

В.Г. ПЕТРОСЯН

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Дается описание процесса образования отложений примесей воды и продуктов коррозии (ПК) на теплопередающих поверхностях ядерных энергетических установок (ЯЭИ). Показана роль ионизирующего излучения на начальном этапе протекания коррозии, что является следствием образования отложений на парогенерирующих поверхностях.

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, продукты коррозии, отложения, облучение, водный теплоноситель, радиолиз, концентрация.

Известно, что образование отложений примесей воды на теплопередающих поверхностях энергетического оборудования сопровождается рядом процессов, снижающих надежность и экономичность работы энергетических установок.

Во-первых, изменяются гидродинамические характеристики отдельных элементов оборудования [1], а также ухудшается теплоотвод от поверхности к воде вследствие термического сопротивления слоя отложений. И тот, и другой процессы могут привести к недопустимому повышению температуры теплоотдающей поверхности и даже к ее разрушению.

Во-вторых, в слое пористых отложений возможно глубокое упаривание воды и, соответственно, концентрирование у поверхности металла теплоотдающей поверхности примесей, в том числе и коррозионно-активных. Поскольку максимальная температура в слое отложений возникает непосредственно у поверхности, то концентрирование коррозионно-активных примесей у поверхности будет максимальным. Локальная коррозия металла поверхности в этом случае может быть весьма существенной.

В реакторных энергетических установках элементы отложений, образующихся на оболочках тепловыделяющих элементов, подвержены воздействию интенсивного потока нейтронов и в результате ядерных реакций превращаются в соответствующие радионуклиды, а последующий их переход в теплоноситель и повторное осаждение на поверхностях оборудования приводят к возникновению и росту мощности радиационного излучения вблизи оборудования реакторного контура, в том числе и той его части, которая находится вне зоны непосредственного воздействия нейтронного потока.

Такая ситуация вызывает необходимость применения дополнительных возможностей снижения скорости образования отложений ПК при наличии их в питательной и контурной воде, что требует адекватного понимания сущности протекающих при образовании отложений процессов. Имеется большое количество публикаций по проблеме образования отложений [2,3] и влиянию на

интенсивность различных параметров. Корректное теоретическое объяснение сущности процессов дает возможность одновременно получить методы оценки количества отложений и контроля за их поведением, что, в конечном счете, позволит оптимально планировать сроки проведения отмывок на тепловых электростанциях и дезактиваций на атомных электростанциях.

Многие исследователи полагают, что процесс накопления отложений является асимптотическим вследствие увеличивающейся вместе с удельным количеством отложений интенсивности их смыва [4-6]. В этом случае математическая модель описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dA}{d\tau} = K_0 C - K_c A, \quad (1)$$

где A – удельное (приведенное к единице поверхности) количество отложений продуктов коррозии в наносном слое, $кг/м^2$; τ – время, $с$; K_0 – так называемая постоянная осаждения, являющаяся в общем случае функцией многих вышеупомянутых параметров, $кг/м^2с$; C – концентрация продуктов коррозии в охлаждающей среде, $кг/кг$; K_c – так называемая постоянная смыва отложений, являющаяся функцией многих переменных, $1/с$.

Отметим, что существенной особенностью рассматриваемого случая (теплообмен в однофазной среде) является постоянство величин K_0 и K_c по длине равномерно обогреваемого канала, что является следствием равномерного распределения отложений по его поверхности. Это упрощает задачу расчета количественных характеристик процесса обмена ПК между слоем отложений и охлаждающей средой. И хотя теоретическое описание процесса образования отложений при омывании поверхности однофазной средой, не противоречащее тем или иным экспериментальным данным, к настоящему времени не разработано, накопленный экспериментальный материал, его анализ и разработанные рекомендации по определению постоянных осаждения и смыва [5] позволяют предположить, что этот процесс может быть описан с достаточной для практики точностью на основе феноменологической модели процесса (1).

