

А.И. Почекина*, Е.С. Юшков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское ш., 31

*e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru

ЦИФРОВОЙ КОНТУР УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ОСНОВЕ KPI, САРА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ПРЕДПРИЯТИИ АТОМНОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация: В статье представлен методический подход к формированию цифрового контура управления качеством на предприятии атомного профиля на основе стандартизации KPI, управления корректирующими и предупреждающими действиями (САРА) и применения аналитических инструментов искусственного интеллекта. Исследование основано на данных за 2020-2024 гг., включающих показатели охраны труда и производственной безопасности, LTIFR, дозовый контроль персонала группы А, экологические показатели, а также сценарную экономическую оценку внедрения цифрового контура качества. Показано, что показатели безопасности, радиационного и экологического контроля могут рассматриваться как практические метрики устойчивости системы управления качеством. За анализируемый период число несчастных случаев снизилось с 1-2 случаев в 2020-2021 гг. до нулевых значений в 2022-2024 гг., а показатель LTIFR уменьшился с 0,28 до 0,00. Радиационные показатели находились ниже контрольного уровня 10 мЗв/год, однако максимальные дозы до 5,2 мЗв подтверждают необходимость управления локальными эпизодами, а не только средними значениями. Экологические KPI демонстрируют межгодовую волатильность, что обосновывает необходимость порогового контроля и анализа причин отклонений.

Предложена логика цифрового контура «KPI – пороги – отклонение – САРА – проверка эффективности – аудит», в которой ИИ используется как надстройка для выявления аномалий, приоритизации разборов и классификации причин. Экономическая оценка показывает, что при CAPEX 30 млн тг и OPEX 6 млн тг/год расчётный срок окупаемости составляет около 1,67 года, а в консервативном варианте – около 2,5 года. Полученные результаты подтверждают целесообразность поэтапного внедрения цифрового контура качества: от стандартизации данных и САРА к аналитике и предиктивным моделям.

Ключевые слова: управление качеством; Quality 4.0; KPI; САРА; искусственный интеллект; цифровой контур; атомная отрасль; LTIFR; экономическая эффективность.

Введение

Цифровая трансформация производственных систем является одним из ключевых направлений развития современной промышленности. Для предприятий высокорегулируемых и риск-ориентированных отраслей цифровизация имеет не только технологическое, но и управленческое значение, поскольку позволяет повысить прослеживаемость процессов, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить более оперативное выявление отклонений. Особую значимость это приобретает в атомной отрасли, где качество продукции и процессов напрямую связано с требованиями безопасности, экологической устойчивости, радиационного контроля и доказуемости управленческих решений.

Современные исследования в области Quality 4.0 показывают, что развитие системы управления качеством должно рассматриваться не как внедрение отдельных цифровых инструментов, а как комплексная трансформация процессов менеджмента качества на основе данных, стандартизации, аналитики и постоянного улучшения [1-3]. В условиях усложнения производственных процессов традиционный документарный и периодический контроль становится недостаточным, так как он преимущественно фиксирует уже произошедшие отклонения. Поэтому актуальным становится переход от реактивного управления качеством к профилактической и предиктивной модели, основанной на анализе данных и прогнозировании рисков [4, 5].

Для предприятий атомного профиля качество следует рассматривать шире, чем только соответствие продукции техническим условиям. Оно проявляется через устойчивость производственных процессов, состояние охраны труда, радиационной безопасности, экологических показателей, промышленной и пожарной безопасности. В связи с этим показатели травматизма, LTIFR, дозовые нагрузки персонала, выбросы, сбросы, отходы и аварийность могут выступать как практические метрики результативности системы управления качеством. Эти данные являются измеримыми, сопоставимыми во времени и пригодными для построения цифрового контура, включающего сбор данных, пороговый контроль, анализ причин отклонений и оценку эффективности корректирующих действий.

Дополнительные возможности для развития системы качества связаны с применением искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти инструменты позволяют выявлять скрытые закономерности, обнаруживать аномалии, классифицировать несоответствия, приоритизировать зоны риска и повышать качество подготовки к аудитам [6]. Однако для предприятий повышенной ответственности ИИ не может рассматриваться как автономная система принятия решений. Его роль должна заключаться в аналитической поддержке специалистов при сохранении принципа human-in-the-loop, когда человек остаётся в контуре принятия управленческих решений [7]. При этом результативное применение ИИ возможно только при наличии качественной базы данных, единых правил расчёта KPI и устойчивой системы CAPA, обеспечивающей связь «отклонение – причина – корректирующее действие – проверка результата» [8-10].

Для предприятий атомного профиля необходимость интеграции KPI, CAPA и инструментов искусственного интеллекта обусловлена спецификой самой отрасли. Управление качеством здесь связано не только с соответствием продукции техническим требованиям, но и с обеспечением промышленной, радиационной, экологической и производственной безопасности. Поэтому отдельное использование KPI без связи с корректирующими и предупреждающими действиями не позволяет в полной мере управлять причинами отклонений, а применение ИИ без стандартизированной базы данных и устойчивой процедуры CAPA может привести к формированию аналитических выводов, не связанных с реальными управленческими решениями.

