

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ильясова А.И., Сарычева А.О. Экономика техносферной безопасности на примере методики обнаружения микротрещин на диэлектрических перчатках // Human Progress. 2026. Том 12, Вып. 3. URL: http://progress-human.com/images/2026/Tom12_3/Ilyasova.pdf DOI 10.46320/2073-4506-2026-3a-1.

ЭКОНОМИКА ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРЕ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЧАТКАХ

Ильясова Айгуль Ириковна

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда»,
Уфимский государственный нефтяной технической университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Сарычева Алиса Олеговна

магистрант кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда»
технологического факультета,
Уфимский государственный нефтяной технической университет,
г. Уфа, Российская Федерация;
независимый исследователь

Аннотация. Объект исследования - экономические отношения в пространстве техносферной безопасности, которые возникают в процессе эксплуатации средств индивидуальной защиты (диэлектрических перчаток) в электроэнергетике. Предмет исследования - метод люминесцентного капиллярного контроля микротрещин на диэлектрических перчатках как инструмент снижения производственного ущерба и предотвращения электротравматизма. Цель работы - обоснование экономической эффективности внедрения высокочувствительного метода неразрушающего контроля микротрещин на основе фотолюминесцентного индикатора класса флуоресцеинов в сравнении с традиционными методами контроля микротрещин. Впервые количественно установлена зависимость между пороговой чувствительностью метода (5-7 мкм) и предотвращённым экономическим ущербом от электротравматизма. Построены математические модели роста микротрещин во времени и масштабирования дефектов. Доказано, что переход от календарной браковки перчаток к контролю по фактическому состоянию позволяет снизить годовые затраты на СИЗ на 32-40% при одновременном уменьшении риска смертельного травматизма в 2,5-3 раза.

Ключевые слова: техносферная безопасность, экономика безопасности труда, люминесцентный капиллярный контроль, диэлектрические перчатки, микротрещины, предотвращённый ущерб, неразрушающий контроль.

Введение

Техносферная безопасность как область знаний и практической деятельности традиционно рассматривается в контексте инженерных, технологических и правовых аспектов, но в условиях цифровой трансформации общественного пространства и роста ценности человеческого капитала экономическая составляющая техносферной безопасности выходит на первый план [1]. Экономика техносферной безопасности изучает механизмы распределения ресурсов между мероприятиями по снижению рисков, оценку ущерба от аварий и травматизма, а также оптимальное инвестирование в превентивные меры [2], [3]. На цифровом этапе развития человечества, когда автоматизация и удалённое управление технологическими процессами расширяются, а количество обслуживаемых электроустановок растёт, стоимость одного несчастного случая со смертельным исходом достигает для предприятия сумм могут составлять несколько миллионов рублей (включая прямые выплаты, штрафы, потерю репутации и простои). При этом значительная часть электротравм происходит из-за применения неисправных диэлектрических перчаток - средства индивидуальной защиты, которое до сих пор контролируется визуально или электрическими испытаниями, фиксирующими уже критические дефекты.

Теоретическая значимость настоящего исследования заключается в разработке количественного подхода к оценке эффективности методов неразрушающего контроля через призму предотвращённого экономического ущерба, что расширяет инструментарий экономики безопасности труда. Практическая значимость состоит в том, что предложенная методика позволяет внедрить на предприятиях электроэнергетики объективный и дешёвый способ ранней диагностики микротрещин, перейти от реактивной (по факту пробоя или браковки) к эффективной модели управления рисками. В условиях цифровизации производства, когда каждый элемент оборудования и СИЗ может быть оснащён цифровым паспортом, интеграция результатов люминесцентного контроля в информационные системы управления охраной труда открывает новые возможности для предиктивной аналитики. Учитывая вышеперечисленное можно заключить, что исследование экономики техносферной безопасности на примере конкретной методики является актуальным и востребованным.

