

Габрилян Грачий Владимирович – кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; студент.

Орехов Вячеслав Валентинович – кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; ассистент.

Abbasov Iftikhar Balakishi – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: igkd@egf.tsure.ru; 44, Nekrasovskii, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371794; the department of engineering drawing and computer design; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Gabriljan Hrachij Vladimir – the department of engineering drawing and computer design; student.

Orekhov V'iacheslav Valentin – the department of engineering drawing and computer design; assistant.

УДК 621.039.57-58

А.С. Курский, В.В. Калыгин

НАКОПЛЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КИПЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Представлена разработанная методика прогнозирования накопления отложений на тепловыделяющих элементах водяного реактора в условиях кипения теплоносителя. Приведены результаты экспериментального обоснования методики при различных стадиях эксплуатации реактора. Теоретически предсказан и в эксперименте обнаружен эффект образования отложений из мелких частиц железа. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по снижению содержания частиц продуктов коррозии железа в переходных режимах работы кипящих реакторов. На основании экспериментальных данных показано, что отложения на твэлах кипящего реактора состоят в основном из меди и железа. Медь находится в растворенной форме и осаждается в порах между частицами соединений железа, а толщину отложений определяют сами частицы продуктов коррозии железа. При изучении процессов зарождения и накопления продуктов коррозии теоретически предсказан и в эксперименте обнаружен эффект образования отложений из мелких частиц железа на оболочках твэлов, которые эксплуатируются в условиях кипения теплоносителя. Относительно крупные частицы, движущиеся вдоль твэла, не способны проникнуть в ламинарный подслои из-за действия на них силы Магнуса. Отработанный на реакторе ВК-50 метод резкого сброса давления на малых уровнях мощности реактора позволяет вывести на систему очистки теплоносителя относительно крупные частицы продуктов стояночной коррозии без их осаждения на твэлах. Эта регламентная операция позволяет более эффективно решать проблемы радиационной безопасности и ресурсной стойкости ТВС легководных реакторов с кипением теплоносителя.

Корпусной кипящий реактор; отложения продуктов коррозии железа; сила Магнуса.

A.S. Kursky, V.V. Kalygin

DEPOSITS ACCUMULATION IN CONDITIONS OF COOLANT BOILING

The developed methodology for predicting of deposits accumulation on the water-water reactors fuel rods is presented. The results of methods substantiation are exhibited in experiments. The experiments were performed at various stages of fuel rods operation in the boiling water reactor. The effect of deposits formation of the small iron particles is theoretically predicted and experimentally observed. The recommendations have worked out for reducing the iron corrosion products in BWRs transient modes. The results of the experimental data showed that the fuel rods

deposits on the boiling water reactor are mainly composed of copper and iron. The copper is located in dissolved form and it is deposited in the pores between the particles of the iron compounds. The thickness of deposits is determined by iron corrosion products. The effect of deposits formation of the small iron particles is theoretically predicted and experimentally observed. The relatively large particle is not able to penetrate into the laminar sublayer due to the action of the Magnus forces. The recommendations have worked out for reducing the iron corrosion products in BWRs transient modes. These recommendations based on the results of theoretical and experimental studies. The method of sharp collapse of pressure at the VK-50 of low power levels allows cleaning coolant from large particles of corrosion products without their deposition on the fuel rods. This rule's of procedure can decide the problems of radiation safety and stability of the BWR fuel assemblies more effectively.

Vessel-type boiling water reactor (BWR); iron corrosion products; deposits in the fuel rods; the Magnus force.

