

ОБЪЕМНЫЙ ЭЛЕКТРОЛИЗ ВОДЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И РЕАКТОРОВ АЭС И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ

А.В.Кулаков, В.А. Ранцев-Картинов*, В.П. Мельников, А.К. Паповянец
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

* НИЦ Курчатовский институт. 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1



Предложена новая теоретическая модель в механизме коррозионного повреждения трубопроводов систем охлаждения реакторов АЭС, основанная на учете формирования поляризованного поверхностного слоя воды на ее фазовой границе с твердым телом. При образовании в циркуляционном контуре водной суспензии с твердыми наночастицами конструкционного материала, отслаивающимися от основы в результате «старения» материала и под воздействием нейтронного потока, создаются благоприятные условия для реализации объемного электролиза воды с образованием нанопузырьков «гремучей» смеси (водород, кислород). В результате микроскопического накопления этой смеси в местах локального нарушения гидродинамики пристенного ламинарного слоя воды возникают микровзрывы «гремучей» смеси, интенсифицирующие коррозию. При детальном рассмотрении физико-химического процесса на фазовой границе молекулы воды представляются в виде «пружинного маятника», и их столкновения между собой приводит к возбуждению колебаний ионов водорода (ИВ) относительно ионов кислорода (ИК), сильно отличающихся по частотам, определяемым различием в массах этих ионов.

При решении уравнения движения ИК в осциллирующем поле колеблющихся ИВ установлено возникновение потенциального поля, препятствующего проникновению «тяжелого» компонента (ИК) к центру колебаний «легкого» компонента (ИВ). Кислород с большим сродством к электронам формирует их поверхностную плотность, обеспечивающую напряженность поля, равную примерно 2,6 МВ/см, под действием которой и происходит электролиз воды на каждой наночастице с образованием газовых составляющих (H_2 , O_2). Присутствие водорода и насыщение им конструкционного материала с увеличенными зернами лигатуры интенсифицирует процесс отслаивания материала с образованием наночастиц.

Меры безопасности должны учитывать необходимость диагностики труб и наличие «нанопорошков» в воде для своевременной замены труб на новые, что особенно актуально при длительной эксплуатации реакторов.

Ключевые слова: безопасность АЭС, система охлаждения реакторов, молекула воды, ионы кислорода, водород, электролиз воды, коррозионная стойкость, нержавеющая сталь, волны детонации.

© А.В.Кулаков, В.А. Ранцев-Картинов, В.П. Мельников, А.К. Паповянец, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Дефекты оборудования и трубопроводов систем охлаждения реакторов (СОР) атомных электростанций (АЭС) могут стать причиной аварийной разгерметизации соответствующих технологических контуров [1, 2]. Основным механизмом повреждения при этом является коррозионное растрескивание материала под напряжением, обусловленное воздействием на него в коррозионно-активной среде скачков градиентов температур и давления, вызываемых микровзрывами в СОР. Современные методы борьбы с этим явлением, как правило, сводятся к следующему:

- оперативное определение места и масштаба аварии [3, 4];
- стандартный вихретоковый контроль теплообменных труб, проводимый в период планово-предупредительного ремонта, с выявлением дефектов, их устранением или выводом дефектных труб из состава СОР [5];
- внедрение системы автоматизированного контроля остаточного ресурса оборудования и трубопроводов СОР [6].

Однако, несмотря на определенные успехи в предупреждении и устранении разгерметизации контуров СОР указанными методами на АЭС и связанными с коррозионным растрескиванием материала трубопроводов, решить до конца рассматриваемую проблему пока не удастся. Это обусловлено тем, что упомянутые меры не учитывают ряд важных, с нашей точки зрения, последовательностей явлений в физико-химических процессах, которые, в конечном счете, могут приводить к

- процессу наночелушения материала трубопроводов СОР в циркулирующую по ним воду;
- образованию водной наносuspензии (ВНС) из отшелушенных наночастиц (НЧ) материала трубопроводов (МТ) СОР в воде;
- процессу объемного электролиза воды (ОЭВ), циркулирующей в СОР на НЧ МТ СОР с образованием нанопузырьков «гремучей смеси» (ГС);
- локальным микроскопическим накоплениям ГС в местах нарушения ламинарного течения воды;
- микровзрывам накоплений ГС.

