

УДК 621.039.56

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧИ ПО КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОСТИ, ВВОДИМОЙ РАЗБАВЛЕНИЕМ БОРНОЙ КИСЛОТЫ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРА ВВЭР-1000, ДИСКРЕТНЫМ ПОГРУЖЕНИЕМ ГРУППЫ ОР СУЗ

Хренников Н. Н., к. ф.-м. н. (khrennikov@secnrs.ru),
Кавун О. Ю., д. т. н. (kavun@secnrs.ru), Семишин В. В. (semishin@secnrs.ru),
Кавун В. О. (vkavun@secnrs.ru), Пипченко Г. Р. (pipchenko@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»),
Перевезенцев В. В., д. т. н. (perevezentsev@bmstu.ru) (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

В статье изложена методика моделирования и расчет тестовой задачи (бенчмарк), которая предназначена обеспечить основу для оценки способности связанных программных средств предсказывать развитие переходных процессов на АЭС.

► **Ключевые слова:** бенчмарк, моделирование, ПС «Радуга-ЭУ».

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.91.1.002

BENCHMARK CALCULATION ON REACTIVITY COMPENSATION INITIATED BY DILUTION OF BORON ACID IN VVER-1000 PRIMARY CIRCUIT COOLANT BY STEPWISE CONTROL RODS GROUP INSERTION

Khrennikov N. N., Ph. D., Kavun O. Yu., Ph. D., Semishin V. V., Kavun V. O.,
Pipchenko G. R. (SEC NRS),
Perevezentsev V. V., Ph. D. (BMSTU)

This work presents the method of modeling and calculation results of the benchmark which is designed to provide the framework to assess the ability of the traditional coupled codes to predict the transient response of the NPP.

► **Key words:** benchmark, modeling, "Rainbow-NPP".

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.91.1.002

Введение

В [1] предложена тестовая задача, заключающаяся в компенсации изменения реактивности при уменьшении концентрации борной кислоты в реакторе ВВЭР-1000 погружением группы органов регулирования. Эта задача основана на результатах измерений, полученных на этапе освоения мощности 2-го энергоблока Ростовской АЭС 31 мая 2010 г. В ходе измерений концентрация борной кислоты уменьшалась за счет подачи оператором в теплоноситель первого контура чистого конденсата системы продувки-подпитки. Для поддержания постоянной мощности в активную зону в ручном режиме погружалась 10-я группа органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Длительность измерений составила около 60 минут. Измерения выполнены на мощности 70 % от номинальной приблизительно через 100 суток с момента начала набора мощности, при этом энерговыработка составила приблизительно 40 эффективных суток.

Целью данной работы является оценка качества исходных данных и результатов измерений, предложенных в описании бенчмарка [1]. Кроме того, в работе определяются измеренные в ходе эксперимента параметры реакторной установки (РУ), которые могут в дальнейшем использоваться при верификации программных средств (ПС) и могут быть включены в окончательную редакцию бенчмарка.

Моделирование эксперимента проводилось с использованием полномасштабной модели ВВЭР-1000 на основе ПС «Радуга-ЭУ» [2] с библиотекой двухгрупповых нейтронно-физических сечений, полученной с помощью ПС «Сапфир-95» [3]. Применение полномасштабной модели энергоблока обусловлено необходимостью детального моделирования системы продувки-подпитки и системы автоматического регулирования энергоблока в целом.

При выполнении расчетного моделирования проводилось сравнение результатов расчетов следующих параметров РУ: критической концентрации борной кислоты в процессе выгорания топлива до начала и во время эксперимента; изменения уровня нейтронной мощности во время эксперимента; изменения положения регулирующей группы ОР СУЗ в ходе эксперимента; полей энерговыделения и температуры теплоносителя на выходе из тепловыделяющей сборки (ТВС) перед началом эксперимента с данными, представленными в описании бенчмарка [1].