Введение. Одной из актуальных проблем эксплуатации кипящих реакторов является образование отложений на тепловыделяющих элементах (ТВЭлах). Отложения, например на реакторах большой мощности (канальных – РБМК), состоят более чем на 90 % из продуктов коррозии железа (ПКЖ) [1]. В основном ПКЖ поступает в реакторную воду с питательной водой из-за коррозии оборудования и трубопроводов конденсатно-питательного и парового трактов. Опыт эксплуатации зарубежных корпусных кипящих реакторов и реактора ВК-50 в России, в частности, показал, что чрезмерный рост отложений продуктов коррозии на ТВЭлах может вызывать разгерметизацию оболочек ТВЭлов вследствие локальной коррозии, вызванной перегревом оболочек (CILC-эффект – Crud Induced Localized Corrosion) [2]. Кроме того, в переходных режимах эксплуатации (снижение мощности, остановка) происходит вынос продуктов коррозии с поверхности отложений в реакторную воду и увеличение ее активности на несколько порядков. Поэтому для повышения ресурсной стойкости конструкционных материалов на реакторе ВК-50 (водяной кипящий электрической мощностью 50 МВт) проведены исследования, направленные на объяснение и прогнозирование характера отложений на ТВЭлах. Результаты выполненных экспериментов актуальны не только для продвижения направления корпусных кипящих реакторов [3], но и для обоснования безопасности водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) больших мощностей с кипением теплоносителя в верхней части ТВЭлов, а также для теплообменных аппаратов в «традиционной» энергетике на органическом топливе.

Методика прогнозирования накопления отложений ПКЖ на ТВЭлах. ВК-50 представляет собой установку с исследовательским корпусным кипящим реактором и естественной циркуляцией теплоносителя в корпусе реактора. Для обоснования проектных решений по реакторам типа АСТ-500 (атомная станция тепло-снабжения), РБМК-1000/1500, ВК-300 на реакторной установке ВК-50 в течение длительной эксплуатации (с 1965) проводились исследования различных типов тепловыделяющих сборок с оболочками ТВЭлов, выполненных из циркониевого сплава Э110 (Zr-1 % Nb), а также конструкционных материалов из нержавеющей сталей (1X18H10T, X18H22B2T2) и сталей перлитного класса (ст.3, ст.20).

Важным этапом этих исследований являлась разработка методики прогнозирования накопления отложений ПКЖ на ТВЭлах, поскольку именно сравнение прогноза с данными материаловедческих исследований отложений на ТВЭлах позволяет определить вклад в отложения различных форм продуктов коррозии железа (растворенной и нерастворенной), режимы работы реактора (стационарные или переходные), во время которых в основном накапливаются отложения, а также основной механизм образования отложений. Для этого была выбрана модель мас-

сопереноса и накопления отложений ПКЖ в контуре теплоносителя с его нагревом и кипением в активной зоне. Механизмы отложения частиц различны в области однофазного потока с конвективным теплообменом, поверхностного кипения и развитого пузырькового кипения. Поэтому распределение отложений вдоль твэлов рассчитывалось по методу математической физики: с выбором участков ($N \geq 20$, 50-100 мм каждый), в пределах которых теплоноситель рассматривался как континуум с единым режимом теплообмена и, соответственно, массопереноса. Весь срок эксплуатации твэлов делят на этапы работы при стационарной мощности, в течение которых концентрация железа в теплоносителе остается практически постоянной, и на этапы переходных режимов работы реактора (в основном, пуски реактора), когда концентрация железа значительно увеличивается. При этом полагают, что линейная мощность на каждом участке равна линейной мощности в середине этого участка. Прирост массы отложений ПКЖ (в пересчете на железо) m_i на i -м участке твэла определяется соотношением

$$m_i = (g_n + g_p) F_i t,$$

где g_n и g_p – скорость роста отложений за счет нерастворенной формы ПКЖ и растворенной формы ПКЖ, кг/(м² с); F_i – площадь поверхности i -го участка твэла, м², t – время, с.

Согласно модельным представлениям о накоплении отложений на теплопередающей поверхности:

1. Скорость роста отложений за счет нерастворенной формы ПКЖ (частиц) пропорциональна их концентрации в теплоносителе и определяется соотношением

$$g_n = \omega_n \frac{V}{F} C_n \rho (1-x),$$

где ω_n – константа осаждения частиц на поверхность, с⁻¹; F – площадь поверхности рассматриваемого участка контура, м²; V – объем участка рассматриваемого участка контура, м³; C_n – концентрация нерастворенной формы продуктов коррозии железа (в пересчете на железо) в теплоносителе в рассматриваемом участке контура, кг/кг; ρ – плотность воды, кг/м³; x – массовое паросодержание, отн. ед.

