

УДК 629.039.58

Температурный режим в бассейне выдержки ВВЭР-1200 при нарушении режима его охлаждения

Акобян Давид Ашотович, аспирант кафедры теплофизики
Слободчук Виктор Иванович, доцент отделения ядерной физики и технологий
ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования температурного режима бассейна выдержки (БВ) блока с реактором типа ВВЭР. Рассмотрены варианты нарушения охлаждения БВ с прекращением принудительной циркуляции охлаждающей воды, частичным оголением отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС), а также при полной потере охлаждающей воды. В статье рассматриваются тепло-гидравлические расчеты, связанные с обоснованием безопасности уплотненного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в БВ.

Ключевые слова: атомная станция, реактор, бассейн выдержки, отработанное ядерное топливо.

Введение

Перед отправкой ОЯТ на захоронение или переработку предусматривается продолжительная выдержка отработавшего топлива в бассейнах выдержки АЭС для обеспечения спада остаточного тепловыделения, обуславливаемого активностью продуктов деления, при которой транспортировка его к месту назначения станет возможной и экономически целесообразной.

При работе реактора с ежегодной перегрузкой 42 ТВС суммарная мощность остаточных энерговыделений ОТВС [1] при загруженном бассейне (ежегодно при перегрузке) составляет не более 3,90 МВт.

При работе реактора с ежегодной перегрузкой 42 ТВС суммарная мощность остаточных энерговыделений ОТВС при полной выгрузке активной зоны (режим нормальной эксплуатации, не аварийный) составляет не более 15,5 МВт.

При работе реактора с ежегодной перегрузкой 42 ТВС суммарная мощность остаточных энерговыделений при аварийной выгрузке зоны составляет не более 16,5 МВт.

При нормальной работе, тепловыделение из отработанного топлива удаляется с помощью комбинации естественной конвекции воды в бассейне выдержки через чехлы ТВС и принудительной конвекции воды в бассейне с помощью внешней системы охлаждения. Существует также некоторый отвод тепла от БВ за счет теплопроводности через боковые стенки и пол бассейна, а также излучения, конвекции и испарения из поверхности бассейна. Эти явления составляют лишь несколько процентов от общего теплоотвода во время нормальной работы, так как основная температура воды в бассейне поддерживается на низком уровне (как правило, меньше, чем 40-50⁰С) с помощью системы охлаждения. Однако при ненормальной ситуации, при повышении температуры воды бассейна, перечисленные явления становятся важными.

Осевой поток через ОТВС реактора с легкой водой (РЛВ) плавно приводится в действие с температурной разницей. При нормальных условиях в бассейне, осевая скорость потока обычно составляет 0,1-0,2 м/с, которое достаточно, чтобы эффективно охлаждать топливо. Разность температур между оболочкой твэла и воды составляет менее 5К, а разница в температуре воды между верхней и нижней частями ТВС, как правило, менее чем 10К. Это типичные перепады температуры и скорости потока для условия нормальной эксплуатации в БВ; они зависят от мощности распада и конструкции рассматриваемой топливной сборки.

Актуальность работы

Бассейны выдержки (БВ) являются стойкими при аварийных ситуациях, из-за их устойчивой структуры, тяжелые аварии в нем уже давно рассматриваются как маловероятное событие, где будет достаточно времени для адекватных и корректирующих действий оператора. Авария на АЭС Фукусима, которая последовала после землетрясения в Японии 11 марта 2011 года, возобновила международный интерес к безопасности отработавшего ядерного топлива, хранящегося в БВ при условии потери охлаждения [2-14].

Основные проблемы при нарушении нормальной эксплуатации

- При прекращении принудительной циркуляции в БВ, т.е. при прекращении охлаждения, появляется опасность кипения и выхода аэрозолей.

- При возникновении течи в БВ с дальнейшим уменьшением уровня воды в БВ и частичным оголением ОТВС, уже возникает опасность не только кипения и выхода аэрозолей, а перегрев оболочек, вплоть до плавления и разрушения оболочки.