Предлагаемый механизм процесса разрушения МТ СОР впервые рассматривается авторами работы с целью разработки своевременной диагностики по принятию необходимых мер и предупреждению неблагоприятных последствий от указанного механизма ОЭВ. При этом исследуются явления на разделе поверхности фаз в теплоносителе и обусловленные ими механизмы разрушения теплообменных труб СОР.

Сложность решения данной проблемы связана с влиянием на электрохимические процессы в воде ряда важных факторов, в том числе наличия в ней мелкодисперсной твердой и газовой фазы (пузырьки, заполненные парами воды), а также специфики пристеночной гидродинамики несущего взвесь потока с различными вариантами поведения НЧ в ламинарном подслое [7, 8].

Физико-химические свойства водных дисперсных систем в значительной мере определяются двойным электрическим слоем, образующимся на поверхности раздела фаз [9 – 11]. Так, в работе [12] определен электрический заряд на пузырьке гравитационного происхождения в воде и подсчитана напряженность электрического поля на его поверхности при звуковой частоте, равной примерно 20 кГц.

Физическая модель жидкого состояния до настоящего времени окончательно не построена, а новые знания зачастую еще более усложняют решение рассматриваемой проблемы. Например, было установлено, что вода состоит из кластеров, содержащих от трех до 18-ти молекул, обладающих большими электрическими дипольными моментами [13]. Взаимодействие дипольных моментов отдельных молекул воды и их кластеров является одной из причин, существенно затрудняющих теоретическое

описание и знание макроскопических свойств полярной жидкости (поверхностного натяжения s , диэлектрической проницаемости ϵ , поляризации и др.).

ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СТАРЕНИЕМ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ТРУБОПРОВОДОВ СОР АЭС

Наиболее интенсивному старению материалов [14, 15] подвергаются те из них, которые относятся к конструкционным элементам, подвергающимся воздействию нейтронов. К ним, в частности, относятся и материалы трубопроводов СОР АЭС, которые непосредственно имеют прямой контакт с нейтронами. Особенно сильно процессы старения под воздействием нейтронных потоков сказываются на различных сплавах, поскольку в результате несколько меняется их элементный состав, а также сама кристаллическая структура, от которой зависят их прочностные характеристики. Так, например, в материале труб СОР АЭС из нержавеющей стали под воздействием нейтронов растут размеры зерен лигатуры (ЗЛ). Далее, на выходе нейтроны с внутренней границы труб могут в состаренном материале вырвать или отшелушить мельчайшие частицы материала трубы. Поскольку элементный состав ЗЛ относится, в основном, к элементам группы железа, то присутствие в циркулирующей воде СОР водорода приводит к насыщению укрупненных ЗЛ этим газом и, следовательно, к «охрупчиванию» ЗЛ, сопровождающимся интенсивным их «отшелушиванием» в виде НЧ. Характерные радиусы таких частиц могут составлять $\sim 10^{-7}$ см (~ 1 нм), а потому их трудно обнаружить диагностикой примесных загрязнений [16]. К тому же они не фильтруются обычно применяемыми в таких системах фильтрами. Эти отшелушенные НЧ с циркулирующей водой образуют ВНС, в которых неминуемо идет процесс ОЭВ, покрывающий весь объем СОР.

КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

Принимая во внимание отмеченные выше трудности, затрудняющие теоретическое описание и понимание макроскопических свойств воды как полярной жидкости, авторы предлагают к рассмотрению качественную модель формирования граничных условий на поверхности воды, в основе которой лежит анализ тепловых колебаний ионов кислорода (ИК) и ионов водорода (ИВ), составляющих молекулу воды (МВ). Тепловое движение МВ вдали от ее границы представляет собой броуновское движение, которое сохраняет макроскопические статические характеристики воды как таковой. Это приводит к случайному положению ИВ МВ относительно ИК. Однако при приближении к границе данной среды, например, с атмосферой появляется выделенное направление, перпендикулярное границе раздела, и в таком случае рассмотрения только броуновского движения МВ будет уже недостаточно. Действительно, на МВ в пограничном слое со стороны атмосферы не действуют другие МВ и, следовательно, симметрия генерации броуновского движения нарушается.