Механизм отложения частиц зависит от режима теплообмена:

Для зоны конвективного теплообмена (кипение отсутствует)

$$\omega_n = 1,952 \cdot 10^{-11} \frac{T}{\mu \cdot d} \exp\left(-\frac{5032,7}{T}\right) \frac{F}{V},$$

где T – абсолютная температура стенки, К; μ – вязкость воды, Па·с; d – диаметр частиц, м.

Для зоны поверхностного кипения

$$\omega_n = \left(\frac{K_H + V_B + V_f}{P_H^{-1} + (V_B + V_f) / K_H} + \frac{0,7 q_u}{r \rho} \right) \frac{F}{V},$$

где q_u – плотность теплового потока, идущего на испарение, Вт/м²; r – теплота парообразования, Дж/кг; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; K_H – коэффициент массопереноса частиц из ядра потока в пограничный слой, толщина которого равна длине пути торможения частиц, м/с; V_B – скорость выхода частиц из воды на поверхность стенки вследствие броуновской диффузии, м/с; V_f – скорость движения частиц в пограничном слое вследствие местных турбулентных пульсаций, м/с; P_H – вероятность закрепления частиц на стенке.

Для зоны развитого кипения

$$\omega_n = \left(\frac{K_H + V_B + V_f}{P_H^{-1} + (V_B + V_f) / K_H} + \frac{1,58 \cdot 10^{-13} q^2}{\rho (1-x)} \right) \frac{F}{V},$$

где q – общая плотность теплового потока, Вт/м².

2. Образование отложений из растворенной формы ПКЖ происходит по механизму кристаллизации вследствие различной растворимости продуктов коррозии железа при различной температуре теплоносителя и поверхности твэла.

Скорость роста отложений за счет растворенной формы ПКЖ определяется соотношением

$$g_p = \Delta C_s \frac{k_m + V_m}{1 / P_m + V_m / k_m} \rho (1-x),$$

где k_m – коэффициент массопереноса растворенной формы продуктов коррозии железа из ядра потока к стенке, м/с; V_m – скорость выхода растворенных продуктов коррозии железа из воды на поверхность стенки в результате молекулярной диффузии, м/с; P_m – вероятность их отложения на стенке вследствие кристаллизации; ΔC_s – разность между концентрацией растворенных продуктов коррозии железа в потоке теплоносителя и концентрацией соответствующей растворимости при температуре стенки, кг/кг.

Толщина отложений ПКЖ (из частиц магнетита Fe_3O_4) с плотностью ρ_o на i -м участке твэла рассчитывается по формуле

$$h = A \frac{m_i}{F_i \rho_o},$$

где h – толщина отложений, м; $A=1,38$ – коэффициент пересчета массы железа в массу магнетита.

В расчетной методике при стационарном режиме работы реактора течение теплоносителя условно разделялось на две части – ядро потока и пограничный слой. При турбулентном течении в пограничном слое выделялся тонкий ламинарный подслой вблизи стенки и так называемый вязкий подслой с переменным характером течения. В отличие от турбулентного перемешивания в вязком подслое, в пределах ламинарного подслоя характерно неоднородное распределение концентрации частиц. Параметром, характеризующим неоднородность, является отношение плотности потока частиц g , осаждающихся на поверхности твэла, к плотности потока частиц, поступающих в ламинарный подслой при развитом кипении:

$$G = \frac{g}{w_o \times C_s}$$

где C_s – концентрация растворенных продуктов коррозии железа в потоке теплоносителя; w_o – скорость воды на границе ламинарного подслоя

$$w_o = \frac{q}{(1-\varphi) \cdot r \cdot \rho'},$$

где q – поверхностная плотность теплового потока на твэле, Вт/м²; φ – истинное объемное паросодержание потока теплоносителя; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; ρ' – плотность воды при температуре насыщения, кг/м³.

