

ТРЕХМЕРНЫЙ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕАКТОРА С ТВЕРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Марьенков А.А., Кавун О.Ю. (НТЦ ЯРБ)

Введение

В данной работе представлены результаты впервые выполненного трехмерного связанного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета активной зоны концептуального проекта высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем (ВРТТ). Расчет выполнен с целью выбора стационарной топливной загрузки реактора, расположения органов системы управления и защиты (СУЗ), определения основных теплотехнических и нейтронно-физических характеристик активной зоны ВРТТ. На основании результатов расчетных исследований проведено уточнение предварительно оцененных геометрических характеристик активной зоны, а также выбран нуклидный состав свежего топлива подпитки для стационарной топливной загрузки.

Краткое описание высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем

Основные принципы концептуального проекта ВРТТ сформулированы в [1].

Активная зона и оборудование первого контура, включая теплообменники и оборудование контура циркуляции теплоносителя, размещаются в едином корпусе (рис. 1), заполненном инертным газом, давление которого в рабочем режиме реактора составляет порядка 0,09 МПа. Внутри общего корпуса расположены: верхний питающий бункер с запасом теплоносителя 3, причем теплоноситель в бункере играет роль верхнего отражателя и первого барьера биологической защиты; активная зона 1, окруженная боковым отражателем из графитовых блоков шестигранной формы. Ниже активной зоны располагаются теплообменники 7, в которых теплообменными средами являются твердый теплоноситель первого контура и вода (пар) при сверхкритических параметрах второго контура. Теплоноситель первого контура проходит в межтрубном пространстве, а теплоноситель второго контура – внутри трубной системы. Под теплообменниками предусмотрены емкости для твердого теплоносителя – нижние бункеры 4, с нижнего уровня которых подъемники 8 забирают теплоноситель для подачи его в верхний бункер.

Для расхолаживания реактора и обеспечения отвода остаточных тепловыделений после ухода основного теплоносителя из активной зоны (вследствие останова подъемников 8) предложена система пассивного отвода тепла (СПОТ), основанная на естественной циркуляции инертного газа в корпусе реактора и отводе тепла к атмосферному воздуху через теплообменники СПОТ 10.

Исходные данные

В качестве исходных данных использованы результаты предварительного расчетного исследования нейтронно-физических свойств активной зоны ВРТТ на основе модели элементарной ячейки. Эти расчеты выполнены с целью выявления основных закономерностей и оптимизации в первом приближении параметров топливной загрузки с помощью программного комплекса UNK 4.0 [1], позволяющего учесть эффект двойной гетерогенности размещения топлива в ячейке. Результаты предварительных расчетов по вышеупомянутой программе определили первоначальные характеристики топливной кампании. При обогащении топлива 15% кампания составляет 4 года с интервалом работы реактора между перегрузками 300 эффективных суток, при этом максимальная глубина выгорания топлива достигает 155 МВт·сут/кг_U. Для компенсации начального запаса реактивности требуется добавление в топливо порядка 0,5% эрбия. Расчеты на основе модели элементарной ячейки ВРТТ позволили получить основные качественные закономерности и отобрать наиболее перспективные варианты для дальнейшего исследования. В данной работе выполнено исследование характеристик активной зоны по программе связанного трехмерного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета [2]. При этом исходными данными по изотопному составу топлива и геометрическим характеристикам микротвэлов служили упомянутые выше расчеты [1].

Кроме того, в качестве исходных данных приняты разработанные в рамках концептуального проекта ВРТТ теплофизические и геометрические характеристики активной зоны реактора [1].