Актуальность исследования определяется тем, что на предприятиях атомного профиля даже при наличии устойчивой отчётности по охране труда, радиационному контролю и экологическим показателям сохраняется необходимость более глубокого анализа причин отклонений и оценки результативности корректирующих действий. Годовые показатели позволяют фиксировать итоговое состояние процессов, однако не всегда раскрывают причины изменений, повторяемость несоответствий и эффективность управленческих мер. Поэтому требуется цифровой контур, в котором данные используются не только для отчётности, но и для своевременного выявления отклонений, запуска CAPA, контроля сроков мероприятий и проверки их эффективности.

Научная новизна исследования заключается в обосновании методического подхода к формированию цифрового контура управления качеством предприятия атомного профиля на основе интеграции KPI, CAPA и инструментов искусственного интеллекта. В отличие от подходов, ориентированных преимущественно на автоматизацию отчётности, в данной работе цифровой контур рассматривается как управленческая система, связывающая показатели безопасности, радиационного и экологического контроля с выявлением отклонений, анализом причин, корректирующими действиями, проверкой их эффективности и подготовкой к аудиту.

Целью исследования является разработка и обоснование методического подхода к формированию цифрового контура управления качеством на предприятии атомного профиля на основе интеграции KPI, CAPA и инструментов искусственного интеллекта.

Методика исследования

Эмпирической базой исследования послужили данные внутренней отчётности АО «Ульбинский металлургический завод» за 2020-2024 гг., включающие показатели охраны труда, промышленной и пожарной безопасности, радиационного контроля, экологической результативности, а также экономические параметры внедрения цифрового контура качества.

Выбор указанных групп показателей обусловлен тем, что на предприятиях атомного профиля качество не ограничивается только соответствием продукции техническим

требованиям. Оно также проявляется через устойчивость производственных процессов, управляемость рисков, безопасность персонала, экологическую результативность и прослеживаемость управленческих решений. В связи с этим показатели охраны труда, радиационного и экологического контроля рассматривались как практические метрики результативности системы управления качеством.

В рамках исследования анализировались следующие группы данных: показатели охраны труда и производственной безопасности, включая количество несчастных случаев, LTIFR, объём отработанных человеко-часов и затраты на охрану труда; показатели радиационной безопасности, включая контрольный уровень, среднюю и максимальную годовую эффективную дозу персонала группы «А»; экологические показатели, включающие выбросы, сбросы и объём образования отходов; показатели промышленной и пожарной безопасности; а также экономические параметры внедрения цифрового контура, включая капитальные затраты, эксплуатационные расходы, операционный эффект, предотвращённые потери и срок окупаемости.

Для повышения наглядности общая логика исследования представлена в виде блок-схемы, отражающей последовательность перехода от исходных данных предприятия к формированию цифрового контура управления качеством (рис. 1). Методика исследования включает систематизацию показателей, определение их управленческого значения, динамический анализ, выявление отклонений, запуск САРА, применение аналитических инструментов искусственного интеллекта и оценку экономической эффективности внедрения цифрового контура.



Рисунок 1 – Блок-схема методики исследования

Представленная блок-схема отражает общую последовательность исследования: от систематизации исходных данных предприятия до формирования модели цифрового управления качеством на основе KPI, САРА и аналитики/ИИ. В рамках данной логики показатели рассматривались не только как элементы отчётности, но и как управленческие индикаторы, позволяющие выявлять отклонения, определять их причины, запускать корректирующие и предупреждающие действия и оценивать их результативность.

Под САРА в работе понимается система корректирующих и предупреждающих действий, включающая регистрацию отклонений, анализ причин, назначение мероприятий, контроль сроков и проверку эффективности принятых решений. Искусственный интеллект рассматривался как аналитическая надстройка над цифровым контуром качества,

предназначенная для выявления аномалий, повторяющихся причин, зон риска и поддержки подготовки материалов к аудиту, без замены ответственного управленческого решения специалиста.

Сценарная экономическая оценка внедрения цифрового контура выполнялась с учётом капитальных затрат, ежегодных эксплуатационных расходов, операционного эффекта, предотвращённых потерь и срока окупаемости проекта. Ниже приведены методические положения, раскрывающие порядок расчёта ключевых показателей и экономической эффективности внедрения цифрового контура качества.

В рамках исследования ключевые показатели результативности рассматривались как количественные индикаторы, отражающие состояние процессов охраны труда, радиационного контроля, экологической результативности и экономической эффективности цифрового контура качества. Для каждого KPI определялись источник данных, единица измерения, периодичность расчёта, управленческий смысл и пороговое значение.

В общем виде оценка выполнения KPI рассчитывалась с учётом направленности показателя. Для показателей, увеличение которых характеризует положительный результат, использовалась формула:

$$KPI = \frac{\text{Фактическое значение}}{\text{Плановое значение}} \times 100\% \quad (1)$$

Для показателей, снижение которых является положительным результатом, использовалась обратная логика расчёта:

$$KPI = \frac{\text{Плановое значение}}{\text{Фактическое значение}} \times 100\% \quad (2)$$

При этом для показателей безопасности, радиационного контроля и экологии основное значение имеет не только достижение планового значения, но и соблюдение установленных пороговых уровней. В случае достижения или превышения порогового значения показатель рассматривался как отклонение, требующее анализа причин и запуска корректирующих или предупреждающих действий.

Показатель LTIFR использовался для оценки частоты несчастных случаев с потерей трудоспособности на 1 млн отработанных человеко-часов. Расчёт выполнялся по формуле:

$$LTIFR = \frac{N}{H} \times 1\,000\,000, \quad (3)$$

где N – количество несчастных случаев с потерей трудоспособности за анализируемый период;

H – общее количество отработанных человеко-часов за тот же период.

