



УДК 004.94:532.517

МРНТИ 27.35.33

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_9

А.М. Егенова¹, С.Д. Куракбаева¹, А.Т.Калбаева^{1*}, М.А.Амандиков², Н.С.Жуматаев¹

¹Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

²Университет Дружбы народов имени А.Куатбекова, Шымкент, Казахстан

*E-mail: atkalbaeva@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация: Работа посвящена разработке и программной реализации специализированного веб-интерфейса для обработки данных, визуализации и предиктивного анализа коррозионной стойкости защитных покрытий. В статье представлен математический аппарат, объединяющий уравнения диффузии агрессивных сред через полимерные матрицы (второй закон Фика), кинетику электрохимического растворения металлической подложки (уравнение Тафеля) и эмпирические модели деградации защитных слоев. На основе предложенных формализмов с использованием языка Python, фреймворка Streamlit и библиотек Pandas, NumPy и Plotly был спроектирован интерактивный программный комплекс. Разработанный инструмент позволяет автоматизировать ввод и фильтрацию экспериментальных данных, проводить многофакторный регрессионный анализ, строить 2D- и 3D-графические зависимости, а также прогнозировать расчетный ресурс безотказной работы покрытий. Прикладная польза данного труда состоит в формировании удобного цифрового двойника, который помогает значительно уменьшить количество экспериментов в процессе поиска оптимальных характеристик изоляционных составов.

Ключевые слова: сопротивление коррозии, программное решение, компьютерная симуляция, Python, Streamlit, полимерные пленки, методы регрессии, графическое отображение информации.

Введение.

Разрушение металлоконструкций и деградация строительных материалов под воздействием агрессивных сред представляют собой сложную научно-техническую проблему, решение которой требует постоянного совершенствования методов пассивной защиты. Поскольку разрушение протекает без остановок, инженерам приходится непрерывно улучшать подходы к пассивной изоляции. На сегодняшний день в мировой индустрии главная роль здесь отводится защитным барьерам, созданным из синтетических пластиков и кремнийорганических материалов.

Использование силиконовых композиций позволяет изолировать наружные фасады сооружений от капиллярной влаги без нарушения процессов естественного воздухообмена. Паропроницаемость стен при этом сохраняется. Накопление избыточной влаги в микропорах бетона или кирпича предотвращается за счет гидрофобизации внутренних стенок капилляров. Это продлевает срок эксплуатации. Дополнительную изоляцию в

суровых климатических условиях обеспечивают сплошные полимерные оболочки. Износ существенно замедляется.

В качестве основного барьера чаще всего используются поливинилхлоридные и полиэтиленовые пленки, демонстрирующие исключительную инертность к большинству неорганических кислот и щелочей [1]. Предотвращение окисления достигается надежно. Путем нанесения термопластичных составов изолируются внутренние поверхности нефтепромысловых резервуаров, магистральных трубопроводов и химических реакторов. Защита работает эффективно. Традиционные защитные слои формируются также из гибких листовых материалов [2].

Современные полимерные пленки изготавливаются преимущественно на базе водных дисперсий с добавлением эпоксидных смол, стирол-бутадиеновых сополимеров и поливинилацетатного связующего. Адгезия к металлу повышается. Вектор развития научных изысканий в данной области направлен на поиск методов модификации полимерных матриц для работы в экстремальных режимах. Исследования ведутся активно. Перспективным направлением считается введение наноструктурных модификаторов в объем пленки [3].

Использование наноструктурированных добавок. Качественное изменение прочностных и диффузионных свойств полимерных матриц достигается путем диспергирования в их объеме ультрадисперсных наночастиц. За счет крайне малых размеров добавляемые частицы способны плотно занимать пустые микропоры и структурные дефекты. Это делает полимерный каркас гораздо плотнее и в разы усиливает силу сцепления с поверхностью. Как результат, барьер начинает значительно хуже пропускать воду, ионы кислот и молекулы растворенного кислорода.

Разработка самовосстанавливающихся покрытий. Концепция интеллектуальных материалов предполагает способность защитной пленки к автономной регенерации сплошности при возникновении локальных механических повреждений. Для этого применяются микрокапсулы. Внедренные в полимерную матрицу капсулы содержат жидкий мономер, высвобождающийся при раскрытии трещины и полимеризующийся под действием катализаторов. Целостность восстанавливается автоматически. Механическое повреждение не приводит к развитию коррозионного очага [4]. Срок службы растет. Вектор экологической безопасности диктует необходимость замены токсичных хроматных и фосфатных ингибиторов коррозии на биоразлагаемые природные аналоги. Зеленая химия предлагает альтернативы. Экстракты растительного происхождения содержат флавоноиды и танины, способные образовывать на поверхности металла прочные хелатные комплексы. Эффективность защиты высока [5]. Опасные отходы при этом не образуются.