Расчет выгорания топлива

Для получения исходного состояния РУ энергоблока № 2 Ростовской АЭС перед началом эксперимента [1] проведен расчет выгорания топлива в соответствии со среднесуточным графиком загрузки с помощью нейтронно-физического модуля «Десна», входящего в состав ПС «Радуга-ЭУ» [2]. Изменения мощности реактора и положения 10-й группы ОР СУЗ в течение топливного цикла приняты в соответствии с данными, представленными в спецификации бенчмарка [1]. Расчетное и измеренное изменение критической концентрации борной кислоты в процессе выгорания топлива приведены на рис. 1. На графике также представлено изменение критической концентрации борной кислоты, рассчитанное по ПС «БИПР-7А» (без учета маневрирования мощностью в процессе топливной кампании) в соответствии с [1].

Как следует из рис. 1, наблюдается существенное расхождение в значениях критической концентрации борной кислоты, рассчитанной по ПС «Десна» и «БИПР-7А», и концентрации борной кислоты, определенной экспериментально. По-видимому, точность экспериментального определения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура не достаточна для верификации ПС, и использование этого параметра в бенчмарке является нецелесообразным.

Моделирование эксперимента

При расчете рассматриваемого переходного процесса по полномасштабной модели энергоблока (подробное описание ПС «Радуга-ЭУ» представлено в [2]), как указано выше, моделировались не только РУ, но и система продувки-подпитки, турбоустановка, система автоматического регулирования энергоблока. Наличие интерактивных пультов управления в полномасштабной модели энергоблока позволило моделировать действия оперативного персонала АЭС в ходе проведения экспериментов.

В исходном состоянии (перед началом эксперимента) проведено сравнение полей энерговыделения и температуры теплоносителя на выходе из ТВС. На рис. 2 приведено сравнение отклонений от экспериментальных данных подогрева теплоносителя и мощности ТВС на начало эксперимента.

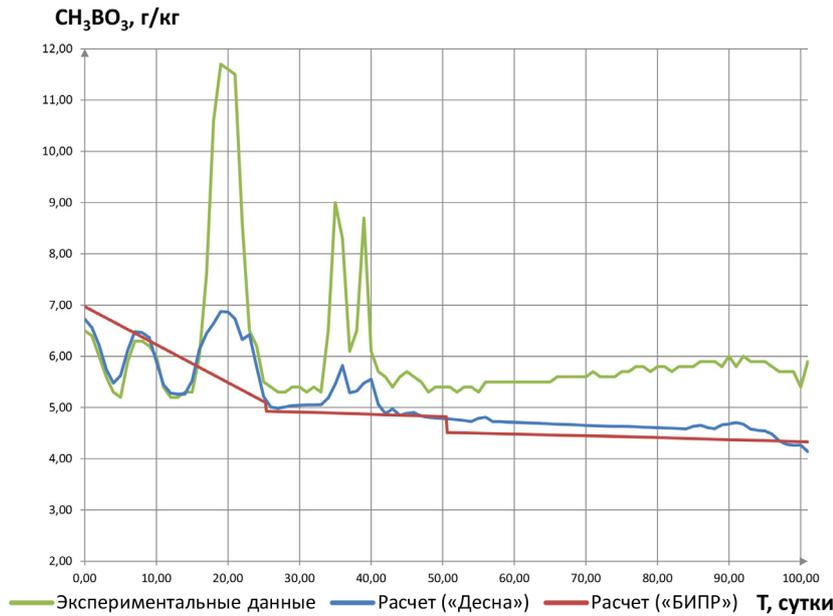


Рис. 1. Изменение критической концентрации борной кислоты в процессе выгорания топлива

