

УДК 624.014:620.193

Методика риск-анализа показателей долговечности металлоконструкций при выборе мер первичной и вторичной защиты от коррозии

¹Королёв В.П., д.т.н., ²Мацегора А.А., ³Кущенко И.В.

¹ООО «Укринсталкон им. В.Н. Шимановского», ДонЦТБ, Украина

²ПАО «Донецкий электротехнический завод», Украина

³ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина

Анотация. У статті розглядається проблема забезпечення технологічної безпеки при експлуатації промислових об'єктів у корозійних середовищах. Методичною основою постановки задачі управління якістю протикорозійного захисту є системний підхід до оцінки деградаційних процесів, що викликають корозійне руйнування сталевих конструкцій. Формалізація процесу вибору оптимальних заходів із захисту від корозії виконується за допомогою критичних функцій безпеки залежно від заданої моделі експлуатації будівельного об'єкта.

Сформована логістична система управління і ухвалення рішень щодо забезпечення надійності конструкцій і їх захисних покриттів на основі розрахункових положень методики граничних станів. Визначені критерії оцінки ризиків при використанні матеріалів і технологій первинного і вторинного захисту від корозії.

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения технологической безопасности при эксплуатации промышленных объектов в коррозионных средах. Методической основой постановки задачи управления качеством противокоррозионной защиты является системный подход к оценке деградационных процессов, вызывающих коррозионное разрушение стальных конструкций. Формализация процесса выбора оптимальных мер по защите от коррозии производится с помощью критических функций безопасности в зависимости от заданной модели эксплуатации строительного объекта.

Сформирована логистическая система управления и принятия решений по обеспечению надежности конструкций и их защитных покрытий на основе расчетных положений методики предельных состояний. Определены критерии оценки рисков при использовании материалов и технологий первичной и вторичной защиты от коррозии.

Abstract. The paper deals with a problem of technological safety assurance in the course of the industrial facility use in corrosive environments. A technical basis for statement of the problem of corrosion protection quality management is the systems approach to the processes estimation of degradation causing the steel structure corrosion damages. Formalization of the process of choosing the optimal measures of corrosion protection is performed by means of the safety critical functions depending on the specified model of the building facility use.

The logistic control and decision-making system for assurance of the steel structure and protective coatings reliability on the basis of the design principles of the limiting state method is generated. The criteria of risk estimation using the materials and techniques of the primary and secondary corrosion protection are specified.

Ключевые слова: риск-анализ, логическая система управления, коррозия.

Введение. В условиях значительного снижения эксплуатационных свойств и остаточного ресурса зданий и сооружений при воздействиях агрессивных сред актуальной проблемой промышленной безопасности остается обеспечение надежности строительных металлоконструкций и их защитных покрытий [1]. Формирование экономических механизмов технического регулирования эффективности средств защиты от коррозии в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов связано с обоснованием критериев коррозионной опасности [2]. В связи с этим существенное значение приобретает использование комплексных критериев, позволяющих выполнять анализ и управление рисками для предотвращения аварийных ситуаций и снижения экономических потерь.

Исследования видовых характеристик экономических потерь, на наш взгляд, должно строиться на основе соблюдения следующих методических принципов:

- народнохозяйственный подход (на любом уровне народнохозяйственной иерархии экономических потерь доминирующим является установление их влияния на состояние общего (национального имущественного) потенциала);
- ресурсный подход (экономические потери могут быть определены только характеристиками наличных ресурсов);
- комплексный подход (исследование должно быть многоаспектным, согласованным и одновременным при раскрытии различных признаков и характеристик потерь (экономических, правовых, организационных и т.д.);
- системный подход (исследование различных видов потерь и обусловивших их факторов во взаимосвязи, взаимодействии).