Применение электрохимических методов контроля. Дegradaция диэлектрических свойств полимерного покрытия в процессе насыщения его влагой контролируется методами электрохимического анализа. Применяется импедансная спектроскопия. Поляризационные измерения позволяют зафиксировать возникновение подпленочной коррозии на самых ранних стадиях, когда визуальные дефекты еще отсутствуют. Метод дает точные результаты. Исследование кинетики переноса заряда на границе раздела фаз помогает оценить степень подавления анодных реакций введенными ингибиторами [6]. В процессе проектирования защитных систем возрастает роль математического моделирования. Физико-химические свойства полимеров рассчитываются численно [7]. Моделирование переноса массы и электрохимического потенциала позволяет сократить объем дорогостоящих натурных испытаний и оптимизировать состав композиции [8]. Результаты моделирования ложатся в основу создания долговечных защитных систем [9].

Материалы и методы исследования.

Комплексная оценка защитного действия антикоррозионных покрытий проводилась с совместным использованием лабораторных испытаний и численных расчётных моделей.

Такая комбинация позволяет снизить затраты на эксперименты. Математический аппарат описывает диффузионный, кинетический, механический и электрохимический аспекты взаимодействия в системе «металл — защитная пленка — агрессивная среда». Вычисления проведены последовательно.

Скорость химического взаимодействия коррозионно-активных компонентов с металлической поверхностью описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dc}{dt} = -kC \quad (1)$$

где:

C — концентрация реагирующих веществ в зоне реакции;

k — кинетическая константа скорости реакции.

Напряженно-деформированное состояние полимерного защитного слоя при внешних механических нагрузках оценивалось методом конечных элементов. Это позволяет выявить места концентрации напряжений. Уравнение статического равновесия принимает вид:

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad (2)$$

где:

σ — тензор напряжений в материале;

f — вектор объёмных нагрузок.

Прогнозирование темпов коррозии в зависимости от набора внешних воздействий выполнялось методом множественной линейной регрессии. Совокупное влияние факторов оценивалось совместно. Регрессионная модель записывается в виде:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \epsilon \quad (3)$$

где y — исследуемая переменная (например, скорость коррозионного разрушения);

x_i — влияющие факторы;

b_i — регрессионные коэффициенты;

ϵ — случайная ошибка модели.

Применение регрессионного подхода повышает точность прогнозирования коррозионного поведения.

Чтобы учесть постепенное разрушение полимерной структуры под влиянием воды и нагрева, показатель проникновения агрессивных веществ D рассматривается как переменная величина и выражается через уточненную зависимость:

$$D(t, W) = D_0 \cdot \exp(\alpha \cdot W(t) + \beta \cdot \frac{t}{t_{service}}) \quad (4)$$

где:

D_0 — начальный коэффициент диффузии сухой пленки;

$W(t)$ — текущее влагонасыщение покрытия;

α, β — эмпирические коэффициенты деструкции полимерной сетки;

$t_{service}$ — нормативный срок службы покрытия.

Данная модель позволяет определить момент достижения агрессивного агента металлической подложки.

Деградация полимерного покрытия под действием ультрафиолетового излучения и влаги аппроксимируется уравнением убывания массы:

$$\frac{dM}{dt} = -kM \quad (5)$$

где:

M — остаточная масса (доля) покрытия;

k — константа скорости деградации материала.

Числовое решение данного уравнения характеризует устойчивость покрытия к эксплуатационному старению.

Кинетика электрохимических реакций на межфазной границе описывается уравнением Тафеля:

$$i = i_0 \left(e^{\frac{\alpha n F \eta}{RT}} - e^{-\frac{(1-\alpha) n F \eta}{RT}} \right) \quad (6)$$

где:

i — плотность тока коррозии;

i_0 — ток обмена, характеризующий реакционную способность системы;

η — перенапряжение на электроде;

α — коэффициент переноса заряда;

n — число электронов, участвующих в реакции;

F — постоянная Фарадея;

R — универсальная газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Краевое условие на границе раздела «покрытие – металлическая подложка» $x = L$ связывает диффузионный поток $J(L, t)$ с кинетикой электрохимического растворения Тафеля:

$$i_{corr}(t) = i_0 \cdot \frac{c(L,t)}{c_{sat}} \cdot \exp\left(\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right) \quad (7)$$

Сопоставление значений тока коррозии даёт количественную оценку барьерных свойств покрытия.

Ресурс защитного барьера рассчитывался на основе эмпирической модели долговечности:

$$t_{fail} \approx \frac{L^2}{D} + \frac{1}{k} \quad (8)$$

где:

L — прогнозируемый срок службы покрытия;

h — толщина нанесённого слоя;

D — коэффициент диффузии агрессивных веществ;

v — скорость абразивного износа поверхности.

Численное моделирование и компьютерная симуляция применяются как мощные инструменты исследования коррозионных процессов и разработки систем защиты [11, 12]. Современное программное обеспечение описывает перенос ионов и нейтральных частиц в электролите, а также распределение тока в металлических конструкциях. Специализированные модули коррозии позволяют воспроизводить реакции переноса заряда на границе металл–электролит с опорой на встроенную термодинамическую базу данных электродных потенциалов. Моделирование ведётся в одно-, двух- и трёхмерной постановке методами конечных и граничных элементов. Круг имитируемых явлений охватывает гальваническую, точечную, щелевую, атмосферную и общую коррозию [13], кислотно-щелочное разрушение в нефтегазовых системах, коррозию арматуры в бетоне и воздействие блуждающих токов. В основе всех этих сценариев лежат единые

электрохимические закономерности переноса заряда и массы. Граничные условия и поверхностные реакции задаются гибко [14]. Электролит может быть задан как тонкий плёночный слой, пористая среда или жидкая фаза. Платформа допускает сопряжение модуля коррозии с модулями теплопередачи и строительной механики, что открывает возможность моделирования коррозионного растрескивания под напряжением и деградации бетонного покрытия [15].