САРА в работе рассматривалась не как единичный числовой показатель, а как управленческий процесс корректирующих и предупреждающих действий. Для оценки результативности САРА использовались показатели своевременности закрытия, доли просроченных мероприятий и эффективности выполненных действий:

$$\text{Доля САРА, закрытых в срок} = \frac{\text{Количество САРА, закрытых в срок}}{\text{Общее количество САРА}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{Доля просроченных САРА} = \frac{\text{Количество просроченных САРА}}{\text{Общее количество САРА}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{Эффективность САРА} = \frac{\text{Количество результативных САРА}}{\text{Количество САРА, прошедших проверку эффективности}} \times 100\% \quad (6)$$

Такой подход позволяет оценивать САРА не только как факт выполнения корректирующих мероприятий, но и как инструмент управления причинами отклонений, сроками исполнения, ответственностью исполнителей и результативностью принятых решений.

В рамках экономической оценки использовались показатели CAPEX и OPEX. Под CAPEX понимаются капитальные затраты на внедрение цифрового контура качества, включая разработку или приобретение программного решения, настройку модулей KPI и SAP, интеграцию с действующими информационными системами, первоначальную настройку аналитических инструментов и обучение пользователей. Под OPEX понимаются ежегодные эксплуатационные расходы, связанные с техническим сопровождением системы, обновлением программного обеспечения, администрированием данных, поддержкой пользователей и дальнейшим развитием аналитических модулей.

Экономическая эффективность внедрения цифрового контура качества с использованием аналитики/ИИ оценивалась сценарным методом. В расчётах учитывались операционный эффект, риск-эффект, валовый годовой эффект, чистый годовой эффект и срок окупаемости проекта. Операционный эффект формируется за счёт сокращения трудозатрат на сбор, обработку, проверку и подготовку отчётности. Риск-эффект связан со снижением потенциальных потерь за счёт более раннего выявления отклонений, повышения дисциплины SAP и уменьшения повторяемости причин несоответствий.

Валовый годовой эффект определялся по формуле:

$$E_{\text{вал}} = E_{\text{опер}} + E_{\text{риск}}, \quad (7)$$

где $E_{\text{вал}}$ – валовый годовой эффект;

$E_{\text{опер}}$ – операционный эффект;

$E_{\text{риск}}$ – эффект от предотвращения потенциальных потерь.

Чистый годовой эффект рассчитывался с учётом ежегодных эксплуатационных расходов:

$$E_{\text{чист}} = E_{\text{вал}} - \text{OPEX}, \quad (8)$$

где $E_{\text{чист}}$ – чистый годовой эффект;

OPEX – ежегодные эксплуатационные расходы.

Срок окупаемости проекта определялся по формуле:

$$T = \frac{\text{CAPEX}}{E_{\text{чист}}}, \quad (9)$$

где T – срок окупаемости, лет;

CAPEX – капитальные затраты на внедрение цифрового контура;

$E_{\text{чист}}$ – чистый годовой экономический эффект.

Дополнительно рассматривался консервативный сценарий, в котором учитывался только операционный эффект без риск-эффекта:

$$T_{\text{конс}} = \frac{\text{CAPEX}}{(E_{\text{опер}} - \text{OPEX})} \quad (10)$$

Применение двух сценариев позволяет оценить экономическую целесообразность внедрения цифрового контура как при базовом варианте, учитывающем операционный эффект и предотвращённые потери, так и при более осторожном варианте расчёта, основанном только на снижении трудозатрат.

Результаты и обсуждение

Анализ данных внутренней отчётности АО «Ульбинский металлургический завод» за 2020-2024 гг. показывает, что показатели охраны труда, радиационного контроля, экологической результативности, промышленной и пожарной безопасности могут быть использованы не только как элементы обязательной отчётности, но и как практические метрики устойчивости системы управления качеством. Их динамика позволяет оценить, насколько предприятие способно поддерживать управляемость процессов, своевременно выявлять отклонения и формировать основу для цифрового контура качества.

Первый аналитический блок связан с динамикой охраны труда и производственной безопасности. На рисунке 2 представлена динамика количества несчастных случаев и показателя LTIFR за 2020-2024 гг.

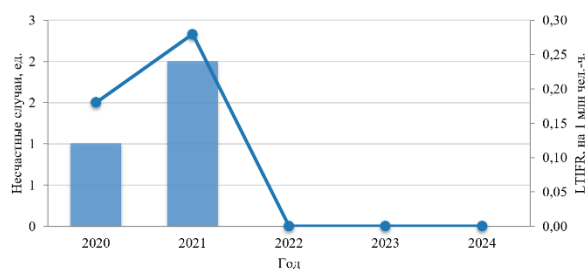


Рисунок 2 – Динамика несчастных случаев и LTIFR за 2020-2024 гг.

Данные показывают, что в 2020 г. был зарегистрирован 1 несчастный случай, в 2021 г. – 2 случая, после чего в 2022-2024 гг. значение показателя снизилось до 0. Аналогичная динамика наблюдается по LTIFR: в 2020 г. показатель составил 0,18, в 2021 г. увеличился до 0,28, а в 2022-2024 гг. сохранялся на уровне 0,00.

