
МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ТУРБОУСТАНОВОК ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС: КЛАССИФИКАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

© 2024 г. Г. В. Томаров^{а, *}, В. Н. Ловчев^{б, **}, А. Ф. Громов^{б, ***}, А. А. Шипков^{а, *}

^аООО “Геотерм-М”, ул. Лефортовский Вал, д. 24, Москва, 111250 Россия

^бАО “Концерн Росэнергоатом”, Ферганская ул., д. 25, Москва, 109507 Россия

*e-mail: geoatom.m@gmail.com

**e-mail: lovchev@rosenergoatom.ru

***e-mail: gromov-af@rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 02.06.2024 г.

Принята к публикации 04.07.2024 г.

Эксплуатация энергоблоков АЭС сопровождается развитием различных механизмов деградации металла (МДМ) под воздействием рабочей среды. Предупреждение повреждений и исключение внезапных разрушений оборудования и трубопроводов (ОиТ) на действующих АЭС зависит от своевременного выявления тех элементов и узлов, в которых создаются предпосылки для проявления и интенсификации механизмов деградации металла. При этом поиск причин возникновения повреждений линий трубопроводов и деталей оборудования должен основываться на определении доминирующего МДМ. От правильности решения этих задач зависит эффективность разрабатываемых технических мероприятий по восстановлению и предупреждению в дальнейшем подобных повреждений. Несмотря на значительный опыт и накопленные статистические данные о повреждениях металла рабочих контуров энергоблоков АЭС, установление идентификационных признаков и выявление доминирующих МДМ в условиях эксплуатации турбоустановок энергоблоков атомных станций остаются весьма актуальными. Это подтверждается существующими различиями в подходах к классификации МДМ и отсутствием четкой методологии в их идентификации при обнаружении дефектов и анализе случаев повреждения элементов трубопроводов и оборудования. Из-за сложности физико-химических процессов и закономерностей МДМ требуется проведение их глубокого и достаточно масштабного изучения, поэтому, как правило, исследованием конкретного МДМ занимаются отдельные специализированные научные организации и институты. Это обстоятельство затрудняет формирование единого подхода к их систематизации и классификации для получения полной картины доминирующих механизмов повреждения ОиТ турбоустановок энергоблоков атомных станций. В то же время достижения последних лет в данной области позволяют сформировать более совершенные критерии и рекомендации по классификации, а также идентификации МДМ, которые целесообразно использовать на практике, в том числе при разработке отраслевой руководящей документации по указанной тематике.

Ключевые слова: энергоблок, элементы трубопроводов и оборудования, механизм деградации металла, эрозия-коррозия, кавитационная эрозия, каплеударная эрозия, гидроабразивный износ

DOI: 10.56304/S0040363624700425

Эксплуатация энергоблоков АЭС сопряжена с повреждением оборудования и трубопроводов вследствие деградации металла под воздействием различных факторов. Такие повреждения негативно влияют на надежность и эффективность оборудования, а во многих случаях приводят к аварийным ситуациям. На рис. 1 представлены сведения о наиболее значительных авариях на АЭС мира с 1968 г. — начала эксплуатации энергоблоков с реакторными установками PWR (водо-водяной энергетический реактор) по причине

эрозионно-коррозионных разрушений [1], в том числе с человеческими жертвами. Наиболее известной является авария на АЭС Surry (США), произошедшая в 1989 г. из-за эрозионно-коррозионного разрушения трубопровода питательной воды, в результате которой были жертвы среди станционного персонала. До сих пор имеют место случаи внезапного разрушения элементов ОиТ турбоустановок энергоблоков АЭС.

Эффективность работ, направленных на анализ причин и выявление доминирующих МДМ, а

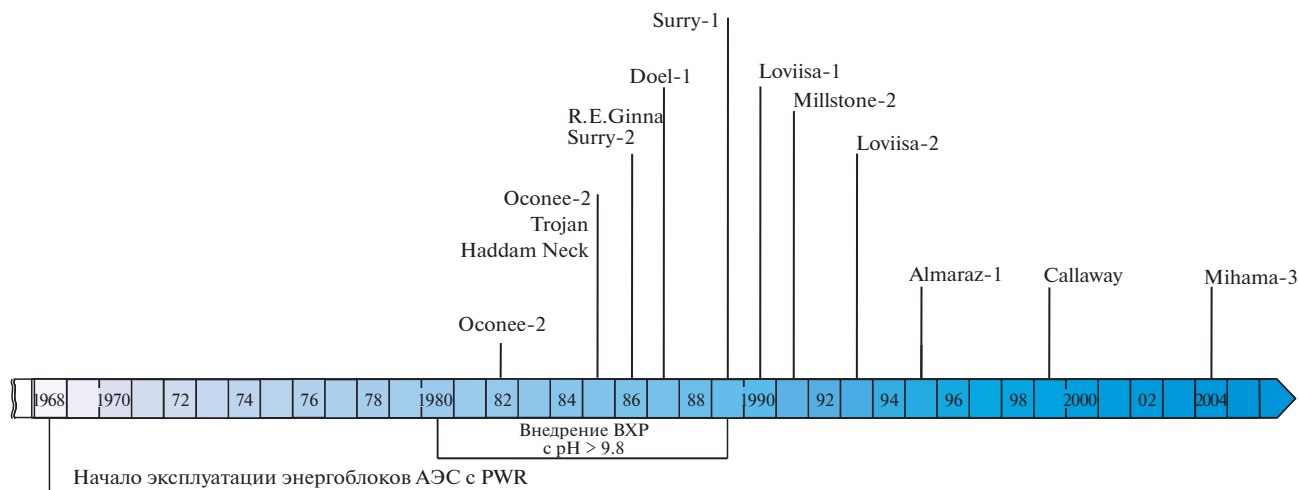


Рис. 1. Наиболее значительные аварии на атомных станциях мира с реакторными установками PWR из-за эрозионно-коррозионного износа [1]

также поиск оптимальных решений по их предупреждению зависят от правильности определения идентификационных признаков механизмов повреждения оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС. На практике неточное распознавание доминирующих механизмов деградации металла элементов ОиТ турбоустановок атомных станций влечет за собой разработку и реализацию не всегда эффективных мероприятий по восстановлению поврежденных ОиТ и предотвращению аналогичных инцидентов.

Классификационные таблицы и схемы предназначены для анализа условий и результатов воздействия того или иного МДМ, т.е. должны способствовать выявлению/идентификации доминирующих механизмов в конкретных случаях повреждения элементов ОиТ. Структура классификации МДМ ОиТ энергоблоков АЭС обычно строится с учетом факторов, позволяющих сформулировать признаки МДМ, таких как:

- возможность реализации в рабочей среде определенного фазового состояния;

- выявление свойств металлов, которые обуславливают их склонность к тем или иным повреждениям;

- определение по схожему виду повреждений/разрушений металлов под воздействием механизмов деградации металла;

- установление по аналогичному функционалу поврежденного элемента и т.д.

В мировой практике известны различные подходы к классификации МДМ энергоблоков атомных станций [2–5]. В настоящее время в большинстве случаев такая классификация сводится к рассмотрению отдельных эффектов воздействия (видов повреждения), изменению состояния металла, влиянию фазового состояния рабочей

среды и т.д. Например, в работе [3] в части классификации МДМ представлены сведения о характерных эффектах старения/деградации и параметрах изменения состояния металла при проявлении различных механизмов повреждения. В [4] систематизирована информация о факторах, определяющих возможность реализации четырех видов эрозионных МДМ трубопроводов АЭС, включая фазовое состояние рабочей среды, вид поврежденной поверхности, влияние вибрации и характер кинетики развития процесса износа во времени (табл. 1).

В основу другой классификационной схемы [5] положены отличительные особенности конкретного вида разрушения под воздействием различных механизмов деградации металла (рис. 2). В этой работе указано, что для общей коррозии характерно равномерное утонение металла, для микробиологической коррозии и так называемой локальной коррозии, включающей питтинг, — локальные язвенные повреждения металла. Для коррозионного растрескивания типичным является образование сетки мелких трещин, а для коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) при механических и термических циклических нагрузках — глубокие одиночные трещины. Такие МДМ, как эрозия-коррозия (ЭК), кавитационная эрозия (КавЭ) и каплеударная эрозия (КапЭ), объединены в группу механизмов воздействия однофазных (водных) и двухфазных (влажно-паровых) потоков. Результатом их проявления становится утонение металла.

Рассмотренные примеры классификации дают ограниченную информацию о МДМ и не обеспечивают однозначного определения доминирующего механизма повреждения.

