

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИЙНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕАКТОРА БРЕСТ-300 В СРЕДЕ ЛОГОС-АЭРОГИДРОДИНАМИКА

Павлов С.В.¹, Семенов А.О.²

¹ТПУ, ИЯТШ, гр.0А11, e-mail: svp36@tpu.ru

²ТПУ, ИЯТШ, ОЯТЦ, доцент, e-mail: semenov_ao@tpu.ru

Введение

Разработка и эксплуатация реакторов любого типа связана с решением ряда конструкционных и эксплуатационных задач. Данные проблемы, чаще всего, связаны с необходимостью осуществления контроля за безопасностью эксплуатации реакторной установки. Именно осознание возможных ситуаций, последствия которых могут приводить к выходу реактора из строя или аварийным ситуациям, служит основой для разработки соответствующих нормативно-правовых документов и датчиков, обеспечивающих контроль за данными системами. Однако, не всегда можно в полной мере предсказать всю полноту событий, которые могут произойти на реакторе, способных повлиять на его стабильность. К тому же многие реакторы со временем модернизируются под использование новых материалов для увеличения прочностных характеристик, тепловой и энергетических мощностей. Поэтому, важным этапом при создании любого прототипа является компьютерное моделирование процессов, которые могут повлиять на стабильность работы реактора.

Одним из таких процессов является коррозия внутренних поверхностей активных зон, в следствии работы в агрессивных средах под воздействием высоких температур и давлений. Под воздействием коррозии происходит разрушение части поверхностей труб и накопление в данных местах, и по течению теплоносителя, коррозионных отложений. В зависимости от параметров среды в первом или втором контурах реактора, интенсивность протекания данного процесса может различаться, однако данный процесс будет оказывать влияние на теплообмен между контурами, приводя к уменьшению теплового КПД установки.

Моделирование процесса коррозии на внутренних поверхностях и исследование его влияние на теплообмен позволяют оценивать изменение процесса передачи тепла от первого контура ко второму и эффективность работы реакторной установки на время топливной компании.

Основная часть

БРЕСТ-300 – (Быстрый Реактор Естественной безопасности или Быстрый Реактор Естественной безопасности со Свинцовым теплоносителем) – реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и ТВС на основе СНУП-топлива. Генеральным конструктором и научным руководителем проекта по созданию данного реактора выступает НИКИЭТ. Данный реактор разрабатывается на тепловую мощность – 700 МВт с двухконтурной системой отвода тепла, глубоким выгоранием топливной смеси – до 10% за компанию протяженностью до 5 лет, с околокритическими параметрами пара перед турбиной (давление более 220 атм., температура – более 500 °С) и высоким КПД-нетто – 43 %.

Применение свинца в данной установке обусловлено целым рядом преимуществ данного теплоносителя: свинец не вступает во взаимодействие с водой или воздухом, не подвержен горению и имеет высокую радиационную стойкость (слабо активируется в радиоактивной среде), имеет высокую температуру плавления (600 К – 327°С), низкую массовую теплоемкость и ограниченную скорость циркуляции. Помимо этого, свинец является весьма распространённым и доступным материалом с хорошо налаженным производством. Поэтому на данный момент активно разрабатываются установки на свинцовом теплоносителе.

Примером установки для исследования свойств свинца, на основании данных которой выполняются расчеты является экспериментальный стенд СПРУТ (стенд для проведения работ по универсальной тематике), представляет собой систему, состоящую из двух контуров: контура свинца и контура воды высокого давления. Технологическая схема установки представлена на рисунке 2. Материал теплопередающих трубок установки соответствует материалу натуральных парогенерирующих труб, примененных в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300. Наружный диаметр теплопередающих труб – 17 мм, толщина стенки теплопередающей трубы – 3,0 мм.

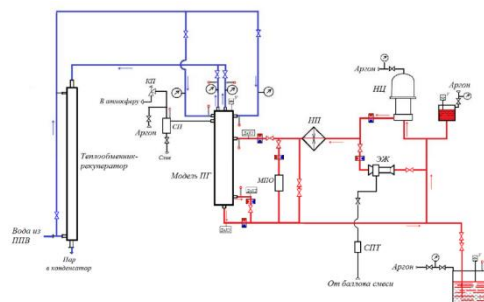


Рис. 2. Схема экспериментальной установки СПРУТ

Как показали исследования на установках, связанные с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ), помимо ряда преимуществ (хороших теплофизических и ядерных свойств материала, негорючести и отсутствия большого давления в первом контуре) у установок на ТЖМТ есть главный недостаток – процесс жидкометаллической коррозии стали и загрязнения трактов циркуляции теплоносителя примесями. Изначально, основной проблемой являлась загрязнение циркуляционных трактов, но в ходе разработки методов очистки более важный характер приобрела проблема обеспечения коррозионной стойкости сталей. Поэтому, возник вопрос о подборе оптимальных параметров для эксплуатации ТЖМТ, для того чтобы с одной стороны не допускать забивания каналов коррозионными оксидами стали и свинца, а с другой – не перейти в режим жидкометаллической коррозии.

