

УДК 621.565+620.9

## Разработка предиктивной модели коррозии и засорения теплообменной аппаратуры на основе CFD-моделирования и машинного обучения для увеличения межремонтного пробега

Верейн Николай Владимирович<sup>(\*)</sup>

vereinnv@sk.sibur.ru

ООО «Сибур-Кстово», Нижегородская область, Кстово, Россия

**Аннотация.** В сложных условиях эксплуатации теплообменных аппаратов коррозия и засорение поверхностей существенно сокращают межремонтные интервалы и вызывают внеплановые остановки. Представлен подход к построению предиктивной модели, объединяющий возможности CFD-моделирования и методов машинного обучения для прогноза и оптимизации технического обслуживания. Описаны этапы формирования обучающей выборки, принципы построения цифровой модели и предложения по оптимизации режимов эксплуатации. Сформулированы основные физические параметры, влияющие на развитие дефектов.

**Ключевые слова:** теплообменник, коррозия, засорение, CFD-моделирование, машинное обучение, оптимизация обслуживания, межремонтный пробег, эксплуатация, диагностика, энергоэффективность

**Введение.** Теплообменные аппараты различных типов (пластиночные, кожухотрубчатые и др.) применяются в химической, нефтегазовой, энергетической промышленности для передачи тепла между рабочими средами. В течение эксплуатации оборудование сталкивается с процессами коррозии и засорения рабочих поверхностей, активизируемых агрессивными компонентами среды, неблагоприятными температурными и гидродинамическими режимами. Вовремя не диагностированные дефекты приводят к потерям производительности, превышению энергозатрат и незапланированным ремонтам, снижая экономическую эффективность предприятия. Необходимость перехода к современным методам технического обслуживания по состоянию требует разработки интегрированных цифровых моделей, способных прогнозировать развитие коррозии и образования отложений с учетом реальных эксплуатационных данных [1].

**Постановка задачи.** Исходные данные включают:

- тип и конструкцию теплообменника,
- режимы работы (температура, давление, скорости потоков),
- состав рабочей среды (агрессивность, загрязняющие компоненты),
- историю эксплуатации и ремонтов.

Целью работы является создание алгоритма построения предиктивной цифровой модели, умеющей прогнозировать вероятность возникновения дефектов и оптимизировать межремонтный пробег аппарата.

В качестве критериев оптимальности приняты:

- минимизация потерь теплопередачи,

- уменьшение частоты внеплановых ремонтов,
- повышение энергоэффективности работы оборудования.

**Основные физические величины.** Температура потоков и рабочих поверхностей — контролирует скорость реакций коррозии и образования осадков [1, 2].

Скорость и распределение потока — определяет зоны интенсивного отложения частиц и вымывания коррозионных продуктов.

Давление рабочей среды — воздействует на интенсивность течения и фазовые переходы.

Состав среды (кислоты, соли, примеси) — определяет потенциальную агрессивность и способность образовывать твердые отложения.

Геометрия и шероховатость поверхности — влияет на локализацию коррозии и накопления загрязнений.

Толщина трехфазного слоя отложений — показатель текущего состояния, динамически меняющий параметры аппарата [1, 2].

Алгоритм построения предиктивной модели коррозии и засорения теплообменной аппаратуры основывается на комплексном подходе с использованием CFD-моделирования и машинного обучения [3]. Ниже приведено подробное описание этапов алгоритма.

1. Сбор и анализ исходных данных. На этом этапе собираются все необходимые данные о конструкции теплообменной аппаратуры, технических параметрах, режимах эксплуатации и химическом составе рабочей среды. Также учитываются предыдущие случаи коррозии и засорения, данные диагностики и ремонта. Это обеспечивает полноту и качество набора данных для последующего моделирования и обучения [1, 4].

2. Создание геометрической и расчетной модели. Формируется точная трехмерная геометрическая модель аппарата с учетом всех конструктивных особенностей. Подготавливается расчетная сетка с необходимой детализацией, особенно в зонах ожидаемых интенсивных потоков, температурных градиентов и возможных очагов коррозии и осадкообразования. Выбираются модели физики потока, включая турбулентность, тепло- и массообмен, химические реакции [5].

3. CFD-моделирование. Производится численное моделирование тепловых процессов, гидродинамики и химического воздействия. Рассчитываются поля скоростей, температур, концентраций агрессивных компонентов и продуктов коррозии. Анализируются потоки, зона застойных течений, местные аномалии, создающие условия для накопления отложений и ускорения коррозии [3].

4. Извлечение параметров. С полученных результатов CFD извлекаются информативные признаки — локальные температуры, скорости, поля концентраций, распределение давлений и состояния поверхностей. Эти данные вместе с историей эксплуатации формируют обучающую выборку для последующих моделей машинного обучения [3].

5. Обучение модели машинного обучения. Выбираются и настраиваются алгоритмы машинного обучения (градиентный бустинг, нейронные сети и др.),

происходит обучение моделей на подготовленных данных. Проводится кросс-валидация и оптимизация параметров для достижения высокой точности прогноза вероятности развития коррозии и засорения [3].

6. Валидация и тестирование. Модель тестируется на независимом наборе данных для оценки точности и устойчивости предсказаний. При необходимости вносятся корректировки, осуществляется дообучение. Полученная модель способна предсказывать риск дефектов для новых условий эксплуатации и давать рекомендации по оптимизации режимов.

7. Внедрение и применение. Предиктивная модель интегрируется в систему мониторинга и управления теплообменной аппаратурой. Используется для планирования технического обслуживания, определения сроков ремонта и оптимизации условий эксплуатации, что способствует увеличению межремонтного пробега и снижению затрат.

Предлагаемый алгоритм обеспечивает системный и комплексный подход к прогнозированию и управлению состоянием теплообменных аппаратов, опираясь на физически обоснованные модели и современные методы данных, что соответствует передовым инженерным практикам.

**Заключение.** В работе предложен алгоритм разработки цифровой предиктивной модели и выделены основные физические параметры процессов коррозии и засорения теплообменных аппаратов. Дальнейшее развитие темы включает интеграцию с производственными системами мониторинга, автоматизацию сбора данных и расширение библиотеки моделей для различных типов оборудования. Развитие и внедрение предиктивных моделей на базе CFD и машинного обучения способствуют росту надежности и эффективности оборудования, снижению числа внеплановых ремонтов и переходу к сервису по фактическому состоянию.

## Список источников

- [1] Кретинин А.В. Оптимизация конструкции теплообменного аппарата методами вычислительной гидромеханики. *Теплоэнергетика*, 2015, № 5, с. 45–52.
- [2] Mills D. *Heat Exchanger Design Guide*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2015, 280 p.
- [3] Monakhov M. Optimization of heat exchanger design using CFD modeling and machine learning. *Chemical Engineering Journal*, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0119479>
- [4] Шакиров Р.А. *Оптимальные теплогидравлические характеристики поверхностных интенсификаторов теплообмена*. Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2022, 150 с.
- [5] Кузьмичев В.С., Омер Х.Х.О., Ткаченко А.Ю., Бобрик А.А. Математическая модель расчета массы теплообменника в задачах оптимизации параметров рабочего процесса авиационных газотурбинных двигателей. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2019, т. 18, № 3, с. 67–80.