

# ЦИФРОВОЕ РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОГО И БЕЗОПАСНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Наиль Анатольевич Гафаров (докт. техн. наук)**

**Александр Валентинович Митрофанов (докт. техн. наук, научный руководитель)**

**Виктор Анатольевич Ломанцов (канд. техн. наук, генеральный директор)**

**Алексей Александрович Вдовин (канд. техн. наук, гл. инженер–первый зам. ген. директора)**

**Сергей Петрович Воронин (нач. метрологической лаборатории)**

**Сергей Владимирович Егоров (нач. технического отдела)**

**АО «Системы и технологии обеспечения безопасности. ТЕХДИАГНОСТИКА»**

460047 Россия, г. Оренбург, ул. Юных Ленинцев, д. 22

Телефон: (3532) 63–84–07

Факс (3532) 62–94–41

E-mail: contact@tdiag.ru

***Аннотация:** В результате выполнения регламентируемых нормативно-правовыми актами в области промышленной безопасности мероприятий по обеспечению безопасности эксплуатации опасных производственных объектов собираются, обрабатываются и анализируются значительные объемы данных. Для управления таким большим количеством информации обоснована и предложена цифровая система обеспечения требуемого уровня безотказности и безопасности при эксплуатации технических устройств, зданий и сооружений опасных производственных объектов.*

***Ключевые слова:** цифровизация, информационная система, автоматизация, планирование мероприятий, безотказность, безопасность, обоснование, планирование, обслуживание, диагностирование, ремонт, испытания, техническое состояние, тяжесть последствий, вероятность отказа*

**DIGITAL DEVELOPMENT SYSTEM OF DEPENDABLE AND SAFE STATE OF  
TECHNICAL DEVICES, BUILDINGS AND STRUCTURES**

**Nail Anatolyevich Gafarov**

**Aleksandr Valentinovich Mitrofanov**

**Viktor Anatolyevich Lomantsov**

**Alexey Alexandrovich Vdovin**

**Sergey Petrovich Voronin**

**Sergey Vladimirovich Egorov**

**JSC «TEKHDIGNOSTIKA»**

460047 Russia, s. Orenburg, str. Unich Lenincev, 22

Phone: (3532) 63-84-07

Fax: (3532) 62-94-41

E-mail: contact@tdiag.ru

***Abstract:** As a result of the implementation of the regulatory legal acts in the field of industrial safety measures to ensure the safety of operation of hazardous production objects are collected, processed and analyzed significant amounts of data. To manage such a large amount of information, a digital system is justified and proposed to ensure the required level of reliability and safety in the operation of technical devices, buildings and facilities of hazardous production objects.*

***Keywords:** digitalization, information system, automatization, event planning, reliability, safety, justification, planning, maintenance, diagnosis, repair, tests, technical condition, severity of consequences, probability of failure.*

## *Введение*

Организации, эксплуатирующие опасные производственные объекты (ОПО) в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов (НПА) в области промышленной безопасности [1, 2 и др.] выполняют определенные мероприятия по обеспечению безотказного и безопасного состояния технических устройств, зданий и сооружений ОПО (далее для краткости — ТУ и ЗС ОПО). В результате проведения этих мероприятий, а именно технических диагностирований и экспертиз промышленной безопасности, ремонтов, обслуживаний, ревизий, испытаний и т. п. (далее — мероприятия безопасного состояния, МБС), собираются и анализируются данные о параметрах технического состояния (ПТС) и критериях предельного состояния (КПС), выполняются расчеты, проводится оценка значений ресурса (срока службы) до перехода элементов ТУ и ЗС в предельное состояние и прогнозируются сроки (период) безопасной эксплуатации до следующих МБС.

Сложилась ситуация, когда именно прогнозные сроки безопасной эксплуатации и расчетное значение ресурса являются конечной целью аналитической части диагностических работ, а полученные в результате МБС данные о ПТС и КПС элементов ТУ и ЗС, повреждениях и закономерностях их изменения и ряд других данных об отклонениях ПТС и их механизмах используются не в полной мере.

В статье показана возможность использования фактически накапливаемых по результатам МБС данных для обеспечения требуемых уровней безотказности и безопасности при эксплуатации ТУ и ЗС ОПО, в том числе за счет оптимизации методов, объемов и сроков МБС.

Как показывают результаты исследования [3], промышленным предприятиям России необходимо готовиться к «новым технологическим реалиям», в том числе к «оптимизации работ на принципах индустриального интернета вещей» (ИИТ, Industrial Internet of Things).

В этом же исследовании [3] отмечается «условие для внедрения ИИТ — наличие на предприятии автоматизированной системы планирования и учета» (ERP-системы). В предлагаемой статье показана актуальность, значимость и возможность применения ERP-системы для обеспечения безотказности и безопасности ТУ и ЗС ОПО.

Условия и требования обеспечения безопасности ОПО и в их составе ТУ и ЗС определены Стратегией национальной безопасности [4] и нормативно-правовыми актами в области промышленной безопасности [1, 5, 6, 7 и др.]. Как показывает опыт длительной эксплуатации ТУ и ЗС ОПО, с ростом наработки растет количество данных о выполненных МБС, возрастает количество результатов оценок и прогнозов ПТС, КПС, и других данных по ТУ и ЗС (далее для краткости — данные МБС).

Большое количество данных МБС создает проблему их хранения, поиска, обработки, анализа и обновления. Возрастает трудоемкость работы с данными и риск их утраты. Полная или частичная утрата данных ведет к ошибкам в планировании сроков и объемов МБС, что ведет к снижению уровня безопасности эксплуатации ОПО.

Для решения этой проблемы предлагается разработать и применить цифровую систему обеспечения безотказного и безопасного состояния (ЦСБС) ТУ и ЗС ОПО.

Актуальность и значимость цифровизации действующей согласно требований НПА [1, 2, 6, 7 и др.] системы обеспечения безотказности и безопасности ТУ и ЗС ОПО наглядно показана на схеме рис. 1.