С управленческой точки зрения данная динамика свидетельствует о переходе от периода остаточной событийности к периоду нулевого травматизма. Однако нулевые значения LTIFR не должны рассматриваться как основание для снижения внимания к системе управления качеством и безопасностью. Напротив, при отсутствии происшествий возрастает значение ведущих индикаторов, контроля процедур, анализа предвестников и дисциплины корректирующих действий. Иными словами, нулевой LTIFR показывает итоговый результат, но не раскрывает состояние причин, барьеров и процессов, за счёт которых этот результат удерживается (рис. 3).

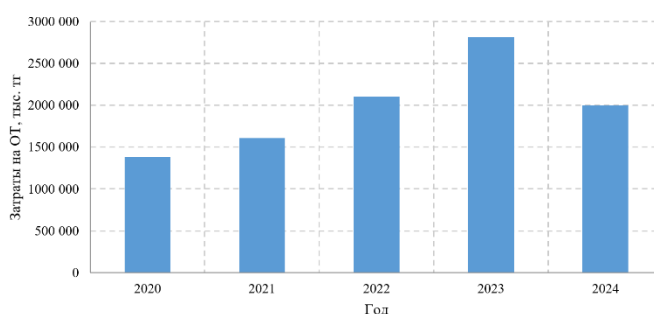


Рисунок 3 – Динамика затрат на охрану труда за 2020-2024 гг.

Затраты на охрану труда увеличились с 1 382 325 тыс. руб. в 2020 г. и 1 608 726 тыс. руб. в 2021 г. до 2 102 982 тыс. руб. в 2022 г. и 2 814 728 тыс. руб. в 2023 г. В 2024 г. затраты составили 1 997 480 тыс. руб., то есть снизились относительно пикового значения 2023 г., но остались выше уровня 2020-2021 гг.

Сопоставление рисунков 2 и 3 позволяет выделить три периода. Первый период – 2020-2021 гг., когда сохранялись ненулевые значения травматизма при относительно меньшем уровне затрат. Второй период – 2022-2023 гг., когда на фоне роста финансирования был достигнут нулевой уровень LTIFR. Третий период – 2024 г., когда нулевой LTIFR сохранился при снижении затрат относительно 2023 г.

Такая динамика может быть интерпретирована как переход от фазы усиления системы к фазе поддержания результата. Для цифрового контура качества это означает, что затраты должны рассматриваться не только как финансовый показатель, но и как ресурс поддержания процессов, процедур, обучения, контроля и корректирующих действий. При этом важно не допустить формального вывода о том, что снижение травматизма автоматически позволяет снижать внимание к системе качества. В условиях нулевой событийности критичным становится контроль состояния процессов, а не только итоговых происшествий.

Следующий аналитический блок связан с радиационной безопасностью. На рисунке 4 представлена динамика средней и максимальной годовой эффективной дозы персонала группы «А» относительно контрольного уровня 10 мЗв/год.

Средняя годовая эффективная доза персонала группы «А» находилась в диапазоне от 0,8 до 1,4 мЗв/год. В 2020 г. она составила 0,8 мЗв, в 2021-2022 гг. – 0,9 мЗв, в 2023-2024 гг. – 1,4 мЗв. Все значения существенно ниже контрольного уровня 10 мЗв/год.

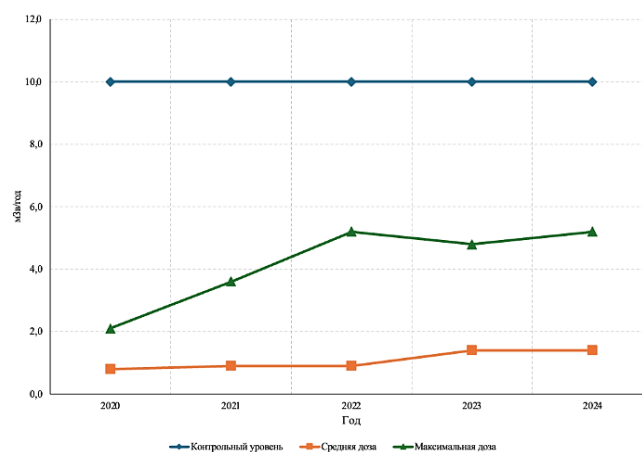


Рисунок 4 – Средние и максимальные дозы персонала группы А относительно контрольного уровня

В то же время максимальная годовая эффективная доза изменялась более выразительно: 2,1 мЗв в 2020 г., 3,6 мЗв в 2021 г., 5,2 мЗв в 2022 г., 4,8 мЗв в 2023 г. и 5,2 мЗв в 2024 г. Несмотря на отсутствие превышения контрольного уровня, максимальные значения показывают наличие локальных эпизодов повышенной дозовой нагрузки.

Данный результат имеет важное методическое значение. Если анализировать только средние значения, система может выглядеть устойчивой и не требующей дополнительного внимания. Однако максимальные значения позволяют выявлять эпизоды, которые скрываются внутри усреднённой статистики. Для цифрового контура качества это означает необходимость управления не только средним уровнем показателей, но и пиковыми значениями. Рост максимальной дозы должен запускать анализ причин: вид работ, участок, продолжительность воздействия, организация допуска, применяемые защитные меры и корректирующие действия.

Именно поэтому, радиационный блок подтверждает необходимость перехода от отчётного контроля к риск-ориентированному мониторингу. В цифровой системе такие показатели могут использоваться для порогового контроля, автоматического выделения отклонений и формирования задач САРА.

Экологический блок представлен двумя графиками. На рисунке 5 показана динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и сбросов загрязняющих веществ в водные объекты.