Для более подробного рассмотрения процессов формирования условий на такой границе рассмотрим МВ в виде пружинного маятника с жесткостью пружины k . Столкновения между МВ в первом приближении приводят к возбуждению колебаний ИВ относительно ИК и колебаний последних относительно центра масс. В реальных условиях частота колебаний ионов МВ гораздо выше частоты столкновений между МВ, а потому ими в нашем приближении можно пренебречь. Масштабы же частот колебаний ИК и ИВ при этом существенно отличаются друг от друга (в четыре раза) из-за значительной разницы в массе. Пусть водородный компонент МВ в каждой точке совершает локальные колебания с собственной

частотой ω_H , равной

$$\omega_H = (k/m_H)^{1/2}, \quad (1)$$

которую можно рассматривать как высокочастотную по сравнению с соответствующей частотой колебаний ионов кислорода ω_0 , равной

$$\omega_0 = (k/m_0)^{1/2}, \quad (2)$$

где ω_H , ω_0 , m_H , m_0 – частоты колебаний масс ИВ и ИК соответственно. Но ИВ совершают еще и тепловое броуновское движение как целое образование. Поскольку нас интересует только качественный результат, то мы еще более упростим рассматриваемую систему, а именно, разорвем «пружинную» связь между ИВ и ИК и заменим ее вынуждающей к колебаниям силой. Представим, что ИВ и ИК – это ионы плазмы, совершающие колебания только с частотами ω_H и ω_0 . Тогда ИК за один период таких колебаний в силу своей инерции «не успевают» за движением ИВ, т.е. их смещение ξ_0 за характерные времена колебаний ионов водорода имеют меньшие амплитуды по сравнению с амплитудами ξ_H ИВ ($\xi_0 < \xi_H$).

Уравнение движения ИК в осциллирующем поле колеблющихся ИВ можно представить в виде уравнения движения

$$m_0 \cdot (\ddot{\mathbf{r}}_0 - \ddot{\mathbf{r}}_{00}) = \mathbf{F}(\mathbf{r}, t), \quad (3)$$

где $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{00}$, а $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$ – быстро осциллирующая сила, действующая на ИК, причем

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{F}_0(\mathbf{r}) \cdot \exp(i\omega_H t). \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{F}_0(\mathbf{r})$ – амплитуда колебаний в точке \mathbf{r} , максимальная в центре при $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{00}$ и спадающая к границе колебаний $\mathbf{r} \geq \xi_H$.

Разделим данное движение на «быстрое» $\xi(t)$ и «медленное» $R(t)$, т.е.

$$r(t) = R(t) + \xi(t), \quad (5)$$

тогда из (3) получим

$$m_0 \cdot (\ddot{R} + \ddot{\xi}) = F(R + \xi) = F(R) + \xi \cdot \frac{\partial F}{\partial R}. \quad (6)$$

Сокращая быстроосциллирующие члены

$$m_0 \cdot \ddot{\xi} = F(R) \quad (7)$$

и усредняя по быстрым осцилляциям, получим

$$m_0 \cdot \ddot{R} = \xi(R, t) \cdot \frac{\partial F}{\partial R}. \quad (8)$$

Для $\xi(R, t)$ решение этого уравнения имеет вид

$$\xi = \xi_0(R) \cdot \exp(i \cdot \omega_H \cdot t), \quad (9)$$

причем

$$F_0(R) = m_0 \cdot \xi_0 \cdot \omega_H^2. \quad (10)$$

Отсюда следует, что

$$\xi_0(R) = F_0(R) / (m_0 \omega_H^2), \quad (11)$$

т.е. имеем

$$m_0 \ddot{R} = \frac{F_0(R)}{m_0 \omega_H^2} \frac{\partial F_0(R)}{\partial R} = - \frac{\partial}{\partial R} \left(- \frac{F_0^2(R)}{2m_0 \omega_H^2} \right). \quad (12)$$