Из (5) следует, что параметр G прямо пропорционален линейной мощности твэла.

Расчетное среднее значение параметра G по теплопередающей поверхности всех твэлов составляет 0,06. Это означает, что в условиях динамического равновесия (притока-оттока примеси) лишь 6 % частиц ПКЖ, поступающих в ламинарный подслой вследствие испарения воды, осаждаются на поверхности твэлов в реакторе, а 94 % возвращается в ядро потока.

Расчет накопления отложений продуктов коррозии железа был выполнен по разработанной методике для твэлов, которые после трех лет облучения в реакторе были подробно исследованы в материаловедческих камерах.

Расчет показал что, основная часть отложений (83 %) образовалась при стационарных режимах работы реактора и лишь 17 % при переходных. Вклад в отложения нерастворенной формы (частицы магнетита) составил около 100 %, растворенной формы продуктов коррозии железа около 0,1 %.

В результате расчета установлено, что в зоне конвективного теплообмена отложения минимальны и определяются, в основном, осаждением частиц ПКЖ. В зоне развитого пузырькового кипения толщина отложений максимальна в области с максимальной мощностью тепловыделения. Объясняется это тем, что отложение частиц ПКЖ происходит в основном у основания растущего парового пузыря на границе раздела трех фаз: пар-вода-обогреваемая поверхность, поэтому скорость роста отложений пропорциональна поверхностной плотности центров кипения. В свою очередь, поверхностная плотность центров кипения имеет сильную (квадратичную) зависимость от теплового потока.

Экспериментальное обоснование расчетной методики накопления отложений. Результаты расчета по разработанной методике дают удовлетворительное согласие с данными материаловедческих исследований отложений на твэлах ТВС. Толщина отложений на поверхности твэлов по данным металлографических исследований шлифов в поперечном сечении составила 28–34 мкм (рис. 1).



Рис. 1. Отложения на поверхности оболочки твэла ТВС на расстоянии 660 мм от нижнего торца сердечника: 1 – отложения; 2 – оболочка твэла

Наилучшее согласие расчета толщины отложений ПКЖ с данными металлографических исследований шлифов в поперечном сечении твэлов получено при плотности отложений частиц магнетита около 2 г/см^3 : плотность магнетита составляет $\rho = 5,2 \text{ г/см}^3$, поэтому пористость отложений из частиц ПКЖ около 60 %.

Расчет дает удовлетворительное согласие формы распределения, а в пределах погрешности профилометрии $\pm 12 \text{ мкм}$ и толщины отложений с результатами послереакторных материаловедческих исследований.

Отложения на твэлах реактора ВК-50 состоят в основном не только из железа, но также из меди: вынос из медьсодержащих сплавов теплообменного оборудования контура теплоносителя (трубные системы регенеративных подогревателей и конденсаторов турбины). В реакторной воде медь находится в растворенной форме, для которой коэффициент распределения между паром и водой $K_p \sim 10^{-3}$ [4]. Поэтому, согласно конвективно-диффузионной модели концентрирования растворенных примесей теплоносителя, у теплопередающей поверхности при кипении (модель процессов “хайд-аут” [5]) концентрация меди в воде у поверхности твэла в 1000 раз выше, чем в ядре потока. Именно поэтому медь осаждается в порах между частицами магнетита, а толщину отложений определяют частицы ПКЖ.

Хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений толщины отложений на твэлах свидетельствует о том, что принятая модель и соответствующие аналитические зависимости правильно отражают накопление отложений продуктов коррозии на твэлах РУ ВК-50.