Таблица 1. Факторы, определяющие возможность и последствия реализации эрозионных МДМ трубопроводов АЭС [4]

Параметр	Механизм деградации металла			
	кавитационная эрозия	флэшинг-эрозия	каплеударная эрозия	гидроабразивный износ
Рабочая среда	Водный поток	Водный (для пред-включенных элементов), двухфазный (для поствключенных элементов)	Двухфазный поток	Одно- и двухфазный потоки
Поверхность повреждения	Существенно шероховатая	Гладкая/полированная	Существенно шероховатая	Различная
Наличие шума/вибраций	Да	Да	Нет	Нет
Скорость развития износа	Нелинейная	Нелинейная	Нелинейная	Линейная

В табл. 2 показан пример подхода к классификации, предложенный в [6], где представлены сведения о возможной реализации МДМ при использовании различных конструктивных стелей для изготовления ОиТ энергоблоков АЭС с РWR. Затемненные ячейки таблицы соответствуют наиболее вероятным МДМ, которые могут воздействовать на различные металлы в условиях конкретных рабочих трактов энергоблоков АЭС.

При этом оговаривается, что отсутствие затемнения в ячейке не исключает полностью вероятность проявления какого-либо МДМ.

Классификационная табл. 2 включает в себя более значительное количество различных механизмов деградации металла ОиТ турбоустановок энергоблоков и имеет разделы по отдельным рабочим трактам. Одним из недостатков этой классификации можно считать отсутствие в ней таких

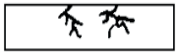
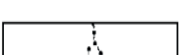
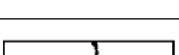
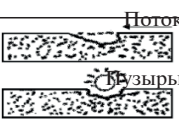
Общая коррозия		Равномерная коррозия
Микробиологическая коррозия		Микробиологическая коррозия
Локальная коррозия		- Питтинги - Щелевая коррозия
Коррозионное растрескивание		Различные виды коррозионного растрескивания
Коррозионная усталость		Трещинообразование при динамической нагрузке, но при отсутствии явного циклического нагружения
Усталость		Термическая и циклическая усталость
Коррозия под воздействием потока		- Эрозия-коррозия - Кавитационная эрозия - Каплеударная эрозия

Рис. 2. Классификация МДМ ОиТ энергоблоков АЭС и виды повреждений [5]

Таблица 2. Возможные МДМ при использовании различных сталей для изготовления ОиТ энергоблоков с PWR [6]

Металл (ОиТ контура)	Общая и локальная коррозия								Механические повреждения	
	ОК	БК	ЭК	ЩК	ПК	ГК	КРН	МБК	КУ	ТО
<i>Система охлаждения ядерного реактора, температура $t = 288–343^{\circ}\text{C}$, I и II контуры</i>										
Низколегированная и углеродистая сталь										
Сварочная нержавеющая сталь 304/316										
Сварные швы из нержавеющей стали 308/309										
Литая нержавеющая сталь CF8/CF8m										
Сплав 600, штуцеры, переходники, приваренные к штуцерам, трубы парогенератора										
Сварные швы из сплава 82/182										
<i>Питательная вода, температура $t = 121–232^{\circ}\text{C}$, деминерализованная вода, $\text{pH} = 9–10$</i>										
Трубы из углеродистой стали										
Легированная поковка 690										
<i>Свежий пар $t = 229–277^{\circ}\text{C}$, пар</i>										
Низколегированная и углеродистая сталь										
<i>Система контроля водно-химического режима (включая систему борного регулирования), температура рабочей среды $t = 46–143^{\circ}\text{C}$, I контур</i>										
Болты из низколегированной стали (предполагаются утечки)										
Сварочная нержавеющая сталь 304/316										
Сварные швы из нержавеющей стали 308/309										
Литая нержавеющая сталь CF8/CF8m										
<i>Система аварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора, температура охлаждающей среды $t = 38–66^{\circ}\text{C}$</i>										
Литая нержавеющая сталь 304/316										
Сварные швы из нержавеющей стали 308/309										
Литая нержавеющая сталь CF8/CF8m										
<i>Вода для охлаждения компонентов ядерного реактора, $t = 40–54^{\circ}\text{C}$, вода после химической водоочистки</i>										
Трубы из низколегированной и углеродистой стали/арматура										
<i>Система технического водоснабжения, техническая вода, $t = 38^{\circ}\text{C}$</i>										
Трубы из низколегированной и углеродистой стали/арматура										
Сварочная нержавеющая сталь 304/316. Трубы теплообменников										
Сварные швы из нержавеющей стали 308/309										
Трубы теплообменников из сплавов на основе меди										

Примечание. ОК – общая коррозия; БК – коррозия в присутствии борной кислоты; ЩК – щелевая коррозия; ПК – питтинговая коррозия; ГК – гальваническая коррозия; МБК – микробиологическая коррозия; КУ – коррозионная усталость; ТО – температурное охрупчивание.

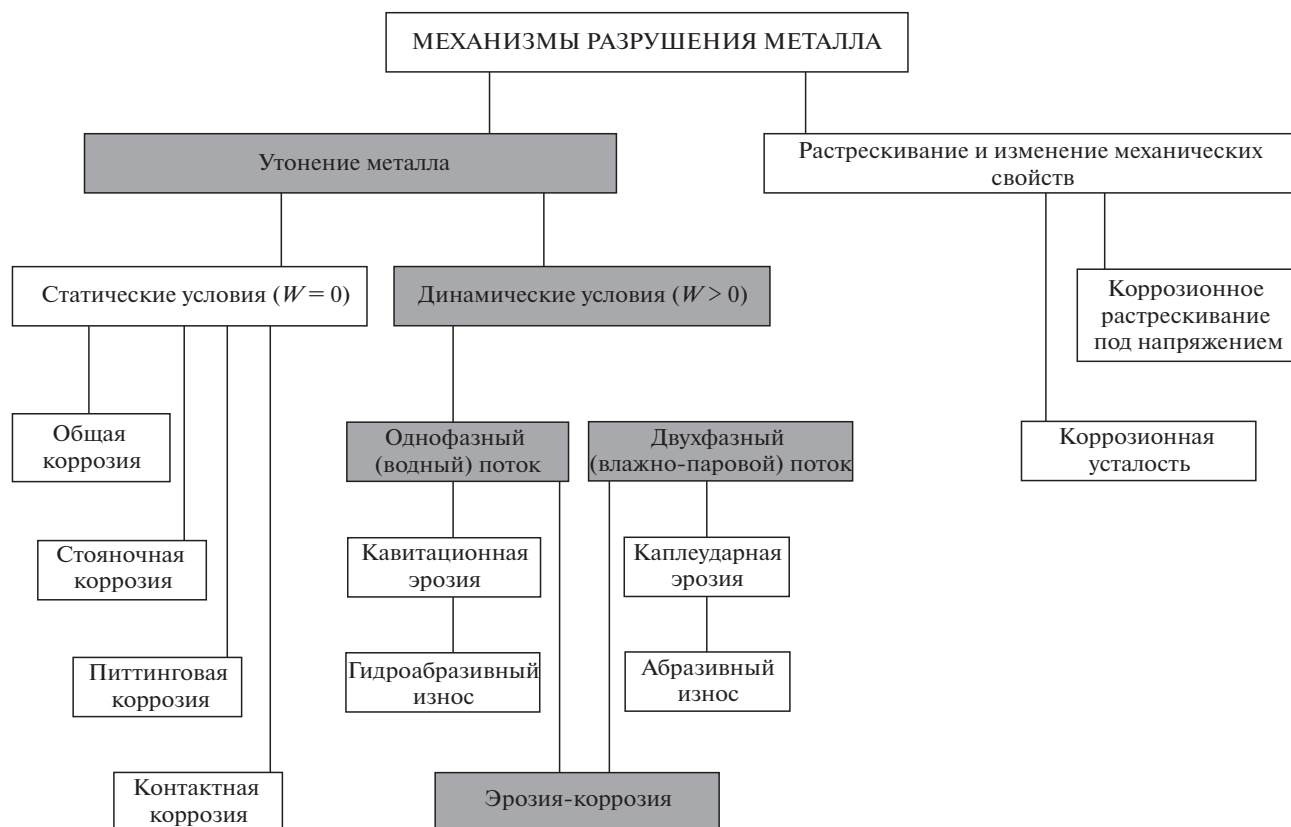


Рис. 3. Классификация основных МДМ элементов ОиТ II контура энергоблоков АЭС.
 W – скорость рабочей среды

широко распространенных МДМ, как кавитационная эрозия, каплеударная эрозия и гидроабразивный износ (ГАИ).