При перегреве оболочек возникает еще парциркулиевая реакция с накоплением большого количества водорода (взрывоопасно). Хранение ОЯТ в БВ — аспект безопасности атомной станции.

Некоторые результаты расчетов и их анализ

Для численного моделирования температурного режима бассейна выдержки построена модель одного отсека и с использованием полученной модели проведены расчеты для следующих случаев:

- нарушение охлаждения бассейна выдержки (прекращение принудительной циркуляции воды в БВ);
- частичная потеря охлаждающей воды и оголение ОТВС (рассмотрен случай оголения 25% верхней части ОТВС);
- полная потеря охлаждающей воды, т.е. ОТВС находятся в воздухе.

Анализируются два варианта энерговыделения в БВ, а именно среднее энерговыделение и случай выгрузки активной зоны. При среднем энерговыделении суммарная тепловая мощность ОТВС составляет 7,9 МВт (плотность энерговыделения составляет 82,3 кВт/м³), а с учетом полной выгрузки активной зоны мощность составит 17 МВт (плотность энерговыделения составляет 175,3 кВт/м³). В случае прекращения принудительной циркуляции охла-

ждающей воды отвод тепла от обработанных ТВС осуществляется в основном за счет естественной конвекции воды и передачи тепла через боковую поверхность БВ за счет теплопроводности и частично за счет испарения. Скорость циркуляции воды при этом незначительная. Как уже было отмечено, проведено моделирование только одной

части БВ (одной секции). Ниже представлены некоторые результаты моделирования.

На рисунках 1,2 представлено распределение температуры в бассейне выдержки при прекращении принудительной циркуляции охлаждающей воды. Рассматривается среднее энерговыделение.

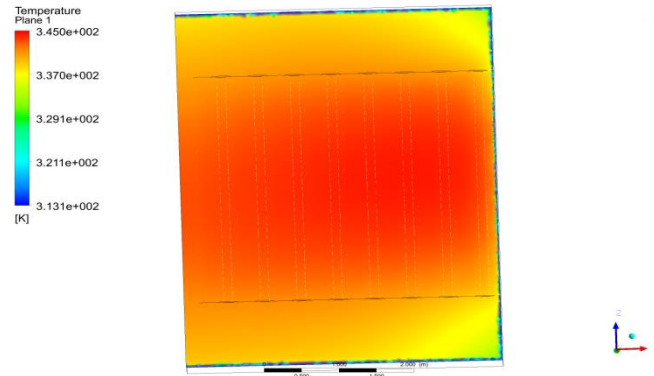


Рисунок 1. Распределение температуры в бассейне выдержки при прекращении принудительной циркуляции охлаждающей воды для случая среднего энерговыделения (температура в К).

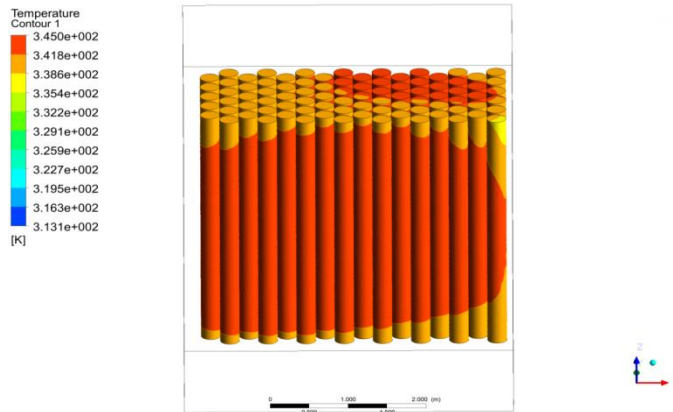


Рисунок 2. Распределение температуры в модели ОТВС при прекращении принудительной циркуляции охлаждающей воды для случая среднего энерговыделения.

Из рисунков видно, что распределение температуры в моделях ОТВС неравномерное. Можно предположить, что при более напряженном температурном режиме эта неравномерность только усилится.