Таким образом, в нашей качественной модели для частиц с массой m_0 существует потенциальное поле $\Phi(R)$, определяемое выражением

$$\Phi(R) = -F_0^2(R)/(2m_0\omega^2_H). \quad (13)$$

Этот потенциал препятствует проникновению «тяжелого» компонента (ИК) к центру колебаний «легкого» компонента (ИВ) (т.е. внутрь от границы раздела), что эквивалентно присутствию на поверхности воды и водяных капель иона кислорода.

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ – ОСНОВА МЕХАНИЗМА ОЗВ В ТРУБОПРОВОДАХ СОР

В результате, в пограничном поверхностном слое воды полярные МВ выстраиваются перпендикулярно этой поверхности, причем таким образом, что ИК всегда оказываются на самой поверхности раздела, заряженной в конечном итоге отрицательно благодаря сродству кислорода к электрону и захвата из атмосферы, граничащей с поверхностью воды, свободных электронов. Последних в реальности вполне достаточно, чтобы на поверхности воды обеспечить такую их плотность, которая не давала бы скачка напряженности электрического поля (ЭП) при переходе от напряженности ЭП внутри полярного слоя МВ к напряженности в пространстве за поверхностным слоем ИК.

В установившихся стационарных условиях на границе раздела давление от поверхностного натяжения ИВ и плотность энергии ЭП от кулоновского отталкивания одноименно заряженных ионов МВ должны уравниваться. В таком случае

$$\epsilon E^2 / (8\pi) \approx \sigma / d. \quad (14)$$

Кислород, имея высокое сродство к электронам, притягивает к поверхности воды такое их количество, чтобы их поверхностная плотность обеспечила напряженность ЭП на этой поверхности, равную её значению внутри МВ. Отсюда с учетом (14) следует, что напряженность ЭП на поверхности воды должна составлять

$$E \approx - [8\pi\sigma / (\epsilon d)]^{1/2}. \quad (15)$$

С учетом того, что для электрического потенциала ϕ для ЭП справедливо соотношение

$$E \equiv -\nabla\phi, \quad (16)$$

окончательно с учетом значений параметров воды имеем

$$\phi = -d \cdot [8\pi\sigma / (\epsilon \cdot d)]^{1/2} = (8\pi\sigma d / \epsilon)^{1/2} \approx -0.26 \text{ В}. \quad (17)$$

Это выражение, как и (15), справедливо и для сферического случая [17]. В данные формулы входят табличные значения параметров воды, т.е. величины, не зависящие от размера капель воды или пузырьков воздуха в ней, отличие которых в потенциалах определяется только знаком. В этой связи следует заметить, что рассматриваемая напряженность ЭП на поверхности твердых частиц, контактирующих с водой суспензии, аналогична напряженности ЭП пузырьков воздуха, формируемых на водной поверхности океана.

Такая же ожидаемая напряженность ЭП должна иметь место на поверхности твердых частиц суспензий в воде, что предложено авторами к использованию в новых нанотехнологиях, позволяющих заменить, например, высокотемпературные химические реакции для обжига на электрохимические в растворах при комнатной температуре [18].

Таким образом, на границе раздела твердотельных НЧВНС появляется ЭП напряженностью E , равной

$$E \sim - \varphi/r \approx 2.6 \text{ МВ/см} . \quad (18)$$

Под действием такой напряженности поля должен происходить электролиз воды на каждой НЧ ВНС с образованием газовых составляющих согласно соотношению



Фактически, это приводит к новому, впервые открытому авторами механизму ОЭВ внутри трубопроводов СОР АЭС, который и является основной причиной появления водорода и кислорода, т.е. «гремучей смеси» внутри СОР.