На рис. 3 представлена схема классификации МДМ, в которой все механизмы делятся на две группы. В первую группу включены механизмы, воздействие которых ограничивается поверхностным слоем (утонение металла), а во вторую – механизмы, приводящие к растрескиванию и образованию трещин. Следует отметить, что механизмы деградации в динамических условиях воздействия движущейся среды имеют существенные различия в однофазных (водных) и двухфазных (влажно-паровых) потоках, поэтому представлены отдельными группами. В структуру классификации включен такой механизм, как ГАИ, который обусловлен механическим воздействием твердых взвесей, находящихся в потоке рабочей среды.

Механизмом эрозии-коррозии в отечественной энергетике принято называть процесс утонения металла вследствие отвода в поток продуктов химического растворения оксидной пленки, образовавшейся из-за протекания электрохимической коррозии металла [7]. Для удобства анализа повре-

ждений и выявления доминирующего механизма ЭК ее часто разделяют на общую и локальную.

Однако в мировой практике встречаются примеры другой терминологии в определении механизма ЭК. Так, в работе [8] эрозией-коррозией называется механизм потери массы из-за механического воздействия на поверхность металла при столкновениях, истираниях или ударах, связанных с движением жидкости или газа, в сочетании с коррозией.

Важно отметить, что механизм ЭК не только становится причиной локальных утонений и разрушений элементов ОиТ, но также является главным источником железосодержащих соединений, поступающих в рабочую среду [9]. Вынос железа в водную и влажно-паровую среду конденсатно-питательного и влажно-парового трактов энергоблоков приводит к образованию отложений в парогенераторе и других элементах технологического контура.

Классификация МДМ используется при выявлении доминирующих механизмов повреждений ОиТ, систематизации статистических данных о их повреждаемости и при решении других практических задач, направленных на предупреждение разрушений элементов ОиТ энергоблоков АЭС. Вы-



Рис. 4. Статистические сведения из базы данных CODAP о доле повреждений ОиТ $\bar{N}$ энергоблоков АЭС, приходящихся на различные МДМ [8]

бор структуры и состава классификации МДМ определяется особенностями ее применения.

Исходя из этого, можно заключить, что оперативному персоналу атомных станций необходимо иметь удобную для использования классификацию, которая охватывала бы все возможные механизмы деградации и повреждений, а также включала бы их идентификационные признаки, чтобы можно было безошибочно и однозначно определить доминирующие МДМ при обнаружении дефектов и разрушений металла ОиТ энергоблоков АЭС.

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ
О ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ
И ТРУБОПРОВОДОВ АЭС**

Проблеме повреждаемости ОиТ энергоблоков АЭС уделяется большое внимание в странах, эксплуатирующих атомные станции. Ведутся систематизация и анализ статистических данных о случаях повреждения элементов II контура энергоблоков под воздействием различных МДМ с выявлением тенденций в этой области. На рис. 4 представлены некоторые выдержки из базы данных CODAP о доли повреждений ОиТ II контура энергоблоков АЭС, приходящихся на различные МДМ [8]. В этой работе объединены некоторые виды механизмов коррозионного

растрескивания, доля которых в суммарной повреждаемости составляет около 22%.

Поскольку механизмы коррозионного растрескивания в большей степени реализуются в I контуре, то в соответствии со статистическими данными можно говорить о том, что для ОиТ турбоустановок энергоблоков АЭС наибольшее количество повреждений связано с реализацией механизма ЭК. На втором месте – повреждаемость элементов трубопроводов от механической циклической усталости, что обусловлено, прежде всего, наличием вибрационных нагрузок.

Значительная часть повреждений приходится на трубопроводы II контура энергоблоков АЭС. В работе [10] представлены некоторые результаты исследований о доле различных МДМ, приведших к повреждениям трубопроводов энергоблоков атомных станций в 1985 и 2020 гг., которые позволяют оценить тенденции изменения показателей их повреждаемости (табл. 3).

Обращает на себя внимание значительный рост доли повреждений, вызванных, в первую очередь, эрозией-коррозией, а также увеличение количества повреждений вследствие механической циклической усталости металла. Наблюдается снижение в несколько раз числа случаев коррозионного растрескивания под напряжением для АЭС с ВВР, что, по всей видимости, свя-

Таблица 3. Доля различных видов МДМ в повреждениях трубопроводов II контура энергоблоков атомных станций в 1985 и 2020 гг. [10]

Механизм деградации	Тип реактора	Данные на 1985 г., %	Данные на 2020 г., %
Коррозионное растрескивание под напряжением	BWR	42.2	16.2
	PWR	5.6	5.7
Термическая циклическая усталость	BWR	14.1	0.8
	PWR	6.8	1.5
Механическая циклическая усталость	BWR	1.5	6.0
	PWR	6.3	12.7
Коррозия под воздействием потока	BWR	0	5.1
	PWR	0	14.6
Кавитационная эрозия	BWR	0	0.6
	PWR	0	1.5
Повреждения из-за конструктивных дефектов	BWR	6.6	1.6
	PWR	4.4	3.4
Гидроудар	BWR	0.2	0.2
	PWR	0.6	0.3
Эрозия-коррозия	BWR	4.4	1.7
	PWR	1.2	3.2
Стояночная (атмосферная) коррозия	BWR	1.0	0.1
	PWR	1.0	0.3
Коррозия (все прочие виды)	BWR	0	7.1
	PWR	0	17.4
Неизвестные причины повреждений	BWR	2.4	0
	PWR	1.7	0

Примечание. BWR — реактор с кипящей водой; PWR — реактор с водой под давлением.

зано с принятием дополнительных мер по их предупреждению.

Представленные статистические данные свидетельствуют о том, что необходимо уделять особое внимание решению проблем ЭК и предупреждению случаев циклической усталости металла трубопроводов энергоблоков АЭС. Результаты обработки данных о повреждаемости ОиТ энергоблоков АЭС существенно зависят от точности идентификации доминирующих МДМ в каждом конкретном случае. Вопросы определения идентификационных признаков реализации механизмов деградации металла на АЭС остаются актуальными и являются предметом дальнейшего изучения.

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИИ МЕТАЛЛА

Под идентификационными признаками следует понимать факторы, параметры и характеристики, отражающие условия и сопутствующие

эффекты реализации МДМ. Фактически идентификационные признаки отражают особенности и закономерности процессов реализации повреждений, а также их вид, вызванный воздействием конкретного механизма деградации металла.

На практике чаще всего требуется использование идентификационных признаков МДМ элементов ОиТ при решении следующих задач:

определения коренных причин и доминирующих МДМ при обнаружении дефектов/разрушений элементов ОиТ энергоблоков АЭС;

выявления элементов ОиТ энергоблоков АЭС, подверженных наиболее интенсивному воздействию МДМ, для оптимизации планирования эксплуатационного контроля металла ОиТ в целях своевременного предупреждения их повреждений.

Необходимо, чтобы в перечень идентификационных признаков были включены сведения, которые могут быть доступны для оперативного персонала АЭС, а проведение дополнительных лабораторных исследований для определения до-

минирующего МДМ с привлечением специализированных организаций требовалось бы только в исключительных случаях. Информация об идентификационных признаках и их использовании, включенная в нормативную документацию атомной отрасли, должна позволять однозначно и безошибочно решать вышеуказанные задачи.

Анализ мирового опыта и научно-технических достижений в данной области свидетельствует о том, что в условиях эксплуатации ОиТ турбоустановок энергоблоков атомных станций в перечень идентификационных признаков *механизма эрозии-коррозии* целесообразно включать следующие характеристики и показатели:

типичную структуру поврежденной поверхности металла;

фазовое состояние рабочей среды (вода, конденсат/сепарат, влажный пар, перегретый/насыщенный пар);

марку и химический состав стали (прежде всего, содержание хрома);

температуру рабочей среды;

среднерасходную скорость рабочей среды;

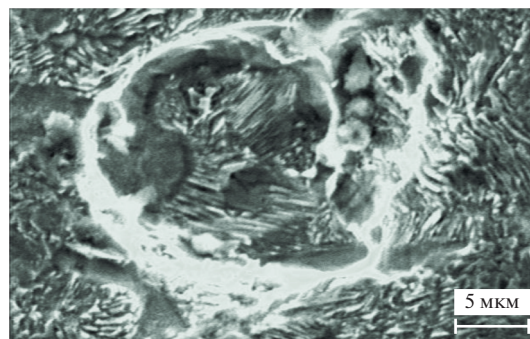
геометрические параметры проточной части элемента и предвключенного участка;

виды дефекта/повреждения от воздействия механизма деградации металла (локальное утонение, одиночная трещина, сетка трещин и т.д.).