Программный комплекс для расчёта коррозионных параметров построен на ключевых библиотеках экосистемы Python, каждая из которых выполняет конкретную функцию:

- `streamlit` (псевдоним `st`): фреймворк для создания интерактивного веб-интерфейса без применения HTML, CSS или JavaScript. Библиотека обрабатывает взаимодействие с пользователем, обновление виджетов и управление состоянием сессии (`st.session_state`). Предоставляются готовые элементы управления: кнопки, ползунки, поля ввода, загрузчики файлов, а также методы отображения таблиц, графиков и математических формул.

- `pandas` (псевдоним `pd`): базовый инструмент для работы с данными в формате `DataFrame`. В приложении используется для:

- чтения данных из CSV и Excel-файлов (`pd.read_csv`, `pd.ExcelFile`); — структурирования информации для удобного доступа и манипуляций;

- фильтрации, сортировки и обработки пропущенных значений (`dropna`, `fillna`, `pd.NA`);

- приведения столбцов к числовому типу (`pd.to_numeric`, `errors='coerce'`);

- подготовки данных для регрессионного анализа и визуализации;

- формирования итоговых таблиц для вывода на экран и выгрузки; использования `st.data_editor` для интерактивного редактирования данных пользователем.

- `numpy` (псевдоним `np`): библиотека для высокопроизводительных числовых операций. Используется совместно с `pandas` и `statsmodels` для работы с многомерными массивами данных.

Применение описанного метода позволяет определить расчётный период безотказной защиты металла и подобрать параметры покрытия, соответствующие конкретным условиям эксплуатации.

Результаты и их обсуждение.

Проектирование эффективных систем защиты от коррозии требует детального изучения механизмов переноса массы в объеме диэлектрической пленки. Чтобы автоматизировать повторяющиеся вычисления и позволить анализировать результаты без задержек, исследователи создали собственное приложение на Python. Его интерактивная веб-оболочка функционирует с помощью библиотеки `Streamlit`.

Программа представляет собой веб-приложение с интуитивно понятным интерфейсом, предназначенное для инженеров, исследователей или профессионалов, работающих с данными о коррозионной стойкости материалов и покрытий. Он предлагает два основных аналитических модуля: регрессионный анализ для определения зависимости между факторами и показателями и модуль анализа коррозии для сравнения показателей различных материалов с течением времени. Приложение имеет следующую файловую структуру, характерную для многостраничных приложений `streamlit`:

- `app.py`: является точкой доступа, устанавливает общие настройки приложения, отображает домашнюю страницу с приветствием и описанием.

- подстраницы/: подпакет со скриптами отдельных страниц. Файлы с кодом для отдельных рабочих окон сгруппированы в отдельную директорию. За счет этого `Streamlit` может самостоятельно управлять переходами между страницами и выстраивать удобную навигацию для пользователя.

Раздел "Главная" (`app.py`) приведены на рисунке 1. Цель этого раздела дать общее введение в приложение и служит отправной точкой. Его основные функции:

- регулирует общие параметры страницы (`st.set_page_config`): широкий макет (`layout="wide"`), заголовок вкладки браузера, значок, статус боковой панели по умолчанию.
- Отображает основную тему и вводный текст, описывающий цель приложения и доступные разделы;

- перенаправляет пользователя на использование боковой панели для навигации;
- Streamlit показывает, что благодаря Session State данные могут храниться между страницами.

Пользователь имеет возможность вводить исходные параметры симуляции (коэффициенты диффузии, константы скоростей реакций, толщины слоев) вручную через интерактивные поля ввода или загружать готовые экспериментальные данные в формате таблиц CSV (рисунок 1). Импорт выполняется мгновенно.