Анализ экспериментальных данных процесса образования наносных отложений ПК при генерации на теплоотдающей поверхности пара [4] показывает, что интенсивность накопления отложений сильно зависит от локальных условий генерации пара. На рис.1 приведено распределение наносных отложений по длине вертикального равномерно обогреваемого парогенерирующего канала в общем случае. В области максимума отложений их удельное количество A может на порядок превышать значение A в области конвективного теплообмена (охлаждение однофазной средой). Поэтому описание процесса образования отложений в парогенерирующем канале в целом, на основе феноменологической модели (1), при неизменных по длине канала постоянных осаждения и смыва является слишком грубым приближением. Особенно сильно некорректность такого описания скажется при проведении расчета количества смываемых с парогенерирующих поверхностей активной зоны кипящего реактора радиоактивных ПК – в этом случае от пространственной координаты будут зависеть не только удельное количество отложений, но и их удельная активность. Это обусловлено тем, что от пространственной координаты зависит и плотность потока нейтронов, и их энергетический спектр. Потребность в корректном

описании распределения отложений по длине парогенерирующего канала приводит к дополнительному усложнению задачи описания процесса образования отложений.



Рис.1. Распределение удельного количества отложений А в вертикальном парогенерирующем канале в зависимости от условий теплообмена

Ранее считалось, что непосредственно облучение не играет существенной роли в процессе образования отложений ПК [4]. Однако дополнительные исследования, проведенные при облучении среды и поверхности ионизирующим излучением, показали, что при облучении условия протекания начального этапа коррозии и формирования пассивирующих слоев могут существенно изменяться. Это побуждает к изучению процессов коррозии в условиях облучения конструкционных материалов и теплоносителя.

Изменение состава и качества поверхности конструкционных материалов, контактирующих с водным теплоносителем (ВТ), можно разбить на два этапа: I – взаимодействие чистой поверхности материала с ВТ и образование первичных слоев окислов и отложений; II – процесс взаимодействия ВТ с образовавшимся на этапе I окисным слоем, коррозия, осаждение и смыв отложений с него.

Влияние радиолиза теплоносителя на ход этапа I исследовано мало. Это связано с тем, что во многих работах для оценки возможного эффекта облучения использовался «энергетический» подход. Но поскольку энергия излучения, поглощаемая ВТ, не превышает 6% всей энергии, выделяющейся в активной зоне, то эффект не может быть существенным. Однако диссипация энергии излучения в ВТ существенно неоднородна, что приводит к радиолизу воды и появлению в ВТ радикальных и молекулярных продуктов радиолиза воды (ПРВ). Последние, в силу своей высокой реакционной способности, оказывают существенное влияние на процесс взаимодействия ВТ с конструкционными материалами.

В данной работе представлен радиолиз ВТ и его взаимосвязь с образованием окисных слоев на поверхности конструкционных материалов в начальный период эксплуатации. Рассматривалась установка с модернизированным «реактором» (облучаемой зоной разомкнутого водяного контура, позволяющего поддерживать в зоне облучения температуру теплоносителя до 620 К). Для облучения использовался поток электронов ускорителя У-12. В модернизированном реакторе размещались два образца (90Х8Х1), нижняя часть которых по

ходу потока омывалась исходным теплоносителем, которым являлся дистиллят (электропроводность $\sigma = 0,5...1,0$ мкСм/см, $pH_0=5,5...5,9$). Далее теплоноситель омывал среднюю, облучаемую часть образцов (мощность поглощенной дозы – $I \approx 0,4 \cdot 10^4$ Вт/кг, время прохода зоны облучения – 10 с), а затем – после облучения – верхнюю часть образцов. В ходе эксперимента контролировались: температура ВТ в зоне облучения; pH охлажденного раствора после облучения; концентрации O_2 , H_2 , H_2O_2 в охлажденном ВТ после прохождения «реактора». Параметры ВТ на входе в «реактор» поддерживались постоянными. В процессе эксперимента определялись также концентрации газов H_2 и O_2 хроматографическим методом, Fe – атомно-адсорбционным методом, H_2O_2 – йодометрическо-спектрометрическим методом.