В настоящее время накоплен положительный опыт решения задач риск-анализа для предотвращения экономических потерь, обеспечения безопасности жизнедеятельности предприятий на основе снижения издержек при внедрении рискоснижающих мероприятий [3]. С учетом факторов неопределенности и риска, высокого уровня физического износа методология управления производственными фондами по фактическому состоянию позволяет получить количественные показатели технологической безопасности зданий и сооружений [4]. Развитие методов расчета конструкций по предельным состояниям позволяет разрабатывать практические меры по обеспечению надежности строительных объектов. К сожалению, неправильное понимание логистического механизма поддержания показателей качества и безопасности, отсутствие критериев оптимальности управленческих решений по защите от коррозии негативно влияют на устойчивое функционирование производственных предприятий.

Целью статьи является рассмотрение организационно-экономических аспектов выбора материалов и технологий противокоррозионной защиты стальных конструкций для обоснования логистической системы управления материальными, информационными и финансовыми потоками предприятия по критерию коррозионной опасности. При таком подходе создаются условия для создания системы менеджмента защиты от коррозии основных фондов, направленной на управление рисками с использованием адаптационных и превентивных инструментов повышения эффективности работы предприятий.

Инновационные и инвестиционные риски предприятий, связанные с использованием материалов и технологий противокоррозионной защиты, зависят от вероятности проявления неблагоприятных событий и степени защищенности строительных объектов. Для обеспечения безопасности конструкций и сооружений важное значение имеет организационно-экономическая и производственно-технологическая деятельность основного производства. Поэтому поставки материалов и услуг в области защиты от коррозии – это сложная логистическая система с высоким уровнем ответственности каждого участника процесса, конечной целью которой является оптимизация затрат на поддержание работоспособности объекта по фактическому состоянию в соответствии с установленными нормативными, технологическими и эксплуатационными требованиями.

Методический подход к инновационному менеджменту мер защиты от коррозии. Целью работы является обеспечение ресурса и снижение инвестиционных рисков на основе технологий инженерной защиты и управления технологической безопасностью трубопроводов шахтного водоотлива. Основная идея состоит в научно-методологическом обосновании процессного подхода к техническому регулированию безопасности и поддержанию работоспособности, повышению эксплуатационных свойств конструкций для управления проектным сроком службы на всех этапах жизненного цикла горношахтных сооружений.

Исследования по созданию теоретического обоснования и научно-практических механизмов технического регулирования технологической безопасности (1 этап – 2004–2011 гг.) включали анализ параметров конструктивной формы, требований надежности и управления безопасностью для разработки эффективных мер инженерной защиты [6, 7]. В результате внедрения разработанных подходов к обеспечению технологической безопасности на объектном уровне усовершенствованы организационная система, нормативно-правовое и методическое обеспечение работ по повышению надежности и безопасности конструкций, зданий и сооружений, установлены регламентные требования научно-технического сопровождения и мониторинга параметров напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений

горно-металлургического комплекса. Реализация задачи обеспечения надежности, долговечности и безопасной эксплуатации стальных конструкций предполагает создание комплекса технических требований к оценке показателей качества первичной и вторичной защиты от коррозии. Надежная защита строительных металлических конструкций и элементов от коррозии определяет их безаварийную и экономичную эксплуатацию в течение заданного срока службы.

В результате выполненных исследований предложены новые подходы в развитии метода предельных состояний для определения коррозионной стойкости, долговечности и ремонтпригодности стальных конструкций и их защитных покрытий. На основе данных эколого-экспертных оценок реализованы меры по классификации и снижению агрессивности коррозионных воздействий при реконструкции и техническом переоснащении производственных объектов. Разработаны эффективные математические методы численного моделирования прочностных и деформационных критериев по показателям коррозионной стойкости, долговечности и ремонтпригодности стальных конструкций и их защитных покрытий.