Основными причинами корродирования ТЖМТ являются:

- взаимодействие ТЖМТ и конструкционных материалов (КМ) с атмосферой в период заполнения контура теплоносителем;
- растворение в свинце компонентов КМ во время эксплуатации;
- разгерметизация контура во время ремонтных работ, течей парогенераторов (ПГ) или аварии.

При этом, известно, что образующаяся оксидная пленка – двуслойная (рисунок 3). Ее состав изменяется от железистой шпинели (Fe_3O_4) до хромистой шпинели ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeCr}_2\text{O}_4$). При этом тип формирующейся пленки зависит от температуры. Так, при 500-550°C диффузия железа преобладает над диффузией хрома. Взаимодействуя с насыщенным кислородом свинцом, образуется оксид железа. Вследствие чего формируется железистая шпинель. При температурах 580-620°C начинает увеличиваться подвод хрома к оксидной пленке, вследствие чего формируется слабопроницаемая для железа хромистая шпинель. В условиях насыщения кислородом эти два слоя приблизительно равны по толщине, но при более точных измерениях магнетитный слой (Fe_3O_4) обычно толще шпинельного на 15% – 30 %.

Для предотвращения аварийных ситуаций, необходимо поддерживать активность кислорода в узком диапазоне: верхний уровень данного диапазона определяется началом формирования магнетита, а нижний – условиями диссоциации образованных пленок на поверхности стали.

Предотращение данных процессов является важной задачей, так как формирование оксидных пленок сказывается на прочности и теплоотдаче контура, а последующая диссоциация приводит к загрязнению сплава и ухудшению свойств теплоносителя.

Одной из мер борьбы является формирование защитных оксидных пленок на внутренней поверхности труб из хрома, кремния, циркония, алюминия и др. элементов. Главными условиями для выбора данных оксидов является их слабая растворимость в теплоносителях на основе свинца и протекторные свойства по отношению к коррозии.

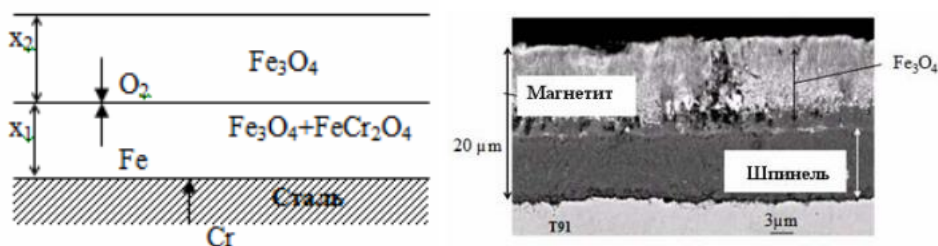


Рис. 3. Условная схема двуслойной пленки на стали в свинце и фотография пленки на поверхности арсенитной стали

В рамках статьи [4] проводилось исследование по формированию оксидных пленок при разных концентрациях кислорода для вышеприведенных реакторов с использованием сплава феррита магнитной стали Т91. Данная сталь по своему составу похожа на отечественную разработку 10X15H9C3B1-Ш (ЭП 302-Ш) применяемую на ректоре БРЕСТ-300.

В ходе экспериментов со сталью Т91 в свинцово-висмутовой эвтектике с массовым содержанием 10^{-6} % масс. оксида в свинце в температурном диапазоне 420-550°C на протяжении более 4000 часов было получено эмпирическое выражение, для определения толщины формирующегося слоя оксидных пленок:

$$\delta_s(t, T) = (-0,987 + 2,54 \cdot 10^{-3} \cdot T) \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

где δ_s – толщина оксидного слоя, мм;

t – время прошедшее с начала процесса, ч;

T – температура свинца, °C.

В связи с ограниченными возможностями программного пакета «Логос-Аэрогидродинамика» для разработки модели было принято следующее допущение:

1. для сокращения времени расчета в ПП «Логос-Аэрогидродинамика», модель трубы теплообменника упрощена до трех элементов: теплоноситель, коррозионный слой и труба теплоносителя.