Для оценки воздействия ионизирующей радиации на первичные процессы взаимодействия металла с теплоносителем использовались материалы с низкой (в условиях эксперимента) коррозионной стойкостью: сталь 2 и дюралюминий. Результаты одного из экспериментов (материал – сталь 2, $[O_2]_0=7,4$ мг/л) показаны на рис. 2, 3. Кривые построены по экспериментальным точкам методом скользящей средней, основанном на методе наименьших квадратов. Разброс результатов при определении концентрации газов – 5...10%, железа и перекиси водорода – 15...30%.

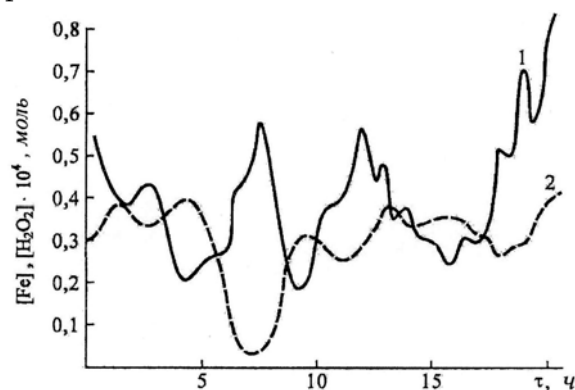


Рис. 2. Зависимость изменения концентраций железа и перекиси водорода от экспозиции: 1 – железо; 2 – перекись водорода

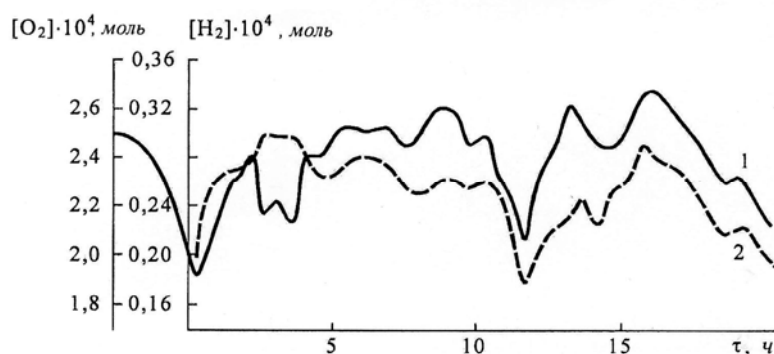


Рис. 3. Зависимость изменения концентраций кислорода и водорода от экспозиции: 1 – водород ; 2 – кислород

Из анализа рис.2,3 видно, что изменения концентраций продуктов от времени (дозы) облучения носят характер нелинейных колебаний с периодом $\tau \approx 5$ ч. При этом концентрации железа и перекиси водорода изменяются в противофазе (рис. 2), а концентрации кислорода и водорода относительно перекиси водорода – в фазе. Поскольку концентрации Fe, H₂O₂ и газов измерялись независимо друг от друга различными методами, эти колебания нельзя отнести к случайным отклонениям.

Таким образом, следует констатировать, что есть определенная корреляция между концентрацией железа, переходящего в раствор, и концентрациями продуктов радиолитического ВТ.

Проведена серия экспериментов при различных исходных параметрах ВТ и излучения. Выявилось, что характеристики колебаний (амплитуда, период, степень нелинейности, уровень концентраций) зависят от материала образцов. Так, уменьшение начальной концентрации кислорода с 7,5 до 1,3 мг/кг в экспериментах с образцами из стали 2 приводит к возрастанию среднего уровня концентрации водорода и увеличению амплитуды колебаний во времени. Аналогичное изменение в опытах с образцами из дюралюминия вызывает уменьшение среднего уровня концентрации водорода и увеличение амплитуды колебаний. Период колебаний в этом случае составляет 4 ч (колебания имеют почти правильный, гармонический характер). Увеличение мощности поглощенной дозы приводит к увеличению среднего уровня концентрации водорода.