Выполненный комплекс работ охватывает широкий спектр проблем контроля качества и эксплуатационных свойств обеспечения технологической безопасности производственных объектов различного назначения (рис. 1). Развитие методов управления технологической безопасностью связано с реализацией программ технического перевооружения и стратегического развития предприятий. Анализ функциональных требований и технических характеристик строительных объектов по данным экспертного диагностирования конструкций способствует формированию программ обеспечения надежности (ПОН) и позволяет определить объемы ремонтно-восстановительных работ для поддержания эксплуатационных параметров.

В соответствии с требованиями международных стандартов разработана методика подтверждения соответствия установленных показателей качества стальных конструкций и их защитных покрытий. Накопленный экспериментальный материал использован для построения информационной системы данных эксплуатационных свойств материалов первичной и вторичной защиты от коррозии и их теоретического обобщения. Внедрение унифицированного критерия оценки по уровню коррозионной опасности обеспечивает возможность выбора экономически обоснованных вариантов и использования технологий долговременной защиты от коррозии, которые имеются в Украине и за рубежом.

Таким образом, за счет эффективного управления физической, экономической и информационной составляющими (см. рис. 1) созданы условия для реализации инновационной программы обеспечения технологической безопасности структурными подразделениями предприятия на основе ресурсосберегающих материалов и технологий.

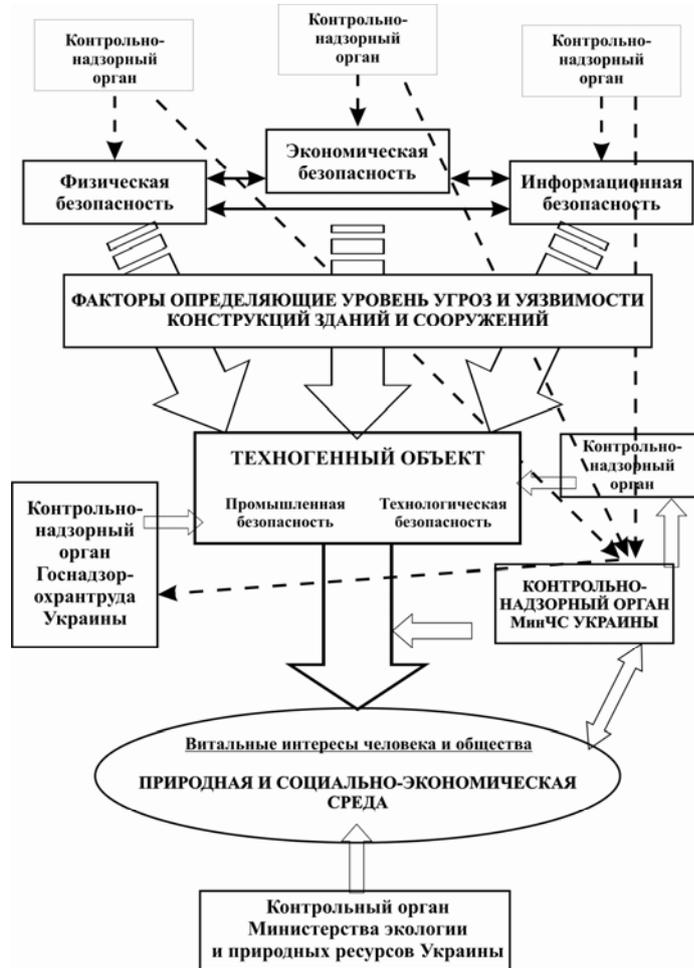


Рис. 1. Схема менеджмента технологической безопасности и ресурсосбережения по критерию коррозионной опасности

Использование критерия коррозионной опасности позволяет производить выбор мер первичной и вторичной защиты на стадии проектирования с учетом требований технологической рациональности противокоррозионной защиты при изготовлении и техническом обслуживании в процессе эксплуатации.

Таким образом, создаются условия для технического регулирования и подтверждения соответствия показателей коррозионной стойкости, долговечности, ремонтпригодности конструкций и их защитных покрытий на основе критических функций безопасности на всех стадиях жизненного цикла строительных объектов.

