



УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБОГРЕВА КОЛЬЦЕВОГО БАКА РЕАКТОРА ВВЭР-440 ВЫНОСНЫМИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯМИ

NUMERICAL SIMULATION OF THE HEATING PROCESS OF VVER-440 CIRCULAR TANK BY EXTERNAL ELECTRIC HEATERS

Балакин Денис Юрьевич, студент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: balakin.serbishino@mail.ru, Тел.: +7(967)852-39-63

Климова Виктория Андреевна, ст. преподаватель каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.a.klimova@mail.ru. Тел.: +7(953)000-84-00

Ташлыков Олег Леонидович, кан-т. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: otashlykov@list.ru. Тел.: +7(343)375-97-37

Balakin Yu. Denis, Student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: balakin.serbishino@mail.ru. Ph.: +7(967)852-39-63

Viktoriia A. Klimova, senior lecturer, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.klimova@mail.ru, Ph.: +7(953)000-84-00

Tashlykov L. Oleg, Cand. Sci., Associate professor, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: otashlykov@list.ru. Ph.: +7(343)375-97-37

Аннотация: Проведено компьютерное моделирование обогрева кольцевого бака реактора ВВЭР-440 выносными электронагревателями. Проанализированы полученные результаты, проведена оценка эффективности данного метода.

Abstract: Computer simulation of VVER-440 circular tank heating by external electric heaters is made. The obtained results are analyzed, the estimation of the heating method efficiency is made.

Ключевые слова: продление срока эксплуатации; реактор ВВЭР-440; кольцевой бак биологической защиты; радиационное охрупчивание металла; подогрев; компьютерное моделирование.

Key words: service life extension; reactor VVER-440; circular tank of biological protection; irradiation embrittlement of metal; heating; computer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Продление сроков эксплуатации энергоблоков Кольской АЭС до 50-60 лет вписывается в общемировую практику. В США на текущий момент продлены до 60 лет сроки эксплуатации 83 из 104 действующих энергоблоков. В течение 40 и более лет атомные энергоблоки эксплуатируются во Франции, в Швейцарии, в Бельгии и других странах. С 1977 г. в Финляндии эксплуатируется АЭС «Ловииза» с реакторами ВВЭР-440, аналогичными установленным на Кольской АЭС. Установленный срок эксплуатации данной АЭС,

признанной одной из самых безопасных и эффективных в мире, в настоящий момент составляет 50 лет [1].

В ходе продления сроков эксплуатации корпусов реакторов Кольской АЭС была проведена оценка срока службы кольцевых баков (КБ) [2]. Результаты оценки технического состояния показали, что из-за высокого флюенса быстрых нейтронов, накопленного металлом кольцевых баков, их ресурс может быть продлен только при условии подогрева воды в баке до 60°C для компенсации радиационного охрупчивания

металла. Кольцевой бак является биологической защитой реактора ВВЭР-440, выполняет функции тепловой защиты бетонной шахты реактора, а также служит опорной конструкцией реактора [3].

Решение данной задачи возможно следующими способами подогрева [4]:

- установка погружных электронагревателей во все 24 секции бака;
- оснащение баков системой ленточного обогрева;
- отбор пара из второго контура для подогрева воды бака;
- оснащение баков системой подогрева с принудительной циркуляцией через внешний электронагреватель.

В работе представлены результаты моделирования теплогидравлических процесса подогрева воды в кольцевом баке с учетом перфорации в ребрах жесткости бака для варианта с выносным подогревателем при помощи программного комплекса САПР SolidWorks.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ И ПРОЕКТА

Начальным этапом моделирования было построение твердотельной модели бака в SolidWorks. Данный программный комплекс предназначен для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Модель изображена на рис. 1.

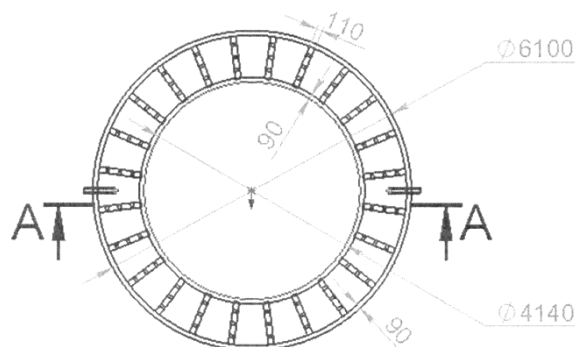
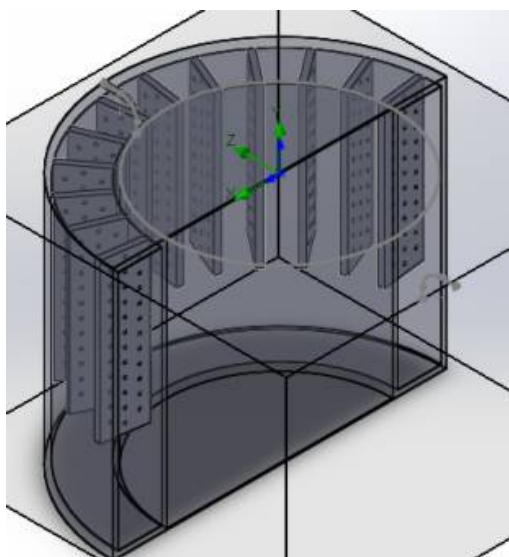