Для случая с повышенным энерговыделением и при частичном оголении ОТВС результаты расчетов представлены на рис. 3-5. Видно, что температура существенно

повышается, начинается кипение воды. Часть ОТВС, находящаяся в воздухе, разогревается значительно сильнее. При этом, чем больше снижается уровень воды, тем сильнее разогревается ОТВС. Это может привести к ситуации, при которой происходит резкое ухудшение механических свойств материала ОТВС.

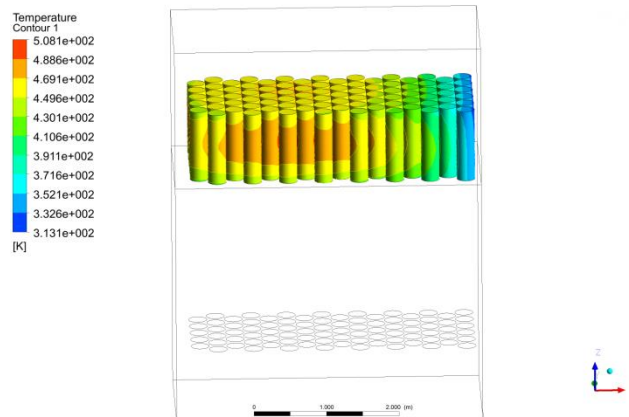


Рисунок 3. Распределение температуры части ОТВС, находящейся в воздухе. Вариант частичного оголения ОТВС для случая полной выгрузки активной зоны.

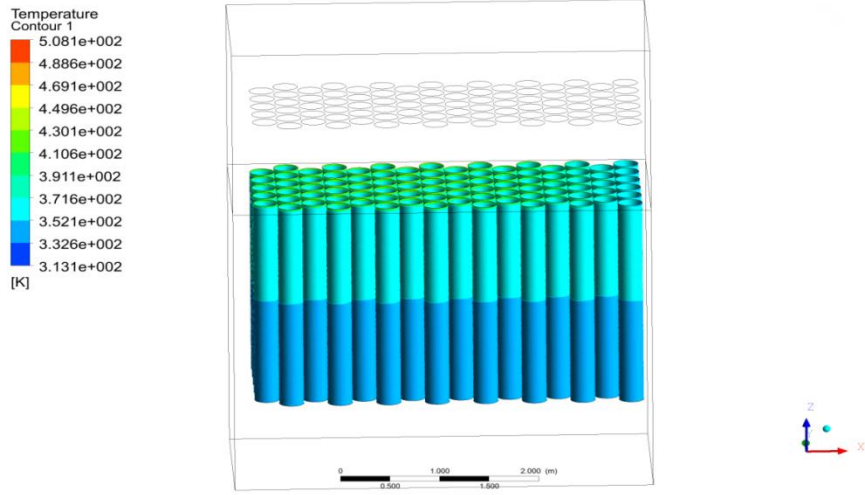


Рисунок 4. Распределение температуры части ОТВС, находящейся в воде. Вариант частичного оголения ОТВС для случая полной выгрузки активной зоны.

