 0.9999. Вероятность состояния, когда оба узла исправны, уменьшается на шестом шаге (6000 часов наработки). В этом случае останется 19% изначального ресурса подшипников. Несмотря на то, что вероятность безотказной работы обоих подшипников достаточно высока, ресурс магнитоэлектрического почти вдвое выше, чем у подшипника качения, следовательно, подшипники качения достигнут состояния отказа значительно раньше.

Исследования выполнены по государственному заданию по проекту «Разработка комплекса научно-технических решений в области создания биотоплив и оптимальных биотопливных композиций, обеспечивающих возможность трансформации потребляемых видов энергоносителей в соответствии с тенденциями энергоэффективности, снижения углеродного следа продукции и использования видов топлива альтернативных ископаемому» (Контракт FSRZ-2021-0012) в научной лаборатории биотопливных композиций Сибирского федерального университета, созданной в рамках деятельности Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь».

Литература

1. Велиев, Э. Ф., Алиев, А. А. (2021). Инновационные технологии как приоритетный фактор развития нефтегазовой промышленности. *ANAS Transactions. Earth Sciences*, 2, 81-93.
2. Кучерявый, В. И., Савич, В. Л., Мильков, С. Н. (2018). Оценка надежности подземного нефтегазопровода по критерию устойчивости. *SOCAR Proceedings*, 4, 59-64.
3. Гасумов, Р. А., Шихалиев, И. Ю. (2011). Повышение надежности эксплуатации нефтяных и газовых скважин за счет применения эффективных технологий. *SOCAR Proceedings*, 4, 53-58.
4. Бухтояров, В. В., Некрасов, И. С., Тынченко, В. С. и др. (2022). Применение прогнозирующих алгоритмов машинного обучения к процессам нефтепереработки в рамках интеллектуальной автоматизации. *SOCAR Proceedings*, 1, 12-20.
5. Hameed, A., Khan, F., Ahmed, S. (2015). A risk-based methodology to estimate shutdown interval considering system availability. *Process Safety Progress*, 34, 267-279.
6. Kolenchukov, O. A., Petrovsky, E. A., Bashmur, K. A., et al. (2021). Simulating the hydrocarbon waste pyrolysis in reactors of various designs. *SOCAR Proceedings*, 2, 1-7.
7. Баширов, М. Г., Миронова, И. С. (2015). Разработка интегральных критериев для оценки технического состояния и ресурса машинных агрегатов нефтегазового производства. *SOCAR Proceedings*, 1, 46-55.
8. Ahmed, Q., Khan, F. I., Raza, S. A. (2014). A risk-based availability estimation using Markov method. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 31, 106-128.
9. Bloch, H. P. (2016). Petrochemical machinery insights. UK: *Butterworth-Heinemann*.
10. Carlson, C. (2012). Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis. USA: *Wiley*.
11. Kan, S. H. (2002). Metrics and models in software quality engineering. USA: *Addison-Wesley Professional*.
12. Kolenchukov, O. A., Bashmur, K. A., Bukhtoyarov, V. V., et al. (2022). The experimental research of n-butane pyrolysis using an agitator. *SOCAR Proceedings*, 1, 29-34.
13. Kolenchukov, O. A., Bashmur, K. A., Bukhtoyarov, V. V., et al. (2022). Experimental study of oil non-condensable gas pyrolysis in a stirred-tank reactor for catalysis of hydrogen and hydrogen-containing mixtures production. *Energies*, 15, 8346.
14. Karagrighiou, A., Lisnianski, A., Kleyner, A. V. (2013). Applied reliability engineering and risk analysis. USA: *Wiley*.
15. Кузнецов, С. В. (2014). Математические модели процессов и систем технической эксплуатации авионики как марковские цепи. *Научный вестник МГТУ ГА*, 201, 56-64.
16. Chakravarthy, S. R. (2010). Markovian arrival processes /in: Wiley encyclopedia of operations research and management science. USA: *Wiley*.
17. Поляхов, Н. Д., Стоцкая, А. Д. (2012). Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников. *Научное приборостроение*, 22, 5-18.
18. Щеклеина, И. Л., Угольников, А. В., Стожков, Д. С. (2016). Об активных магнитных подшипниках. *Известия УГГУ*, 4, 76-79.
19. Zhang, W., Zhu, H. (2017). Radial magnetic bearings: An overview. *Results in Physics*, 7, 3756-3766.
20. Кожухов, Е. А., Петровский, Э. А., Башмур, К. А., Коленчуков, О. А. (2020). Применение магнитоупругих подшипников для демпфирования колебаний роторов турбодетандеров. *Нефтегазовое дело*, 18, 137-144.