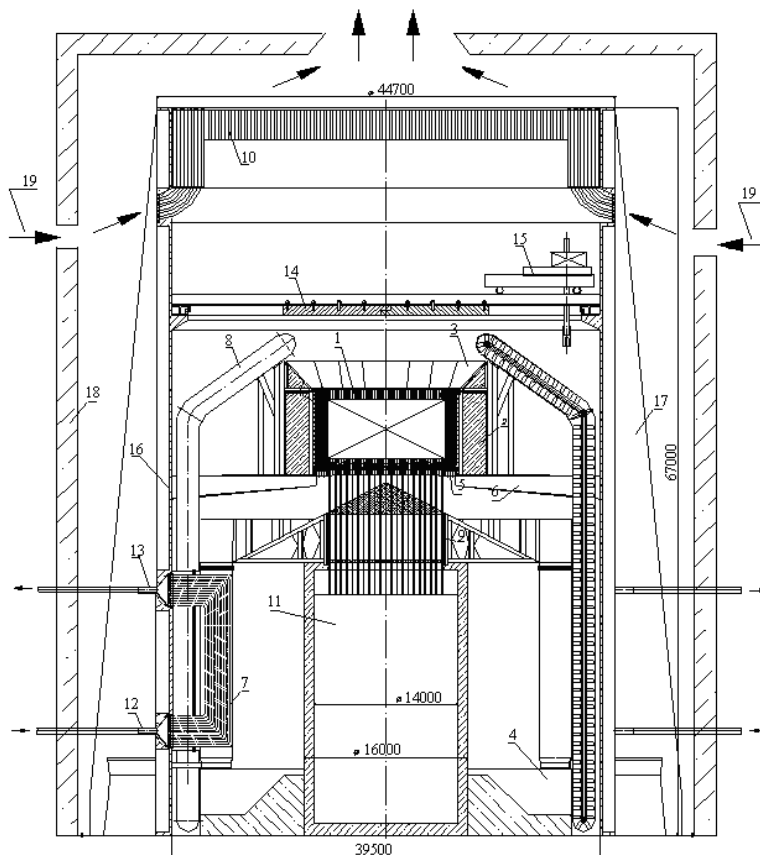


Рис. 1. Реакторная установка ВРТТ-1600:

- 1 – активная зона; 2 – биологическая защита; 3 – верхний раздаточный бункер; 4 – нижний бункер; 5 – нижняя опорная плита; 6 – нижняя опорная металлоконструкция; 7 – теплообменник; 8 – система подъема теплоносителя; 9 – блок направляющих труб СУЗ; 10 – теплообменники СПОТ; 11 – приводы СУЗ; 12 – патрубок подвода питательной воды; 13 – патрубок отвода «острого» пара; 14 – верхняя биологическая защита; 15 – РЗМ; 16 – корпус реакторной установки; 17 – ребра жесткости силового корпуса; 18 – защитная оболочка (контаймент); 19 – охлаждающий воздух

Моделирование активной зоны высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем с гексагональной решеткой

Один из вариантов конструкции активной зоны ВРТТ предполагает использование шестигранных ТВС. Данная работа посвящена исследованию нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны ВРТТ именно с ТВС в виде шестигранной призмы.

Результаты предварительных расчетов по программе ДЕСНА позволили разработать конструкцию ТВС и определить основные геометрические размеры активной зоны.

Описание активной зоны высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем

Для предварительных расчетов была выбрана следующая геометрия активной зоны: эквивалентный диаметр – 10,7 м, высота – 6,4 м, высота топливного столба – 5,6 м.

В состав активной зоны ВРТТ (рис. 2) входят: кольцевой отражатель из трех рядов заменяемых шестигранных графитовых колонн размером «под ключ» 540 мм; 349 топливных каналов; верхний и нижний отражатели, представляющие собой шестигранные стаканы, содержащие твердый теплоноситель; управляющие стержни СУЗ, расположенные в направляющих каналах в центре ТВС. Нижняя ТВС опирается на опорный стакан, служащий для центрирова-

ния ТВС, а также для формирования безразрывного связанного течения теплоносителя в канале активной зоны. Стаканы устанавливаются в опорную решетку, состоящую из стальных шестигранников, сваренных между собой. В свою очередь, вся активная зона лежит на опорной плите, установленной на основном корпусе реакторной установки.