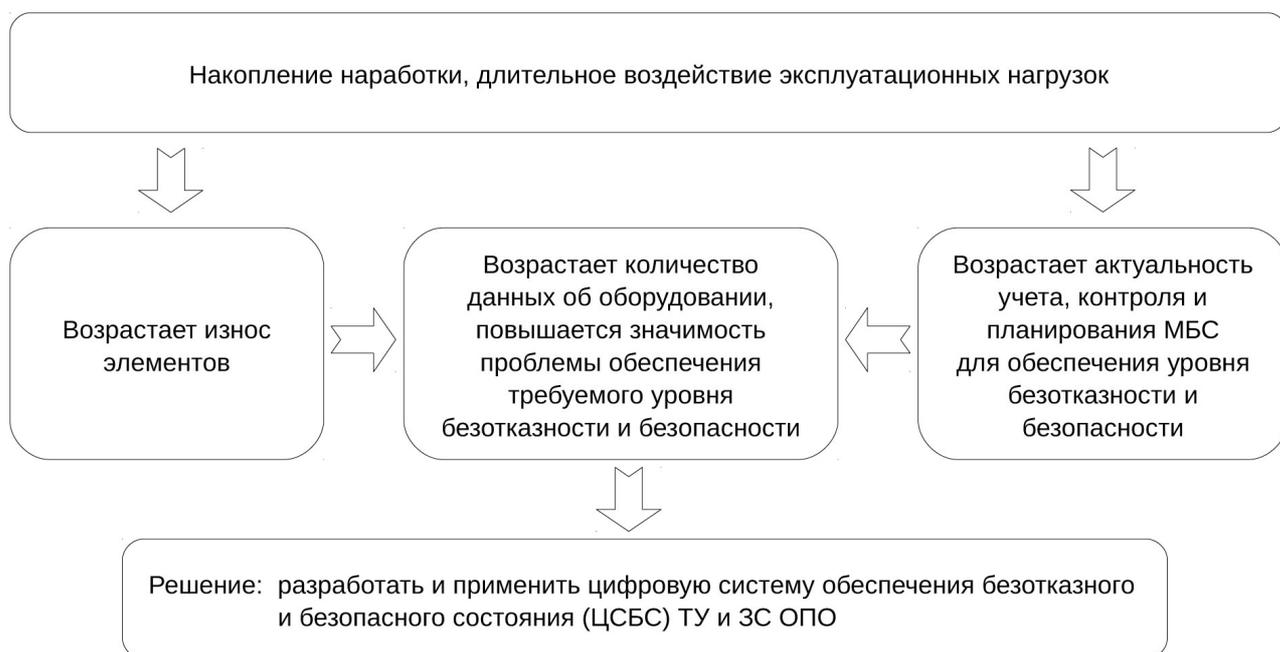


Рис. 1 — Актуальность проблемы обеспечения промышленной безопасности ТУ и ЗС ОПО

Применение ЦСБС, т. е. цифровое развитие действующей системы обеспечения безотказного и безопасного состояния ТУ и ЗС ОПО позволяет: решить проблему управления большим количеством данных; снизить трудоемкость этих работ; обеспечить обоснованность и исключить ошибки в планировании МБС; поддерживать требуемый уровень безотказности и безопасности при длительной эксплуатации ТУ и ЗС без увеличения затрат, путем перераспределения сил и средств с неопасных на фактически опасные элементы ТУ и ЗС и снизить вероятности отказа этих элементов, а следовательно ТУ, ЗС и ОПО в целом, на 1–2 порядка.

В ЦСБС реализованы результаты научных исследований, разработок, а также опыт, накопленные за более чем 25-летний период работы АО «Техдиагностика» (с 1991 года) [8] по обеспечению выявляемости и достоверности оценки повреждений, базы данных о повреждениях, анализу динамики повреждаемости, прогнозированию и оценке уровня безотказности и безопасности эксплуатации поврежденных элементов ТУ и ЗС, подверженных воздействию

сероводородсодержащих рабочих сред. Обоснована возможность предупреждения отказов и аварий ТУ и ЗС путем оценки и прогнозирования безотказности и безопасности эксплуатации элементов ТУ и ЗС, накопивших эксплуатационные повреждения, в том числе за счет оптимизации методов, объемов и сроков МБС. ЦСБС будет полезна при реализации государственной программы «Цифровая экономика» [9] в процессах обеспечения безотказности и безопасности ТУ и ЗС ОПО предприятий добычи и переработки нефти и газа, химической и нефтехимической отрасли.

ЦСБС предполагает цифровизацию (цифровое развитие) процессов обоснования, планирования, контроля и учета МБС, оценки и подтверждения уровня безотказности и безопасности эксплуатации ТУ и ЗС ОПО.

Целью ЦСБС является обеспечение требуемого уровня безотказности и безопасности длительно эксплуатируемых ТУ и ЗС ОПО, а для ее достижения решаются три основные задачи:

1. Сбор и обработка документации и информации о техническом состоянии ТУ и ЗС, результатах МБС;

2. Разработка и формирование ЦСБС, включающее: разработку структуры хранения данных, программных модулей управления электронными экземплярами документации, данными характеристик и параметров ТУ и ЗС ОПО, анализа этих данных и построения прогнозов их изменения; обоснования объемов и сроков МБС и контроля их выполнения; разработку форм выходных электронных документов и технических инструкций на внедрение и эксплуатацию ЦСБС; наполнение базы данных и другое;

3. Обоснование критериев распределения сил и средств между фактически опасными и неопасными элементами ТУ и ЗС, оценки и подтверждения безотказности и безопасности их эксплуатации на прогнозируемый период.

В ходе решения первой задачи — сбора и обработки информации, по фактически накапливаемым в процессах обеспечения безотказности и безопасности ТУ и ЗС ОПО [10, 11] данным были определены две группы. В первую группу включены данные характеристик ТУ и ЗС и данные планирования сроков и учета выполнения МБС. Во вторую группу вошли результаты МБС, в том числе имеющиеся: объемы и методы; механизмы повреждаемости; параметры и другие характеристики отклонений и дефектов; данные оценки ПТС, КПС, и срока (периода) безопасной эксплуатации до следующего МБС. Во вторую группу также включены данные необходимые для обоснования МБС, используя начала риск-ориентированного подхода, а именно полуколичественные методы оценки вероятности безотказной работы и тяжести последствий отказа при эксплуатации ТУ и ЗС в период до следующих МБС [12].