Осмотр образцов после экспериментов показал, что облучаемая часть поверхности образца существенно отличается от необлучаемой или омываемой облученным ВТ. Исследование поверхностей образцов методами электронографии, электронной микроскопии и γ -резонансной спектроскопии позволило установить определяющее влияние облучения на структуру и состав окисных пленок, формируемых в указанных зонах контакта конструкционных материалов с ВТ. Необходимо также отметить, что в моменты времени, отвечающие экстремумам концентраций Fe, H₂, O₂ и H₂O₂, наблюдается изменение внешнего вида поверхности образцов. Можно предположить определенную взаимосвязь качества поверхности образцов и эффективности радиолитического ВТ.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Начальный период коррозии, определяющий последующее протекание коррозионного процесса в условиях облучения, имеет сложный неравномерный характер с изменением во времени показателей состава теплоносителя по колебательному закону.
2. Существует корреляция между характеристиками изменения количественного состава теплоносителя и качеством поверхности конструкционного материала, контактирующего с ним.
3. Характеристики колебаний (период, амплитуда, средний уровень концентраций) зависят от вида конструкционного материала, температуры теплоносителя, интенсивности облучения и начальной концентрации кислорода.

В связи с отсутствием обобщающей модели процесса все это вызывает необходимость изучения начального периода коррозии конструкционных материалов при облучении для конкретных условий эксплуатации и связанным вследствие этого образованием отложений на парогенерирующих поверхностях оборудования АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов В.В., Касперович А.И., Мартынова О.И. Водный режим атомных электростанций. - М.: Атомиздат, 1976. - 400 с.
2. Burrill K.A. Corrosion product transport in water-cooled nuclear reactors. Part I: Pressurized water operation // The Canadian journal of chemical engineering. - 1977. - Vol.55, No.2. - P. 54-61.
3. Рассохин Н.Г., Кабанов Л.П., Тевлин С.А., Терсин В.А. О теплопроводности железоокисных отложений // Теплоэнергетика. - 1973. - № 9. - С. 12-15.
4. Charlesworth D.H. The deposition of corrosion products in boiling water systems // Chemical engineering progress, symposium series. - 1970. - Vol.66, No.104. - P.21-30.
Скляр В.П. Исследование констант массопереноса для АЭС с канальным реактором // В кн.: Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып.5. - М.: Атомиздат, 1981. - С. 27-35.
5. Lister D.H. Corrosion products in power generating systems // Atomic Energy of Canada Limited, AECL-6877. - 1980. - P.55.

НИИ «Арматом» РА. Материал поступил в редакцию 06.05.2006.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՏԵՂԱԿԱՅԱՆՔՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՏԱՐԻ ԵՎ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՏԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԳՈՒՈՐԾԱԾԻՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ՎՐԱ ՆՍՏՎԱԾՔՆԵՐԻ ԱՌԱՋԱՅՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԸ

Տրվում է միջուկային էներգետիկական տեղակայանքների ջերմափոխանցման մակերևույթների վրա ջրում լուծված խառնուրդների և կոռոզիոն նյութերի ելքերից ի հայտ եկող նստվածքների առաջացման գործընթացների նկարագիրը: Ցույց է տրված ճառագայթման ազդեցությունը սկզբնական կոռոզիոն գործընթացների և, որպես դրանց հետևանք, նստվածքների առաջացումը գոլորշածին մակերևույթների վրա:

Առանցքային բառեր. միջուկային էներգետիկական տեղակայանքներ, կոռոզիոն նյութեր, նստվածք, ճառագայթում, ջրային ջերմատար, ռադիոլիզ, խտություն:

V.G. PETROSYAN

PROCESS OF SEDIMENTS ACCUMULATION ON STEAM GENERATING SURFACES UNDER THE IRRADIATION OF COOLANT AND CONSTRUCTION MATERIALS OF NUCLEAR POWER PLANTS

The process of sediment accumulation of water admixtures and corrosion products (CP) on heat-transferring surfaces of nuclear power plants is described. The role of ionizing radiation on the initial stage of corrosion resulting in sediment accumulation on steam generating surfaces is shown.

Keywords: nuclear power plant, corrosion products, sediments, radiation, water heat transfer, radiolysis, concentration.