Конечной целью реализации инновационного проекта является создание специализированной аналитической системы, которая позволит выделять финансовые потоки инновационной программы из общих затрат компании и производить оценку эффективности затрат, связанных с обеспечением технологической безопасности и защиты от коррозии основных фондов и объектов инфраструктуры.

Оценка характера и интенсивности коррозионного разрушения стальных трубопроводов. Характерной чертой современного этапа в горнодобывающей отрасли является все более широкое вовлечение в эксплуатацию месторождений, расположенных в сложных горно-геологических условиях. Ухудшение природных экологических факторов разработки угольных пластов, обусловленное, в первую очередь, углублением горных работ, связано с увеличением числа шахт, сверхкатегорийных по газу, опасных по внезапным выбросам угля, газа и породы, по пыли, резкому увеличению водопритоков в горные выработки.

С увеличением глубины разработки угольных пластов агрессивность газообразных и жидких сред (в частности, минерализация и химический состав шахтных вод) возрастает. Шахтные воды угольных месторождений имеют различный химический состав. Разнообразие состава обусловлено сложными процессами формирования шахтных вод, основными из которых следует считать тектонику, литолого-минералогический состав осадочных отложений угленосного бассейна, условия питания водоносных горизонтов, интенсивность водообмена и др.

Шахтные воды, откачиваемые при добыче угля в верхних и средних зонах шахтных полей, формируются за счет атмосферных осадков, поверхностных вод, а также различных техногенных объектов (накопители шахтных вод и жидких отходов и другие источники техногенных вод). Трубопроводы, предназначенные для транспортировки воды, рассчитаны на долговременную эксплуатацию. Надежная и бесперебойная работа трубопроводов и наземных сооружений в значительной степени определяется эффективностью средств и методов противокоррозионной защиты. В противном случае, они подвергаются интенсивному коррозионному разрушению, что связано с возникновением аварийных ситуаций.

Принимая решение о выборе защитного покрытия для противокоррозионной защиты стальных конструкций трубопроводов подземной прокладки необходимо учитывать следующие требования:

- следует принимать во внимание все существующие нормативные требования (государственные и отраслевые стандарты), обосновывающие показатели эффективности технических решений по защите от коррозии;
- выбор материалов и технологий диктуется техническими условиями организаций-производителей средств защиты, в которых должны быть представлены характеристики, установленные государственными стандартами;
- заказчиком могут устанавливаться дополнительные требования, характеризующие показатели качества материалов и технологий противокоррозионной защиты с учетом условий изготовления, монтажа и эксплуатации;
- гарантийные требования к долговечности предоставляются производителями материалов, конструкций и их защитных покрытий на основе сертификатов, проектных спецификаций и технологических карт, подтверждающих выбор и обоснование сроков службы в условиях эксплуатации заданного объекта.

Для одного и того же назначения трубопроводов существуют различные варианты защитных покрытий, отличающиеся как по природе материала (металлические и металлизационные, битумные, битумно-полимерные, бутилкаучуковые, уретановые, эпоксидные и пр.), так и по способу нанесения (напыляемые, обмазочные, оклеечные и пр.). Чтобы осуществить выбор защитного покрытия, обоснованный с точки зрения свойств назначения покрытия и рациональности его нанесения, необходимо выполнить сравнение целесообразности конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик на основе экономических критериев стоимостных оценок материалов, оборудования и показателей долговечности.

На основании сбора данных по условиям эксплуатации определены характерные особенности конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров шахтных трубопроводов (табл. 1). Результаты контроля коррозионного состояния, выполненного на фрагментах – образцах трубопроводов, систематизированы в табличной форме. Пример описания качественных и количественных показателей коррозионных разрушений для внутренней и наружной поверхностей трубопровода шахтного водоотлива приведен в табл. 2.