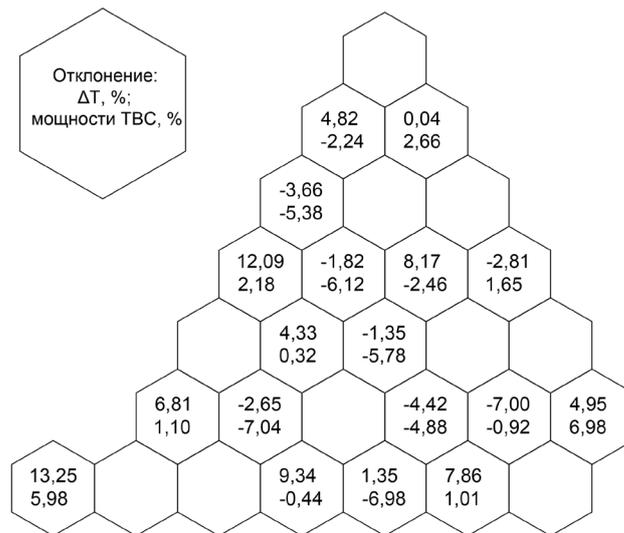


Рис. 2. Отклонения величины подогрева теплоносителя в ТВС и относительной покассетной мощности от измеренных величин: верхнее значение – отклонение величины подогрева, нижнее – отклонение мощности ТВС от мощности, измеренной экспериментально

Как следует из рис. 2, корреляции между отклонениями в расчете подогрева теплоносителя и относительной покассетной мощности ТВС не наблюдается. Помимо того, что отклонения в расчете подогрева теплоносителя слабо связаны с отклонениями в расчете мощности кассеты, точность экспериментальных данных зависит от многих факторов, которые не могут быть полностью учтены при проведении крупносеточного расчета.

Для уточнения расхода подпитки было проведено два расчета (в [1] указан диапазон измерения

расхода подпитки в диапазоне от 17 до 18 м³/ч). При проведении данных расчетов не проводилось моделирование действий оператора, а положение 10-й группы ОР СУЗ определялось автоматически для поддержания постоянного уровня мощности турбоустановки (энергоблок работал в режиме «Т»).

Изменение положения 10-й группы ОР СУЗ и уровня нейтронной мощности для расходов подпитки 17 и 18 м³/ч приведено на рис. 3. Судя по приведенным результатам, расчет позволил уточнить средний расход системы продувки-подпитки, который составил величину 17 м³/ч.