References

1. Veliyev, E. F., Aliyev, A. A. (2021). Innovative technologies as a priority factor of the oil and gas industry development. *ANAS Transactions. Earth Sciences*, 2, 81-93.
2. Kucheryavy, V. I., Savich, V. L., Milkov, S. N. (2018). Evaluation of the reliability of the underground oil and gas pipeline on stability criterion. *SOCAR Proceedings*, 4, 59-64.
3. Gasumov, R. A., Shikhaliyev, I. Yu. (2011). Oil and gas fields operation reliability increase owing to use of efficient technology. *SOCAR Proceedings*, 4, 53-58.
4. Bukhtoyarov, V. V., Nekrasov, I. S., Tynchenko, V. S., et al. (2022). Application of machine learning algorithms for refining processes in the framework of intelligent automation. *SOCAR Proceedings*, 1, 12-20.
5. Hameed, A., Khan, F., Ahmed, S. (2015). A risk-based methodology to estimate shutdown interval considering system availability. *Process Safety Progress*, 34, 267-279.
6. Kolenchukov, O. A., Petrovsky, E. A., Bashmur, K. A., et al. (2021). Simulating the hydrocarbon waste pyrolysis in reactors of various designs. *SOCAR Proceedings*, 2, 1-7.
7. Bashirov, M. G., Mironova, I. S. (2015). Integral criteria development for technical state and lifespan assessment of machine assembly in oil and gas industry. *SOCAR Proceedings*, 1, 46-55.
8. Ahmed, Q., Khan, F. I., Raza, S. A. (2014). A risk-based availability estimation using Markov method. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 31, 106-128.
9. Bloch, H. P. (2016). Petrochemical machinery insights. UK: *Butterworth-Heinemann*.
10. Carlson, C. (2012). Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis. USA: *Wiley*.

11. Kan, S. H. (2002). Metrics and models in software quality engineering. USA: Addison-Wesley Professional.
12. Kolenchukov, O. A., Bashmur, K. A., Bukhtoyarov, V. V., et al. (2022). The experimental research of n-butane pyrolysis using an agitator. *SOCAR Proceedings*, 1, 29-34.
13. Kolenchukov, O. A., Bashmur, K. A., Bukhtoyarov, V. V., et al. (2022). Experimental study of oil non-condensable gas pyrolysis in a stirred-tank reactor for catalysis of hydrogen and hydrogen-containing mixtures production. *Energies*, 15, 8346.
14. Karagrigoriou, A., Lisnianski, A., Kleyner, A. V. (2013). Applied reliability engineering and risk analysis. USA: Wiley.
15. Kuznetsov, S. V. (2014). Processes and systems of avionics technical operation as Markov chains mathematical models. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*, 201, 56-64.
16. Chakravarthy, S. R. (2010). Markovian arrival processes /in: Wiley encyclopedia of operations research and management science. USA: Wiley.
17. Polyakhov, N. D., Stotskaya, A. D. (2012). The methods review of practical application for active magnetic bearings. *Nauchnoye Priborostroyeniye*, 22, 5-18.
18. Shchekleina, I. L., Ugolnikov, A. V., Stozhkov, D. S. (2016). About active magnetic bearings. *News of the Ural State Mining University*, 4, 76-79.
19. Zhang, W., Zhu, H. (2017). Radial magnetic bearings: An overview. *Results in Physics*, 7, 3756-3766.
20. Kozhukhov, Ye. A., Petrovsky, E. A., Bashmur, K. A., Kolenchukov, O. A. (2020). Application of magnetoelastic bearings for damping of turboexpander rotor vibrations. *Petroleum Engineering*, 18, 137-144.