Рис. 1. Твердотельная модель бака с расчетной областью (разрез и вид сверху)

Бак представляет собой кольцевую полость наружным диаметром 6 100 мм и внутренним диаметром 4 100 мм с толщиной стенки 90 мм. Высота бака 4 640 мм. В верхней части кольцевой полости расположены 24 перфорированных ребра высотой 3 000 мм и толщиной 110 мм, в каждом 34 отверстия диаметром 50 мм.

Подвод горячей воды от внешнего электронагревателя в бак осуществлялся через патрубков заполнения, входящий в верхней части и подающий воду в нижнюю часть межкольцевой полости (рис. 2). С противоположной стороны в верхней части бака располагался патрубок дренажа для отвода воды. Через центральную полость бака в направлении сверху вниз подавался воздух, охлаждавший конструкцию.

Для анализа гидродинамики и теплообмена в кольцевом баке был разработан проект в приложении Flow Simulation, являющимся дополнительным модулем SolidWorks. Данная программа позволяет решать сложные задачи, в которых сочетается несколько видов теплообмена, с достаточной степенью точности.

В ходе моделирования учитывалась теплопроводность в твердых телах, а также гравитационные эффекты. Тепловые потери через наружные стенки бака не учитывались, стенки приняты адиабатическими.

В табл. 1 и на рис. 2 приведены граничные условия в режиме обслуживания реактора.

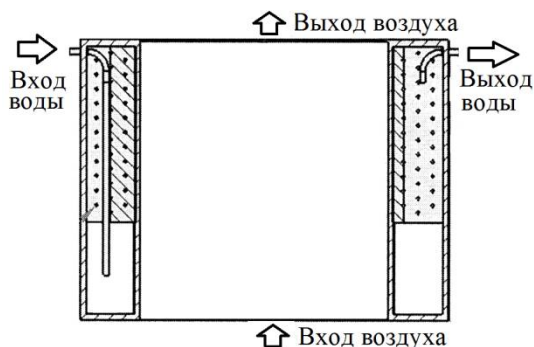


Рис. 2. Отверстия модели

В целях оптимизации соотношения точности расчета и затраченного машинного времени сперва проводился расчет на укрупненной сетке, затем сетка уменьшалась. Значения контрольных параметров (тепловой поток через внутреннюю кольцевую стенку, температуры воды и воздуха на выходе) сравнивались для крупной и мелкой сеток. В случае совпадения точность считалась достигнутой, в противном случае сетка еще уменьшалась. Также учитывалось наличие течения через отверстия перфорации. В итоге расчет производился на автоматической сетке пятого уровня.

Таблица 1

Граничные условия	
Параметр	Значение
<i>Подобласть течения 1 - вода</i>	
Вход – отверстие с расходом расход, кг/с температура, °С	1,73 80
Выход – отверстие с давлением давление, Па	101 325
<i>Подобласть течения 2 - воздух</i>	
Вход – отверстие с расходом расход, м ³ /с температура, °С	4,64 20
Выход – отверстие с давлением давление, Па	101 325

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 показано распределение температуры по сечению кольцевого бака, а на рис. 4 – траектории потока от входа воды, окрашенные в цвета температуры. В табл. 2 приведены значения температур и тепловых потоков через контрольные поверхности. Эти параметры запрашивались в виде целей расчета и использовались в качестве критериев завершения.

Таблица 2

Результаты моделирования	
Параметр	Значение
Температура воды на выходе, °С	70,23
Температура воздуха на выходе, °С	37,05
Минимальная температура внутренней обечайки бака (локально внизу), °С	78,8
Средняя температура внутренней обечайки бака, °С	79,5
Тепловой поток через внутреннюю боковую стенку, Вт	13 789

Следующим этапом работы был выбор расчетной сетки. Использовалась автоматическая сетка с улучшенным разрешением узких каналов. В ходе расчета осуществляется дробление ячейки базовой сетки в области высоких градиентов рассчитываемых параметров и, наоборот, слияние в области низких градиентов. Возможно до восьми уровней дробления.