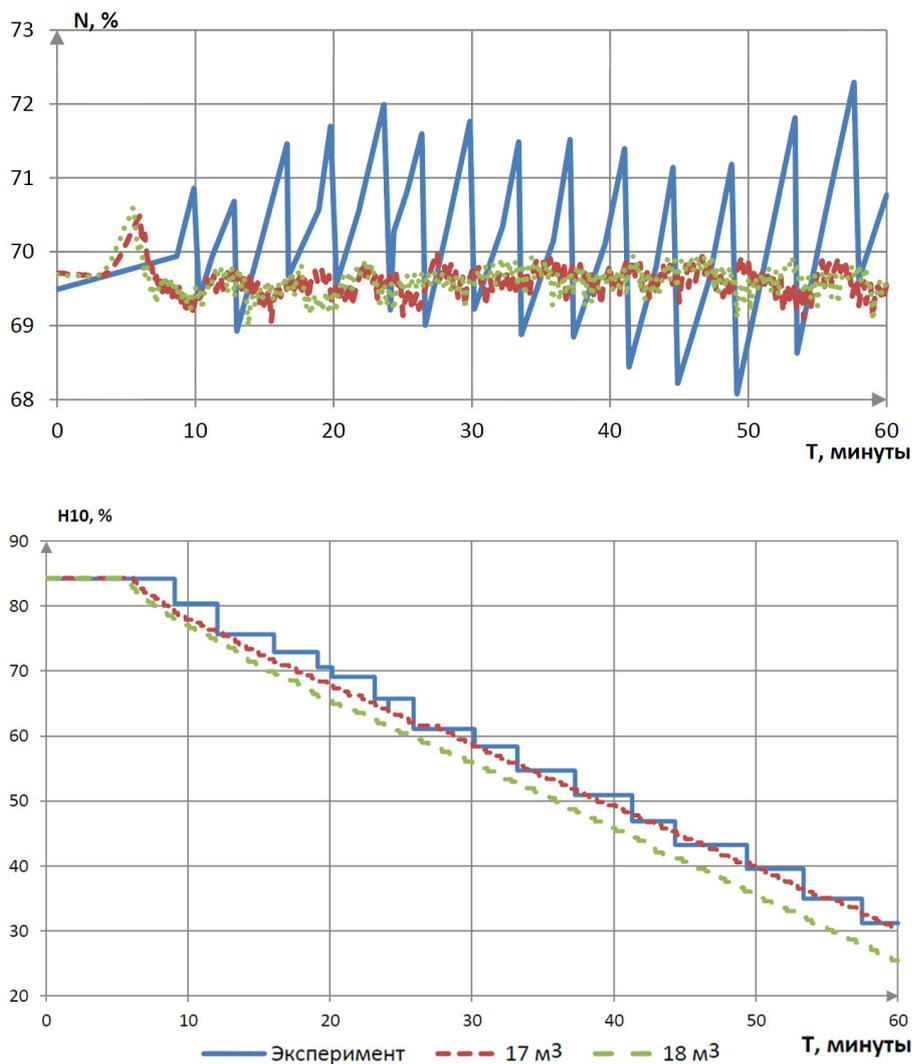


Рис. 3. Изменение мощности и положения 10-й группы ОР СУЗ в ходе эксперимента

Результаты моделирования системы продувки-подпитки, проведенного в данной работе, показали, что время транспортного запаздывания с момента переключения системы продувки-подпитки на подачу чистого конденсата до начала разбавления теплоносителя на входе в реактор чистым конденсатом составило ~ 150 секунд, полное время начала подачи чистого конденсата в РУ (с учетом перемешивания) ~ 300 секунд, значение массового расхода подпитки составляет $\sim 4,84$ кг/с, температура подпиточной воды – 264 °С.

После уточнения расхода подпитки расчет был проведен с имитацией действий оператора в реальном эксперименте. Когда уровень мощности достигал границ, указанных в спецификации бенчмарка ± 2 %, 10-я группа ОР СУЗ погружалась в активную зону реактора вручную с целью снижения уровня мощности, что позволило смоделировать изменение мощности, полученное при измерениях.

Положение 10-й группы ОР СУЗ и уровень нейтронной мощности в ходе измерений в сравнении с расчетными данными представлены на рис. 4.

Как следует из рис. 4, положение 10-й группы ОР СУЗ в конце моделирования практически совпадает с измеренным значением. Изменение уровня мощности в процессе моделирования также аналогично измеренному.

На рис. 5 приведено изменение критической концентрации борной кислоты, полученное в ходе измерений, в сравнении с расчетным.

Как следует из рис. 5, наблюдается систематическое превышение концентрации борной кислоты, измеренной штатным концентратомером бора, по сравнению с расчетной. Аналогичное отклонение расчетной и измеренной концентрации борной кислоты наблюдалось и при моделировании выгорания топлива (см. рис. 1).