Результаты анализа данных фактически получаемых и используемых в процессах обеспечения безотказности и безопасности ТУ и ЗС показали [11], что в большинстве своем в цифровом виде ведется учет только данных о выполнении МБС. В то время как, данные, по-

лучаемые по результатам МБС, как правило остаются в бумажных отчетах и заключениях и не пригодны для машинной (автоматизированной) обработки. Возможность машинной обработки таких данных не появляется даже если эти отчеты и заключения хранятся в сканированном, но не в структурированном виде. Такая ситуация влечет за собой повышенную трудоемкость работы с этими данными и ошибки так называемого «человеческого фактора» при планировании видов, сроков и объемов МБС.

Применение ЦСБС для сбора, накопления, систематизации, анализа, хранения и актуализации данных по ТУ и ЗС ОПО позволит исключить ошибки и недостатки планирования и обеспечить поэлементный сбор, учёт, обработку и отображение значений ПТС, КПС, и других данных на любой момент текущей и прогнозируемой эксплуатации, что позволит определять и учитывать в планах МБС уровни безотказности и безопасности эксплуатации ТУ и ЗС ОПО.

Для реализации ЦСБС обоснована и предложена следующая последовательность сбора и обработки данных, предшествующая формированию ЦСБС и состоящая из базового и расширенного вариантов.

Базовый вариант работ по сбору и обработке данных предусматривает наличие документов, данных результатов диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. При этом предусматривается анализ наличия и достоверности технической документации по ТУ и ЗС, результатов предыдущих диагностирований и экспертизы промышленной безопасности, анализ собранных данных, их систематизация и структурирование, приведение к цифровому виду, пригодному для использования в процессе автоматизированной обработки и анализа в ЦСБС и создания электронных документов.

В случае отсутствия или недостаточного объема документов и данных ранее выполненных диагностирований и экспертиз предусмотрен расширенный вариант работ по сбору и обработке данных. Он предусматривает (дополнительно к работам по базовому варианту) проведение обследования ТУ и ЗС по индивидуальным программам работ методами контроля и диагностики и анализ имеющихся и полученных по результатам работ значений ПТС, КПС, и ряд других необходимых для ЦСБС данных. При этом предусмотрено восстановление технических паспортов и других обязательных форм технической документации на ТУ и ЗС, их перевод в электронный цифровой вид, анализ наличия, достоверности и соответствия фактическому состоянию данных по ТУ и ЗС ОПО.

В ЦСБС предусмотрен учет также и механизмов изменения ПТС всех элементов ТУ и ЗС, что позволяет планировать не только сроки МБС, но и методы и объемы контролей и ремонтов. Для наглядности, на рис. 2 представлена схема изменения ПТС и КПС во времени и по результатам МБС.

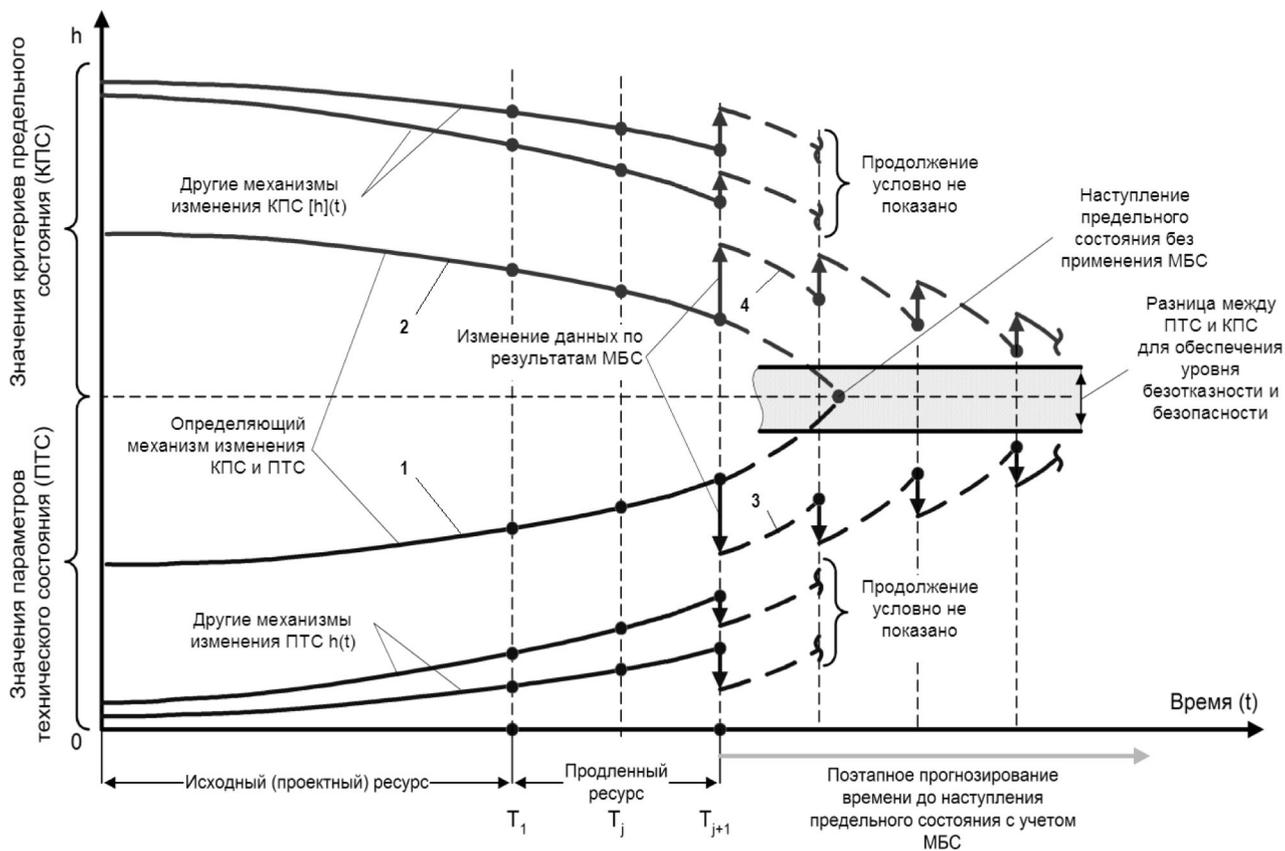


Рис. 2 — Условная схема изменения ПТС и КПС во времени и по результатам МБС: кривые 1 и 2 без учета МБС; кривые 3 и 4 — с учетом МБС