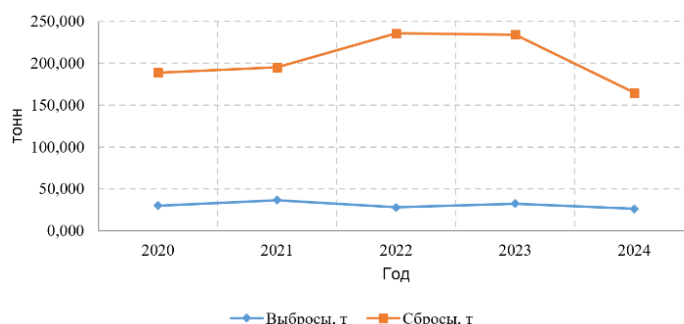


Рисунок 5 – Динамика выбросов и сбросов за 2020-2024 гг.

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу составили 30,087 т в 2020 г., 36,666 т в 2021 г., 27,830 т в 2022 г., 32,499 т в 2023 г. и 26,114 т в 2024 г. В целом за рассматриваемый период наблюдается снижение выбросов к 2024 г., несмотря на отдельные межгодовые колебания.

Сбросы загрязняющих веществ в водные объекты изменялись более резко: 188,780 т в 2020 г., 194,950 т в 2021 г., 235,759 т в 2022 г., 234,193 т в 2023 г. и 164,716 т в 2024 г. Максимальные значения зафиксированы в 2022-2023 гг., после чего в 2024 г. наблюдается заметное снижение.

Динамика сбросов показывает, что экологические показатели имеют выраженную волатильность и требуют причинного анализа. Сам факт снижения в 2024 г. является

положительным результатом, однако для системы управления качеством важно понимать, за счёт чего он достигнут: изменения производственных режимов, природоохранных мероприятий, технического обслуживания, модернизации оборудования или иных факторов. Без цифрового контура такие взаимосвязи трудно фиксировать и проверять.

На рисунке 6 представлена динамика объёма образования производственных отходов.

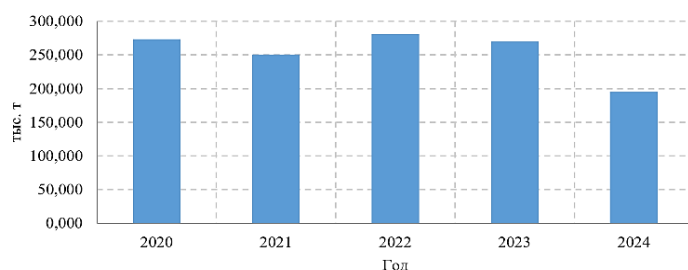


Рисунок 6 – Динамика образования производственных отходов за 2020-2024 гг.

Объём образования производственных отходов составил 273,249 тыс. т в 2020 г., 250,785 тыс. т в 2021 г., 281,289 тыс. т в 2022 г., 269,644 тыс. т в 2023 г. и 194,780 тыс. т в 2024 г. Наибольшее значение наблюдалось в 2022 г., после чего показатель начал снижаться. Минимальное значение зафиксировано в 2024 г.

Полученная динамика показывает, что экологический контур также может рассматриваться как часть системы управления качеством. Выбросы, сбросы и отходы отражают не только экологическое воздействие, но и устойчивость технологических режимов, эффективность природоохранных мероприятий и управляемость производственных процессов. Для цифровой системы качества такие показатели должны быть связаны с ответственными подразделениями, источниками данных, пороговыми значениями и корректирующими действиями.

На основе анализа производственных, радиационных и экологических показателей была сформирована логика цифрового контура управления качеством, представленная на рисунке 7.

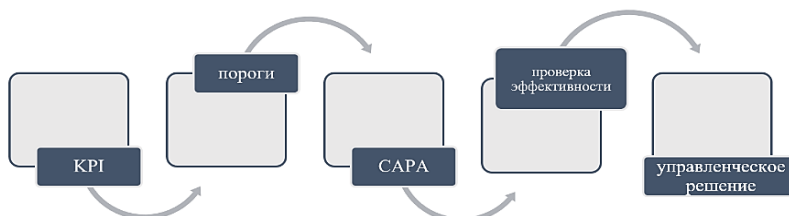


Рисунок 7 – Цифровой контур управления качеством на основе KPI, CAPA и аналитики

Представленный на рисунке 7 цифровой контур обобщает результаты анализа производственных, радиационных и экологических показателей и показывает, каким образом данные могут быть переведены из формата отчётности в формат управленческого действия. В такой модели KPI используются для фиксации состояния процессов и выявления отклонений, CAPA обеспечивает анализ причин и контроль корректирующих мероприятий, а аналитика/ИИ применяется для выявления аномалий, повторяющихся причин и зон риска.

Практическое значение данного контура заключается в том, что каждый показатель связывается с пороговым значением, ответственным подразделением и последующим управленческим действием. Например, рост LTIFR или несчастных случаев должен запускать анализ причин в контуре охраны труда; увеличение максимальной индивидуальной дозы - разбор конкретных работ и условий воздействия; волатильность сбросов или отходов - анализ технологических режимов, состояния оборудования и эффективности природоохранных мероприятий.

При этом ИИ в предложенной модели не заменяет ответственное управленческое решение, а выполняет вспомогательную аналитическую функцию. Для предприятий атомного профиля принципиально важно, чтобы окончательное решение оставалось за компетентным специалистом, а результаты работы цифровой системы были объяснимыми, проверяемыми и документально подтверждёнными.