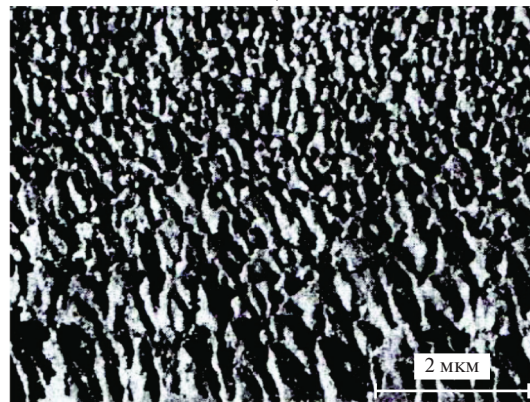
Далее идентификационные признаки ЭК металла рассматриваются более детально и некоторые из них сравниваются с аналогичными признаками таких механизмов утонения металла, как кавитационная эрозия, каплеударная эрозия и гидроабразивный износ.

Характерная структура поврежденной поверхности металла является, как правило, доступным для оперативного персонала идентификационным признаком, который выявляется при визуальном осмотре и металлографических исследованиях. Так, опыт эксплуатации АЭС показывает, что каждому механизму утонения металла в условиях работы ОиТ турбоустановок (ЭК, КавЭ, КапЭ и ГАИ) соответствуют определенный характерный внешний вид и морфология поврежденной поверхности.

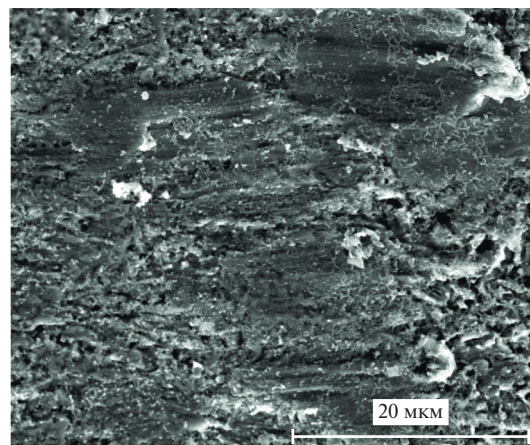
Для примера на рис. 5, *а* показан элемент поверхности металла, поврежденной кавитационной эрозией [11]. На ней хорошо видны выбоины, типичные для механических разрушений. На рис. 5, *б* представлен рельеф поверхности металла после воздействия каплеударной эрозии [12], который отличается большим количеством углублений механического происхождения. Для морфологии поверхности после воздействия гидроабразивного износа (рис. 5, *в*) [13] характерно сочетание множества углублений различных размеров с площадками более мелких эле-



а)



б)



в)

Рис. 5. Типичные примеры морфологии поврежденной поверхности металла под воздействием кавитационной эрозии (*а*), каплеударной эрозии (*б*), абразивного износа (*в*) [11]

ментов повреждения металла. Морфологические особенности поврежденной поверхности могут быть предпосылкой для выявления доминирования того или иного механизма повреждения элементов ОиТ.

На экспериментальном стенде Московского энергетического института (МЭИ) был выполнен

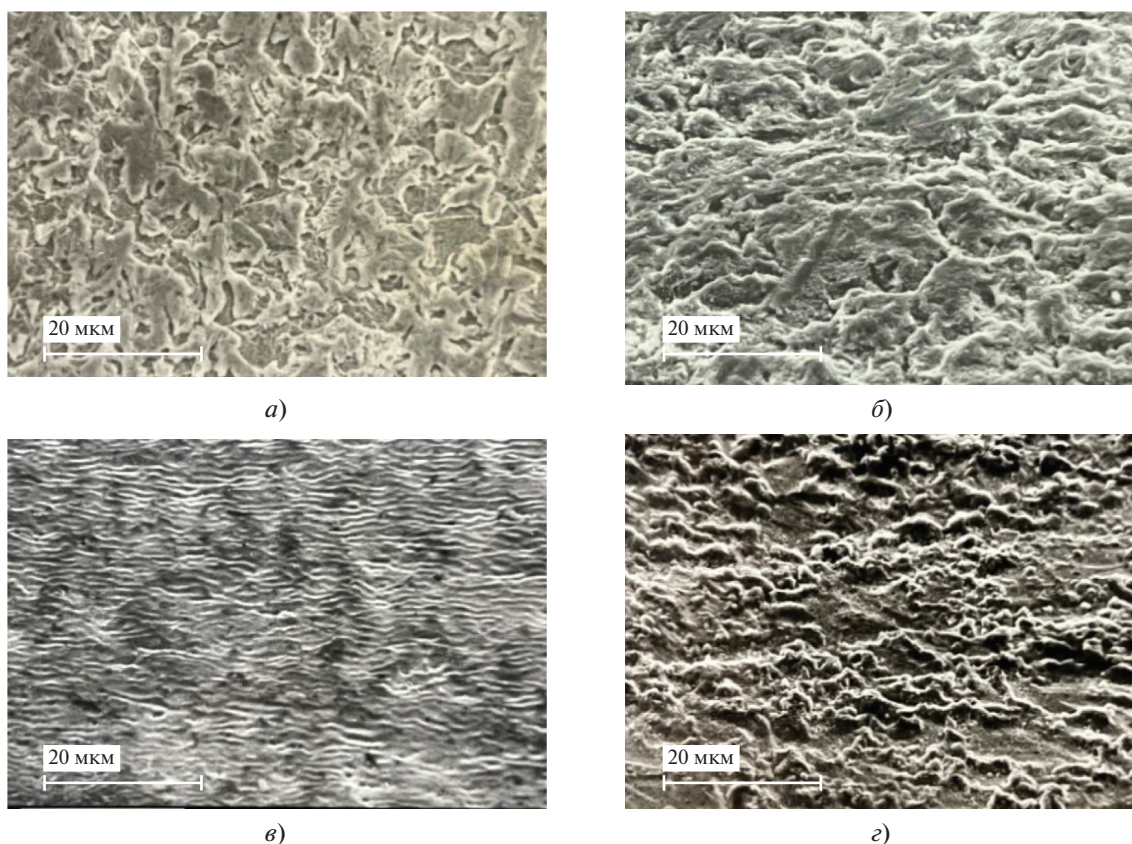


Рис. 6. Фрактограммы поверхности образцов из углеродистой стали (сталь 20) после эрозионно-коррозионного воздействия двухфазного (влажно-парового) потока (степень влажности пара 25%; скорость потока 150 м/с). Температура, °C: *а* – 120; *б* – 170; *в* – 212; *з* – 170 (с дозированием в поток ОДА [14])

комплекс исследований закономерностей ЭК в высокоскоростном влажно-паровом потоке [14]. В процессе этих исследований были определены экспериментальные зависимости влияния степени влажности и скорости пара, температуры, значения водородного показателя pH и других параметров двухфазного потока на интенсивность эрозии-коррозии различных металлов. Результаты изучения морфологических изменений поверхности образцов из углеродистой стали 20 под воздействием ЭК при температуре влажно-парового потока 120°C представлены на рис. 6, *а*. На фрактограмме можно отметить наличие различных мелких элементов разрушения металла (гребни отрыва, ямки, углубления разной формы). Однако главным фактором является присутствие большого количества плоских площадок без существенных деталей рельефа.

На рис. 6, *б* приведена фрактограмма поверхности образца стали 20 после эрозионно-коррозионного воздействия влажно-парового потока при температуре 170°C. Видно, что плоские безрельфные участки практически исчезли, имеется большое количество ярко выраженных углублений неправильной и овальной формы, а также глобу-

лярных образований различных размеров. Если сравнить рис. 6, *а* и *б*, то можно предположить, что при температуре 170°C проявляются более интенсивное химическое растворение оксида железа и вынос продуктов растворения в поток, что соответствует существенному росту скорости ЭК.

Поверхность образца из стали 20 после эрозионно-коррозионного воздействия влажно-парового потока при температуре 212°C показана на рис. 6, *в*. Здесь можно отметить наличие волнистого рельефа поверхности металла с линейными довольно равномерно расположенными бороздками. Это обусловлено процессом пассивации и замедлением химического растворения оксида железа. Результаты аналогичных исследований [15] показали, что температура влияет как на структуру эрозионно-коррозионных поврежденных поверхностей, так и на толщину оксидного слоя (рис. 7).