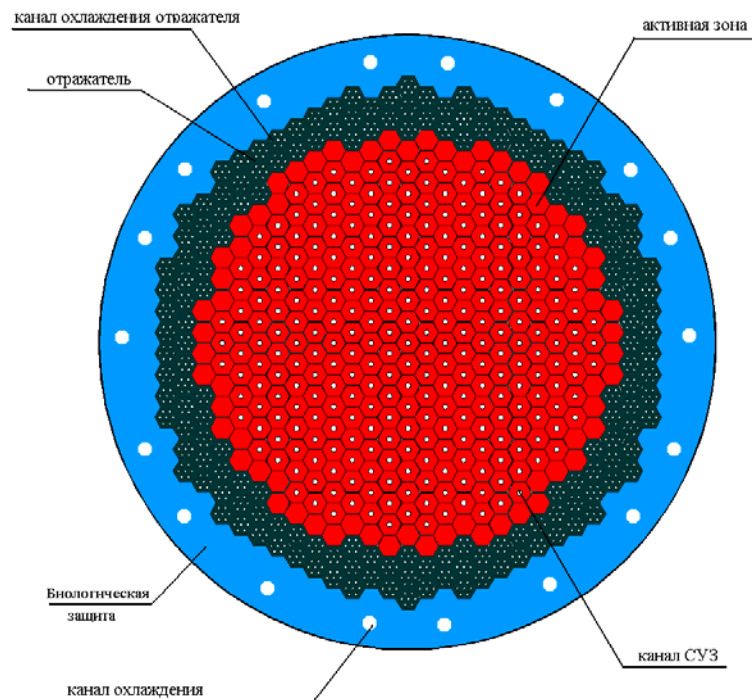


Рис. 2. Активная зона ВРПТ

Каждая ТВС (рис. 3) состоит из шестигранного графитового кожуха с размером «под ключ» 540 мм и толщиной стенки 10 мм, четырех дистанционирующих решеток, центральной трубы с толщиной стенки 10 мм для стержня СУЗ и твэлов цилиндрической формы (рис. 4), устанавливаемых в дистанционирующие решетки по треугольной сетке с шагом 35 мм в три слоя по высоте ТВС. В каждом слое ТВС 210 твэлов, т.е. общее число твэлов в ТВС равно 630.

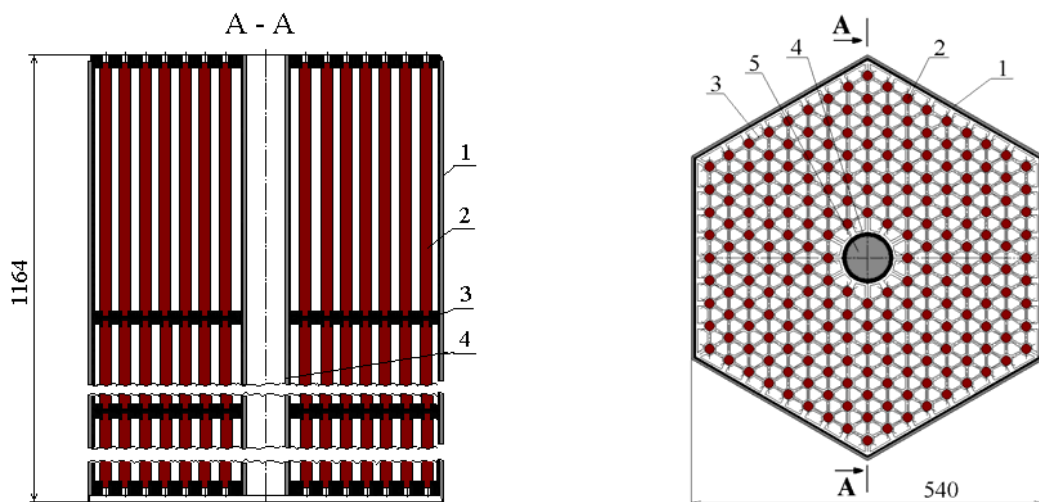


Рис. 3. Схематичный чертеж ТВС:
 1 – графитовый кожух; 2 – тепловыделяющий элемент; 3 – дистанционирующая решетка;
 4 – труба канала СУЗ; 5 – стержень СУЗ