Конвективно-диффузионная модель выброса продуктов коррозии от поверхности твэлов в теплоноситель кипящего реактора. При разработке математической модели накопления ПКЖ на оболочках твэлов была использована гипотеза, согласно которой частицы продуктов коррозии способны не только концентрироваться в отложениях, но и адсорбироваться на границе раздела фаз вода-пар. Способность адсорбироваться на поверхности пузырей для определенного размера частиц и при определенных режимах энергетически выгодна, поэтому после отрыва пузырей часть ПКЖ может выноситься в ядро потока. Концентрация частиц радиоактивных продуктов коррозии (РПК) в реакторной воде является убывающей функцией от диаметра частиц [6]. Чем ниже концентрация частиц с определенным диаметром в реакторной воде, тем меньше вероятность частицы столкнуться с образующимся пузырем пара, адсорбироваться на нем и выйти из ламинарного подслоя за счет диффузии (броуновской и турбулентной) после отрыва пузыря от поверхности оболочки твэла. Иными словами, с уменьшением концентрации частиц возрастает время нахождения частицы в ламинарном подслое и, следовательно, в частице ПКЖ возрастает удельная активность радионуклида ^{59}Fe , который образуется в результате ядерной реакции $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$.

Однако результаты измерения фильтрации воды при помощи набора полимерных мембран (диаметры пор от 0,2 до 4 мкм), показали, что характер зависимости «увеличение удельной активности ^{59}Fe с увеличением диаметра частиц» справедлив только до определенного размера частиц. Активация относительно крупных частиц происходит в большей степени в ядре потока теплоносителя. Эти частицы, движущиеся вдоль твэла, не способны проникнуть в ламинарный подслой из-за действия на них силы Магнуса. Эта сила возникает из-за наличия градиента скорости и действует в направлении от стенки.

$$F_m = \frac{\pi}{8} \rho d^3 [\omega \times u],$$

где угловая скорость $\omega = -\frac{1}{2} \frac{du}{dx}$; d – диаметр частицы, м; u – продольная скорость, м/с; ρ – плотность воды, кг/м³

Частицы диаметром более 3,5 мкм в основном не участвуют в образовании отложений. У этих частиц скорость, приобретаемая за счет силы Магнуса (w_m), больше скорости конвективного переноса частиц к поверхности твэла (w_0):

$$W_m = \frac{d^2 u^2}{48 \nu \delta_{cl}} > W_0,$$

где δ_{cl} – толщина пограничного слоя, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

В «паровой» зоне при приближении к стенке падает продольная скорость, а в основном течении изменение продольной скорости невелико. Поэтому в этой части ТВС вблизи границы вязкого подслоя максимально произведение $u \frac{du}{dx}$. Соот-

ветственно проникновение крупных частиц в ламинарный подслой у поверхности твэлов останавливают силы Магнуса, наибольшие в верхней части твэла (с минимальными тепловыми нагрузками). Отложения в паровой части твэла плотные, поскольку формируются из мелких частиц, более прочно связанных с поверхно-

стью оболочки. Отложения в нижней, экономайзерной части твэла реактора ВК-50 (с максимальными тепловыми нагрузками) более рыхлые, чем отложения в верхней части твэлов, поскольку в ламинарном подслое «минимально» воздействие сил Магнуса на относительно крупные частицы.

На рис. 2 приведена зависимость скорости конвективного переноса частиц к поверхности твэла (w_0) от координаты вдоль твэла (z). Для сравнения на этом же рисунке показана зависимость скорости, приобретаемой за счет сил Магнуса (w_m), от диаметра частицы (d).