На стенде МЭИ были выполнены также экспериментальные исследования эффективности снижения скорости эрозии-коррозии углеродистой стали в двухфазном влажно-паровом потоке (при температуре 170°C) с помощью присадок пленкообразующего октадециламина (ОДА) с

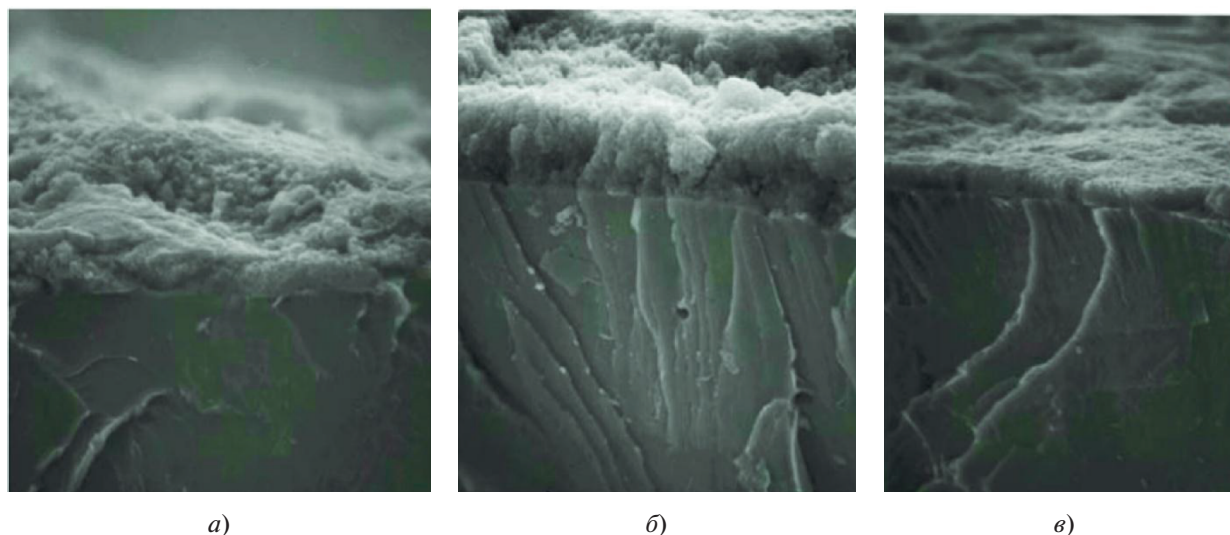


Рис. 7. Влияние температуры рабочей среды на толщину оксидного слоя на поверхности стали в условиях воздействия механизма эрозии-коррозии [14].

Температура, °C: *a* – 120; *б* – 180; *в* – 225.

Толщина оксидного слоя, мкм: *a* – 1.5; *б* – 3.0; *в* – 1.0

концентрацией в потоке 3.0–5.0 мкг/кг. Сравнивая фрактограммы, приведенные на рис. 6, *б* и *з*, можно видеть, что в присутствии присадки ОДА существенно изменяется структура поврежденной поверхности стали. Это в определенной степени объясняет снижение интенсивности ЭК при дозировании ОДА. Полученные сведения следует учитывать при идентификации механизма эрозии-коррозии металла под воздействием рабочей среды, в том числе в присутствии ОДА.

Фазовое состояние рабочей среды является важным идентификационным признаком МДМ, который свидетельствует о принципиальной возможности проявления того или иного механизма. Далее на примере турбоустановки К-1000-60/3000 показано, как фазовое состояние среды влияет на возникновение различных МДМ.

На рис. 8 представлена тепловая схема турбоустановки К-1000-60/3000 с указанием фазового состояния среды в основных ОиТ. Серой заливкой показано базовое оборудование (или его часть), для которого характерным фазовым состоянием рабочей среды является влажный пар, а черной заливкой – оборудование (или его часть), для которого рабочей средой является вода. Заливка отсутствует там, где рабочая среда – насыщенный и перегретый пар. При этом имеются зоны фазового перехода из влажного пара в перегретый в цилиндре низкого давления турбины и в сепараторе-пароперегревателе (СПП).

Путем сопоставления параметров и факторов, способствующих реализации различных МДМ, с условиями эксплуатации и статистикой повреждаемости ОиТ турбоустановок энергоблоков

была сформирована табл. 4. Здесь приведены МДМ, возникновение которых возможно в проточной части элементов ОиТ рабочих трактов турбоустановок К-1000-60/3000.

Из таблицы следует, что эрозия-коррозия является одним из наиболее распространенных МДМ, которому подвержены ОиТ энергоблоков, изготовленные из углеродистой и низколегированной стали и работающие в однофазном (водном) и двухфазном (влажно-паровом) потоках. Во влажно-паровой зоне проточной части турбины отмечаются случаи каплеударной эрозии лопаток последних ступеней, а также ЭК корпуса турбины и стыков диафрагм (рис. 9, *а*).

В перегретом паре и зонах фазового перехода проточной части турбины и второй ступени СПП могут формироваться условия для проявления механизма коррозионного растрескивания металла под напряжением на фоне циклических нагрузок. Элементы первой ступени СПП в большей степени подвержены воздействию механизма эрозии-коррозии.

В элементах ОиТ с проточной частью сложной формы, где рабочей средой является водный поток, возможна реализация механизма локальной эрозии-коррозии металла, например на внешнем радиусе гибов трубопроводов (рис. 9, *б*). Участки трубопроводов после регулирующей арматуры и суживающих устройств могут быть подвержены кавитационной эрозии. Также проявление механизма КавЭ возможно в проточной части насосов (рис. 9, *в*). При этом следует учитывать, что кави-

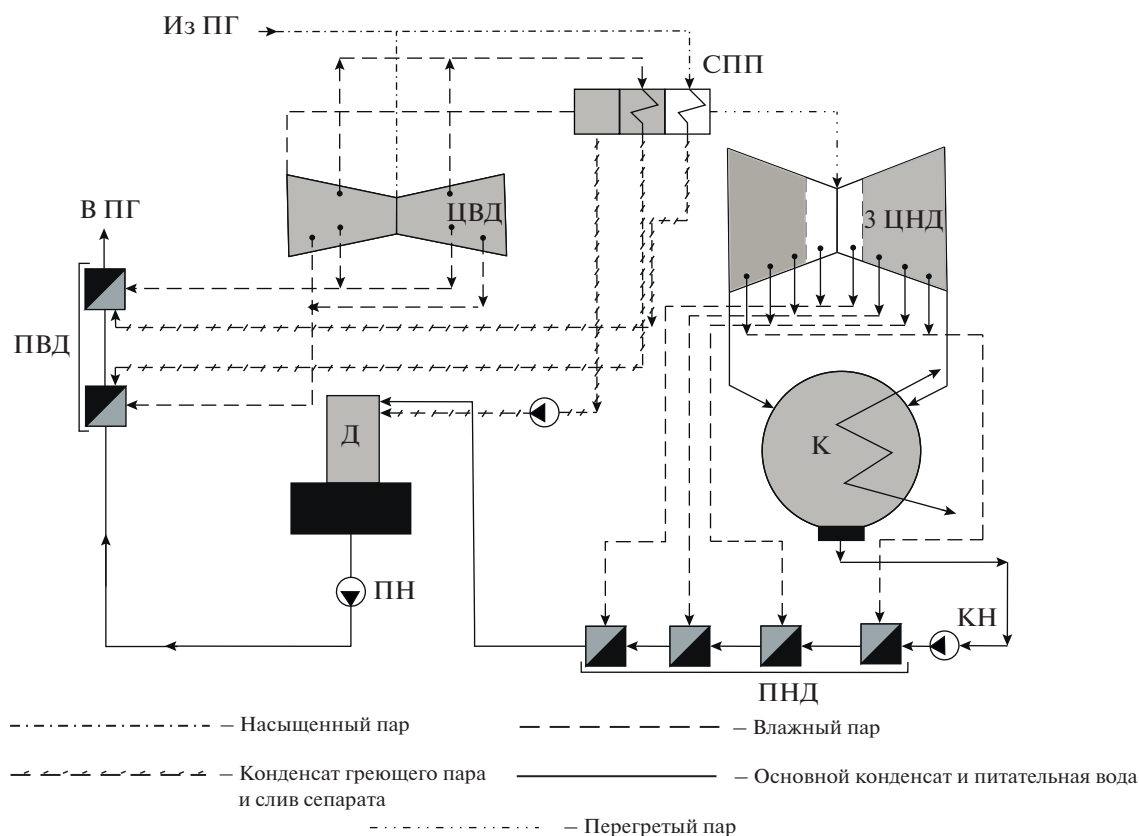


Рис. 8. Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-1000-60/3000 с указанием фазового состояния среды в рабочем контуре.