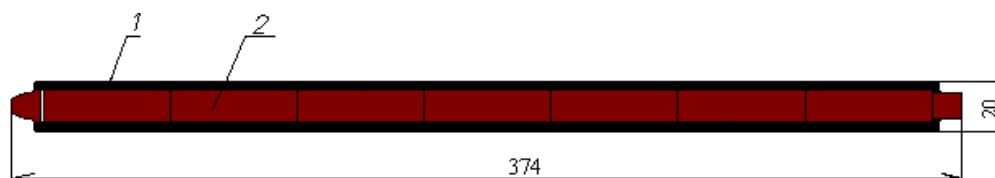


Рис. 4. Тепловыделяющий элемент:
1 – графитовая трубка; 2 – топливо в виде компактов микротвэлов

Конструкция твэла включает графитовую оболочку толщиной 3,65 мм, в которой помещаются топливные компакты из микротвэлов в графитовой матрице.

Состав и геометрические характеристики стержней СУЗ также выбраны в результате серии вариантных расчетов по комплексу программ САПФИР_95 – ДЕСНА.

Органы СУЗ расположены в центральной трубе 86x10 мм в каждой ТВС, за исключением периферийного ряда, в количестве 283 штук. Поглотитель СУЗ – стержни из карбида бора с плотностью 1,67 г/см³. Поглощающий элемент СУЗ представляет собой многослойный цилиндр (рис. 5), состоящий из направляющей графитовой трубки наружным диаметром 60 мм. Поглотителем является карбид бора, при этом поглощающая втулка имеет внутренний диаметр 30 мм и наружный – 55 мм, а ее внутреннее пространство заполнено графитом.

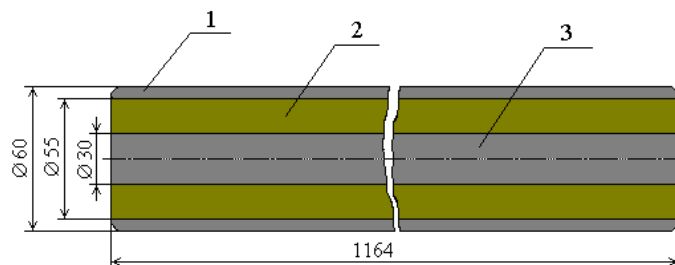


Рис. 5. Поглощающий элемент СУЗ:
1 – наружная трубка; 2 – поглощающая втулка; 3 – графитовый вытеснитель

Подготовка двухгрупповых нейтронно-физических сечений для трехмерного расчета активной зоны высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем

При подготовке библиотеки нейтронно-физических сечений (констант) была использована аттестованная программа САПФИР_95 [3] для нейтронно-физического расчета тепловых ядерных реакторов, широко используемая применительно к водо-водяным и уран-графитовым реакторам. С целью проверки применимости программы САПФИР_95 для расчета ячеек ВРТТ результаты расчетов элементарной ячейки с помощью данной программы в гомогенном приближении сопоставлялись с расчетами, учитывающими двойную гетерогенность размещения топлива в ячейке, по программе UNK.

Нейтронно-физический расчет активной зоны ВРТТ выполнен по программе с трехмерной двухгрупповой моделью активной зоны реактора ДЕСНА, входящей в состав программного комплекса РАДУГА [2]. Для проведения связанных теплогидравлических и нейтронно-физических расчетов ВРТТ (твердый теплоноситель состоит из мелкодисперсных частиц графита) программа ДЕСНА была соответствующим образом доработана на основе теплогидравлической модели, реализованной в программе ТРР [4].

При использовании предварительных данных, полученных в результате анализа нейтронно-физических свойств активной зоны ВРТТ с помощью программы UNK, была подготовлена библиотека нейтронно-физических сечений по программе САПФИР_95 и проведены предварительные расчеты по программе ДЕСНА.

Схема ТВС для расчетов по программе САПФИР_95 в секторе симметрии 60° приведена на рис. 6.