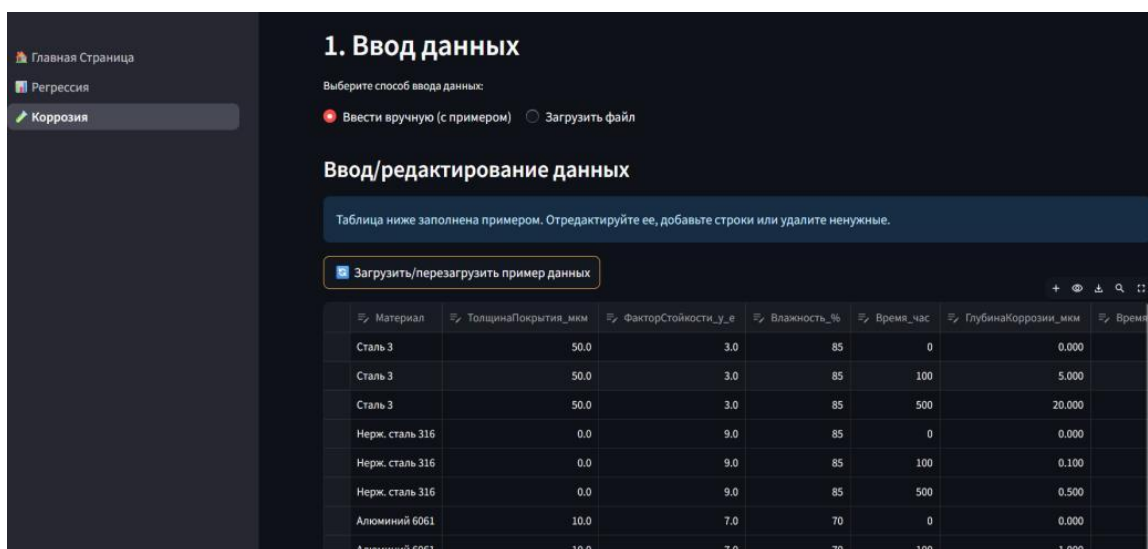


Рисунок 1 – Окно ввода данных разрабатываемого программного комплекса

После считывания данных система запускает вычислительные модули, рассчитывающие временную динамику изменения концентраций коррозионно-активных агентов и падение защитных свойств во времени.

Окно проверки данных выполняет следующие действия:

- проверяет наличие обязательных столбцов ('Материал', 'Время_n').
- пытается преобразовать известные числовые столбцы в числовой формат (`errors='coerce'`).
- проверяет наличие NaN в обязательных столбцах после ввода/загрузки.
- предварительный просмотр: в складном блоке (`st.expander`) отображает первые строки данных, введенных после операции преобразования, и информацию о типах данных.
- предупреждает о существовании NaN

Графики строятся автоматически (рисунок 2). Результаты выводятся на интерактивный холст.

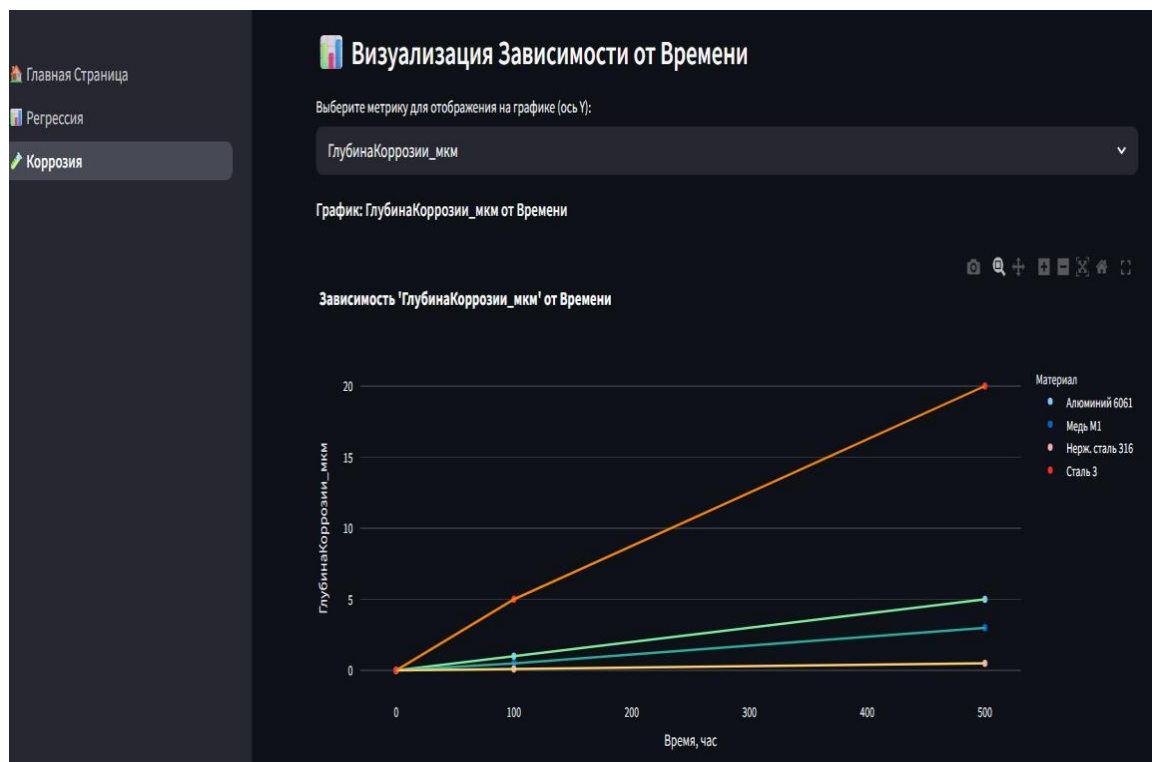


Рисунок 2 – Сравнение временных зависимостей показателей коррозии

Дополнительное сравнение коррозионной стойкости выполняет следующие функции:

- Предоставляет поле выбора для выбора конкретного материала из списка.
- В виде карт показывает набор основных показателей для выбранного материала из сводной таблицы (st.metric) использование специальной функции для форматирования значений и обработки разрешений. Сводная таблица организована в столбцы.
- Сводную таблицу можно скачать (в форматах CSV и Excel).