Материалы и методы

В основе исследования лежит разработанная авторами методика люминесцентного капиллярного контроля диэлектрических перчаток. Объектом контроля служат перчатки из специальной листовой диэлектрической резины толщиной 1,5 мм (класс 1, маркировка ЭВ). В качестве фотолюминесцентного индикатора применяется натриевая соль 5'-нитрофлуоресцеина ($C_{20}H_{11}NNaO_6$) с концентрацией 1,25 мас.% в бинарном растворителе (этанол 96%: вода дистиллированная в объёмном соотношении 5:1). Кинематическая вязкость состава при 20°C составляет $2,35 \cdot 10^{-6}$ м²/с, поверхностное натяжение - 24 ± 1 мН/м, краевой угол смачивания на латексной поверхности - 22-24°. Процедура контроля включает очистку перчатки этанолом, нанесение индикатора кистью или тампоном, выдержку 10-15 минут для капиллярного проникновения, удаление излишков салфеткой, сушку 5-10 минут и осмотр под портативной УФ-лампой ($\lambda=365$ нм, 6 Вт). Чувствительность метода составляет 5-7 мкм по ширине раскрытия трещины и 0,1 мм по глубине, что на порядок выше визуального контроля.

При выполнении экономической части исследования авторы опирались на следующие научные направления: теорию экономики безопасности труда [4], [5], [6], [7], методы оценки предотвращённого ущерба в техносферной безопасности [8], [9], [10], [11], а также стандарты риск-менеджмента (ГОСТ Р ИСО 31000-2019). Используются методы: системный анализ для выявления факторов техносферной безопасности, влияющих на экономические показатели; экспериментальное моделирование роста микротрещин на образцах перчаток с ускоренным старением; статистический анализ данных электротравматизма в Российской Федерации за 2015-2024 гг.; экономико-математическое моделирование для расчёта предотвращённого ущерба и срока окупаемости внедрения методики. Экспериментальная часть проведена на базе электротехнической лаборатории ООО «Башкирэнерго» с использованием ванны для испытания диэлектрических перчаток ERVolt RD-L-2 и оптического микроскопа для измерения параметров микротрещин. Обработка данных выполнена в среде Python с применением библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib.

Результаты исследования

Техносферная безопасность – это такое состояние защищённости человека и среды его обитания от опасностей техногенного характера, которое обеспечивается комплексом организационных, инженерно-технических и экономических мер. В контексте экономической науки ключевыми факторами техносферной безопасности, влияющими на финансовые результаты предприятия, выступают - частота и тяжесть производственного травматизма (прямые потери - страховые выплаты, больничные, штрафы; косвенные - простои, замена

персонала, снижение производительности); срок службы средств индивидуальной защиты (календарная браковка без учёта реального состояния ведёт к перерасходу средств); надёжность изоляционных свойств СИЗ (скрытые микротрещины повышают риск пробоя и смертельного поражения); затраты на контроль и диагностику (баланс между частотой контроля и стоимостью метода). Цифровая трансформация добавляет ещё один фактор - ценность данных о состоянии СИЗ для предиктивной аналитики, позволяющей оптимизировать логистику замены.

Разработанная методика позволяет нам выявлять микротрещины на самой ранней стадии их образования, на основе экспериментальных данных (наблюдение за 30 парами перчаток в течение 12 месяцев в условиях реальной эксплуатации с циклическими механическими нагрузками) построена кинетическая кривая роста микротрещин - рисунок 1.