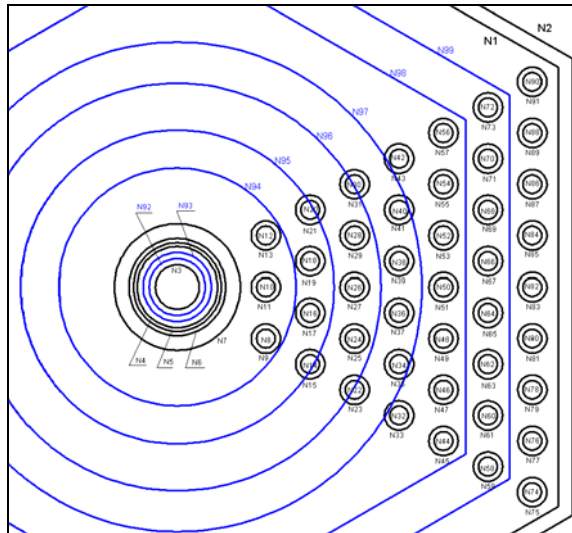


Рис. 6. Расчетная схема ТВС ВРТТ

Библиотека нейтронно-физических сечений для программы ДЕСНА, рассчитанная по указанной схеме, имеет следующий диапазон изменения параметров топлива и теплоносителя:

- температура топлива (от 290 до 2270 К);
- температура теплоносителя (от 290 до 1770 К);
- выгорание топлива от 0 до 180 МВт-сут/кг_U.

Нейтронно-физический расчет активной зоны высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем

Серия трехмерных расчетов активной зоны выполнена для разработки:

- стационарной топливной загрузки;
- схемы перегрузок и оптимизации нуклидного состава топлива подпитки с целью обеспечения допустимой неравномерности поля энерговыделения в процессе топливной кампании;
- схемы расположения органов СУЗ и выбора оптимального расположения стержней регулирующей группы.

На основании серии расчетов разработана картограмма стационарной топливной загрузки активной зоны реактора с сектором симметрии 60°, которая приведена на рис. 7. Номер сорта кассеты – это номер года в топливной кампании, сорт № 4 – графитовый отражатель. Определены следующие параметры активной зоны при номинальной мощности реактора 3560 МВт и трехгодичном топливном цикле:

- высота топливного столба активной зоны 7,35 м (семь столбов ТВС);
- длительность топливной кампании между перегрузками топлива 400 суток при трехгодичной схеме перегрузки.

Разработка схемы перегрузки топлива проводилась при условии обеспечения допустимого значения температуры топлива. Подпитка активной зоны осуществлялась ТВС с одинаковым обогащением топлива 15 % по U-235 и 5 % эрбия (концентрация эрбия выбиралась в процессе оптимизации).

Картограмма стационарной загрузки с нумерацией кассет для трехгодичной топливной кампании в секторе симметрии 60° представлена на рис. 8. Номер сорта кассеты – это номер года в топливной кампании, сорт № 4 – графитовый отражатель.