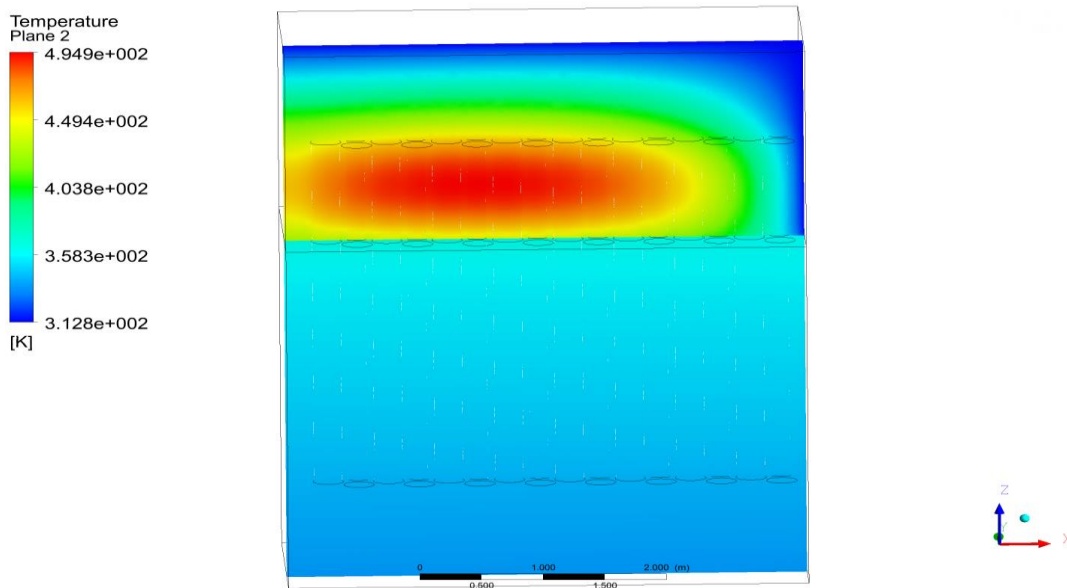


Рисунок 5. Распределение температуры в бассейне выдержки. Вариант частичного оголения ОТВС для случая полной выгрузки активной зоны.

При полной потере охлаждающей воды (рис. 6,7) ситуация резко ухудшается. Температура ОТВС достигает значения, при котором уже начинается парциркуниевая

реакция с выделением водорода, что может привести к взрыву.

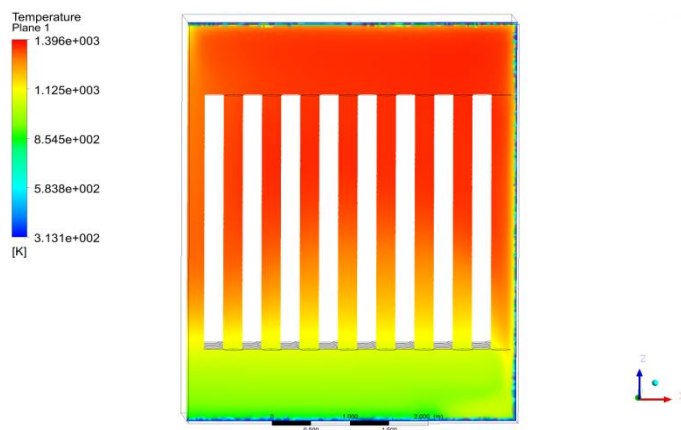


Рисунок 6. Распределение температуры в воздушном объеме бассейна выдержки для случая с полной потерей охлаждающей воды.

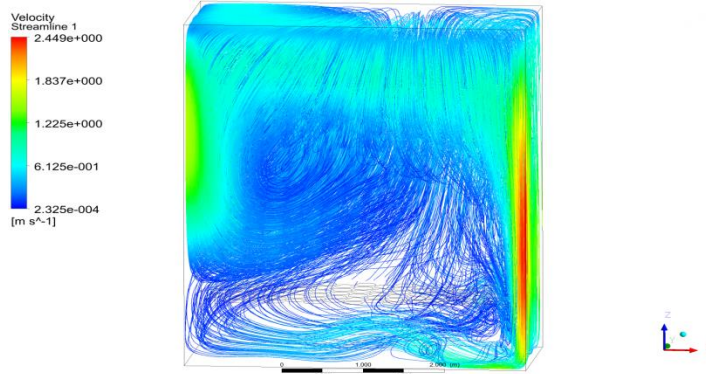


Рисунок 7. Распределение линий тока в воздухе бассейна выдержки для случая с полной потерей охлаждающей воды.

Выводы

Проведено численное моделирование температурного режима отработанных ТВС в бассейне выдержки блока с ВВЭР-1200 при нарушении режима нормального охлаждения. Рассмотрены варианты с прекращением принудительной циркуляции охлаждающей воды, частичным оголением ОТВС и с полной потерей воды в бассейне выдержки.