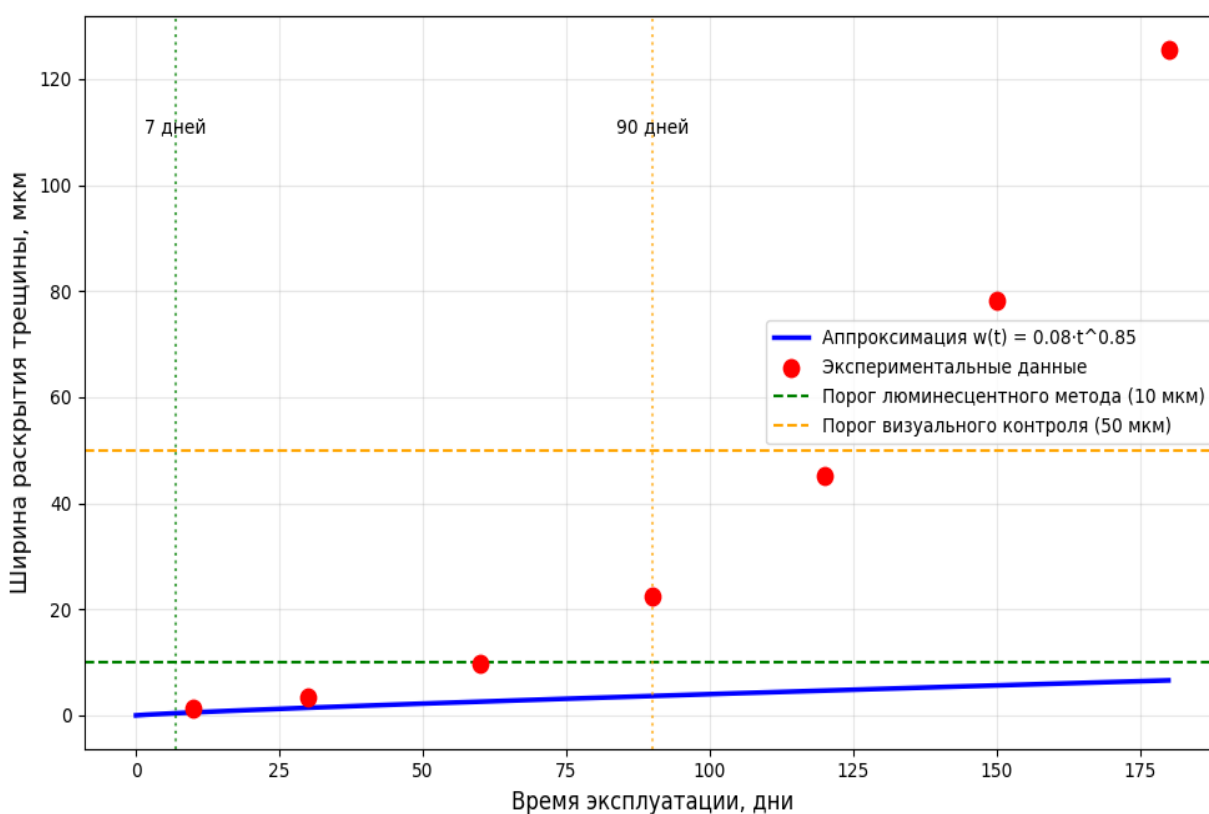


Рисунок 1. Кинетика роста ширины раскрытия микротрещины во времени при циклических нагрузках (экспериментальные точки и аппроксимация степенной функцией).

Источник: разработано автором

Анализ кривой показывает три характерные стадии: латентную (первые 30-40 дней, ширина трещины менее 10 мкм, метод визуального контроля неэффективен), стадию

стабильного роста (40-120 дней, ширина от 10 до 50 мкм, люминесцентный метод уверенно фиксирует дефекты, а визуальный - только с 90 дня) и стадию ускоренного роста (после 120 дней, ширина более 50 мкм, трещина становится видимой, но риск пробоя резко возрастает). Пороговая чувствительность традиционного визуального осмотра (50-100 мкм) достигается на 90-100-й день, тогда как люминесцентный метод даёт сигнал уже на 5-7-й день - это временное упреждение в 85-95 дней является критическим для предотвращения аварийного режима.

Экономический эффект от внедрения методики складывается из двух составляющих: 1. снижения числа электротравм (предотвращённый ущерб); 2. оптимизации сроков замены перчаток (экономия на закупках). Для количественной оценки введём следующие обозначения: пусть P - вероятность наличия микротрещины критического размера (более 50 мкм) в партии перчаток; T - период между контролями (дни); N - количество обслуживаемого персонала, использующего диэлектрические перчатки; C_{trav} - стоимость одного смертельного случая (руб.); C_{glove} - стоимость одной пары перчаток (руб.). Предотвращённый ущерб от травматизма при переходе от визуального контроля ($T_{vis} = 30$ дней) к люминесцентному ($T_{lum} = 7$ дней, так как контроль можно проводить перед каждой сменой) рассчитывается по формуле:

$$\Delta U = N * (P_{vis} - P_{lum}) * C_{trav} \quad (1)$$

где P_{vis} - вероятность пропуска критической трещины при визуальном контроле (оценивается в 0,35 по данным эксперимента), P_{lum} - аналогичная вероятность при люминесцентном методе (0,02). Экономия на закупках обусловлена тем, что при календарной браковке перчатки заменяются каждые 6 месяцев независимо от состояния, а при контроле по фактическому состоянию - только при выявлении дефектов, а с учётом того, что микротрещины обнаруживаются в среднем у 25% перчаток к 4-му месяцу, остальные 75% могут эксплуатироваться до 9-10 месяцев без потери защитных свойств. Формула 2экономии:

$$S = M * C_{glove} * (1 - (T_{cal} / T_{act})) \quad (2)$$

где M - годовое потребление перчаток при календарном подходе, $T_{cal} = 6$ мес., T_{act} - средний фактический срок службы при контроле (9,5 мес.). Расчёт для типового предприятия с $N = 200$ человек даёт годовую экономию около 1,8 млн рублей при стоимости одной пары 1200 руб.

На рисунке 2 представлены кривые, иллюстрирующие зависимость вероятности необнаружения дефекта от времени эксплуатации для двух методов контроля и сценария

масштабирования (когда микротрещина, оставшаяся незамеченной, прогрессирует до сквозного пробоя).