На схеме условно показано прогнозируемое время наступления предельного состояния, когда один из параметров технического состояния достигнет своего предельного значения без учета применения МБС (кривые 1 и 2), а также показано, что применение МБС позволяет значительно продлить эксплуатацию ТУ и ЗС и обеспечить требуемый уровень безотказности и безопасности (кривые 3 и 4). На схеме уровень безотказности и безопасности представлен в виде разницы между значениями ПТС и КПС.

Для решения второй задачи — непосредственно формирование самой ЦСБС, предложена математическая модель–концепция, описываемая выражением (1):

$$\{M_j\} \rightarrow [M_{BC} | f([V_{BO}], C_{1-5})], \quad (1)$$

где  $\{M_j\}$  — МБС;  $f([V_{BO}], C_{1-5})$  — техническое состояние ТУ и ЗС ОПО, отвечающее/удовлетворяющее критерию вероятности безотказности эксплуатации ТУ и ЗС ОПО и его элементов в зависимости от тяжести последствий отказа ( $C_{1-5}$ );  $[M_{BC}]$  — критерий оценки совокупности МБС (по параметрам своевременность, обоснованность и достаточность), при выполнении которых достигается состояние ТУ и ЗС ОПО, отвечающее критерию безотказности  $f([V_{BO}], C_{1-5})$ .

При этом  $f([V_{BO}], C_{1-5}) = 1 - f([V_0], C_{1-5})$ , где предельные значения вероятности отказа  $f([V_0], C_{1-5})$  определяются для каждого из пяти уровней тяжести последствий отказа.

На схеме рис. 3 приведены перечни фактически выполняемых работ в действующей при эксплуатации ТУ и ЗС ОПО системе обеспечения безопасности согласно [1, 6 и др.] и получаемые при этом так называемые данные ЦСБС. Показаны виды МБС, перечни, критерии и результаты оценки входных данных и выходных данных в ЦСБС, а также оценки параметров безотказности и безопасности эксплуатации ТУ и ЗС на прогнозируемый период до следующих МБС.

1) Фактически выполняемые работы и их данные		2) Обработка результатов работ (1) в ЦСБС, обоснование МБС и их сроков			3) Критерии безопасности	
Выполняемые МБС	Получаемые данные	Критерии оценки	Результат оценки	Выходные данные	Показатели уровня ПБ	Критерий уровня ПБ
<b>Обслуживание</b> (осмотр, ревизия, проверка, очистка и др.)	1. Дата текущего ( $D_{i,t}^O$ )	$T_N^O + D_{i,t}^O$	Необходимость и срок обслуживания	1. Графики обслуживания, диагностирования, ремонта, испытания ТУ и ЗС. 2. Перечень элементов ТУ и ЗС, подлежащих обслуживанию, диагностированию, ремонту, испытанию. 3. Графики, аналитические данные и таблицы повреждаемости и дефектности элементов ТУ и ЗС по их типам, конструкционным и техническим параметрам, параметрам технического состояния и механизмам их повреждаемости. 4. Количественные распределения элементов ТУ и ЗС по значениям остающегося срока эксплуатации до следующего диагностирования (обследования) ( $\tau - T_\phi$ ) и результаты их оценки: – $\tau - T_\phi \geq 2,5T_N$ – не требуется диагностирование и ремонт; – $T_N \leq \tau - T_\phi < 2,5T_N$ – необходимо диагностирование; – $\tau - T_\phi < T_N$ – необходим ремонт. 5. Количественные распределения элементов ТУ и ЗС: – по уровням тяжести последствий отказов $C_{1,5}$ ; – по уровням вероятности отказа $V_{1,5}$ ; – по расчётным значениям остаточного ресурса $\tau$ ; – по значениям ( $\tau - T_\phi$ ). 6. Планы, объёмы, сроки и перечни обслуживания, диагностирования ТУ и ЗС и их элементов с учётом фактического технического состояния. 7. Объёмы, перечни, виды и параметры ремонтов и испытаний ТУ и ЗС и их элементов. 8. Выходные документы, настраиваемые пользователями и формируемые по любому набору данных, содержащихся в ЦСБС.	Показатели уровня ПБ $V_{a1} - V_{a5}, C_1 - C_5$ – уровни вероятности и тяжести последствий отказов, см. таблицы 1 – 3	Критерий уровня ПБ Предельное значение вероятности [J] отказа, см. таблицу 3, выражение (5)
	2. Дата последнего ( $D_{i,t-1}^O$ )	$ПТС^O \rightarrow КПС^O$	Необходимость и срок диагностирования			
	3. Нормативный период между обслуживаниями ( $T_N^O$ )	$\Sigma  ПТС^O_i - ПТС^O_{i-1}  \cdot Z > [X]$				
<b>Диагностирование</b> (обследование)	1. Дата текущего ( $D_{i,t}^D$ , $D_{i,t-1}^D$ )	$V_{a1} \dots V_{a5}$ см. таблицу 3	Уровень промышленной безопасности (УПБ)	– по уровням тяжести последствий отказов $C_{1,5}$ ; – по уровням вероятности отказа $V_{1,5}$ ; – по расчётным значениям остаточного ресурса $\tau$ ; – по значениям ( $\tau - T_\phi$ ). 6. Планы, объёмы, сроки и перечни обслуживания, диагностирования ТУ и ЗС и их элементов с учётом фактического технического состояния. 7. Объёмы, перечни, виды и параметры ремонтов и испытаний ТУ и ЗС и их элементов. 8. Выходные документы, настраиваемые пользователями и формируемые по любому набору данных, содержащихся в ЦСБС.	Показатели уровня ПБ $V_{a1} - V_{a5}, C_1 - C_5$ – уровни вероятности и тяжести последствий отказов, см. таблицы 1 – 3	Критерий уровня ПБ Предельное значение вероятности [J] отказа, см. таблицу 3, выражение (5)
	2. Дата последнего ( $D_{i,t-1}^D$ , $D_{i,t-2}^D$ )	$T_N^D + D_{i,t}^D$	Необходимость и срок диагностирования			
	3. Нормативный период между диагностированиями ( $T_N^D$ )	$T_N \leq \tau - T_\phi < 2,5T_N$ $ПТС = f(t)$ $V \rightarrow [V]$ $ПТС \rightarrow КПС$	Необходимость и срок диагностирования			
	4. Период эксплуатации после предыдущего диагностирования ( $T_\phi$ )	$\tau - T_\phi < T_N$ $ПТС \approx КПС$ $V \approx [V]$	Необходимость и срок ремонта (замены)			
<b>Ремонт</b> (замена)	5. ПТС <sup>А</sup> и ПТС <sup>Б</sup>			Показатели уровня ПБ $V_{a1} - V_{a5}, C_1 - C_5$ – уровни вероятности и тяжести последствий отказов, см. таблицы 1 – 3	Критерий уровня ПБ Предельное значение вероятности [J] отказа, см. таблицу 3, выражение (5)	
	6. КПС <sup>А</sup> и КПС <sup>Б</sup>					
	7. Расчётное значение остаточного ресурса ( $\tau$ )					
<b>Испытание</b>	8. Механизмы и закономерности повреждаемости			Показатели уровня ПБ $V_{a1} - V_{a5}, C_1 - C_5$ – уровни вероятности и тяжести последствий отказов, см. таблицы 1 – 3	Критерий уровня ПБ Предельное значение вероятности [J] отказа, см. таблицу 3, выражение (5)	
	1. Дата текущего ( $D_{i,t}^I$ )	$T_N^I + D_{i,t}^I$	Необходимость и срок испытания			
	2. Дата последнего ( $D_{i,t-1}^I$ )	Результаты испытания отрицательные	Необходимость и срок ремонта (замены); диагностирования			
	3. Нормативный период между испытаниями ( $T_N^I$ )	$ПТС^I \rightarrow КПС^I$	Необходимость и срок диагностирования			
	4. ПТС <sup>И</sup>		Необходимость и срок ремонта (замены)	Показатели уровня ПБ $V_{a1} - V_{a5}, C_1 - C_5$ – уровни вероятности и тяжести последствий отказов, см. таблицы 1 – 3	Критерий уровня ПБ Предельное значение вероятности [J] отказа, см. таблицу 3, выражение (5)	
	5. КПС <sup>И</sup>					
	6. Параметры <sup>И</sup>					