Аудит коррозионного состояния трубопроводов шахтного водоотлива выявил наличие множественных протечек, вызванных сквозными

коррозионными повреждениями стальных труб. Для контроля характера и интенсивности коррозионного разрушения были отобраны фрагменты стальных труб, для которых эксплуатационный ресурс составил от 2-х до 8-ми лет в зависимости от условий расположения трубопроводов.

Данные инструментальных замеров выявили очаги равномерной и местной (язвами и питтингами) коррозии со следующими показателями коррозионного износа:

- для наружной поверхности стальных труб от 0,3 до 0,7 мм/год;
- для внутренней поверхности стальных труб от 0,15 до 0,5 мм/год.

Технические решения по I варианту рассматриваются как базовые для обоснования экономической эффективности проектных и технологических решений по обеспечению заданного срока службы трубопроводов.

Анализ рисков при выборе мер защиты от коррозии. Выбор мер первичной и вторичной защиты производился на основе нормативных требований ДСТУ 4219-2003 противокоррозионной защиты для подземных трубопроводов, предусматривающих решения по «усиленным» и «весьма усиленным» покрытиям для следующих вариантов:

I вариант – *первичная защита*. Предполагается, что на протяжении срока службы секций шахтного трубопровода защита от коррозии осуществляется только за счет повышенной (обычной) коррозионной стойкости стали.

II вариант – *первичная и вторичная защита*. Срок службы секций обеспечивается за счет вторичной защиты внешней поверхности и первичной защиты внутренней поверхности трубопроводов.

III вариант – *вторичная защита*. Долговечность службы секций шахтного трубопровода достигается за счет защитных покрытий на внешней и внутренней поверхностях стальных труб.

Обоснование эффективности проектных решений по защите от коррозии производится на основе показателя среднего риска (среднего ущерба) согласно зависимости

$$R_c = \sum_{i=1}^{i=n} P_i X_i, \quad (1)$$

где R_c – количественная мера риска, средний риск, выражаемая величиной ожидаемых потерь (грн); P_i – вероятность получения ущерба размера X_i в результате наступления какого-либо неблагоприятного события (группы событий); X_i – величина ущерба в стоимостном выражении (грн); n – число возможных вариантов ущербов, которые могут иметь место при наступлении неблагоприятного события, включая и нулевой ущерб.

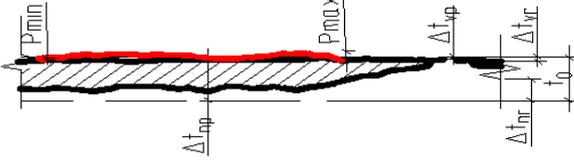
Таблиця 1

Експлуатаційні характеристики шахтних трубопроводів
і їх захисних покриттів

Назначение трубопровода	Рабочее давление	Габаритные размеры: D – диаметр, b – толщина стенки, мм	Условия эксплуатации (состав среды, температура $t_{\text{ср}}$, давление МПа, коэф. заполнения, место установки)	Конструкция защитного покрытия	Данные по отказам (коррозионным разрушениям), средний фактический срок эксплуатации существующих секций трубопроводов	Требование к сроку службы защитного покрытия трубопровода	Технические требования к производству работ
Откачка шахтной воды	$P_{\text{р}} = 6-27 \text{ атм}$	$D = 159 \text{ мм}$ $b = 4,5 \text{ мм}$		Грунтовка наружной поверхности в заводских условиях	От 2-х до 4 лет в выработках с исходящей струей и влажной средой (температура – $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, влажность – $86-90\%$)	20 лет	Полная заводская готовность защитного покрытия
		$D = 219 \text{ мм}$ $b = 8 \text{ мм}$					
Противопожарный трубопровод	$P_{\text{р}} = 15-40 \text{ атм}$	$D = 159 \text{ мм}$ $b = 4,5 \text{ мм}$	Заполнение периодичное, температура – $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, среда – рудничная атмосфера, влажность – $86-88\%$	Грунтовка наружной поверхности в заводских условиях	от 4-х до 8 лет в выработках со свежей струей (температура – $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$, влажность – $45-65\%$), воздействие шахтной воды	20 лет	Полная заводская готовность защитного покрытия
		$D = 219 \text{ мм}$ $b = 8 \text{ мм}$					
Трубопровод сжатого воздуха	$P_{\text{р}} = 6 \text{ атм}$	$D = 159 \text{ мм}$ $b = 4,5 \text{ мм}$		Грунтовка наружной поверхности в заводских условиях		20 лет	Полная заводская готовность защитного покрытия
		$D = 219 \text{ мм}$ $b = 8 \text{ мм}$					
		$D = 325 \text{ мм}$ $b = 10-12 \text{ мм}$					