Программа осуществляет автоматическое ранжирование исследуемых образцов по уровню их коррозионной стойкости на основе расчета времени прорыва защитного слоя t_{fail} . Данные сводятся в общую таблицу. Для наглядного сравнения свойств различных покрытий в системе предусмотрен модуль детального анализа, позволяющий выводить ключевые параметры выбранного материала с помощью интерактивных карточек метрик (рисунок 3). Это упрощает выбор материала. Сформированные таблицы и графики могут быть экспортированы для дальнейшей статистической обработки.

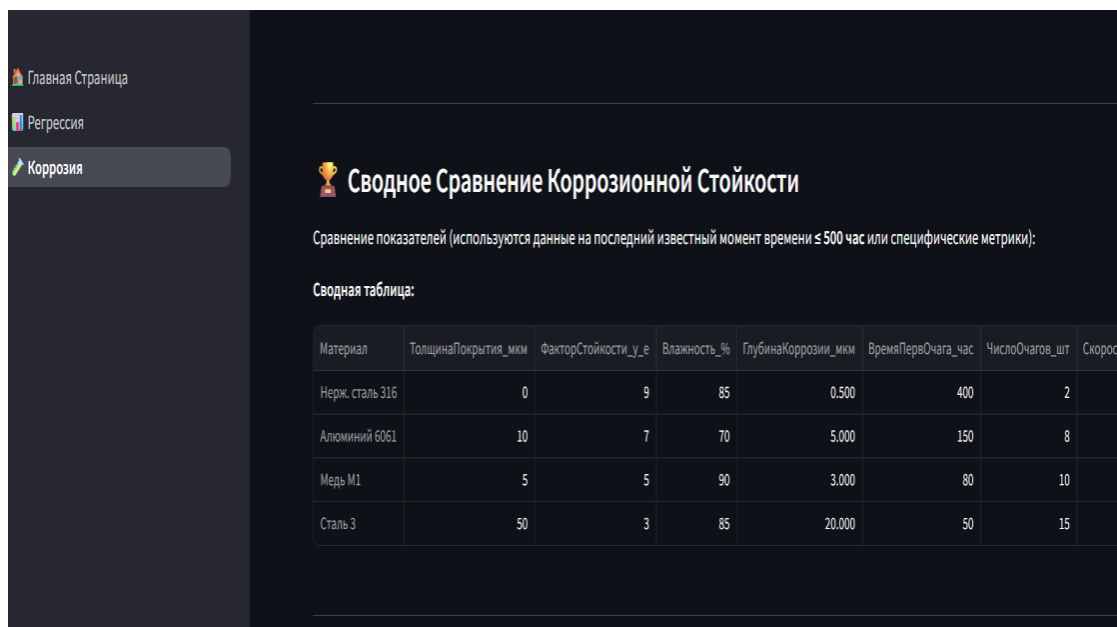


Рисунок 3 – Дополнительное окно сравнения коррозионной стойкости

В разделе Визуализация рассматривается график сравнения фактических и прогнозных значений Y (plotli). OLS генерируется линией тренда и осевыми гистограммами (рис.4).

- Создает график остатков Vs. Предполагаемые значения (plotly.express.scatter) для анализа распределения отходов.

- Рисует 3D-график, показывающий фактические точки данных и плоскость (или поверхность) регрессии в трехмерном пространстве, если выбраны ровно два фактора (plotly.graph_objects).

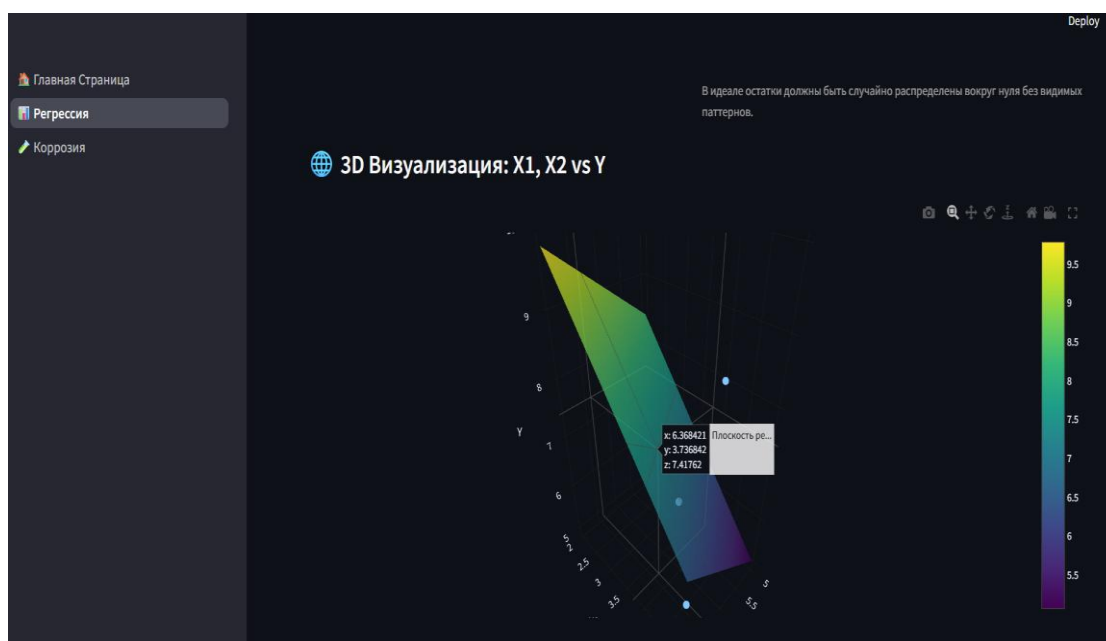


Рисунок 4 – Окно трехмерной визуализации

Загрузка результатов позволяет пользователю загружать следующие данные:

- таблица с исходными данными, фактическими значениями Y , прогнозируемыми значениями Y и остатками (в форматах CSV и Excel).