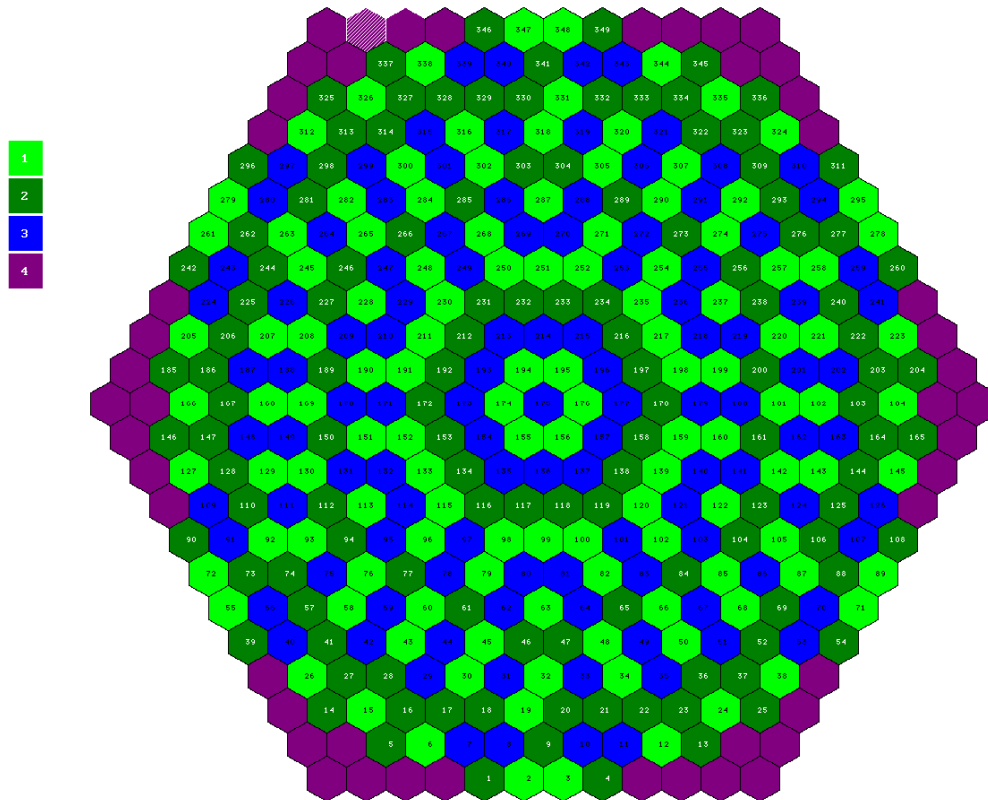


Рис. 7. Картограмма стационарной загрузки активной зоны

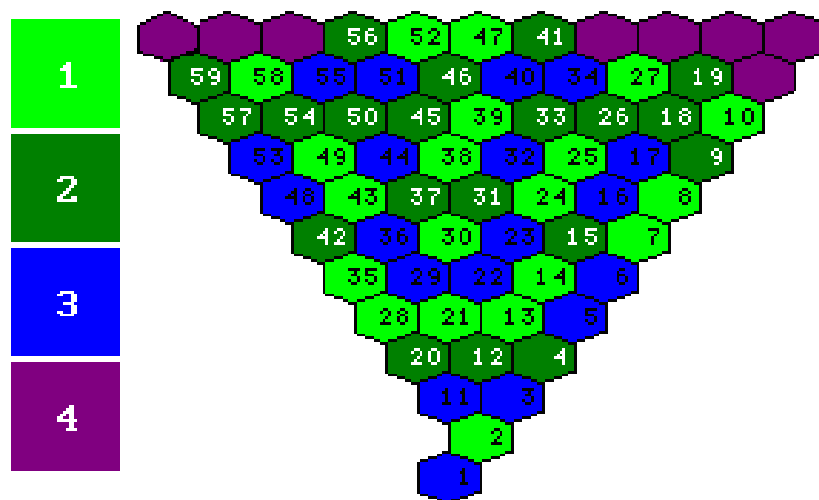


Рис. 8. Нумерация кассет и картограмма стационарной загрузки активной зоны в секторе симметрии 60°

Одним из основных результатов, полученных в данной работе, является представленная ниже схема стационарных перегрузок топлива, указывающая порядок перестановки ТВС в секторе симметрии 60° .

Схема стационарных перегрузок активной зоны реактора в секторе симметрии 60°

Свежая ТВС ----> 8 ----> 46 ----> 3
 Свежая ТВС ----> 39 ----> 19 ----> 16
 Свежая ТВС ----> 10 ----> 9 ----> 6
 Свежая ТВС ----> 35 ----> 59 ----> 53
 Свежая ТВС ----> 58 ----> 57 ----> 48
 Свежая ТВС ----> 14 ----> 18 ----> 17
 Свежая ТВС ----> 24 ----> 26 ----> 22
 Свежая ТВС ----> 43 ----> 54 ----> 29
 Свежая ТВС ----> 25 ----> 4 ----> 23
 Свежая ТВС ----> 49 ----> 20 ----> 36
 Свежая ТВС ----> 47 ----> 31 ----> 40
 Свежая ТВС ----> 52 ----> 37 ----> 51
 Свежая ТВС ----> 28 ----> 50 ----> 44
 Свежая ТВС ----> 13 ----> 33 ----> 32
 Свежая ТВС ----> 30 ----> 45 ----> 55
 Свежая ТВС ----> 38 ----> 12 ----> 34
 Свежая ТВС ----> 2 ----> 56 ----> 11
 Свежая ТВС ----> 7 ----> 41 ----> 1
 Свежая ТВС ----> 27 ----> 15
 Свежая ТВС ----> 21 ----> 42 ----> 5