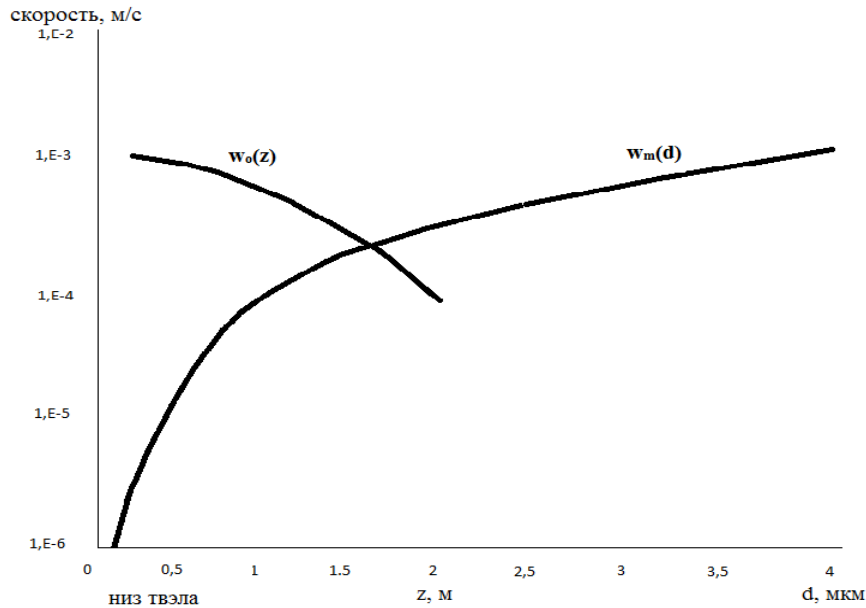


Рис. 2. Зависимость скорости w_0 конвективного переноса частиц к поверхности твэла от координаты z (высоты твэла) и зависимость скорости частицы w_m от поверхности твэла за счет силы Магнуса от диаметра частицы d

Эта теоретическая зависимость совпадает с результатами с измерениями удельной активности ^{59}Fe гамма-спектрометрическим методом (ошибка измерений не более 10 %) по результатам фильтрации реакторной воды на полиядерных мембранах фотометрическим методом (ошибка измерений 15 %): частицы с диаметром 3–3,5 мкм попадают в ламинарный подслой на 20 % длины твэла в нижней его части, из диапазона 2–3 мкм – на 50 % длины твэла, из диапазона 1–2 мкм – практически по всей длине твэла.

Снижение содержания частиц продуктов коррозии железа при переходных режимах работы реактора. Эксперименты доказали, что снижение мощности реактора приводит к пропорциональному снижению скорости конвективного переноса частиц в ламинарный подслой. Поэтому на пониженной мощности реактора снижается максимальный размер частиц, которые способны образовывать отложения на твэлах. Например, если мощность реактора снизится от номинальной (200 МВт) в 2 раза (w_0 уменьшится в 2 раза от максимальной на рис. 2), то максимальный диаметр частиц, которые способны поступать к поверхности твэла средней мощности, уменьшится от 3,5 мкм до 2,5 мкм. Следовательно, очистку теплоносителя от стояночной коррозии в пусковых режимах необходимо максимально про-

водить при кипении теплоносителя на пониженной мощности. На этом низком уровне мощности (менее 20 % от максимальной) методом резкого сброса давления в реакторе на 1–2 МПа в 1 минуту можно вывести частицы продуктов стояночной коррозии более 3 мкм, которые не будут осаждаться на твэлах, но будут утилизироваться на системе очистки теплоносителя. Сброс давления в реакторе сопровождается интенсивным объемным вскипанием воды, а центрами образования дополнительных пузырьков являются неоднородности воды, которыми являются частицы продуктов коррозии. Слабо закрепленные на поверхности частицы в ламинарном подслое адсорбируются на поверхности образующихся пузырьков и выносятся с ними в ядро потока, увеличивая концентрацию ПКЖ в 10 и более раз.

Отработанные пускоостановочные режимы данными способами позволили снизить концентрацию продуктов коррозии в воде реактора ВК-50 на 1-2 порядка по сравнению с ранее применявшимися режимами эксплуатации.

Водно-химический режим для обеспечения надежной работы в условиях кипения. При исследованиях режимов с нарушением водно-химического режима была обнаружена зависимость выхода из строя оболочек твэлов корпусного кипящего реактора от плотности теплоносителя: чем выше паросодержание, тем больше дефектов по высоте ТВС. В верхней части активной зоны на границе раздела пар/вода существует наибольшая опасность для коррозионного растрескивания. Это связано с возможностью концентрирования хлоридных примесей при многократном высыхании порций воды и облегчением доступа кислорода.