Рис. 3 — Схема последовательности обработки данных МБС в ЦСБС, а также перечни, критерии и результаты обработки и оценки этих данных:  $V$  — уровень вероятности отказа; — вероятность отказа; ПБ — промышленная безопасность

В общем виде распределения, выборки, перечни и другие формируемые в ЦСБС выходные данные можно представить следующими группами:

1. Графики обслуживания, диагностирования, ремонта, испытания и других работ МБС ТУ и ЗС ОПО.
2. Перечни ТУ и ЗС и их элементов, подлежащие обслуживанию, диагностированию, ремонту, испытанию в установленные графиками сроки.
3. Графики, аналитические данные и таблицы повреждаемости и дефектности ТУ и ЗС и их элементов по их типам, конструкционным и техническим параметрам, параметрам технического состояния и механизмам их повреждаемости.

Количественные распределения ТУ и ЗС и их элементов по значениям остающегося срока эксплуатации до следующего диагностирования (обследования) или ремонта — так на-

зываемый период ( $\tau - T_\phi$ ), и результаты их оценки (где  $T_N$  — нормативный период между диагностированиями (обследованиями),  $T_\phi$  — период эксплуатации с момента предыдущего диагностирования (обследования)):

—  $(\tau - T_\phi) \geq 2,5T_N$  — массив данных по элементам, для которых не требуется диагностирование и ремонт;

—  $T_N \leq (\tau - T_\phi) < 2,5T_N$  — массив данных по элементам, для которых необходимо диагностирование;

—  $(\tau - T_\phi) < T_N$  — массив данных по элементам, для которых необходим ремонт.

5. Количественные распределения ТУ и ЗС и их элементов:

— по уровням тяжести последствий отказов  $C_1 \dots C_5$ ;

— по уровням вероятности отказа  $V_1 \dots V_5$ ;

— по расчетным значениям остаточного ресурса  $\tau$ ;

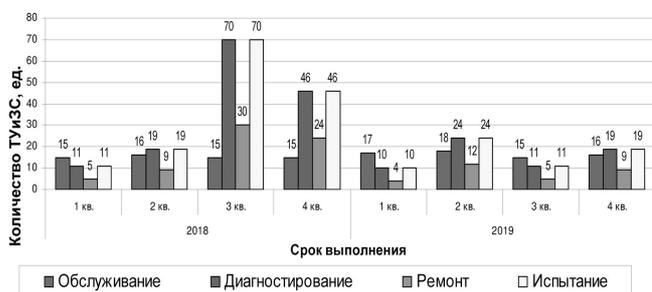
— по значениям  $(\tau - T_\phi)$ .

6. Планы, объемы, сроки и перечни обслуживания, диагностирования ТУ и ЗС ОПО и их элементов с учетом фактического технического состояния по критериям значения  $(\tau - T_\phi)$ .

7. Перечни и объемы ремонтов, виды и параметры испытаний и других работ МБС ТУ и ЗС ОПО.

8. Выходные документы, настраиваемые пользователями и формируемые по любому набору данных, содержащихся в ЦСБС, в т. ч. необходимые для долгосрочного планирования и финансирования работ и формирования конкурсных документов.