Таблиця 2

Результати візуального і інструментального контролю
фрагмента сталевий труби шахтного водоотливу

Образец	Схема характерного сечения образца	Обозначение характеристик коррозионных поражений равномерная (местная) коррозия	Интервальные значения параметров	Описание характера разрушения
		<p>t_0 – толщина стенки трубы, мм. $\Delta t_{гр}$ – потери сечения (мм) на наружной поверхности трубы при равномерной коррозии. $\Delta t_{вн}$ – потери сечения (мм) на внутренней поверхности трубы при равномерной коррозии. $\Delta t_{гр}^{плп}$ – потери сечения (мм) на наружной поверхности трубы при местной коррозии. $\Delta t_{вн}^{плдх}$ – потери сечения (мм) на внутренней поверхности трубы при местной коррозии. $R_{плп}$ – толщина (мм) ржавчины.</p>	<p>Интервальные значения параметров t_0 – 4,0 $\Delta t_{гр}$ – 1,3–1,40 $\Delta t_{вн}$ – 0,15–0,2 $\Delta t_{гр}^{плп}$ – 0,5–3,8 $\Delta t_{вн}^{плдх}$ – 0,2 $R_{плп}$ – 2,5</p>	<p>Преобладает местная коррозия с наружной стороны образца. Степень поражения язвенной и пиллинговой коррозией 50–60 %. На внутренней стороне преобладает равномерная коррозия. Коррозионная стойкость – 0,5–1,0 мм/год.</p>

Средний риск инновационной деятельности при реализации защитных мер по предупреждению коррозионного разрушения можно определить на основании выражения

$$R_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij}(V) P_j P_i(j, z_j) X_i, \quad (2)$$

где $P_i(j, z_j)$ – условная вероятность возникновения ущерба X_i при наступлении неблагоприятного события j -го типа и осуществления защитных мероприятий от него с затратами z_j ;

$g_{ij}(V)$ – вероятность выбора объектом ситуации, характеризующейся вероятностью наступления неблагоприятного события P_j и законом распределения ущерба $P_j(j, z_j)$, зависящим от принятых мер по защите z_j . Особенность подхода к определению риска на основе зависимости (4) представлена графически на рис. 2.

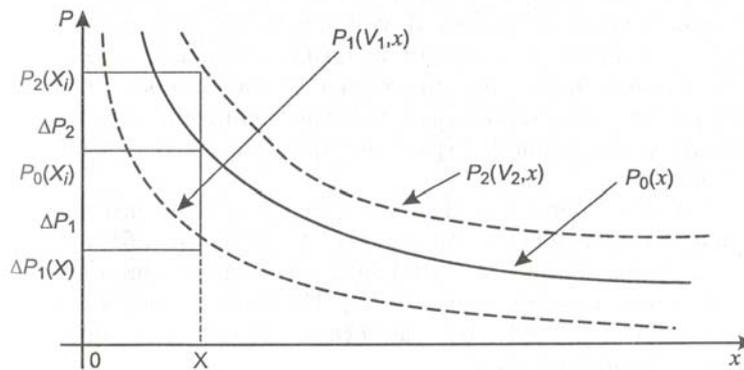


Рис. 2. Закон распределения ущерба при возможности и невозможности выбора мер по защите от коррозии

Разработанные требования к оценке качества противокоррозионной защиты и менеджменту показателей долговечности стальных трубопроводов применены для регламентных процедур выбора мер защиты по критерию коррозионной опасности.