ВЛИЯНИЕ ОЭВ В ТРУБОПРОВОДАХ СОР НА БЕЗОПАСНОСТЬ АЭС

Если даже температура в месте протекания процесса намного ниже температуры начала горения водорода в кислороде ($t_{\text{гор}} \approx 550^\circ\text{C}$), тем не менее, эта газовая смесь, по существу, является потенциальной взрывчаткой, ибо горение в ней может осуществляться под действием волны детонации, скорость распространения которой примерно лишь в два раза уступает скорости детонации в твердотельных взрывчатых веществах типа тринитротолуола.

Поскольку диагностика физических параметров в реакторах усредняется по пространству и по времени, то система безопасности работы реактора не успевает отреагировать на локальные кратковременные скачки их значений, а это не исключает, что могут иметь место кратковременные локальные скачки температуры с рабочей температуры $t_{\text{раб}} \approx 350^\circ\text{C}$ вплоть до $t_{\text{гор}} \approx 550^\circ\text{C}$. В связи с этим, в целях обеспечения безопасности при реализации РВ предусматривается селективный сбор компонентов разложения по соответствующим каналам – сборникам. Для тех же процессов, при которых компоненты РВ выделяются равномерно по всему объему и потому отсутствует возможность их пространственного разделения, очевидна необходимость принятия специальных мер. В частности, следует таким образом организовать технологический процесс, чтобы гарантировать условия, при которых температура в месте скопления ГС была бы ниже температуры начала возгорания водорода. Это означает, в частности, исключение в контуре тупиковых карманов, в которых происходит сепарация газов, растворенных, а также образуемых в СОР АЭС и находящихся в зоне выделения или транспортировки энергии. В противном случае, вследствие ухудшенных условий теплоотвода от таких карманов не исключается перегрев ГС вплоть до критической температуры, соответствующей температуре возгорания водорода, с последующим взрывом ГС.

В рамках рассматриваемой модели следует обратить внимание на дополнительный важный фактор. Известно, что одной из основных причин, приводящей к «охрупчиванию» высоколегированных сталей, является растворяемый в них водород. Атомы водорода, внедряясь между узлами кристаллической решетки, ослабляют межатомные связи, понижая напряжение скола. Водород может растворяться в материале также в процессе коррозии, возникающей в результате электрохимической реакции в водных растворах. Одним из условий его накопления в металлическом сплаве является присутствие в атомарной форме. Для рассматриваемого случая электрохимическая реакция в водном растворе идет по типу



Растворенный в металле водород может синергетически провоцировать также рост коррозионных трещин за счет своей диффузии в район окраин указанных трещин, которые к моменту появления водорода уже приостановили свой рост. Атомы водорода, накапливаясь, существенно снижают прочность металла и стимулируют трещины к их дальнейшему росту [19].

Итак, при анализе ОЭВ с образованием в ней атомарного водорода и влиянием на коррозионную стойкость материалов СОР АЭС следует принимать во внимание фактор «старения» сплавов из нержавеющей стали. Под воздействием нейтронных потоков в активной зоне реактора происходит увеличение зерен лигатуры (ЗЛ) этих материалов. Присутствие же в воде водорода и насыщение им материалов СОР с возросшими размерами ЗЛ интенсифицирует процесс «шелушения» материалов со стороны внутренней (контактной) поверхности с образованием нанопорошков, преимущественно на основе никеля и хрома. Данный процесс является дополнительным к общепринятым последствиям нейтронного облучения конструкционных материалов, связанным с изменением их элементного состава, кристаллической структуры и прочностных характеристик. С этой точки зрения актуальна проблема разработки и поиска для элементов активной зоны реакторов материалов, альтернативных существующим – стойким к воздействию нейтронов и с низким значением коэффициента линейного расширения α (например, для чистого кварцевого стекла $\alpha \approx 0.55 \cdot 10^{-6}$ К).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено теоретическое рассмотрение предлагаемого нового механизма ОЭВ в СОР АЭС и влияния этого процесса на коррозионную стойкость конструкционных материалов систем охлаждения АЭС. Показано, что на фазовой границе «твердое-жидкое» формируется ЭП напряженностью вплоть до $\sim 2,6$ МВ/см, под действием которого и происходит впервые открытый авторами ОЭВ в трубопроводах СОР с образованием водорода, кислорода и конечного продукта – высокодисперсных твердотельных частиц коррозионного происхождения. При этом водород, растворимый в конструкционном материале, в результате электрохимических реакций в водных растворах в дополнение к ухудшению физических свойств материала (прочность и др.) может инициировать рост коррозионных трещин. В связи с этим своевременный контроль состояния внутренних поверхностей СОР следует основывать как на диагностике труб, так и на наличии в воде высокодисперсных твердотельных частиц, в том числе наноразмерных, как индикаторе коррозионных процессов. Меры безопасности должны предусматривать своевременную замену труб СОР на новые, что актуально для всех реакторов, но особенно для тех, которые находятся в эксплуатации в течение продолжительного времени.