Дальнейшие исследования проводились путем вариации содержания эрбия в топливе от 1 до 5 %. При содержании эрбия 1 и 3 % запас реактивности на выгорание в начале кампании (для компенсации которой требуется введение органов СУЗ с соответствующим существенным увеличением неравномерности энерговыделения в активной зоне) составляет 14 и 6 % соответственно (рис. 9). Для уменьшения некомпенсированного начального запаса реактивности проводилась вариация содержания эрбия, высоты активной зоны и длины кампании. В итоге были получены следующие характеристики активной зоны:

- высота топливного столба в активной зоне 7,35 м;
- содержание эрбия 5%.

Длительность кампании между перегрузками составила 400 суток при трехгодичной схеме перегрузки топлива.

Результаты изменения запаса реактивности в течение кампании при разном содержании эрбия и высоте активной зоны 5,6 и 7,35 м представлены на рис. 9 и 10.

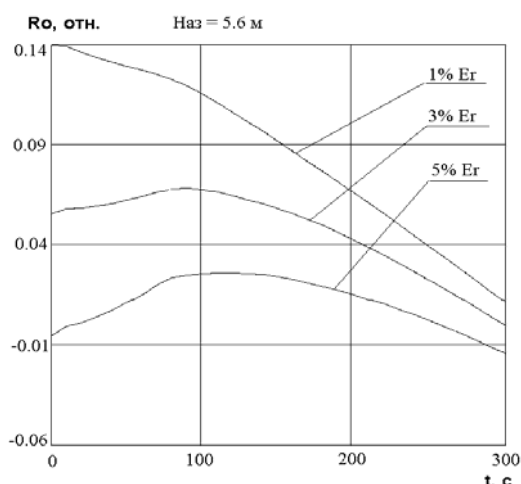


Рис. 9. Изменение запаса реактивности в течение кампании при разном содержании эрбия в топливе с высотой активной зоны 5,6 м

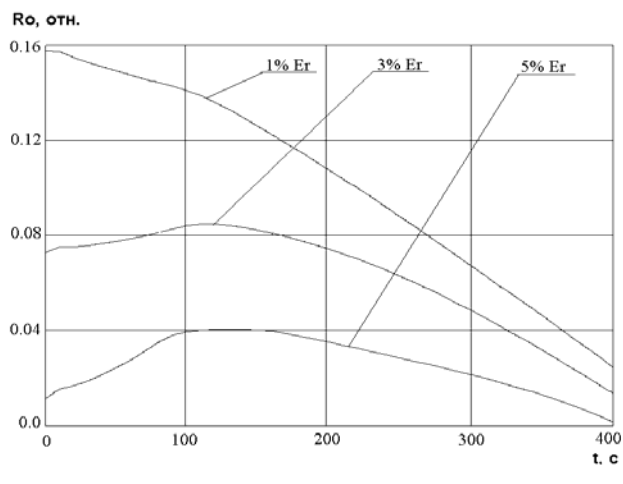


Рис. 10. Изменение запаса реактивности в течение кампании при разном содержании эрбия в топливе с высотой активной зоны 7,35 м

Из рис. 9 и 10 следует, что на начало кампании при различном содержании эрбия в топливе запас реактивности сильно отличается, и это влияет на начальную глубину погружения органов регулирования СУЗ. Однако на конец кампании запас реактивности при различном содержании эрбия в топливе отличается незначительно и приближается к нулю, что говорит о максимально возможном выгорании топлива в течение кампании при всех рассмотренных вариантах. Следует заметить, что при содержании эрбия в свежем топливе более 5% длительность топливной кампании начинает снижаться. Таким образом, оптимальное содержание эрбия в топливе составляет 5%. При этом максимальная температура топлива, достигаемая в течение всей кампании без учета работы органов СУЗ для компенсации избыточной реактивности, не превысила 1240 °С.