- таблица с коэффициентами регрессии и их краткая статистика (в форматах CSV и Excel).

- обработка ошибок: улавливает фактические ошибки (например, `np.linalg.LinAlgError` мультиколлинеарный) и общие исключения, сообщения об ошибках и следы стека для отладки. Загрузка результатов организована так, как показано на рисунке 5.

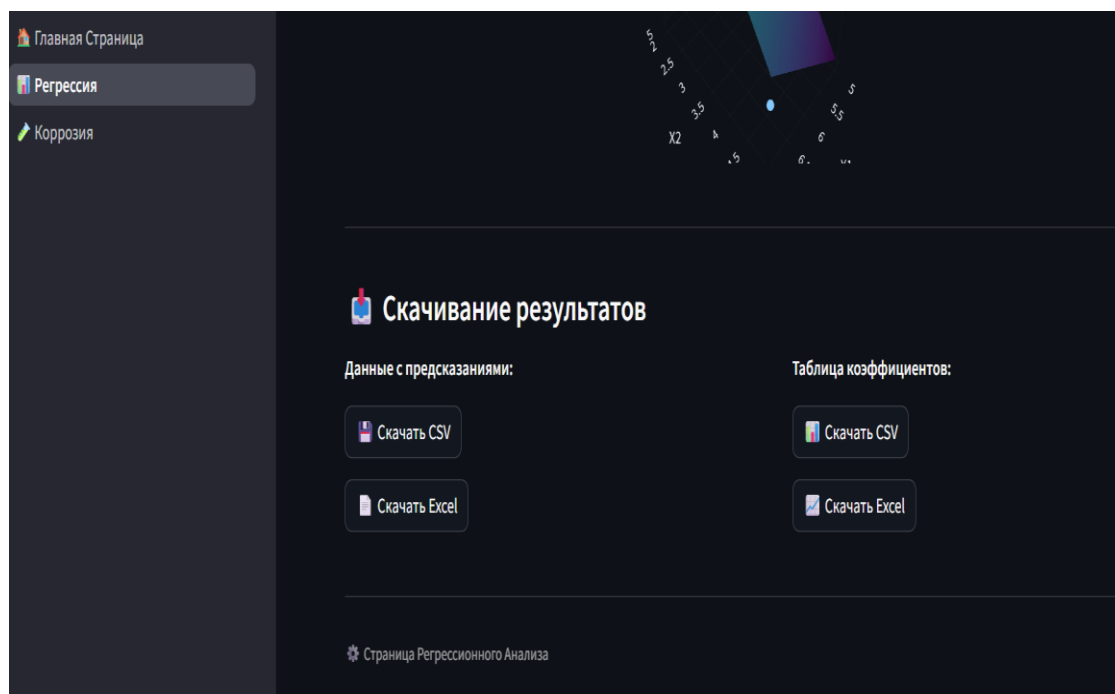


Рисунок 5 – Окно загрузки данных

Перспективы интеграции программного комплекса с аппаратно-сенсорными системами (IoT).

Для трансформации разработанного программного комплекса в полноценную систему предиктивного мониторинга и предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance) спроектирована концептуальная архитектура двунаправленного информационного обмена с внешними аппаратно-сенсорными модулями.

Архитектура построена на использовании промышленных протоколов передачи данных в реальном времени:

1. Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): применяется для периодического сбора первичных метрик (уровня относительной влажности, температуры окружающей среды, электрического сопротивления полимерной матрицы и тока подпленочной коррозии) с распределенной сети физических датчиков (коррозионных трекеров и влагомеров), смонтированных на контролируемых объектах.

2. REST API на базе фреймворка FastAPI/Flask: выступает промежуточным связующим звеном (middleware) между брокером сообщений и веб-приложением на Streamlit. Через API-эндпоинты выполняется валидация, первичная фильтрация и запись поступающих временных рядов в базу данных (PostgreSQL/TimescaleDB).

Считанные в режиме реального времени параметры среды автоматически передаются в расчетное ядро программы. Алгоритм осуществляет динамический перерасчет текущего коэффициента диффузии $D(W, t)$ и обновляет прогноз остаточного ресурса покрытия t_{fail} . При превышении критических пороговых значений тока коррозии i_{corr} или ускоренной деградации полимера веб-интерфейс формирует автоматическое оповещение для инженерно-технического персонала.

Предложенная схема интеграции закладывает основу для поэтапного перехода разработанной модели к индустриальному формату цифрового двойника антикоррозионной защиты.

Заключение.