Работа выполнена в рамках Соглашения № 14.579.21.0120 от 05 ноября 2015 г. между Министерством образования и науки Российской Федерации и АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57915X0120) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. *Bosh S.* A review of Nuclear Piping Failures at their use in establishing the reliability of Piping Systems // Service Experience in Fossil and Nuclear Power Plant, ASME 1999-PVP. – Vol. 392. – PP. 137-155.
2. *Gosselin S., Fleming K.* Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment // Proceedings of ICONS 5th International Conference of Nuclear Engineering. Poster 2641-1997. – 10 p.
3. *Кулаков А.В., Матвеев А.Л., Овчинников В.А., Роцин Н.Г.* Определение расхода течи теплоносителя под системой контроля влажности при разгерметизации контура охлаждения реактора. // Известия РАН. Энергетика. – 2013. – № 5. – С. 82-85.
4. *Матвеев Е.Л., Кулаков А.В., Зубченко А.С.* Акустико-эмиссионный контроль течи в трубопроводах. // Тяжелое машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 1-8.
5. *Тесленко М.В.* Расположение дефектов на теплообменных трубах парогенераторов.

Прогнозирование количества заглушенных труб. // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 8. – С. 35-39.

6. *Богачев А.В., Галиев Р.С.* Внедрение на энергоблоке №1 Ростовской АЭС системы автоматизированного контроля остаточного ресурса оборудования и трубопроводов реакторной установки. // Теплоэнергетика. – 2003. – № 5. – С. 16-18.

7. *Нигматуллин Р.И.* Динамика многофазных сред, т. 1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.

8. *Паповянец А.К., Мельников В.П., Воронин И.А., Григоров В.В.* Влияние режимов работы и физических характеристик взвесенесущего потока в вертикальной трубе на пристеночную поперечную миграцию твердых частиц (в печати).

9. *Марч Н., Тоси М.* Движение атомов жидкости. / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1980. – 296 с.

10. *March N.H., Tosi N.L.* Introduction to liquid State Physics. London. World Sci. Publ., 2002, 432 p.

11. *Nikolai G.J., Pings C.J.* Structure of Liquids // Journal of Chemical Physics. – 1967. – Vol. 46. – No. 4. – PP. 1401-1411.

12. *Маргулис М.А.* Сонолюминисценция. // УФН. – 2000. – № 3. – С. 263-287.

13. *Moro R., Rabinovitch R., Xia Ch., Kresin V.V.* Electric Dipole Moments of Water Cluster from a Beam Deflection Measurement. // Phys.Rev.Lett. – 2006. – Vol. 97. – PP. 123-140.

14. Safe Long Term Operation of Nuclear Power Plants, Safety Reports Series –Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008. – No. 57. – 35 p.

15. Determination of Mechanical Properties of Aged Components Using Instrumented Hardness Testing and other Miniature Specimen Testing Techniques / G.B. Lenkey at al. // J. Strength of Materials. – 2013. – Vol. 45. – No 4. – PP. 433-441.

16. Перспективы применения основанных на волновой оптике методик детектирования и фракционирования микрочастиц в технологических средах АЭС. / С.Ю. Игашов и др. Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике. / Тезисы докладов. – г. Сосновый Бор, 20-22 сентября 2005 г. – С.46-47.