ПГ — парогенератор; СПП — сепаратор-пароперегреватель; ЦВД — цилиндр высокого давления турбины; ЦНД — цилиндр низкого давления турбины; К — конденсатор; КН — конденсатный насос; ПН — питательный насос; ПВД — подогреватель высокого давления; ПНД — подогреватель низкого давления; Д — деаэратор

Таблица 4. Механизмы деградации металла элементов основного оборудования и трубопроводов турбоустановок К-1000-60/3000

Механизм деградации металла	Турбина		С	ПП		К	ПВД, ПНД	ПН, КН, АРМ	Трубопроводы			
	Рабочая среда											
	ВП	ЗФП	ВП	ВП	ЗФП	ВП	вода	вода	пар	ВП	вода	КГП
ЭК	+		+	+		○	+	+		+	+	+
КавЭ							+	+			+	
КапЭ	+		○	○						○		
КРН		+			+				○			
ФЭ												+
ПК (СК)	○	+	○	○		+						
МБК						+						
ОК	○		○		○	○	○	○		○	○	○

Примечание. +, ○ — интенсивное и слабое воздействие МДМ; С — сепаратор; ПП — пароперегреватель; К — конденсатор; ПВД, ПНД — подогреватели высокого и низкого давления; ПН — питательный насос; КН — конденсатный насос; АРМ — энергетическая арматура; ВП — влажный пар; ЗФП — зона фазового перехода; КГП — конденсат греющего пара; ФЭ — флэш-эрозия; СК — стояночная коррозия.

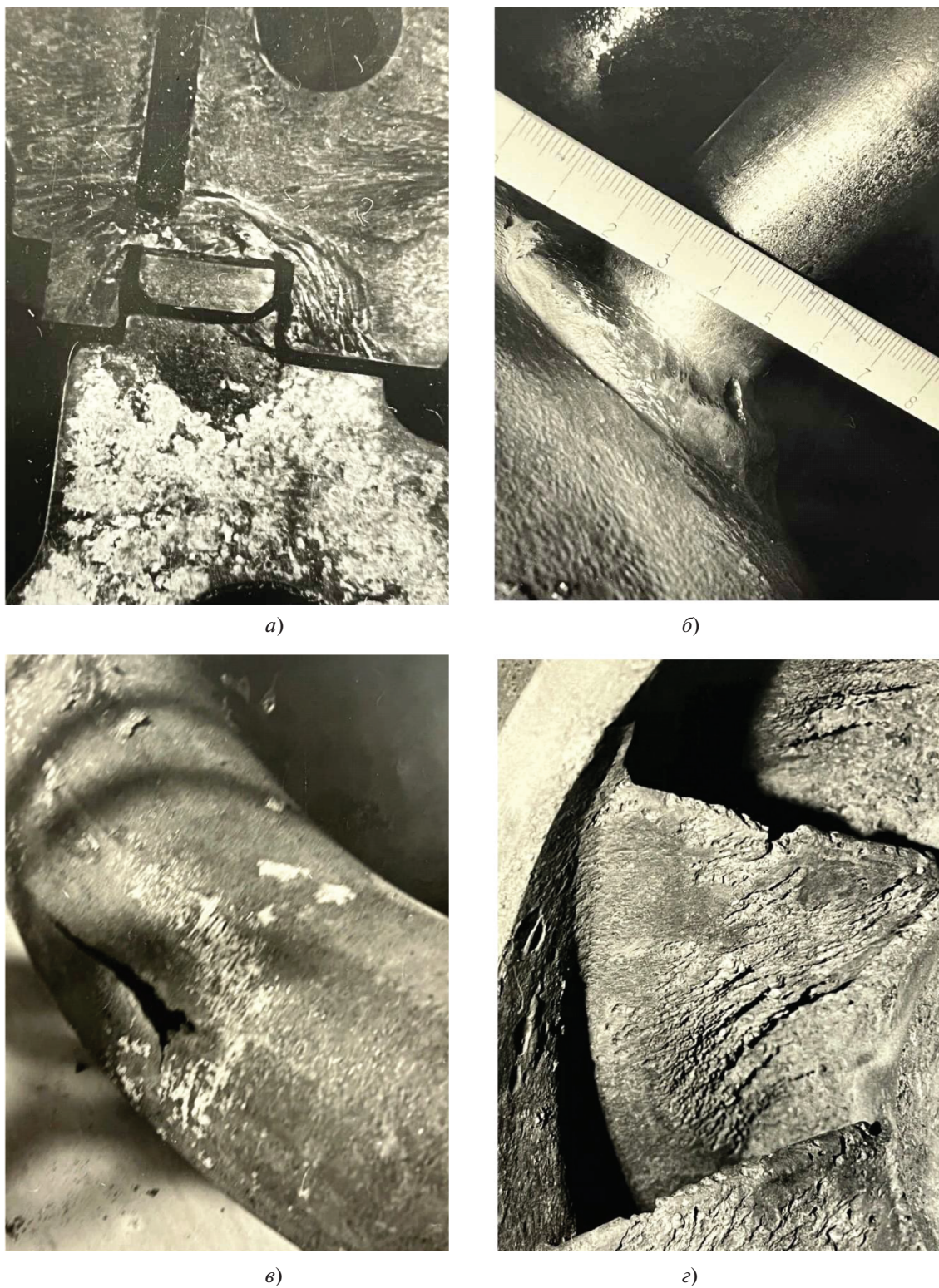


Рис. 9. Примеры внешнего вида эрозионно-коррозионного повреждения разъема обоймы диафрагмы турбины насыщенного пара (а), эрозионно-коррозионного повреждения элементов трубной системы ПВД в зоне приварки трубы (б) и на внешнем радиусегиба трубы (в), повреждения лопаток насоса под воздействием кавитационной эрозии (г)

тационная эрозия наблюдается только при воздействии однофазного водного потока, в том числе при пусковых режимах, в процессе останова и на частичных нагрузках.

Трубопроводы конденсата греющего пара наряду с ЭК подвержены воздействию так называемого механизма флэшинг-эрозии, который реализуется в потоке вскипающей однофазной водной среды. Питтинговая коррозия проявляется в зонах фазового перехода в парогенераторе и ЦНД турбины при выпаривании и концентрировании коррозионно-активных веществ, а также в период простоя энергоблоков в виде стояночной (атмосферной) коррозии.

Такие механизмы, как ГАИ, КавЭ, КапЭ, коррозионное растрескивание под напряжением, воздействуют, как правило, на ограниченную зону в элементах ОиТ. Гидроабразивный износ характерен, прежде всего, для пусковых режимов работы энергоблоков, когда происходит ударное воздействие на ОиТ твердых взвесей продуктов стояночной коррозии и оставшейся после ремонта металлической пыли, которые попадают в несущие одно- и двухфазные потоки рабочей среды.

Следует отметить, что определенное фазовое состояние рабочей среды является необходимым, но недостаточным условием для проявления какого-либо МДМ. Кроме того, в реальных условиях эксплуатации ОиТ турбоустановок энергоблоков АЭС возможен синергетический эффект увеличения интенсивности износа металла из-за одновременного воздействия различных механизмов, что может вызвать более серьезные повреждения. Например, часто кавитационная эрозия углеродистой и низколегированной стали протекает на фоне проявления механизма эрозии-коррозии.

Марка и химический состав стали (включая содержание хрома), из которой изготовлены ОиТ, существенно влияют на возможность реализации различных МДМ. Как ранее отмечалось, механизм ЭК может наблюдаться только у углеродистых и низколегированных сталей. При этом КавЭ и КапЭ, а также ГАИ могут воздействовать и на нержавеющие стали, а КРН в большей степени подвержены аустенитные стали.

Температура рабочей среды оказывает влияние на возможность реализации, прежде всего, механизма эрозии-коррозии. Температурный диапазон проявления ЭК составляет 40–300°C, а температурный пик скорости ЭК находится в пределах 140–220°C. При этом температура рабочей среды может оказывать влияние на процессы и интенсивность воздействия других МДМ.