Результаты расчетов показывают, что при прекращении принудительной циркуляции охлаждающей воды происходит разогрев воды до температуры кипения.

При частичном оголении ОТВС разогрев сборок происходит до температуры свыше 230°C.

При полной потере охлаждающей воды температура ОТВС достигает 1230°C. При такой температуре интенсивно протекает паро-циркониевая реакция с выделением водорода, т.к. даже при полной потере охлаждающей воды в бассейне выдержки остается некоторое количество водяного пара, который может вступать в реакцию с цирконием. Образование водорода может привести к взрыву образовавшейся смеси.

Литература:

1. Система охлаждения бассейна выдержки. НВ АЭС, 2014.
2. Analysis of accidental loss of pool coolant due to leakage in a PWR SFP / Xiaoli Wu, Wei Li, Yapei Zhang, Wenxi Tian, Guanghui Su, Suizheng Qiu / State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, No. 28, Xianning West Road, Xi'an, Shanxi 710049, China // Annals of Nuclear Energy 77 (2015) 65–7.
3. CFD simulating the transient thermal–hydraulic characteristics in a 17× 17 bundle for a spent fuel pool under the loss of external cooling system accident / S.R. Chen, W.C. Lin, Y.M. Ferng, C.C. Chieng, B.S. Pei / Taiwan Power Company, Taiwan, ROC / Institute of Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University, 101, Sec. 2. Kuang-Fu Rd., Hsingchu 30013, Taiwan, ROC / Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University, 101, Sec. 2. Kuang-Fu Rd., Hsingchu 30013, Taiwan, ROC / Department of Mechanical and Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong // Annals of Nuclear Energy 73 (2014) 241–249.
4. Investigation of a long term passive cooling system using two-phase thermosyphon loops for the nuclear reactor spent fuel pool / Wen Fu, Xiaowei Li, Xinxin Wu, Zhengming Zhang / Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology / Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China // Annals of Nuclear Energy 85 (2015) 346–356.
5. Martin Ramos, M., Analysis of fuel related events, 2009, Report SPNR / CLEAR/09 11 006, European Clearinghouse on NPP Operational Experience Feedback, Petten, The Netherlands.
6. Collins, T.E. and G. Hubbard, Technical study of spent fuel pool accident risk at decommissioning nuclear power plants, 2001, Report NUREG-1738, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA.
7. Wang, D., et al., Study of Fukushima Daiichi nuclear power station unit 4 spent fuel pool. Nuclear Technology, 2012. 180: pp. 205-215.
8. Hung, T.-C., et al., The development of a three-dimensional transient CFD model for predicting cooling ability of spent fuel pools. Applied Thermal Engineering, 2013. 50: pp. 496-504.
9. Shah, M.M. Analytical formulas for calculating water evaporation from pools, 2008. In: ASHRAE Transactions (2008 ASHRAE Annual Meeting), 114.
10. Gauntt, R.O., et al., MELCOR computer code manuals, 2000, Report NUREG/CR-6119, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA.
11. Oginio, M. Analysis of fuel heat-up in a spent fuel pool during a LOCA, 2012. In: Technical Workshop on the Accident of TEPCO's Fukushima Dai-ichi NPS, July 23-24, 2012, Tokyo, Japan.
12. Джекел, В. Spent fuel pool boil down calculations with MELCOR 1.8.6, 2013. In: Fifth European MELCOR User Group Meeting, May 2-3, 2013, Stockholm, Sweden.
13. Wagner, K.C. and R.O. Gauntt, Mitigation of spent fuel pool loss-of-coolant inventory accidents and extension of reference plant analyses to other spent fuel pools, 2006, Sandia Letter Report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.
14. Benjamin, A.S. and D.J. McCloskey, Spent fuel heatup following loss of water during storage. Nuclear Technology, 1980. 49: pp. 274-29