Первичный расчет производится без учета коррозионного слоя.

В качестве параметров внешней трубы задавались свойства стали 10X15H9C3B1-Ш (ЭП 302-Ш):

- теплоемкость – $C_p = 460$ Дж/(кг·K);
- коэффициент теплопроводности – $\lambda = 15$ Вт/(м·K);
- плотность – $\rho = 7800$ кг/м³.

В качестве параметров теплоносителя задавались свойства жидкого свинца:

- теплоемкость – $C_p = 147,3$ Дж/(кг·K);
- коэффициент теплопроводности – $\lambda = 35,3$ Вт/(м·K);
- молекулярная вязкость – $2,6$ кг/(м·с)
- плотность – $\rho = 10360$ кг/м³.

Модель теплоносителя представляет собой цилиндр; модель трубы представляет собой трубу. Габаритные характеристики приведены в таблице.

Таблица 1

Габаритные характеристики принятых моделей

Параметр	Значение
Модель теплоносителя	
Радиус, мм	14
Длина, мм	20
Модель трубы	
Внутренний радиус, мм	14
Внешний радиус, мм	17
Длина, мм	20

В начале работы необходимо создать компоненты для выбранных ранее моделей, после чего создать тела (рис.3.).

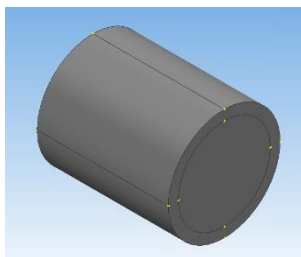


Рис. 3. Геометрическая модель двух цилиндров

Для каждого созданного тела в модели необходимо установить сетку для дальнейшего моделирования (рис.4).

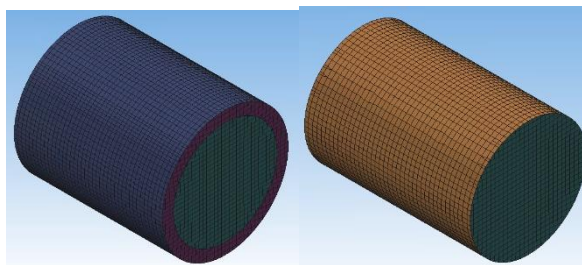


Рис. 4. Примеры поверхностной сетки

Далее по регионам присваиваются свойства и задаются граничные в зависимости от условия задачи. После чего производится расчет модели.

Заключение

В представленной работе выполнено исследование причин возникновения коррозии в жидкометаллическом теплоносителе, состав коррозионной пленки и возможности моделирования и изучения теплофизических и гидродинамических характеристик труб контуров БРЕСТ-300 в ПП «ЛОГОС – АЭРОГИРОДИНАМИКА». На основе изученных характеристик создана упрощенная модель фрагмента трубы первого контура, заданы граничные условия и физические параметры слоев.

Список использованных источников.

1. Ядерная энергетика. Проблемы. Решения / Под ред. М.Н. Стриханова. – В 2-х частях. – Часть 1. – М.: ЦСПиМ, 2011. – 424 с.
2. Грабежная В.А. Расчетно-экспериментальное исследование работы модели парогенератора БРЕСТ-ОД-300 / Михеев А.С., Штейн Ю.Ю., Семченков А.А. – Москва: Известия вузов, Ядерная энергетика, № 1, 2013. – С.101–146.
3. Алексеев В.В., Варсеев Е.В., Орлова Е.А. Расчетная модель процесса образования двухслойного оксидного покрытия на поверхности стали в свинцовом теплоносителе / В.В. Алексеев, Е.В. Варсеев, Е.А. Орлова // Известия вузов. Физика, 2013. – С. 79–86.
4. Вайзенбургер А. Коррозия сталей и их защита в ядерных реакторах, охлаждаемых сплавами на основе свинца / В.В. Алексеев, Вайзенбургер А., Мюллер Г., Дель Джацко М., Фетцер Р., Хайнцель А., Джагану А. Е.В. Варсеев, Е.А. Орлова // Вопросы атомной науки и техники. серия: ядерно-реакторные константы. – Карлсруэ: Технологический институт Карлсруэ, 2016. – С. 52– 63.
5. Логос-Аэрогидродинамика / [Электронный ресурс]. – URL: <file:///C:/Programs/LOGOS/DOCS/RUS/index.htm#%3E%3Ecmd=1%3E%3Epan=2> (дата обращения: 12.10.2023)