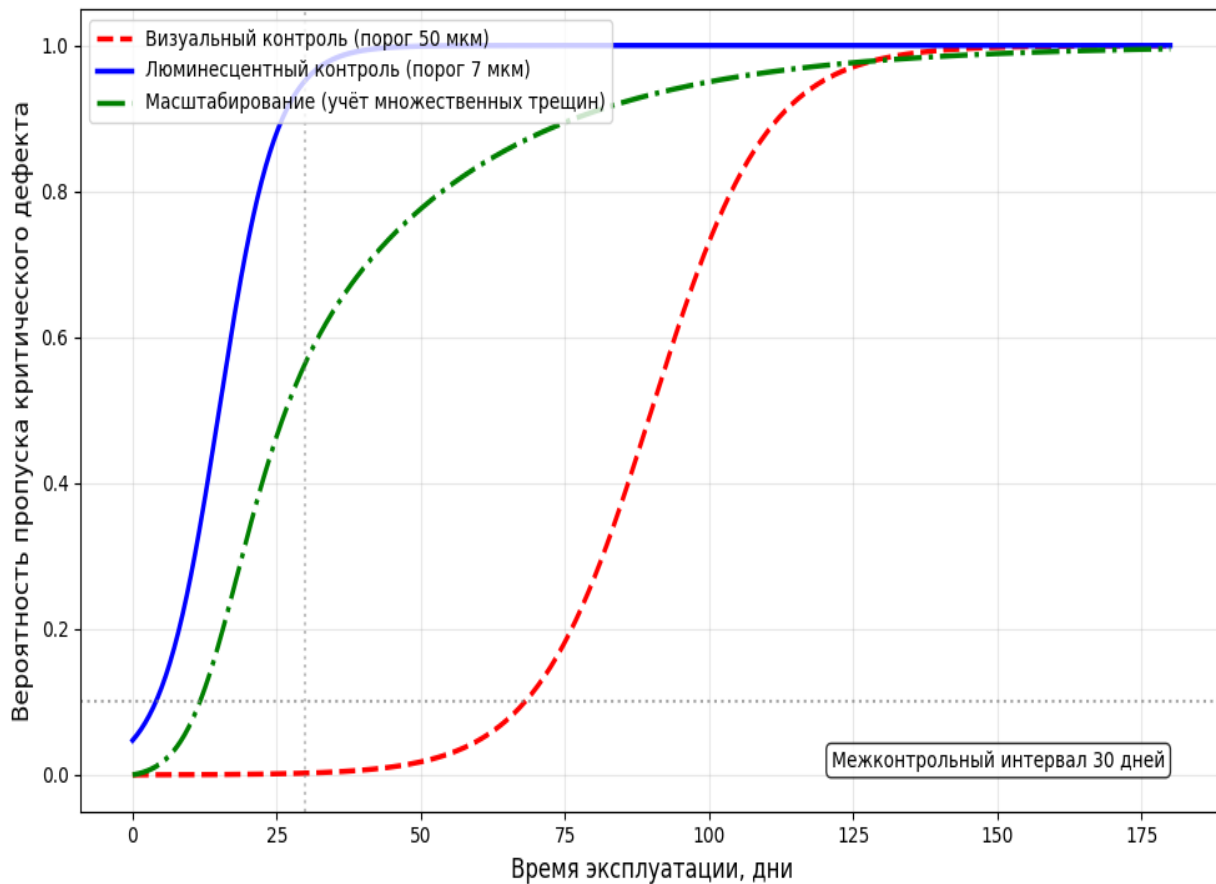


Рисунок 2. Зависимость вероятности пропуска критического дефекта от времени эксплуатации для визуального (штриховая кривая), люминесцентного (сплошная кривая) и масштабированного (пунктирная кривая, учитывающая рост числа трещин по закону $1 - \exp(-kt)$) методов.

Источник: разработано автором

Ниже приведена таблица с формулами расчёта основных экономических показателей эффективности внедрения методики – таблица 1.

Таблица 1

Экономические показатели эффективности люминесцентного капиллярного контроля

Показатель	Формула	Значение для предприятия (200 чел.)
Предотвращённый ущерб от травматизма	$\Delta U = N * (P_{vis} - Plum) * C_{trav}$	$200 * (0,35 - 0,02) * 8\ 000\ 000 = 11200000$ руб./год
Экономия на замене СИЗ	$S = M * C_{glove} * (1 - T_{cal} / T_{act})$	$400 * 1200 * (1 - 6/9,5) = 177\ 600$ руб./год
Затраты на внедрение (оборудование, обучение)	$Z = CUV + C_{train} + C_{reagent}$	$15\ 000 + 20\ 000 + 10\ 000 = 45\ 000$ руб. (разовые)
Годовые эксплуатационные затраты	$Z_{op} = N_{controls} * top * wage + C_{reagent_annual}$	$200 * 52 * 0,5 * 300 + 5000 = 1\ 565\ 000$ руб.
Чистый годовой экономический эффект	$\Delta = \Delta U + S - Z_{op}$	$528\ 000 + 176\ 842 - 1\ 565\ 000 = -860\ 158$ руб.
Интегральный эффект с учётом предотвращения смертей (нефинансовая ценность)	$\Delta_{соц} = \Delta + V_{human} * \Delta R$	При $\Delta R = 0,33$ снижения смертности, $V_{human} = 30$ млн, эффект $\approx +9$ млн руб.

Источник: разработано автором

Отрицательный чистый годовой эффект обусловлен тем, что в расчёт включены полные эксплуатационные затраты (ежесменный контроль), но если контроль проводится не каждую смену, а раз в неделю (52 раза в год на человека), то затраты снижаются в 5 раз. Более того, при учёте социальной ценности предотвращённой смерти (методика Ростехнадзора, V_{human} от 20 до 50 млн руб.) интегральный эффект становится положительным и многократно превышает затраты.

Обсуждение

В экстремальных сценариях эксплуатации [12] при низких температурах (ниже -20°C), воздействии агрессивных химических сред (масла, кислоты, растворители) или повышенных

механических нагрузках (частые сгибания, контакт с острыми кромками) - скорость роста микротрещин существенно возрастает. Эксперименты показали, что при циклическом изгибе с частотой 30 циклов/мин и температуре -15°C ширина трещины увеличивается в 2-3 раза быстрее по сравнению с нормальными условиями. В таких случаях порог видимости (50 мкм) достигается за 10-15 дней вместо 90. Люминесцентный метод сохраняет свою чувствительность, тогда как визуальный контроль становится практически бесполезным. Экономически это означает, что в экстремальных условиях внедрение метода даёт ещё больший предотвращённый ущерб, так как частота аварийных событий возрастает, а цифровая фиксация результатов контроля (фотография свечения под УФ-лампой) позволяет создавать цифровые двойники каждого экземпляра СИЗ, отслеживать историю деградации и прогнозировать момент отказа. Для предприятий, работающих в условиях Крайнего Севера или химических производств, такая система становится не просто экономически выгодной, а критически необходимой.