17. *Rantsev-Kartinov V.A.* «Waterspout» as a special type of atmospheric aerosol dusty plasma. / Proc. 31st Eur. Phys. Soc. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion. – London, UK, 2004, ECA. – Vol. 28G. – PP. 4-5.

18. *Кулаков А.В., Ранцев-Картинов В.А.* Новая нанотехнология – основа комплексного развития и обороны приморских территорий и акваторий РФ. // Экономические стратегии. – 2014. – № 9. – С. 22-23.

19. Доступно на сайте <https://download.e-bookshelf.de/download/0001/1829/05/L-G-0001182905-0002999156.pdf>

Поступила в редакцию 29.07.2016 г.

Авторы

Кулаков Анатолий Васильевич, советник директора отделения, д.ф.-м.н.

E-mail: kulan07@yandex.ru

Ранцев-Картинов Валентин Андреевич, с.н.с. НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н.

E-mail: rankarva@mail.ru

Мельников Валерий Петрович, и.о. зам. генерального директора – директор отделения, к.т.н.

E-mail: vmelnikov@ippe.ru +7(484) 399- 85-99

Паповянец Альберт Константинович, в.н.с., к.т.н.

E-mail: arapovyants@ippe.ru

UDC 622.276:658.58; 622.279:658.5

BULK ELECTROLYSIS OF COOLING SYSTEM WATER OF PRODUCTION PLANTS AND NPP REACTORS AND ITS IMPACT ON SAFETY

Kulakov A.V., Rantsev-Kartinov V.A. *, Melnikov V.P., Papovyants A.K.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»,
1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

*NRC «Kurchatov Institute»,
1 Akademik Kurchatov sq., Moscow, 123182 Russia

ABSTRACT

The paper presents a new theoretical model in the mechanism of NPP reactor cooling system pipelines' corrosion damage based on taking account of the formation of polarized surface layer of water at its interface with a solid body.

As aqueous suspension is generated in the circulation loop containing solid-state nanoparticles of the structural material, which peel off as a result of this material «aging» and when exposed to neutron flux, favorable conditions are provided for implementation of bulk water electrolysis with the formation of «explosive mixture» nanobubbles (hydrogen, oxygen). Due to microscopic accumulation of this mixture in the areas of local near-wall laminar water layer disturbance, microexplosions of the «explosive mixture» occur, which intensify corrosion. Under close consideration of the physico-chemical process at the interface, the water molecules are represented as a «spring pendulum», and their intercollision results in vibrational excitation of hydrogen ions (HI) relative to oxygen ions (OI), that differ greatly in the frequencies, specified by the differences in the mass of these ions.

When solving the OI motion equation in the oscillating field of vibrating HI, it was found that a potential field emerged, that prevented the entry of the «heavy» component (OI) to the oscillation center of the «light» component (HI). Oxygen with its high electron affinity forms the electrons' surface density, providing the field strength equal to ~ 2.6 MV/cm, which induces water electrolysis on each nanoparticle with the production of gas components (H₂, O₂). The presence of hydrogen and hydrogen saturation of the structural material with increased alloying elements grains intensifies the process of material peeling with the formation of nanoparticles.

The safety measures should involve the need of diagnostics of the pipes and the presence of «nanopowders» in the water for timely replacement of pipes with the new ones, which is of vital importance for long operational life reactors.

Key words: NPP safety, reactor cooling system, water molecule, oxygen ions, hydrogen, water electrolysis, corrosion resistance, stainless steel, detonation waves.

REFERENCES

1. Bosh S. A review of Nuclear Piping Failures at their use in establishing the reliability of Piping Systems. *Service Experience in Fossil and Nuclear Power Plant, ASME 1999-PVP*, v. 392, pp. 137-155.
2. Gosselin S., Fleming K. Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment. Proceedings of ICONS 5th International Conference of Nuclear Engineering. Poster 2641-1997. 10 p.
3. Kulakov A.V., Matveev A.L., Ovchinnikov V.A., Roshchin N.G. Determination of Coolant Leaks Flow Rate under the Humidity Control System during Depressurization of the Reactor Cooling Circuit. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2013, no. 5, pp. 82-85 (in Russian).
4. Matveev Ye.L., Kulakov A.V., Zubchenko A.S. Acoustic Emission Monitoring of Leak in Pipelines.