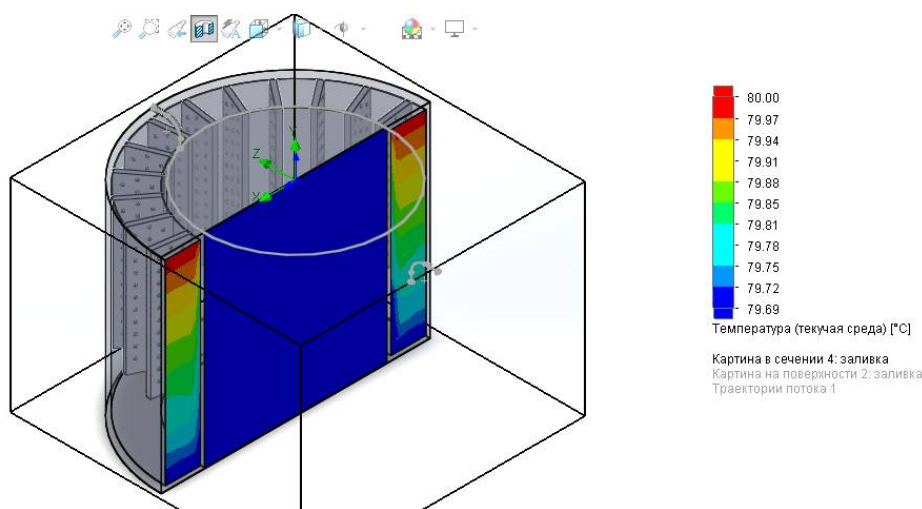


Рис. 3. Распределение температур в баке

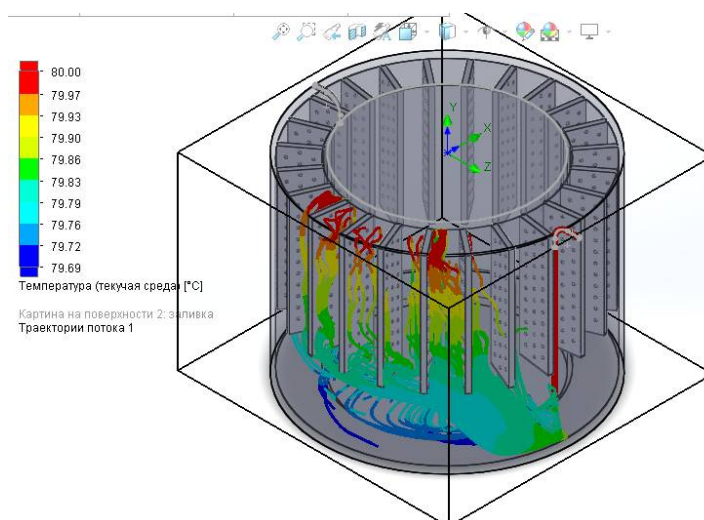


Рис. 4. Траектории движения частиц жидкости

Результаты расчета подтверждают эффективность предложенной схемы обогрева, так как достигается необходимый тепловой режим и допустимая температурная неравномерность по объему бака. Наличие отверстий в перегородках способствует локальной турбулизации жидкости и лучшему перемешиванию.

ВЫВОДЫ

Данный способ обогрева позволяет эффективно решить проблему радиационного охрупчивания металла кольцевого бака, но в любом случае он несет в себе определенные финансовые потери. По этой причине реакторная установка ВВЭР-440 (проект В-213) оснащена сухой кольцевой защитой вместо кольцевого бака с водой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Омельчук В.В. Кольцевая АЭС, как основа энергетики региона: настоящее и перспективы Мурманск.2016. http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/IX_reg_forum_2016/4_OmelchukVV_Forum_dialog120516.pdf

2. Кокорин В. В., Ташлыков О. Л. Продление сроков эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 (проект В-230) // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение.

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 800-803.

3. Ташлыков О.Л., Кузнецов А.Г., Арефьев О.Н. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС: В 2 кн. –М.: Энергоатомиздат, 1995.- Кн.1.

4. Балакин Д. Ю., Ташлыков О. Л. Реконструкция кольцевого бака реактора ВВЭР-440 // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Екатеринбург : УрФУ, 2017. С. 676-679