Использование методов первичной защиты для установленных сроков службы секций шахтных трубопроводов требует применения коррозионностойких (нержавеющих) сталей марки 12X18H10T. Рассмотрены технологические возможности выполнения противокоррозионной защиты в условиях существующего цеха металлоарочной крепи ПАО «ДЭТЗ».

Проанализированы преимущества и ограничения, связанные со следующими технологиями защиты:

I вариант – традиционный метод распыления для двухкомпонентных материалов на основе эпоксидов, полиуретанов;

II вариант – оклеечная изоляция фотополимерными материалами «ТехноПласт».

III вариант – порошковое наплавление эпоксидных покрытий.

На основе анализа конструктивных, технологических, эксплуатационных и экономических ограничений для применения рассмотренных вариантов первичной и вторичной защиты обоснованы проектные решения покрытий на основе материалов серии «Технопласт» [5]. Выполненные ускоренные коррозионные испытания на климатическое старение по стандарту ISO 12944, подтвердили срок службы принятых систем покрытий не менее 15 лет. Таким образом, применение II варианта обеспечивает защиту от коррозии наружной поверхности стальных труб при допустимых показателях коррозионного разрушения внутренней поверхности для срока службы первичной защиты в течение пяти лет.

Выводы

Разработан методический подход, включающий обоснование выбора средств защиты от коррозии, на основе анализа рисков по критерию коррозионной опасности. Полученные результаты определяют проектные требования к показателям качества первичной и вторичной защиты шахтных трубопроводов, разработке технических регламентов, устанавливающих показатели технологической безопасности с учетом опасности коррозионного разрушения. Таким образом, предложен организационно-экономический механизм для решения задач ресурсосбережения, выбора средств первичной и вторичной защиты от коррозии шахтных трубопроводов, включающий требования к проектированию, изготовлению и эксплуатации по заданным показателям надежности.

Литература

- [1] Шимановский А.В. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений / Шимановский А.В., Гордеев В.Н., Королёв В.П., Оглобля А.И., Рухович И.Р., Филатов Ю.В. – К.: Изд-во «Сталь», 2008.
- [2] Королёв В.П. Критические функции безопасности при анализе рисков коррозионного разрушения стальных конструкций./ Донбас-Ресурс 2011. Якість і безпека у будівництві / Тези доповідей конференції. – К.: Видавництво «Сталь». – С. 62–64.

- [3] Тихомиров Н.П. Риск-анализ в экономике / Н.П. Тихомиров, Т.М. Тихомирова. – М.: ЗАО «Изд-во «Экономика». – 318 с.
- [4] Korolov V., Vysotskyu Y., Gibalenko O., Korolov P. Estimation of steel structure corrosion risk level. EUROCORR-2010. The European Corrosion Congress / From the Earth's Depths to Space Heights.// 13–17 September 2010, Moscow, Russian Federation / Book of Abstracts, p. 534.
- [5] Рекомендации по применению фотополимерных волоконно-армированных материалов «ТехноПласт» при ремонтно-восстановительных работах и защите от коррозии листовых металлоконструкций. – Киев: УкрНИИПроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского, 2006, 48 с.
- [6] Королёв В.П. Реинжиниринг для обеспечения технологической безопасности конструкций зданий и сооружений / Королёв В.П., Лотоцкий О.Б., Филатов Ю.В. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – № 2. – 2008,. – С. 26–33.
- [7] Филатов Ю.В. Обеспечение технологической безопасности и защита от коррозии основных фондов и объектов инфраструктуры горно-металлургического комплекса компании «Донецксталь» / Филатов Ю.В., Королёв В.П. // Инновационный дайджест, спец. вып., март 2012. – С. 34–36.

Надійшла до редколегії 21.05.12 р.