Экономическая оценка внедрения цифрового контура представлена на рисунке 8.

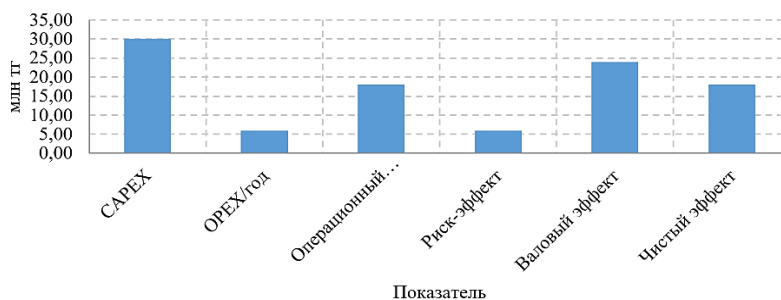


Рисунок 8 – Экономическая эффективность внедрения цифрового контура управления качеством

Расчётный сценарий предполагает капитальные затраты на внедрение цифрового контура в размере 30 млн тг и ежегодные эксплуатационные расходы в размере 6 млн тг. Операционный эффект, связанный со снижением трудозатрат на сбор, обработку, проверку и подготовку отчётности, оценивается в 18 млн тг в год. Дополнительно учитывается риск-эффект в размере 6 млн тг в год, связанный с предотвращением потенциальных потерь за счёт более раннего выявления отклонений и повышения дисциплины САРА.

Валовый годовой эффект составляет 24 млн тг, а чистый годовой эффект после учёта эксплуатационных расходов – 18 млн тг. При капитальных затратах 30 млн тг расчётный срок окупаемости составляет около 1,67 года. В консервативном варианте, когда учитывается только операционный эффект без предотвращённых потерь, срок окупаемости составляет около 2,5 года.

Полученные результаты показывают, что экономическая целесообразность цифрового контура связана не только с применением ИИ, но и с построением единой управляемой системы, где данные, пороговые значения, САРА и аналитика работают совместно. Основной эффект формируется за счёт сокращения трудоёмкости отчётности, повышения скорости реакции на отклонения, улучшения дисциплины корректирующих действий и снижения вероятности повторяемости причин.

Вместе с тем необходимо учитывать ограничения полученных результатов. Используемые данные представлены преимущественно на годовом уровне, что достаточно для анализа динамики и обоснования цифрового мониторинга, но ограничивает возможности построения полноценной предиктивной модели. Для более точного применения ИИ потребуются данные более высокой детализации: по подразделениям, участкам, видам работ, сменам, режимам оборудования, прединцидентам и карточкам САРА.

Кроме того, устойчивость цифрового контура зависит от качества исходных данных, единых справочников, регламентов ввода информации и ответственности владельцев показателей. При отсутствии системы управления данными, то есть data governance, цифровизация может привести к накоплению несогласованных данных, а не к повышению управляемости. Поэтому первым этапом внедрения должны стать стандартизация KPI, источников данных и правил расчёта, а уже затем – подключение аналитики и ИИ.

В целом результаты исследования подтверждают, что показатели охраны труда, радиационного контроля и экологии могут использоваться как метрики устойчивости системы управления качеством. Их включение в цифровой контур KPI-САРА создаёт основу для перехода от отчётного контроля к управлению на основе данных. Применение ИИ в такой системе является целесообразным при соблюдении трёх условий: наличие качественных данных, объяснимость аналитических выводов и сохранение участия человека в принятии решений.

Предложенный подход позволяет рассматривать цифровую систему управления качеством как инструмент интеграции производственных, радиационных, экологических и экономических показателей в единый управленческий контур. Это обеспечивает повышение прозрачности данных, ускорение реакции на отклонения, подготовку к аудитам и экономически обоснованное развитие системы качества на предприятии атомного профиля.

Заключение

По результатам исследования установлено, что показатели охраны труда, радиационной безопасности, экологического контроля, промышленной и пожарной

безопасности могут рассматриваться как элементы единого цифрового контура управления качеством на предприятии атомного профиля. Такой подход позволяет перейти от разрозненной отчётности к управлению устойчивостью процессов, предупреждению отклонений и прослеживаемости управленческих решений.

Анализ данных АО «Ульбинский металлургический завод» за 2020-2024 гг. показал наличие измеримой базы для построения такого контура. В сфере охраны труда наблюдается положительная динамика: число несчастных случаев снизилось с 1-2 случаев в 2020-2021 гг. до 0 в 2022-2024 гг., а показатель LTIFR – до 0,00. Радиационные показатели не превышали контрольный уровень, однако максимальные дозы до 5,2 мЗв подтверждают необходимость контроля не только средних значений, но и отдельных локальных эпизодов. Экологические KPI характеризуются межгодовой волатильностью, что требует порогового контроля и анализа причин отклонений.

В работе предложена логика цифрового контура: KPI – пороговые значения – отклонение – анализ причин – САРА – проверка эффективности – аудит – аналитическая поддержка ИИ. Искусственный интеллект в данном случае рассматривается не как самостоятельный механизм принятия решений, а как аналитическая надстройка для выявления аномалий, приоритизации рисков, классификации причин и подготовки материалов к аудиту.