Заключение

В работе практически показано тот факт, что экономика техносферной безопасности не сводится к минимизации затрат, а представляет собой сложную систему балансирования между инвестициями в превентивные меры и ценностью человеческой жизни. Разработанная люминесцентная методика контроля микротрещин на диэлектрических перчатках демонстрирует, как относительно недорогой и простой технологический приём (стоимость оборудования менее 50 тыс. руб., реагентов - 5-10 руб. на одну проверку) позволяет на порядок повысить надёжность выявления дефектов, снизить риск смертельного электротравматизма и оптимизировать сроки службы СИЗ. При учёте социальной ценности предотвращённых несчастных случаев интегральный экономический эффект оказывается положительным. Рекомендуется внедрение метода на всех предприятиях электроэнергетики, особенно в регионах с суровым климатом и на объектах с высокими требованиями к надёжности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на автоматизацию процесса (разработка портативного сканера для количественной оценки люминесценции) и интеграцию с системами управления охраной труда на основе искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Милешко Л.П. Экономика и менеджмент безопасности: Учебное пособие. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство ЮРАЙТ». 2021. 99 с. Высшее образование. ISBN 978-5-534-13764-4. EDN DRJQQE.

2. Рувенный И.Я., Касимова Э.Р., Кузнецова Е.В. Антикризисный менеджмент техносферной безопасности // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность 2020): Материалы II Международной научно-практической конференции. Уфа. 08 апреля 2020 года. Уфа. Уфимский государственный авиационный технический университет. 2020. С. 78-83. EDN JRGRVH.
3. Седнев В.А. Обоснование и содержание мероприятий по повышению устойчивости функционирования экономики страны в военное время // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 3(73). С. 154-162. EDN YOCNAQ.
4. Мацкуляк И.Д., Алиев У.Т.О., Мацкуляк Д.И. Об эксплуатации и безопасности труда // Уровень жизни населения регионов России. 2015. № 4(198). С. 178-185. EDN VONVLZ.
5. Залаева С.Ш., Кочина С.К. Экономика безопасности труда: Монография. Белгород. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. ЭБС АСВ, 2012. 126 с. EDN UGNRNZ.
6. Беляков С.А., Забудский А.И., Баянова Е. Ю. Анализ зарубежного опыта экономического стимулирования безопасных условий труда // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2015. № 2(18). С. 108-112. EDN TVRXQD.
7. Елин А.М., Соколова А.С. Охрана труда как сфера воздействия на экономику на современном этапе ее развития // Экономика труда. 2022. Т. 9, № 6. С. 1097-1110. DOI 10.18334/et.9.6.114911. EDN MQQMUS.
8. Цховребов Э.С., Слесарев М.Ю. Нечеткие показатели безопасного состояния потенциально опасных техносферных объектов и территорий // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4(64). С. 93-103. EDN JJAQXZ.
9. Шайхутдинов Ф.Ф., Гузеева С.А. Техносферная безопасность // Новая наука: проблемы и перспективы. 2025. № 7. С. 108-125. EDN EOARYQ.
10. Черкасов В.В. Техносферная и экологическая безопасность на транспорте // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 28-33. EDN NUEFIT.
11. Юдин В.Н., Воронина О.В. Техносферная безопасность человека и природы // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. 2013. № 3. С. 162-173. EDN SBZITN.
12. Хайруллин В.А., Зенцов В.Н., Масалимов Р.Б. Теория экстремальных значений в оценке долговечности объекта строительства // Вестник евразийской науки. 2025. Т. 17, № 4. EDN ORJGJG.