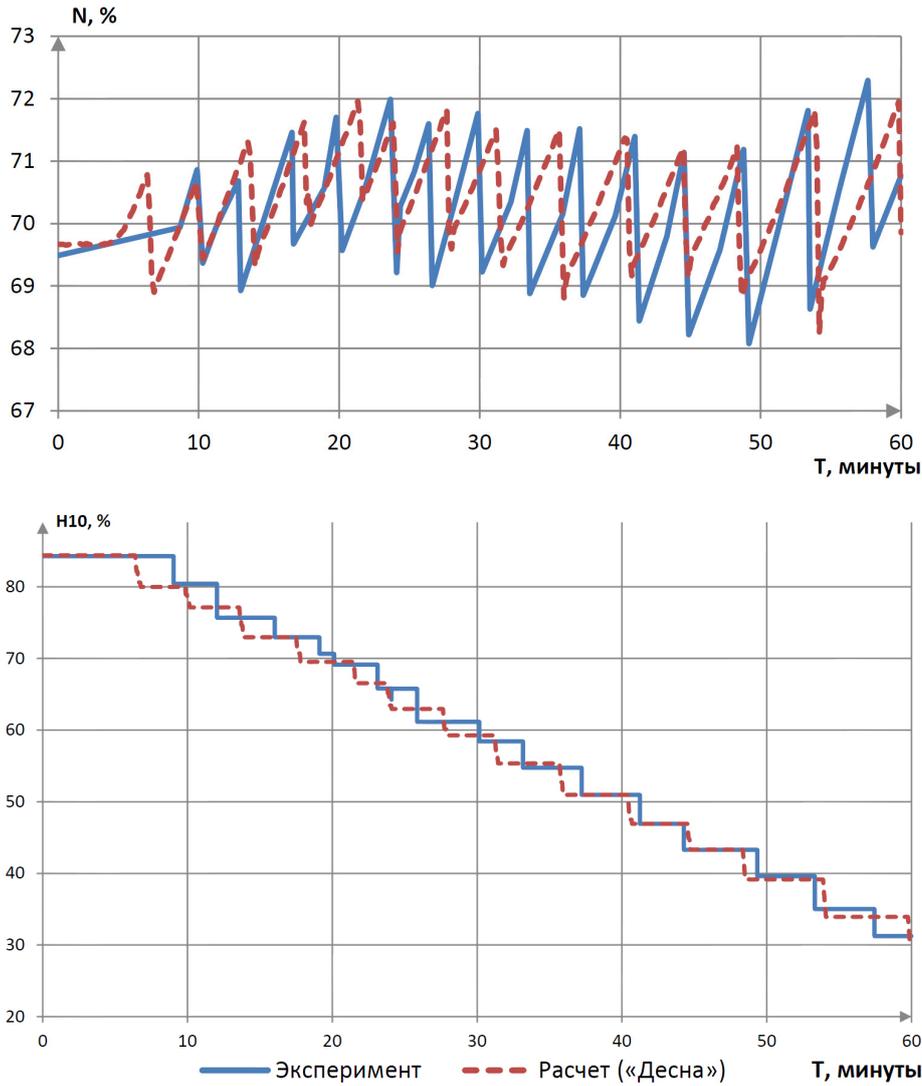


Рис. 4. Изменение мощности и положения 10-й группы ОР СУЗ в ходе измерений

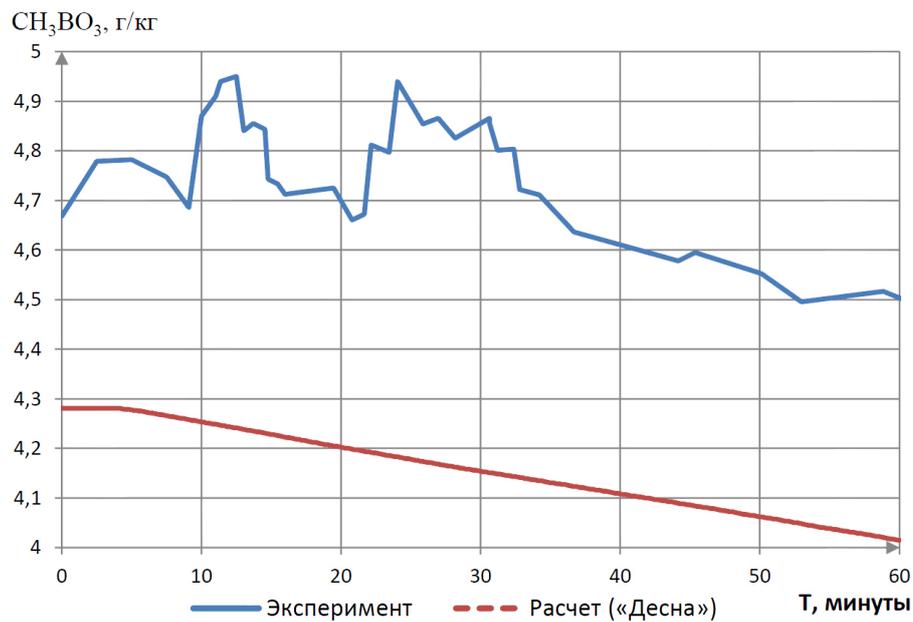


Рис. 5. Изменение критической концентрации борной кислоты во время эксперимента

Заключение

Результаты численного моделирования изменения глубины погружения рабочей группы ОР СУЗ при уменьшении концентрации борной кислоты демонстрируют хорошую корреляцию с измеренными данными. Поэтому моделирование глубины погружения 10-й (регулирующей) группы ОР СУЗ в ходе измерений, связанных с изменением концентрации борной кислоты, можно рекомендовать для сравнения расчетов, выполненных по различным ПС.

Следует отметить, что без использования полномасштабной модели системы продувки-подпитки ВВЭР-1000 моделирование действий оператора, определение массового расхода и транспортного запаздывания подачи чистого конденсата в РУ, а также температуры подпиточной воды – довольно сложные задачи. Результаты моделирования системы продувки-подпитки, проведенного в данной работе, показали, что время транспортного запаздывания с момента переключения системы продувки-подпитки на подачу чистого конденсата до начала разбавления теплоносителя на входе в реактор чистым конденсатом составило ~ 150 секунд, полное время

начала подачи чистого конденсата в РУ (с учетом перемешивания) ~ 300 секунд, значение массового расхода подпитки составляет ~ 4,8 кг/с, температура подпиточной воды – 264 °С. При моделировании бенчмарка по другим ПС при отсутствии модели системы продувки-подпитки чистый конденсат должен подаваться на всас главных циркуляционных насосов с указанными выше параметрами.