Экономическая оценка показала целесообразность внедрения цифрового контура: при CAPEX 30 млн тг и OPEX 6 млн тг/год срок окупаемости составляет около 1,67 года, а в консервативном варианте около 2,5 года. При этом ключевым условием эффективности является предварительная стандартизация данных, правил расчёта KPI, процедур САРА и сохранение принципа human-in-the-loop.

Следовательно, цифровой контур управления качеством на основе KPI, САРА и ИИ может рассматриваться как эффективный инструмент перехода от отчётного контроля к профилактическому управлению качеством, безопасностью и экологической устойчивостью предприятия атомного профиля.

Список литературы

1. Gueorguiev T. An approach to integrate Artificial Intelligence in ISO 9001-based quality management systems / T. Gueorguiev // Measurement: Sensors. – 2025. – Article 101787. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101787>.
2. The Quality 4.0 Roadmap: Designing a capability roadmap toward quality management in Industry 4.0 / A.M. Carvalho et al // Quality Management Journal. – 2024. – Vol. 31(2). – P. 117-137. <https://doi.org/10.1080/10686967.2024.2317478>.
3. Sader S. A review of quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges / S. Sader, I. Husti, M. Daroczi // Total Quality Management & Business Excellence. – 2022. – Vol. 33(9-10). – P. 1164-1182. <https://doi.org/10.1080/14783363.2021.1944082>.
4. Tercan H. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review / H. Tercan, T. Meisen // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2022. – Vol. 33. – P. 1879-1905. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01963-8>.
5. Artificial Intelligence in manufacturing: State of the art, perspectives, and future directions / R.X. Gao et al // CIRP Annals. – 2024. – Vol. 73(2). – P. 723-749. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.04.101>.
6. A review of explainable artificial intelligence in smart manufacturing / A. Puthanveetil Madathil et al // International Journal of Production Research. – 2025. – Vol. 63(23). – P. 8654-8697. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2513574>.
7. Human-in-the-loop machine learning: a state of the art / E. Mosqueira-Rey et al // Artificial Intelligence Review. – 2023. – Vol. 56. – P. 3005-3054. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10246-w>.
8. Data Quality Assessment in Smart Manufacturing: A Review / T. Peixoto et al // Systems. – 2025. – Vol. 13(4), Article 243. <https://doi.org/10.3390/systems13040243>.
9. Data governance & quality management-Innovation and breakthroughs across different fields / B.M.V. Bernardo et al // Journal of Innovation & Knowledge. – 2024. – Vol. 9(4), Article 100598. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100598>.

10. Arunagiri T. Enhancing Pharmaceutical Product Quality With a Comprehensive Corrective and Preventive Actions (CAPA) Framework: From Reactive to Proactive / T. Arunagiri, K.P. Kannaiah, M. Vasanthan // Cureus. – 2024. – Vol. 16(9). – P. e69762. <https://doi.org/10.7759/cureus.69762>.

А.И. Почкина*, Е.С. Юшков

Ұлттық зерттеу ядролық университеті «МИФИ»,
115409, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ., Каширское тас жолы, 31

*e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru

KPI, CAPA ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ АТОМ САЛАСЫ КӘСІПОРНЫНДА САПАНЫ БАСҚАРУДЫҢ ЦИФРЛЫҚ КОНТУРЫ

Мақалада атом саласы кәсіпорнында KPI көрсеткіштерін стандарттау, түзетуші және алдын алу іс-қимылдарын басқару (CAPA), сондай-ақ жасанды интеллекттің аналитикалық құралдарын қолдану негізінде сапаны басқарудың цифрлық контурын қалыптастыруға арналған әдістемелік тәсіл ұсынылған. Зерттеу 2020-2024 жылдар аралығындағы деректерге негізделген. Бұл деректерге еңбек қауіпсіздігі және өндірістік қауіпсіздік көрсеткіштері, LTIFR, А тобы персоналының дозалық бақылауы, экологиялық көрсеткіштер, сондай-ақ сапаның цифрлық контурын енгізудің сценарийлік экономикалық бағалауы кіреді.

Қауіпсіздік, радиациялық және экологиялық бақылау көрсеткіштері сапаны басқару жүйесінің тұрақтылығын сипаттайтын практикалық метрикалар ретінде қарастырылуы мүмкін екені көрсетілген. Талдау жүргізілген кезеңде жазатайым оқиғалар саны 2020-2021 жылдардағы 1-2 жағдайдан 2022-2024 жылдары нөлдік мәндерге дейін төмендеген, ал LTIFR көрсеткіші 0,28-ден 0,00-ге дейін азайған. Радиациялық көрсеткіштер жылына 10 мЗв бақылау деңгейінен төмен болғанымен, максималды дозалардың 5,2 мЗв-қа дейін жетуі тек орташа мәндерді ғана емес, сонымен бірге жергілікті эпизодтарды да басқару қажеттілігін растайды. Экологиялық KPI көрсеткіштері жылдар бойынша құбылмалылық танытады, бұл шекті бақылауды және ауытқу себептерін талдауды қажет етеді.

Жұмыста «KPI – шекті мәндер – ауытқу – CAPA – тиімділікті тексеру – аудит» цифрлық контурының логикасы ұсынылған. Бұл модельде жасанды интеллект аномалияларды анықтау, талдауларды басымдық бойынша сұрыптау және себептерді жіктеу үшін қосымша аналитикалық құрал ретінде қолданылады. Экономикалық бағалау нәтижелері бойынша CAPEX 30 млн теңге және OPEX жылына 6 млн теңге болған жағдайда есептік өтелу мерзімі шамамен 1,67 жылды, ал консервативті сценарийде шамамен 2,5 жылды құрайды. Алынған нәтижелер сапаның цифрлық контурын кезең-кезеңімен енгізудің орынды екенін растайды: деректерді және CAPA жүйесін стандарттаудан бастап аналитика мен предиктивті модельдерге дейін.