Среднерасходная скорость рабочей среды в сочетании с информацией о фазовом состоянии среды и марке стали позволяют косвенно судить, в частности, о возможности проявления кавитационной (в водном высокоскоростном потоке) или каплеударной (во влажно-паровом потоке) эрозии, а также об интенсивности эрозии-коррозии. Интенсивность этих МДМ растет с увеличением скорости движения рабочей среды.

Сложная форма проточной части и предвключенного участка могут влиять на возможность реализации и интенсивность таких МДМ, как эрозия-коррозия, кавитационная и каплеударная эрозия, а также гидроабразивный износ. Это связано с резким увеличением локальных значений скорости и степени турбулентности потока, которые способны провоцировать интенсификацию ЭК, КапЭ, а также ГАИ. Локальное падение давления водного потока в канале ниже значения насыщения может вызывать КавЭ.

Вид дефекта/повреждения от воздействия механизма деградации металла, указанный в конце перечня идентификационных признаков, может существенно помочь при определении возможности реализации того или иного МДМ. Так, локальное утонение происходит при воздействии эрозии-коррозии, кавитационной эрозии и каплеударной эрозии. Образование трещин отражает последствия механизмов коррозионного растрескивания под напряжением и т.д.

Необходимо отметить, что до сих пор при проведении классификации бывают случаи неверного определения МДМ. Так, например, иногда ошибочно считают возможным проявления механизма КавЭ во влажно-паровом потоке [16]. При этом экспериментальные исследования на стенде МЭИ [14] свидетельствуют о том, что во влажно-паровом потоке отсутствуют физические предпосылки для возникновения эффекта кавитации.

Установлено, что в двухфазном потоке в диапазоне температур 120–210°C алюминиевый сплав АМГ-2 (менее прочный, чем стали 20 и 12ХМ) обладает более высокой эрозионно-коррозионной стойкостью (рис. 10). Это объясняется, с одной стороны, различными свойствами защитных оксидных пленок алюминиевого сплава и стали, а с другой — отсутствием эффекта кавитации в двухфазном потоке. При кавитационном воздействии интенсивность износа (утонения) образцов из алюминиевого сплава, уступающего по механическим свойствам стали, была бы значительно выше. Это подтверждает гипотезу о том, что во влажно-паровом потоке нет условий для реализации кавитационной эрозии.

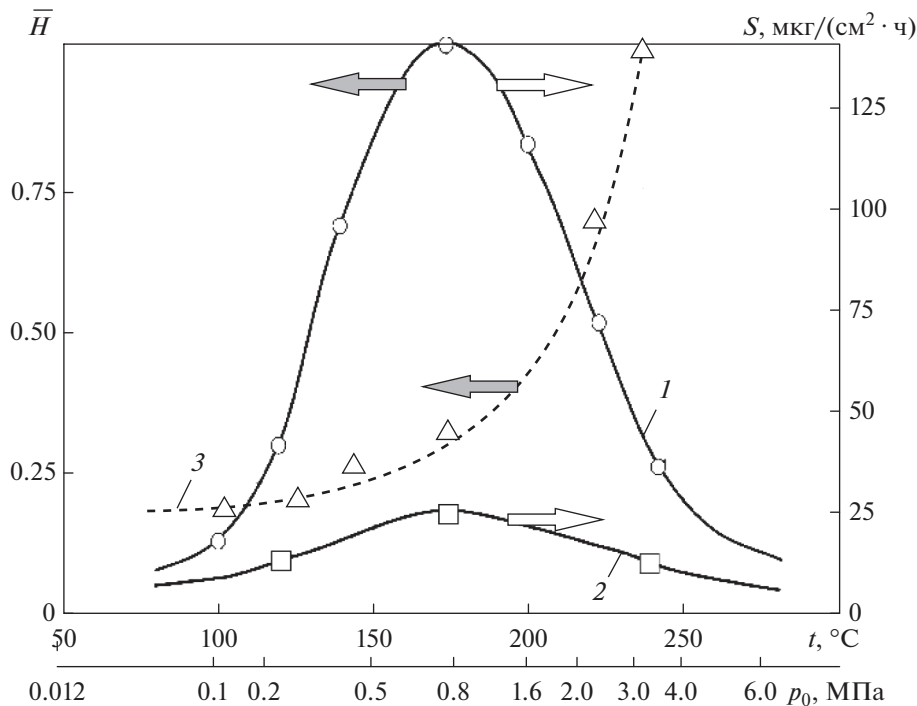


Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований зависимости относительного утонения ($\bar{H} = \Delta h / \Delta h_{\max}$, где Δh – утонение; $\Delta h_{\max}$ – максимальное утонение) и скорости эрозии-коррозии (S) образцов из углеродистой стали (сталь 20) (1) и низколегированной стали 12ХМ (2), а также алюминиевого сплава АМГ-2 (3) от начальных параметров на входе в канал (температуры t_0 и давления p_0) влажно-парового потока при степени влажности пара 25% и скорости потока 0.3 М (М – число Маха)

Таким образом, идентификационные признаки, используемые в том числе при формировании классификационных схем, позволяют определять принципиальную возможность реализации конкретного МДМ элементов ОиТ энергоблоков АЭС.

Современные достижения в области изучения закономерностей процессов деградации металла и результаты аналитических исследований повреждаемости элементов ОиТ атомных станций создают предпосылки для совершенствования нормативной документации в части определения идентификационных признаков и классификации различных механизмов повреждаемости металла энергоблоков АЭС.

Для более детального и точного выявления доминирующего механизма целесообразно использовать критериально-параметрические базы МДМ, которые включали бы диапазоны граничных значений параметров и характеристик, обуславливающих возможность реализации конкретного механизма деградации металла ОиТ энергоблоков АЭС. Пример критериально-параметрической базы, разработанной для идентификации механизма ЭК, представлен далее.

КРИТЕРИАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ БАЗА РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА ЭРОЗИИ-КОРРОЗИИ МЕТАЛЛА В ОДНО- И ДВУХФАЗНОМ ПОТОКАХ

Для установления возможности реализации механизма ЭК в однофазном (водном) и двухфазном (влажно-паровом) потоках в конденсатно-питательном и влажно-паровом трактах энергоблоков АЭС была разработана критериально-параметрическая база (табл. 5). Основой для ее формирования послужили известные закономерности физико-химических процессов механизма эрозии-коррозии [7, 14] и результаты анализа эрозионно-коррозионных повреждений элементов ОиТ турбоустановок энергоблоков АЭС с ВВЭР. Критериально-параметрическая база включает в себя диапазоны значений основных параметров и характеристик, которые определяют граничные условия проявления механизма ЭК.

Процедура идентификации механизма эрозии-коррозии в данном случае заключается в сопоставлении полученных при обследовании повреждения реальных значений параметров и условий эксплуатации и характеристик элементов трубопровода или оборудования с граничными

Таблица 5. Критериально-параметрическая база для идентификации механизма эрозии-коррозии металла ОиТ турбоустановок энергоблоков АЭС, работающих в водном и влажно-паровом потоках

Параметр	Водный поток	Влажно-паровой поток
Температура, °С	50–300	
Концентрация хрома в металле, %	Менее 2.0	
Среднерасходная скорость, м/с	Более 0.1	
Водородный показатель pH ₂₅	Менее 10.0	Менее 10.0 (pH ₂₅ жидкой фазы)
Концентрация кислорода в среде, мкг/дм ³	Менее 200	—
Степень влажности пара, %	—	Более 1.5%

Таблица 6. Диапазоны значений параметров, соответствующих интенсивному проявлению механизма эрозии-коррозии металла элементов ОиТ АЭС, работающих в однофазном (водном) и двухфазном (влажно-паровом) потоках

Параметр	Водный поток	Влажно-паровой поток
Концентрация хрома в металле, %	Менее 0.03	
Среднерасходная скорость, м/с	Более 10.0	Более 50.0
Температура, °С	140–220	
Степень влажности пара, %	—	Более 10.0

ми условиями реализации механизма ЭК, которые приведены в критериально-параметрической базе.

Как указывалось ранее, отдельные идентификационные признаки, в том числе представленные в критериально-параметрической базе по МДМ эрозии-коррозии, дают представление о необходимых, но не всегда достаточных условиях реализации МДМ. Практика показывает, что скорость ЭК элементов ОиТ энергоблоков атомных станций может значительно меняться — от 0.01 до 3.0 мм/год. Поэтому важно понимать, при каких режимах эксплуатации следует ожидать существенного увеличения скорости эрозии-коррозии, чтобы своевременно осуществлять контроль технического состояния элементов ОиТ, работающих в таких условиях.