Таким образом, установление и поддержание норм водно-химического режима является одной из главных задач эксплуатации оборудования в условиях кипения теплоносителя.

В 1978 г. на установке ВК-50 был внедрен нейтрально-кислородный водно-химический режим с дозированием кислорода в конденсатно-питательный тракт до концентрации 200 мкг/кг. При кислородном водно-химическом режиме значительно повысилась коррозионная стойкость углеродистых сталей и уменьшился вынос продуктов коррозии в теплоноситель. Коррозия углеродистой стали стала носить более равномерный характер по сравнению с эксплуатацией реактора без ввода кислорода в теплоноситель. Состав отложений характеризуется наличием оксидов железа типа маггемит ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$). Маггемитовая пленка способствует замедлению коррозионных процессов на поверхности оборудования и трубопроводов. Скорость коррозии снизилась более чем в 100 раз и составила до 0,02 мм/год, а вынос продуктов коррозии – до 0,01 г/м²×сут. Ввод кислорода ведет к уменьшению коррозии металла и улучшению норм качества питательной воды при работе реактора на мощности.

Кислородный водно-химический режим при эксплуатации оборудования из углеродистой стали внедрялся параллельно на реакторной установке ВК-50 и на тепловых станциях (Конаковская ГРЭС и др.). В результате были получены убедительные доказательства высокой эффективности данного водно-химического режима, и была подтверждена возможность более широкого применения сталей перлитного класса в контурах тепловых и атомных энергетических установок.

Нормальное функционирование кислородного режима приводит к уменьшению случаев выхода из строя (разгерметизации) оболочек твэлов.

Химическая отмывка отложений на оболочках твэлов ТВС ВК-50. Кроме поддержания требуемого водно-химического режима другим действенным способом ресурсной стойкости теплообменной поверхности оборудования является борьба с окисными пленками и отложениями.

В связи с этим были проведены экспериментальные исследования химических отмылок оболочек твэлов различными растворами. Материаловедческие исследования проводили на твэлах ТВС после эксплуатации в активной зоне и мно-

голетнего хранения в бассейне выдержки. После химической отмывки растворами и повторной загрузки ТВС на дооблучение в активную зону реактора также проводились материаловедческие исследования.

Проведенные исследования показали, что наиболее эффективным средством для снятия отложений с поверхности оболочек зарекомендовал раствор «ЭММАК» (mineral miracle solution). Характеристика отмывочного раствора представлена в табл. 1.

Таблица 1

Раствор «ЭММАК» в различных фазах цикла химической отмывки

Фаза цикла	Содержание, г/кг
Окисление (2 часа)	$\text{KMnO}_4 - 1,0$ $\text{HNO}_3 - 1,0$
Восстановление (2 часа)	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6 - 1,0$ $\text{HNO}_3 - 1,0$

После экспериментов с раствором «ЭММАК» отложения на оболочках твэлов практически полностью снимались за 1 цикл химической отмывки, включающий окислительный этап – 2 часа и восстановительный этап – 2 часа.

Изменения отложений на оболочках твэлов до и после химической отмывки раствором «ЭММАК» приведены на рис. 3, 4.