На рис. 4 представлен пример выходных данных, автоматически формируемых в ЦСБС — так называемых электронных документов: поквартального двухгодичного графика обслуживания, диагностирования, ремонта и испытания ТУ и ЗС ОПО, а также пример одного из прилагаемых к графику перечней элементов, подлежащих диагностированию (обследованию).



а)

№ п/п	Наименование ТУ и ЗС / элемента ТУ и ЗС	Размеры				Срок диагностирования	Виды / механизмы повреждения
		Дн, мм	S, мм	Отбр. толщ., мм	Протяжен., м		
ЦДГНИК. Технополиэтилене трубопроводы							
1	4'Р30.8.4-646.1	-	-	-	10	1 кв. 2018	-
	Трубы №№1-3, 5	108	6	2	2	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
	Отвод №4	108	9	2	-	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
	Переход №6	108x89	6	2	-	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
	Трубы №№7-10	89	5	1,5	8	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
2	Тройник №11	89	7	1,5	-	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
	300.Ос.30.01.00.1	-	-	-	15	1 кв. 2018	-
	Трубы №№1-5	325	12	3	5	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
	От вод №6	325	14	3	-	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
	Переход №7	325x219	12	3	-	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН
Трубы №№8-12	219	10	2	9	1 кв. 2018	ЯКИ; СКРН	

б)

Рис. 4 — Примеры выходных электронных документов: а) пример графика обслуживания, диагностирования, ремонта и испытания; б) пример перечня ТУ и ЗС и их элементов, подлежащих диагностированию (обследованию) в I квартале 2019 г.

Для решения третьей задачи обоснованы критерии распределения сил и средств между неопасными и фактически опасными элементами ТУ и ЗС, позволяющие обосновать сроки и объемы работ МБС, оценивать и подтверждать уровень безотказности и безопасности эксплуатации ТУ и ЗС и их элементов на прогнозируемый период [12, 13 и др.].

Как показано на схеме (рис. 5), в условиях, когда фактическая наработка ТУ и ЗС превышает проектный ресурс в несколько раз, количество МБС и данных нарастает, ужесточаются требования НПА и нормы безопасности [7, 14 и др.], задача оценки и подтверждения уровня безотказности и безопасности эксплуатации становится все более актуальной.

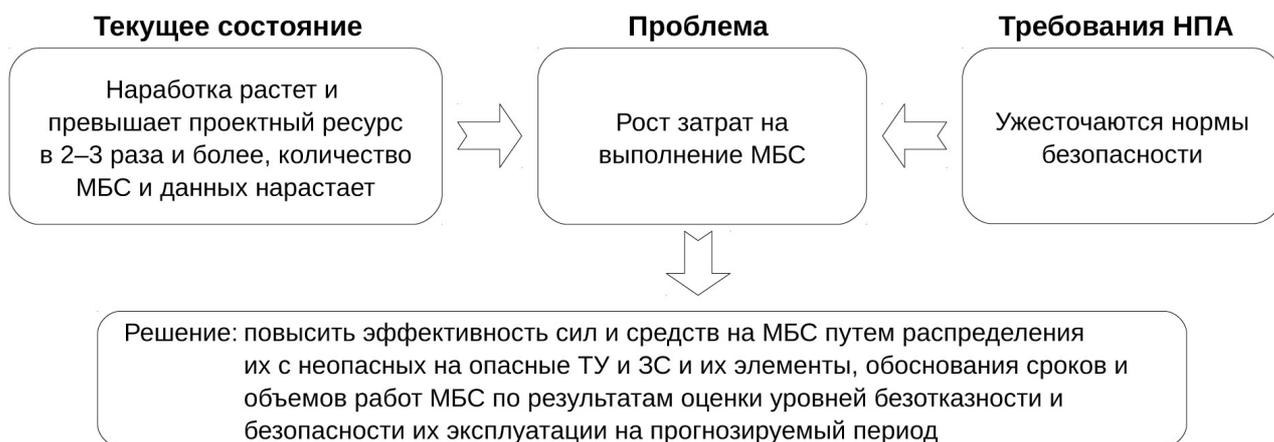


Рис. 5 — Актуальность задачи оценки и подтверждения уровня безотказности и безопасности эксплуатации

В ЦСБС риск-ориентированный подход осуществляется полуколичественным методом, предусматривающим использование не значений параметров, а их условных уровней: пяти-уровневая классификация тяжести последствий ( $C_1...C_5$ ) и вероятности отказа ( $Va_1...Va_5$ ), четырехуровневая классификация качества диагностирования ( $KI_1...KI_4$ ) [12].

Уровень вероятности отказа определяется уровнем качества диагностирования и расчетным значением величины остаточного ресурса — выражение (2), а предельное значение вероятности отказа определяется уровнем тяжести его (отказа) последствий — выражение (3).

$$Va_{1-5} = f(\tau/T_N, KI_{1-4}); \quad (2)$$

$$[V] = f([V_o], C_{1-5}). \quad (3)$$

В приведенных ниже табл. 1÷3 представлены обоснованные в работе [12] критерии оценки уровней качества диагностирования (табл. 1), уровней тяжести последствий отказа (табл. 2) и уровней вероятности отказа (табл. 3).

Таблица 1 — Критерии оценки уровней качества диагностирования  $KI_1...KI_4$  элементов ТУ и ЗС ОПО

Уровни качества диагностирования	Критерии оценки
$KI_1$	Диагностирование методами контроля состояния поверхностей элементов, согласно требованиям НТД
$KI_2$	Диагностирование методами контроля состояния поверхностей элементов, основного металла и сварных швов согласно требованиям НТД
$KI_3$	Диагностирование двумя независимыми операторами по расширенной программе, с применением 2-х и более дополнительных методов НК, увеличенным не менее чем на 20 % объемом контроля по сравнению с минимально требуемыми по НТД. Применяется при уровнях вероятности отказа $V_{a4}$ и $V_{a5}$ и тяжести последствий отказа $C_3...C_5$
$KI_4$	Диагностирование двумя независимыми операторами по расширенной программе, с применением 2-х и более дополнительных методов НК, увеличенным до 90–100 % объемом контроля элементов ТУ и ЗС ОПО. Либо очередное диагностирование с третьим уровнем качества при условии, что предыдущее диагностирование оценено уровнем качества не ниже третьего Применяется при уровнях вероятности отказа $V_{a4}$ и $V_{a5}$ и тяжести последствий отказа $C_3...C_5$