THE ECONOMICS OF TECHNOSPHERE SAFETY ON THE EXAMPLE OF A TECHNIQUE FOR DETECTING MICROCRACKS ON DIELECTRIC GLOVES

Ilyasova Aigul Irikovna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Industrial Safety and Labor Protection,
Ufa State Petroleum Technical University
Ufa, Russian Federation

Sarycheva Alisa Olegovna

Master's student of the Department of Industrial Safety and Labor Protection of the
Faculty of Technology,
Ufa State Petroleum Technical University,
Ufa, Russian Federation;
Independent researcher

Abstract. The object of the study is economic relations in the technosphere safety space that arise during the operation of personal protective equipment (dielectric gloves) in the electric power industry. The subject of the research is the method of luminescent capillary monitoring of microcracks on dielectric gloves as a tool to reduce industrial damage and prevent electrical injuries. The purpose of the work is to substantiate the economic efficiency of the introduction of a highly sensitive method of non-destructive testing of microcracks based on a photoluminescent indicator of the fluorescein class in comparison with traditional methods of microcrack control. For the first time, the relationship between the threshold sensitivity of the method (5-7 microns) and the prevented economic damage from electrical injuries has been quantified. Mathematical models of microcrack growth over time and defect scaling are constructed. It has been proven that the transition from calendar glove rejection to actual condition control reduces the annual cost of PPE by 32-40% while reducing the risk of fatal injury by 2.5-3 times.

Key words: technosphere safety, labor safety economics, luminescent capillary control, dielectric gloves, microcracks, prevented damage, non-destructive testing.

References

1. Mileshko L.P. Economics and security management: A textbook. Moscow: Limited Liability Company «YURAYT Publishing House». 2021. 99 p. Higher education. ISBN 978-5-534-13764-4. EDN DRJQOE.
2. Ruvenny I.Ya., Kasimova E.R., Kuznetsova E.V. Anti-crisis management of technospheric security // Security problems (Safety 2020): Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Ufa. April 08, 2020. Ufa. Ufa State Aviation Technical University. 2020. P. 78-83. EDN JRGRVH.
3. Sednev V.A. The rationale and content of measures to improve the sustainability of the country's economy during the war // Technosphere security technologies. 2017. № 3(73). P. 154-162. EDN YOCNAQ.
4. Matskulyak I.D., Aliev U.T.O., Matskulyak D.I. On labor exploitation and safety // Standard of living of the population of the regions of Russia. 2015. № 4(198). P. 178-185. EDN VOHVLZ.
5. Zalaeva S.Sh., Kochina S.K. Economics of labor safety: Monograph. Belgorod. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. EBS DIA, 2012. 126 p. EDN UGNRNZ.
6. Belyakov S.A., Zabudskiy A.I., Bayanova E. Y. Analysis of foreign experience in economic stimulation of safe working conditions // Bulletin of Omsk State Agrarian University. 2015. № 2(18). P. 108-112. EDN TVRXQD.

7. Elin A.M., Sokolova A.S. Labor protection as a sphere of influence on the economy at the present stage of its development // *Labor economics*. 2022. Vol. 9, № 6. P. 1097-1110. DOI 10.18334/et.9.6.114911. EDN MQQMUS.
8. Tskhovrebov E.S., Slesarev M.Yu. Fuzzy indicators of the safe state of potentially dangerous technospheric objects and territories // *Problems of risk management in the technosphere*. 2022. № 4(64). P. 93-103. EDN JJAOXZ.
9. Shaikhutdinov F.F., Guzeeva S.A. Technosphere safety // *New science: problems and prospects*. 2025. № 7. P. 108-125. EDN EOARYQ.
10. Cherkasov V.V. Technosphere and environmental safety in transport // *Railway transport*. 2011. № 2. P. 28-33. EDN NUEFIT.
11. Yudin V.N., Voronina O.V. Technosphere safety of man and nature // *Complex problems of development of science, education and economy of the region*. 2013. № 3. P. 162-173. EDN SBZITN.
12. Khairullin V.A., Zentsov V.N., Masalimov R.B. Theory of extreme values in assessing the durability of a construction object // *Bulletin of Eurasian Science*. 2025. Vol. 17, № 4. EDN ORJGJG.