Ключевые слова: сапаны басқару; Quality 4.0; KPI; CAPA; жасанды интеллект; цифрлық контур; атом саласы; LTIFR; экономикалық тиімділік.

A.I. Pochekina*, E.S. Yushkov

National Research Nuclear University MEPhI,
31 Kashirskoe Highway, Moscow, 115409, Russian Federation

*e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru

DIGITAL QUALITY MANAGEMENT LOOP BASED ON KPI, CAPA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE AT A NUCLEAR INDUSTRY ENTERPRISE

The article presents a methodological approach to the development of a digital quality management loop at a nuclear industry enterprise based on KPI standardization, management of corrective and preventive actions (CAPA), and the use of artificial intelligence analytical tools. The study is based on data for 2020-2024, including occupational health and industrial safety indicators, LTIFR, dose monitoring of Group A personnel, environmental indicators, as well as a scenario-based economic assessment of the implementation of the digital quality loop.

It is shown that safety, radiation and environmental monitoring indicators can be considered practical metrics of the stability of the quality management system. During the analyzed period, the number of accidents decreased from 1-2 cases in 2020-2021 to zero values in 2022-2024, while the LTIFR indicator decreased from 0.28 to 0.00. Radiation indicators remained below the control level of 10 mSv/year; however, maximum doses of up to 5.2 mSv confirm the need to manage local episodes rather than relying only on average values. Environmental KPIs demonstrate year-to-year volatility, which justifies the need for threshold control and analysis of the causes of deviations.

The paper proposes the logic of the digital loop «KPI – thresholds – deviation – CAPA – effectiveness verification – audit», in which artificial intelligence is used as an additional tool for anomaly detection, prioritization of reviews, and classification of causes. The economic assessment shows that with CAPEX of 30

million tenge and OPEX of 6 million tenge per year, the estimated payback period is approximately 1.67 years, and about 2.5 years in the conservative scenario. The obtained results confirm the feasibility of a phased implementation of the digital quality loop: from data and CAPA standardization to analytics and predictive models.

Key words: quality management; Quality 4.0; KPI; CAPA; artificial intelligence; digital loop; nuclear industry; LTIFR; economic efficiency.

Сведения об авторах

Алёна Игоревна Почекина* – магистрант программы «Управление в атомной отрасли» (направление 38.04.02 «Менеджмент») кафедры № 72 «Управления бизнес-проектами», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация; e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru.

Евгений Семёнович Юшков – к.т.н., доцент кафедры № 72 «Управления бизнес-проектами», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация; e-mail: esyushkov@mephi.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9161-0877>.

Авторлар туралы мәліметтер

Алёна Игоревна Почекина* – «Атом саласындағы басқару» бағдарламасының магистранты, 38.04.02 «Менеджмент» бағыты, № 72 «Бизнес-жобаларды басқару» кафедрасы, Ұлттық зерттеу ядролық университеті «МИФИ», Ресей Федерациясы; e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru.

Евгений Семёнович Юшков – техника ғылымдарының кандидаты, № 72 «Бизнес-жобаларды басқару» кафедрасының доценті, Ұлттық зерттеу ядролық университеті «МИФИ», Ресей Федерациясы; e-mail: esyushkov@mephi.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9161-0877>.

Information about the authors

Alyona Igorevna Pochekina* – Master's student of the program «Management in the Nuclear Industry» in the field of study 38.04.02 «Management», Department № 72 «Business Project Management», National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation; e-mail: alenka_2011.kz@mail.ru.

Evgeny Semyonovich Yushkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department № 72 «Business Project Management», National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation; e-mail: esyushkov@mephi.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9161-0877>.

Поступила в редакцию 30.03.2026

Поступила после доработки 25.05.2026

Принята к публикации 28.05.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-61](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-61)



МРНТИ: 76.29.33

И.М. Увалиева, Ж.Т. Рахметуллина, Ш.Т. Тезекпаева*, Д.Р. Борозенец, Ж.Ж. Нурумов

Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,

Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19

*e-mail: shtezekpaeva@ektu.kz

МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ КИСЛОТНО-ОСНОВНОГО РАВНОВЕСИЯ ПО ДАННЫМ ГАЗОМЕТРИИ КРОВИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ГЕНДЕРСОНА-ХАССЕЛЬБАХА

Аннотация: В статье рассматривается система поддержки клинических решений для диагностики нарушений кислотно-основного равновесия на основе анализа газового состава крови с использованием уравнения Гендерсона-Хассельбаха. В условиях возрастающих требований к точности и скорости клинической диагностики особую актуальность приобретает алгоритмизированная интерпретация показателей газометрии. Работа направлена на систематизацию ключевых параметров ABG (pH, P_aCO_2 , HCO_3^- , BE и др.), анализ их физиологических взаимосвязей и разработку логико-математической модели для автоматизированной классификации кислотно-щелочных нарушений. Представлен алгоритмический подход к оценке

©И.М. Увалиева, Ж.Т. Рахметуллина, Ш.Т. Тезекпаева, Д.Р. Борозенец, Ж.Ж. Нурумов, 2026