Таблица 2 — Критерии оценки уровней тяжести последствий отказа  $C_1...C_5$  элементов ТУ и ЗС ОПО и предельные значения  $f([V_0], C_{1-5})$

Уровень тяжести последствий отказа	Критерии уровней тяжести последствия отказа элементов ТУ и ЗС ОПО	Предельные значения вероятности отказа $[V(C)]$ элементов ТУ и ЗС ОПО [11]
$C_1$	Отказ практически не повлияет на производство продукции и загрязнение окружающей среды	$2 \times 10^{-1}$
$C_2$	Отказ возможно приведет к останову производства продукции (снижению производительности) и загрязнению окружающей среды	$10^{-1}$
$C_3$	Отказ приведет к останову производства продукции и загрязнению окружающей среды	$10^{-2}$
$C_4$	Отказ приведет к критическим последствиям, т. е. возможна гибель людей	$10^{-4}$
$C_5$	Отказ приведет к катастрофическим последствиям, т. е. к гибели людей	$10^{-6}$

Таблица 3 — Определение уровней вероятности отказа  $Va_1...Va_5$  элементов ТУ и ЗС ОПО по величине расчетного значения остаточного ресурса  $\tau$

Уровни качества диагностирования	Критерии оценки расчетного значения $\tau$				
	$\tau < T_N$	$2T_N > \tau \geq T_N$	$3T_N > \tau \geq 2T_N$	$4T_N > \tau \geq 3T_N$	$\tau \geq 4T_N$
$KI_1$	$Va_5$	$Va_5$	$Va_5$	$Va_5$	$Va_4$
$KI_2$	$Va_5$	$Va_5$	$Va_5$	$Va_4$	$Va_3$
$KI_3$	$Va_5$	$Va_5$	$Va_4$	$Va_3$	$Va_2$
$KI_4$	$Va_5$	$Va_4$	$Va_3$	$Va_2$	$Va_1$

где  $T_N$  — нормативный период между диагностированиями

Для подтверждения соответствия требованиям НПА [14] обоснована следующая последовательность и условие нормирования предельных значений вероятности возникновения отказов ТУ и ЗС, приводящих к возможной аварии, выражение (4):

$$V_{HO} \leq V_{HD} \leq V_{PC} \leq V_O \leq [V_O], \quad (4)$$

где  $V_{HO}$  — вероятность возникновения отклонения ПТС (дефекта), не выявляемого (пропущенного) при диагностировании;  $V_{HD}$  — вероятность возникновения недопустимого (критического) дефекта;  $V_{PC}$  — вероятность возникновения предельного состояния;  $V_O$  — вероятность отказа;  $[V_O]$  — нормируемое значение вероятности отказа.

Из условия нормирования вероятностей (4) следует, что вероятность пропуска дефекта не должна превышать предельное значение вероятности отказа оборудования с учетом тяжести его (отказа) последствий. Нормируемое значение вероятности безотказной работы ТУ и ЗС (иначе — безотказность) определяется выражением (5):

$$[V_{BO}] = 1 - [V_O]. \quad (5)$$

Решение задачи оптимизации МБС осуществляется путем классификации ТУ и ЗС и его элементов по уровням вероятности отказа и концентрации средств и усилий на фактически опасных элементах (с уровнями тяжести последствий отказа  $C_3...C_5$  и вероятности отказа  $Va_3...Va_5$ ), а также применения профилактических мер, наилучшим образом снижающих вероятность отказа поврежденных элементов, что наглядно показано на схеме рис. 6.