Рис. 3. Диаметр оболочки тепловыделяющего элемента до химической отмывки

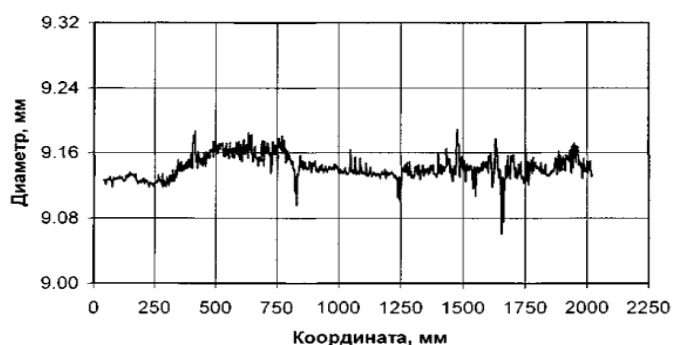


Рис. 4. Диаметр оболочки тепловыделяющего элемента после 1 цикла химической отмывки раствором «ЭММАК»

Как показали послереакторные исследования, химические отмывки с раствором «ЭММАК» не оказывают существенного влияния на состояние материала оболочки. После химической отмывки ТВС отработала в активной зоне реактора без образования дефектов на оболочках твэлов.

Выводы

1. Разработана методика прогнозирования накопления отложений продуктов коррозии железа на тепловыделяющих элементах корпусного кипящего реактора. Основным механизмом разрушения оболочки твэлов является формирование парового подслоя под отложениями, достигшими критического значения.
2. Выполненное моделирование и его практическое подтверждение позволяют принять компенсирующие эксплуатационные меры для решения проблем ресурсной стойкости конструкционных материалов в условиях кипения теплоносителя.
3. Состояние теплообменной поверхности в кипящем теплоносителе в основном зависит от водно-химического режима.
4. Внедрен коррекционный (кислородный) водно-химический режим, позволяющий широко применять стали перлитного класса в контурах энергетических установок.
5. Для эффективного снятия отложений отработана технология химической отмывки, которая обеспечивает работоспособность теплообменного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тяпков В.Ф., Чудакова И.Ю., Алексеенко О.А.* Водно-химический режим на энергоблоках АЭС с РБМК-1000 // Теплоэнергетика. – 2011. – № 7. – С. 21-25.
2. Review of fuel failures in water cooled reactors. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010, IAEA nuclear energy series. NF-T-2.1.
3. *Курский А.С., Калыгин В.В., Семидоцкий И.И.* Перспективы атомной теплофикации в России // Теплоэнергетика. – 2012. – № 5. – С. 1-7.
4. *Смирнова И.М.* Метод аналитического контроля поверхностных отложений на оболочках твэлов ядерных реакторов с водным теплоносителем // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 11. – Т. 75. – С. 3-7.
5. *Краснов А.М., Ещеркин В.М., Шмелев В.Е. и др.* Процессы концентрирования растворенных примесей теплоносителя («хайд-аут») на исследовательском реакторе ВК-50 // Теплоэнергетика. – 2002. – № 7. – С. 18-23.
6. *Краснов А.М., Ещеркин В.М., Черкасов В.В. и др.* Экспериментальное обоснование методики накопления продуктов коррозии железа на твэлах реактора ВК-50 // Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства: Сб. рефератов и статей. – 2003. – Вып. 5. – С. 17-23.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.В. Попова.

Курский Александр Семенович – Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара (ОАО «ВНИИНМ»); e-mail: kurskiy.aleksandr@rambler.ru; 123098, г. Москва, ул. Рогова, 5а, а/я 369; тел.: 89262729774; к.т.н.; главный инженер.

Калыгин Владимир Валентинович – Государственный научный центр «Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (ОАО «ГНЦ НИИАР»); e-mail: kalygin@niiar.ru; 433510, Ульяновская область, Димитровград, ул. Димитрова, 6-22; д.т.н.; профессор; зам. директора по научной работе.

Kursky Alexandr Semyonovich – High Tech Research Institute of Inorganic Materials (JSC «HTRIM»); e-mail: kurskiy.aleksandr@rambler.ru; 5a, Rogova street, Moscow, a/ya 369, 123098, Russia; phone: +79262729774; cand. of eng. sc.; chief engineer.

Kalygin Vladimir Valentinovich – State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors (JSC «SSC RIAR»); e-mail: kalygin@niiar.ru; 6-22, Dimitrov street, Dimitrovgrad, 433510, Russia; dr. of eng. sc.; professor; director of research.