Прогнозирование технического состояния термохимических реакторных систем

*О. А. Коленчук¹, А. Ю. Михайлов¹, К. А. Башмур¹, В. С. Тынченко^{1,2,3},
Р. Б. Сергиенко⁴, В. В. Кукарцев^{2,5,6}, В. В. Тынченко^{3,5}*

¹Институт нефти и газа, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Институт информатики и телекоммуникаций, СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

⁴Gini GmbH, Мюнхен, Германия;

⁵Институт космических и информационных технологий,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

⁶Институт инженерной экономики, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

Реферат

На сегодняшний день термохимические реакторы являются неотъемлемым элементом во многих отраслях промышленности. Отказ элементов реактора может привести к существенным негативным последствиям. Представлен анализ последствий отказов термохимических реакторов, содержащих перемешивающее устройство. Методом FMEA определены основные причины отказов термохимических реакторов с перемешивающим устройством. При использовании статистических данных отказов на диаграмме Парето представлено распределение основных причин выхода из строя перемешивающего устройства. Установлено, что совокупность наиболее значимых причин приводит к выходу из строя подшипниковых узлов и, как следствие, перемешивающего устройства. Представлена марковская модель интенсивности отказов подшипниковых узлов термохимического реактора с использованием подшипников качения, а также магнитостатических подшипников. С помощью метода марковских процессов показано обоснование замены подшипников качения перемешивающего устройства на магнитостатические подшипниковые узлы. Вероятность безотказной работы в результате расчетов составила 0.9998 для опор на основе подшипников качения и 0.9999 для магнитостатических подшипников.

Ключевые слова: анализ отказов; термохимический реактор; марковские процессы; перемешивающее устройство; подшипниковый узел; техническое состояние.

Termokimyəvi reaktor sistemlərinin texniki vəziyyətinin proqnozlaşdırılması

*O. A. Kolençukov¹, A. Y. Mixaylov¹, K. A. Başmur¹, V. S. Tınçenko^{2,3},
R. B. Serqiyenko⁴, V. V. Kukarsev^{2,5,6}, V. V. Tınçenko^{3,5}*

¹Sibir Federal Universiteti, Neft və Qaz İnstitutu, Krasnoyarsk, Rusiya

²N. E. Bauman adına MDTU, «Rəqəmsal materialşünaslıq: yeni materiallar və maddələr», MTT Mərkəzi, Moskva, Rusiya

³M. F. Reşetnev adına Sibir Dövlət Universiteti, İnformatika və telekommunikasiya İnstitutu, Krasnoyarsk, Rusiya

⁴Gini GmbH, Münhen, Almaniya

⁵Sibir Federal Universiteti, Kosmik və İnformasiya Texnologiyaları İnstitutu, Krasnoyarsk, Rusiya

⁶M.F. Reşetnev adına Sibir Dövlət Universiteti, Mühəndislik iqtisadiyyatı İnstitutu, Krasnoyarsk, Rusiya

Xülasə

Hal hazırda termokimyəvi reaktorlar bir çox sənaye sahələrinin ayrılmaz elementidir. Reaktor elementlərinin imtinası əhəmiyyətli mənfə nətəcələrə səbəb ola bilər. Tərkibində qarışdırıcı cihazı olan termokimyəvi reaktorların imtina nətəcələrinin təhlili təqdim olunur. Qarışdırıcı cihazı olan termokimyəvi reaktorların imtinasının əsas səbəblərini müəyyən etmək üçün FMEA üsulundan istifadə edilmişdir. İmtinanın statistik məlumatlarından istifadə edərək Pareto diaqramında qarışdırıcı cihazın sıradan çıxmasının əsas səbəblərinin bölüşdürülməsi göstərilmişdir. Ən əhəmiyyət kəsb edən səbəblər məcmusunun yastıq qovşaqlarının və nəticə olaraq, qarışdırıcı cihazın sıradan çıxmasına səbəb olduğu müəyyən edilmişdir. Diyircəkli yastıqların, eləcə də maqnitostatik yastıqların istifadəsilə, termokimyəvi reaktorun yastıq qovşaqlarının imtina intensivliyinin Markov modeli təqdim olunmuşdur. Markov prosesləri metodundan istifadə edərək qarışdırıcı cihazın diyircəkli yastıqlarının maqnitostatik yastıq qovşaqları ilə əvəz edilməsinin əsaslandırılması göstərilmişdir. Hesablamalar nəticəsində imtinasız işləmə ehtimalı diyircəkli yastıq əsaslı dayaqlar üçün 0.9998, maqnitostatik yastıqları üçün isə 0.9999 olmuşdur.

Açar sözlər: imtinaların təhlili; termokimyəvi reaktor; Markov prosesləri; qarışdırıcı cihaz; yastıq qovşağı; texniki vəziyyət.