В результате выполненной научно-исследовательской работы спроектировано и реализовано кроссплатформенное программное обеспечение на базе веб-фреймворка Streamlit. Успешная апробация созданного инструментария подтвердила его высокую надежность и эффективную функциональность при обработке массивов экспериментальных данных и численном моделировании процессов переноса массы и заряда в антикоррозионных пленках.

Путем объединения уравнений диффузии Фика, электрохимической кинетики Тафеля и моделей механического износа в единую расчетную систему была достигнута высокая точность прогнозирования остаточного ресурса покрытий. Расчеты подтверждены лабораторными тестами. Практическая ценность предложенного подхода заключается в возможности оптимизации толщины и химического состава наносимого слоя непосредственно на этапе проектирования. Это исключает необходимость проведения долгих натурных тестов.

Интеграция разработанного программного комплекса в контур промышленного предиктивного обслуживания технологического оборудования позволит существенно снизить затраты на внеплановый ремонт. Надежность повышается многократно. Дальнейшее развитие проекта предполагает подключение баз данных коммерческих материалов и адаптацию расчетных модулей для работы с датчиками систем мониторинга коррозии в реальном времени.

Список использованной литературы

1. Haldhar, R., Kim, S.-C., Berdimurodov, E., Chaudhary, M. (2021). Corrosion Inhibitors: Industrial Applications and Commercialization. In: Sustainable Corrosion Inhibitors II: Synthesis, Design, and Practical Applications. ACS Symposium Series; (1404), 219–235. DOI: 10.1021/bk-2021-1404.ch010.
2. Zakeri, A., Bahmani, E. & Sabour Rouh Aghdam, A. (2022). Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. Corrosion Communications; 5, 25–38. DOI: 10.1016/j.corcom.2022.03.002.
3. Al Jahdaly, B.A., Maghraby, Y.R., Ibrahim, A.H., Shouier, K.R., Alturki, A.M. & El-Shabasy, R.M. (2022). Role of green chemistry in sustainable corrosion inhibition: A review on recent developments. Materials Today Sustainability; 20, 100242. DOI: 10.1016/j.mtsust.2022.100242.
4. Khan, M.A.A., Irfan, O.M., Djavanroodi, F. & Asad, M. (2022). Development of Sustainable Inhibitors for Corrosion Control. Sustainability; 14(15), 9502. DOI: 10.3390/su14159502.
5. Aslam, R., Mobin, M., Zehra, S. & Aslam, J. (2022). A comprehensive review of corrosion inhibitors employed to mitigate stainless steel corrosion in different environments. Journal of Molecular Liquids; 364, 119992. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.119992.
6. Lee, H., Gray, S., Zhao, Y. & Castelluccio, G.M. (2022). Machine learning applied to identify corrosive environmental conditions. Frontiers in Materials; 9, 830260. DOI: 10.3389/fmats.2022.830260.
7. Ma, S., Du, Y., Wang, S. & Su, Y. (2023). Application of machine learning in material corrosion research. Corrosion Reviews; 41(4), 417–426. DOI: 10.1515/corrrev-2022-0089.
8. Ma, J., Dai, J., Guo, X., Fu, D., Ma, L., Keil, P., Mol, A. & Zhang, D. (2023). Data-driven corrosion inhibition efficiency prediction model incorporating 2D–3D molecular graphs and inhibitor concentration. Corrosion Science; 222, 111420. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111420.

9. Hakimian, S., Pourrahimi, S., Bouzid, A.-H. & Hof, L.A. (2023). Application of machine learning for the classification of corrosion behavior in different environments for material selection of stainless steels. *Computational Materials Science*; 228, 112352. DOI: 10.1016/j.commatsci.2023.112352.
10. Silakorn, P., Jantrakulchai, N., Wararatkul, N., Wanwilairat, S., Kangkachit, T., Techapiesancharoenkij, R., Rakthanmanon, T. & Hanlumyuang, Y. (2023). Top-of-line corrosion via physics-guided machine learning: A methodology integrating field data with theoretical models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*; 221, 110558. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110558.
11. Vangrunderbeek, V., Coelho, L.B., Zhang, D., Li, Y., Van Ingelgem, Y. & Terry, H. (2023). Exploring the potential of transfer learning in extrapolating accelerated corrosion test data for long-term atmospheric corrosion forecasting. *Corrosion Science*; 225, 111619. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111619.
12. Zeng, C., Neils, A., Lesko, J. & Post, N. (2024). Machine learning accelerated discovery of corrosion-resistant high-entropy alloys. *Computational Materials Science*; 237, 112925. DOI: 10.1016/j.commatsci.2024.112925.
13. Kuang, J. & Long, Z. (2024). Prediction model for corrosion rate of low-alloy steels under atmospheric conditions using machine learning algorithms. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*; 31, 337–350. DOI: 10.1007/s12613-023-2679-5.
14. Özkan, C., Sahlmann, L., Feiler, C., Zheludkevich, M.L., Lamaka, S.V., Sewlikar, P., Kooijman, A., Taheri, P., Mol, A. (2024). Laying the experimental foundation for corrosion inhibitor discovery through machine learning. *npj Materials Degradation*; 8, 21. DOI: 10.1038/s41529-024-00435-z.
15. Dong, Z., Ding, L., Meng, Z., Xu, K., Mao, Y., Chen, X., Ye, H. & Poursaei, A. (2024). Machine learning-based corrosion rate prediction of steel embedded in soil. *Scientific Reports*; 14, 18194. DOI: 10.1038/s41598-024-68562-w.