Для определения диапазонов значений параметров и характеристик, соответствующих интенсивному проявлению механизма ЭК металла элементов ОиТ энергоблоков АЭС, работающих в однофазном (водном) и двухфазном (влажно-паровом) потоках, была разработана специальная таблица (табл. 6). Представленные в ней сведения получены в том числе на основе результатов рас-

четно-экспериментальных исследований с использованием аттестованного в Ростехнадзоре программного средства РАМЭК для оценки скорости эрозии-коррозии [17].

Следует отметить, что для элементов линий трубопроводов конденсатно-питательного и влажно-парового трактов энергоблоков АЭС со сложной формой проточной части скорость ЭК может быть значительно выше, чем для прямолинейных участков. Это обусловлено усилением гидродинамического воздействия и турбулизацией потока, приводящих к интенсификации процессов массопереноса в пристенной области. В работе [18] предложена матрица гидродинамических коэффициентов для элементов трубопроводов с различными геометрическими характеристиками проточной части, учитывающая увеличение скорости эрозии-коррозии для них по сравнению с прямолинейными участками, что целесообразно использовать при оценке интенсивности ЭК металла элементов ОиТ.

Создание аналогичных критериально-параметрических баз для других МДМ будет способствовать повышению эффективности и безошибочности определения доминирующих механизмов и

выявления конкретных причин повреждения металла элементов ОиТ энергоблоков АЭС.

ВЫВОДЫ

1. Анализ зарубежного и отечественного опыта эксплуатации энергоблоков АЭС свидетельствует об отсутствии единого подхода к формированию структуры классификации МДМ оборудования и трубопроводов турбоустановок. Полученная информация используется в основном при статистической обработке данных о повреждениях.

2. Для определения причин разрушения и доминирующих механизмов воздействия на металл при обнаружении дефектов и повреждений элементов оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС необходимо разработать для персонала атомных станций единую по структуре и содержанию классификацию, включающую идентификационные признаки по каждому МДМ.

3. Предложенный перечень и краткое описание идентификационных признаков механизма эрозии-коррозии могут быть использованы при выявлении доминирующего механизма повреждения элементов ОиТ энергоблоков АЭС.

4. Разработанная критериально-параметрическая база реализации механизма эрозии-коррозии металла в одно- и двухфазном потоках позволяет определить возможность реализации ЭК элементов ОиТ турбоустановок энергоблоков АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Michel F., Schulz H. GRS (Germany). Technical and regulatory aspects of ageing management of pressure-retaining components in German NPPs // Ageing issues in nuclear power plants, 2005.
2. EPRI Materials Degradation Matrix. Revision 4. Final Rep., May 2018.
3. РД-ЭО-185-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС / Концерн «Росэнергоатом». Утв. и введен в действие приказом Концерн «Росэнергоатом» от 27.06.2000 № 318.
4. Crockett H.M., Horowitz J.S. Tackling erosion in nuclear piping systems // Proc. of the ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conf. San Antonio, Texas, USA, 22–26 July 2007. <https://doi.org/10.1115/PVP2007-26086>
5. Nopper H. Degradation mechanism experienced in NPPs // IAER Regional Workshop South America, Argentina, 8–11 Dec. 2008.
6. Expert panel report on proactive materials degradation assessment (NUREG/CR-6923) / P.L. Andresen, F.P. Ford, K. Gott, R.L. Jones, P.M. Scott, T. Shoji, R.W. Staehle, R.L. Tapping // BNL-NUREG-77111-2006. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2007.
7. Томаров Г.В., Шипков А.А. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 1. Процессы и закономерности эрозии-коррозии // Теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 5–17. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080064>
8. NEA CODAP Project Topical Report on Basic Principles of Collecting and Evaluating Operating Experience Data on Metallic Passive Components. Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2018)12. www.oecd-neo.org.
9. Томаров Г.В., Шипков А.А. Эрозионно-коррозионный вынос железосодержащих соединений — источник отложений в парогенераторах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2011. № 3. С. 54–62.
10. Lydell B., Forano D.E., Riznic J. OECD nuclear energy agency CODAP database project on passive component operating experience. An international collaboration in materials research // Nucl. Eng. Des. 2021. V. 380. P. 111280. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111280>
11. Investigation into morphology of cavitation erosion-corrosion pits on the surface of carbon steel / S.A. Karab, M.S. Aboraia, M.A. Doheim, S.M. Ahmed // Int. J. Eng. Inf. Techn. 2014. V. 1. No. 1. P. 28–34.
12. Nam W. C. Liquid droplet impingement erosion mechanism of low-alloy steels in the secondary side of pressurized water reactors // S-Space. 2015. No. 8.
13. Zeng L., Chen G., Chen H. Comparative study on flow-accelerated corrosion and erosion-corrosion at a 90° carbon steel bend // Mater. 2020. V. 13. Is. 7. P. 1780. <https://doi.org/10.3390/ma13071780>
14. Томаров Г.В. Физико-химические процессы и закономерности эрозии-коррозии металла энергетического оборудования в двухфазном потоке // Теплоэнергетика. 2001. № 9. С. 59–67.
15. Nuclear Corrosion: Research, Progress and Challenges [European Federation of Corrosion (EFC) Series 69] / Ed. by Stefan Ritter. Woodhead Publishing, 2020.
16. The corrosion damage characters of the secondary loop piping in nuclear power plant / L. Zhao, K. Luo, G. Li, S. Tu // Res. Square. 2021. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-141378/v1>
17. Аттестационный паспорт № 359 от 14.10.2014 (с дополнением № 1 от 06.04.2015) программного средства РАМЭК-1 для проведения расчетов скорости эрозии-коррозии в однофазном (жидком) водном теплоносителе основного металла трубопроводов и оборудования конденсатно-питательного тракта энергоблоков АЭС с реакторными установками ВВЭР-1000 / Экспертный совет по аттестации программных средств при Ростехнадзоре.
18. Томаров Г.В., Шипков А.А. Гидродинамические коэффициенты и зоны локальной эрозии-коррозии металла в двухфазных потоках рабочего контура АЭС и ТЭС // Тяжелое машиностроение. 2009. № 7. С. 10–14.

Mechanisms of Metal Degradation in Equipment and Pipelines of Turbo Plants of Nuclear Power Plant Units: Classification and Identification

G. V. Tomarov^{a, *}, V. N. Lovchev^{b, **}, A. F. Gromov^{b, ***}, and A. A. Shipkov^{a, *}

^a *ООО Geotherm-M, Moscow, 111250 Russia*

^b *АО Concern Rosenergoatom, Moscow, 109507 Russia*

^{*}*e-mail: geoatom.m@gmail.com*

^{**}*e-mail: lovchev@rosenergoatom.ru*

^{***}*e-mail: gromov-af@rosenergoatom.ru*

Abstract—Operation of nuclear power plant units is accompanied by the development of various metal degradation mechanisms (MDM) under the influence of the working environment. Prevention of damage and elimination of sudden destruction of equipment and pipelines (E&P) at operating nuclear power plants depends on the timely identification of those elements and units in which the preconditions for the manifestation and intensification of metal degradation mechanisms are created. In this case, the search for the causes of damage to pipeline lines and equipment parts should be based on the determination of the dominant MDM. The effectiveness of the technical measures being developed to restore and prevent similar damage in the future depends on the correct solution to these problems. Despite significant experience and accumulated statistical data on damage to the metal of the working contours of nuclear power plant units, the establishment of identification features and the detection of dominant MDM in the operating conditions of turbine installations of nuclear power plant units remain highly relevant. This is confirmed by the existing differences in approaches to the classification of MDM and the lack of a clear methodology for their identification when detecting defects and analyzing cases of damage to pipeline elements and equipment. Due to the complexity of the physical and chemical processes and patterns of MDM, their deep and fairly large-scale study is required; therefore, as a rule, the study of a specific MDM is carried out by separate specialized scientific organizations and institutes. This circumstance makes it difficult to form a unified approach to their systematization and classification in order to obtain a complete picture of the dominant mechanisms of damage to E&P turbine installations of nuclear power plant units. At the same time, the achievements of recent years in this area make it possible to formulate more advanced criteria and recommendations for classification and identification of MDM, which are advisable to use in practice, including in the development of industry guidance documentation on this topic.

Keywords: power unit, pipeline and equipment elements, metal degradation mechanism, erosion-corrosion, cavitation erosion, droplet impact erosion, hydroabrasive wear