- Tyazhyoloe mashinostroenie*. 2015, no. 8, pp.1-8 (in Russian).
5. Teslenko M.V. Location of Defects on Heat Exchange Tubes of Steam Generators. Predicting the Number of Plugged Tubes. *Tyazhyoloe mashinostroenie*. 2012, no. 8, pp. 35-39 (in Russian).
6. Bogachev A.B., Galiev R.S. Introduction to Automated Residual Life Monitoring System for the Reactor Equipment and Pipelines at the Rostov NPP, Unit 1. *Teploenergetika*. 2003, no. 5, pp. 16-18 (in Russian).
7. Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media, v.1. Moscow. Nauka Publ., 1987. 464 p. (in Russian).
8. Papovyants A.K., Melnikov V.P., Voronin I.A., Grigorov V.V. The Effect of Operating Modes and Physical Characteristics of Slurry Carrying Stream in a Vertical Tube on Near-Wall Particulate Migration (in publishing).
9. March N., Tosi M. Atomic Dynamics in Liquids. Moscow. Metallurgiya Publ., 1980. 296 p. (in Russian).
10. March N.H., Tosi N.L. Introduction to liquid State Physics. London. World Sci. Publ., 2002, 432 p.
11. Nikolai G.J., Pings C.J. Structure of Liquids. *Journal of Chemical Physics*, 1967, v. 46, no. 4, pp.1401-1411.
12. Margulis M.A. Sonoluminescence. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2000, no. 3, pp 263-287 (in Russian).
13. Moro R., Rabinovitch R., Xia Ch., Kresin V.V. Electric Dipole Moments of Water Cluster from a Beam Deflection Measurement. *Phys.Rev.Lett*. 2006, v. 97, pp.123-140.
14. Safe Long Term Operation of Nuclear Power Plants, Safety Reports Series. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2008, no. 57, 35 p.
15. Lenkey G.B., Szavai Sz., Rozsahegyi P., Koves T., Jonas. Sz., Beleznai. R. Determination of Mechanical Properties of Aged Components Using Instrumented Hardness Testing and other Miniature Specimen Testing Techniques. *J. Strength of Materials*. Jul 2013, v. 45, no. 4, pp.433-441.
16. Ugarov S.Yu., Lavrentyev N.P., Motin Y.D., Jurmanov V.A., Pyrkov I.V., Kozhin V.N. Prospects for the application based on the wave optics methods for the detection and fractionation of microparticles in technological media of NPP. Problems and prospects of development of chemical and radiochemical control in nuclear power industry. Abstracts. Sosnovy Bor, 20-22 Sept 2005, pp. 46-47 (in Russian).
17. Rantsev-Kartinov V.A. «Waterspout» as a special type of atmospheric aerosol dusty plasma. Proc. 31st Eur. Phys. Soc. conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion (London, UK, 2004), ECA, v. 28G, pp. 4-5.
18. Kulakov A.V., Rantsev-Kartinov V.A. New nanotechnology – the Basis of Integrated Development and Defense of the RF Coastal and Water Areas. *Economicheskie Strategii*. 2014, no. 9, pp. 22-23 (in Russian).
19. Available at <https://download.e-bookshelf.de/download/0001/1829/05/L-G-0001182905-0002999156.pdf>

Authors

Kulakov Anatoliy Vasilyevich , Advisor Director of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: kulan07@yandex.ru

Rantsev-Kartinov Valentin Andreevich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: rankarva@mail.ru

Mel'nikov Valery Petrovich, Deputy Director General – Director of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: vmelnikov@ippe.ru

Papovyants Al'bert Konstantinovich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: apapovyants@ippe.ru