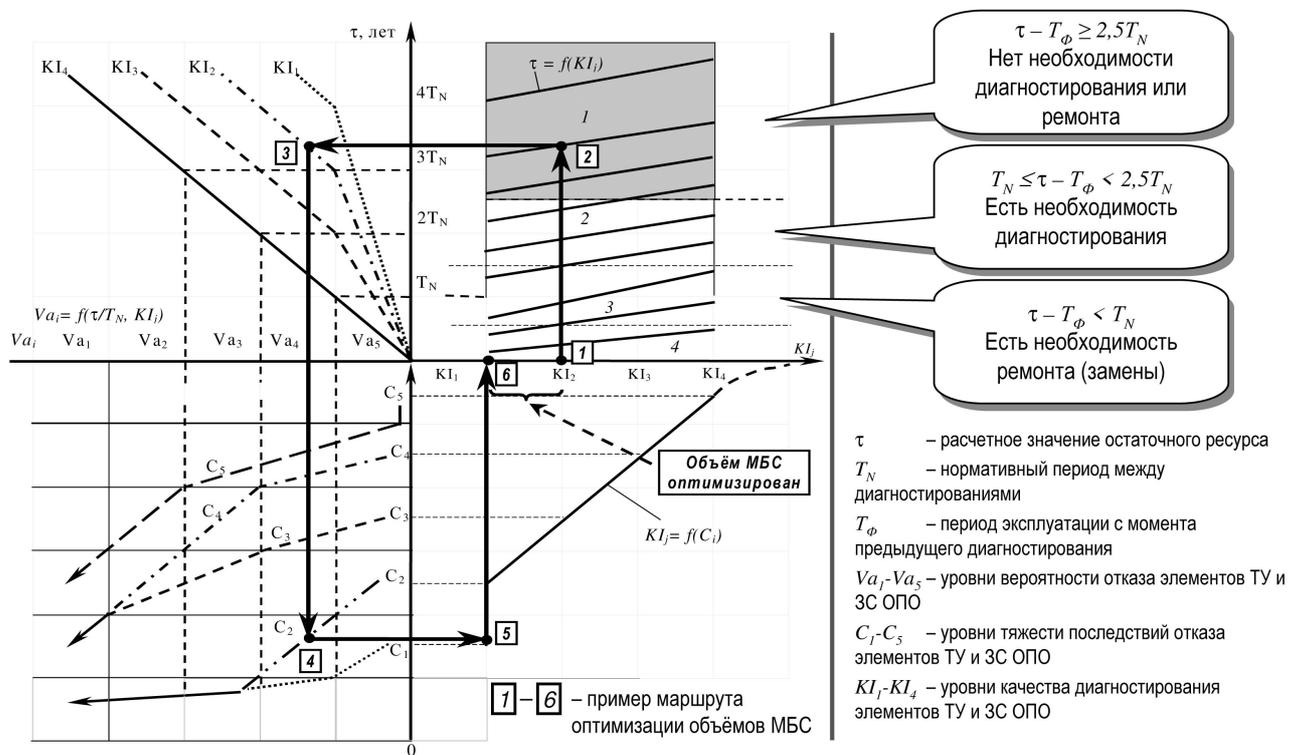


Рис. 6 — Пример схемы оптимизации МБС, где маршрутом **1-6** показано повышение эффективности расходования средств и сил, направляемых на поддержание безотказности и безопасности эксплуатации ТУ и ЗС на прогнозируемый период

Как показано на схеме рис. 6, в связи с тем, что далеко не всем элементам при следующих МБС требуется диагностирование или ремонт и/или не всегда требуется высокий уровень качества диагностирования (первое диагностирование проведено с уровнем качества 2, последующие — с уровнем качества 1), за счёт применения показанной схемы осуществляется повышение эффективности расходования средств и сил, направляемых на поддержание безотказности и безопасности эксплуатации ТУ и ЗС и снизить тем самым вероятность отказа этих элементов, а следовательно ТУ, ЗС и ОПО в целом, на 1–2 порядка.

Основные результаты представленного в статье цифрового развития действующей при эксплуатации ОПО системы обеспечения безотказности и безопасности ТУ и ЗС и применения ЦСБС коротко заключаются в следующем:

1. Обоснована актуальность цифрового развития действующей системы обеспечения безотказного и безопасного состояния технических ТУ и ЗС ОПО и обоснована возможность использования в ЦСБС данных результатов фактически выполняемых МБС: осмотров, ревизий, ремонтов, диагностирований, испытаний и т.п.

2. Разработаны, обоснованы и приведены методические подходы для сбора и обработки данных и формирования ЦСБС, позволяющей:

— осуществлять обоснование объемов и сроков, планировать и контролировать исполнение МБС;

— концентрировать, то есть перераспределять средства и усилия с неопасных на фактически опасные элементы, а также применять профилактические меры, наилучшим образом снижающие вероятность отказа поврежденных и опасных (по уровню вероятности и тяжести последствий отказа) элементов путем оценки результатов МБС по критериям ЦСБС;

— обеспечить оперативный доступ к документации и информации о техническом состоянии, результатах МБС специалистам, ответственным за безопасную эксплуатацию, специалистам службы технического надзора, руководителям производственных подразделений, филиалов, руководству организации;

— обеспечить возможность продолжения эксплуатации ТУ и ЗС ОПО по фактическому техническому состоянию путем своевременного применения обоснованных МБС; поддерживать и подтверждать требуемый уровень безотказности и безопасности эксплуатации ТУ и ЗС на прогнозируемый период.

3. Положительный эффект применения ЦСБС достигается за счет управления обоснованием, планированием, выполнением и контролем МБС на прогнозируемый период эксплуатации и выражается:

— в повышении качества планирования МБС по параметрам своевременность, обоснованность, достаточность;

— в обеспечении требуемого уровня безотказности и безопасности при эксплуатации ТУ и ЗС на ОПО на прогнозируемый период;

— в сокращении трудоемкости обоснования и составления планов, прогнозов, перечней, объемов работ и других необходимых для обеспечения безопасности эксплуатации ТУ и ЗС ОПО документов; поиска необходимых документов, данных о ТУ и ЗС и их техническом состоянии;

— в обеспечении требуемой надежности хранения данных и документации.

Эффективность инвестиций при внедрении ЦСБС, достигается за счет снижения потерь от внеплановых простоев ТУ и ЗС ОПО, расчетный срок окупаемости составляет не более двух лет.

#### *Список литературы*

1. Правила проведения экспертизы промышленной безопасности: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности № 538 от 14.11.2013.

2. Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности № 116 от 25.03.2014.

3. Минпромторг оценил готовность российских предприятий к цифровизации.

/ Баленко Е.

[Электронный

ресурс]

URL: [https://www.rbc.ru/technology\\_and\\_media/03/07/2018/5b3a26a89a794785abc9f304](https://www.rbc.ru/technology_and_media/03/07/2018/5b3a26a89a794785abc9f304)

(дата обращения: 10.07.2018)

4. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 г. (утверждена указом Президента Российской Федерации № 537 от 12.05.2009)
5. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федер. закон № 116-ФЗ от 21.07.1997.
6. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности № 101 от 12.03.2013.
7. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности № 96 от 11.03.2013.
8. Методы диагностирования технологического оборудования: сборник результатов выполненных в АО «Техдиагностика» исследований и разработок. В 2 т. / под общ. ред. докт. техн. наук А. В. Митрофанова. — Оренбург: Южный Урал, 2017.
9. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации № 1632-р от 28.07.2017)
10. Митрофанов А. В., Егоров С. В. Методы повышения надежности и безопасности при эксплуатации технологического оборудования на объектах добычи сероводородсодержащего газа // Материалы XI международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». — 15–18 ноября 2016 г., (г. Оренбург, Самородово). — С. 194–200.
11. Митрофанов А. В., Вдовин А. А., Егоров С. В. Информационная система планирования, учета и контроля мер поддержания безопасного состояния оборудования технологических объектов добычи и переработки нефти и газа // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2017. — № 12. — С. 27–32.
12. Митрофанов А. В. Методы управления состоянием технологического оборудования по критериям вероятности и риска отказа. — М.: Недра, 2007. — 380 с.
13. Барышов С. Н. Оценка поврежденности, несущей способности и продление ресурса технологического оборудования. Модели. Критерии. Методы. — М.: Недра, 2007. — 287 с.
14. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» (утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.04.2016 г. № 144).