ҚОРҒАНЫШ ҚАПТАМАЛАРЫНЫҢ КОРРОЗИЯҒА ТӨЗІМДІЛІК ПАРАМЕТРЛЕРІН БАҒАЛАУ МЕН ВИЗУАЛИЗАЦИЯЛАУҒА АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕНДІ ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа: Жұмыс деректерді өңдеуге, визуализацияға және қорғаныс жабындарының коррозияға төзімділігін болжамды талдауға арналған арнайы веб-интерфейсті әзірлеуге және бағдарламалық қамтамасыз етуге бағытталған. Мақалада агрессивті орталардың диффузия теңдеулерін полимерлі матрицалар (Фиктің екінші заңы), металл субстраттың электрохимиялық еру кинетикасы (Тафель теңдеуі) және қорғаныс қабаттарының деградациясының эмпирикалық модельдері арқылы біріктіретін математикалық аппарат ұсынылған. Ұсынылған формализмдер негізінде Python тілін, Streamlit шеңберін және pandas, NumPy және plotly кітапханаларын қолдана отырып, интерактивті бағдарламалық жасақтама жасалды. Әзірленген құрал эксперименттік деректерді енгізу мен сүзуді автоматтандыруға, көп факторлы регрессиялық талдау жүргізуге, 2D және 3D графикалық тәуелділіктерді құруға, сондай - ақ жабындардың ақаусыз жұмысының есептік ресурсын болжауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыстың қолданбалы пайдасы оқшаулағыш қосылыстардың оңтайлы сипаттамаларын іздеу процесінде эксперименттер санын едәуір азайтуға көмектесетін ыңғайлы цифрлық егізді қалыптастырудан тұрады.

Түйін сөздер: коррозияға төзімділік, бағдарламалық шешім, компьютерлік модельдеу, Python, Streamlit, полимерлі пленкалар, регрессия әдістері, ақпаратты графикалық түрде көрсету.

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR ASSESSING AND VISUALIZING CORROSION RESISTANCE PARAMETERS OF PROTECTIVE COATINGS

Abstract: The work is devoted to the development and software implementation of a specialized web interface for data processing, visualization and predictive analysis of corrosion resistance of protective coatings. The article presents a mathematical apparatus combining the equations of diffusion of aggressive media through polymer matrices (Fick's second law), the kinetics of electrochemical dissolution of a metal substrate (Tafel equation) and empirical models of degradation of protective layers. Based on the proposed formalisms using Python, the Streamlit framework, and the Pandas, NumPy, and Plotly libraries, an interactive software package was designed. The developed tool makes it possible to automate the input and filtering of experimental data, perform multifactorial regression analysis, build 2D and 3D graphical dependencies, and predict the estimated uptime of coatings. The applied benefit of this work is the formation of a convenient digital twin, which helps to significantly reduce the number of experiments in the process of searching for optimal characteristics of insulating compounds.

Keywords: corrosion resistance, software solution, computer simulation, Python, Streamlit, polymer films, regression methods, graphical data visualization.

Сведение об авторах

Егенова Алия Мейрамбековна	PhD, старший преподаватель, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: aegenova@mail.ru.
Куракбаева Севара Джумагалиевна	кандидат технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: sevam@mail.ru.
Калбаева Айжан Тажихановна	кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: atkalbaeva@mail.ru.
Амандиков Мадамин Алдамурадович	кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Информатика и математика», Университет Дружбы народов имени А.Куатбекова, Шымкент, Казахстан, e-mail: amandikov59@bk.ru
Жуматаев Нурлыбек Срайлович	PhD, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан, e-mail: nuralmiras@mail.ru

Авторлар туралы мәлімет

Егенова Алия Мейрамбековна	PhD, аға оқытушы, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: aegenova@mail.ru.
Куракбаева Севара Джумагалиевна	техника ғылымдарының кандидаты, профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: sevam@mail.ru.
Калбаева Айжан Тажихановна	техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: atkalbaeva@mail.ru.
Амандиков Мадамин Алдамурадович	техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Информатика және математика» кафедрасының меңгерушісі, А. Куатбеков атындағы Халықтар Достығы университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: amandikov59@bk.ru
Жуматаев Нурлыбек Срайлович	PhD, доцент, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, e-mail: nuralmiras@mail.ru

Information about the authors

Yegenova Aliya Meirambekovna	PhD, Senior Lecturer, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: aegenova@mail.ru.
Kurakbayeva Sevara Dzhumagalievna	Candidate of Technical Sciences, Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: sevam@mail.ru.
Kalbayeva Aizhan Tazhikhanovna	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: atkalbaeva@mail.ru.
Amandikov Madamin Aldamuradovich	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Mathematics, Peoples' Friendship University named by A.Kuatbekov, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: amandikov59@bk.ru
Zhumataev Nurlybek Sraiovich	PhD, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, city Shymkent, Kazakhstan, e-mail: nuralmiras@mail.ru