Как показало сравнение расчетной и измеренной мощности ТВС и подогрева теплоносителя в ТВС, корреляции между отклонениями в расчетах среднего подогрева теплоносителя в ТВС и относительной покасетной мощности не наблюдается. По-видимому, для учета реальных показаний термодатчиков на выходе из ТВС требуется расчет на мелкой сетке.

Рассчитанные значения критической концентрации борной кислоты, полученные как по ПС «Радуга-ЭУ», так и по ПС «БИПР-7А», заметно отличаются от значений измеренной концентрации борной кислоты. Учитывая существенную погрешность концентромера, применяемого при измерениях, по-видимому, концентрацию борной кислоты не следует рекомендовать в качестве параметра для верификации программных средств.

Список литературы

1. Benchmark on reactivity compensation with diluted boron by stepwise insertion of control rod cluster into the VVER-1000 core. NEA / EGMPEBV / DOC (2018), OECD Nuclear Energy Agency, January 2018.
2. Кавун О. Ю. Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – М.: –1999. – Вып. 2.
3. Тебин В. В., Обухов В. В., Сергеев В. К., Иванов А. С. и др. Проект пакета программ САПФИР для решения задач расчета ячейки реактора. В сб. ВАНТ с. ФиТЯР, вып. 4, М., ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1985.

References

1. Benchmark on Reactivity Compensation with Diluted Boron by Stepwise Insertion of Control Rod Cluster into the VVER-1000 Core. NEA / EGMPEBV / DOC (2018), OECD Nuclear Energy Agency, January 2018.
2. O. Yu. Kavun. Methodology for Simulation of Nuclear Plant Dynamics Implemented in RADUGA-EU software. Science and Engineering Issues. Ser.: Physics of Nuclear Reactors, issue 2, M., 1999.
3. V. V. Tebin, V. V. Obukhov, V. K. Sergeev, A. S. Ivanov et al. Draft Software Package 'SAPFIR' for Reactor Cell Calculations. In a compilation 'Issues of Nuclear Science and Engineering', ser. 'Phys. and eng. of nuclear reactors', issue 4, M.: CNIATOMINFORM, 1985.