На следующем этапе нейтронно-физического расчета ВРТТ разрабатывалась оптимальная картограмма расположения органов регулирования СУЗ. Как уже упоминалось выше, они расположены в центральных каналах всех ТВС, кроме расположенных вблизи бокового отражателя. Подбор количества групп органов регулирования СУЗ осуществлялся таким образом, чтобы эффективность всех групп была приблизительно одинаковой, за исключением 1 группы, применяемой только для аварийной защиты. Объединение органов регулирования по номерам регулирующих групп представлено на рис. 11. Общее число групп – 7, причем седьмая группа – основная регулирующая. Номер сорта соответствует номеру регулирующей группы. Расположение основной регулирующей группы выбиралось таким образом, чтобы она компенсировала избыточную реактивность в течение всей кампании и поле покассетного энерговыделения при ее движении искажалось наименьшим образом.

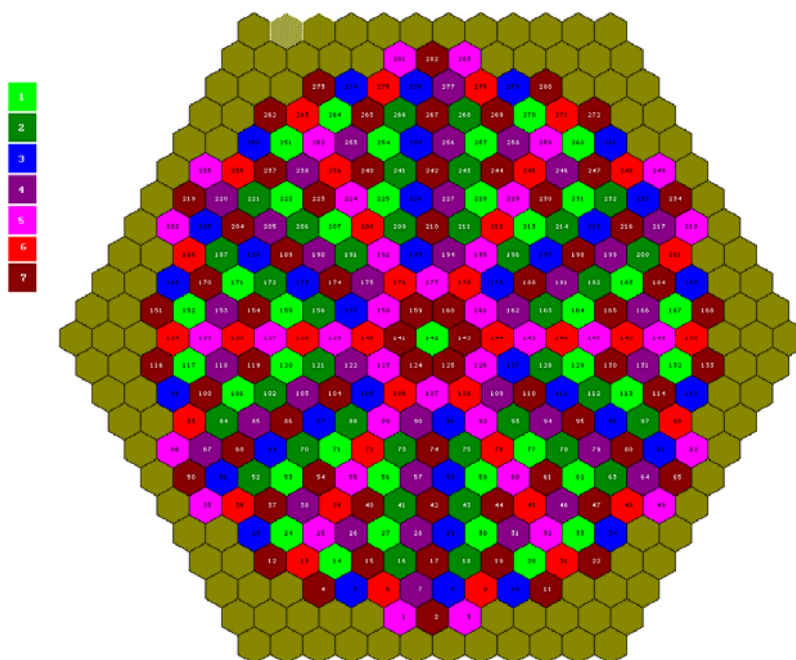


Рис. 11. Схема расположения стержней СУЗ

В результате расчета стационарной топливной загрузки активной зоны реактора получены следующие результаты:

- длительность топливной кампании составила 400 суток при трехгодичной схеме перегрузки топлива;
- средняя глубина выгорания на начало кампании – 58,6 МВт·сут/кг_U;
- средняя глубина выгорания на конец кампании – 110,8 МВт·сут/кг_U;
- суммарный расход твердого теплоносителя через активную зону был принят равным примерно 6000 кг/с.

Поля покассетного относительного энерговыделения в начале и конце топливной кампании представлены на рис. 12 и 13, поля средней покассетной глубины выгорания в начале и конце кампании представлены на рис. 14 и 15.

На рис. 16 – 20 представлены изменения следующих характеристик активной зоны в течение кампании:

- средней температуры топлива;
- средней температуры теплоносителя;
- максимальной температуры топлива;
- максимальной температуры оболочки твэлов;
- аксиального оффсета.

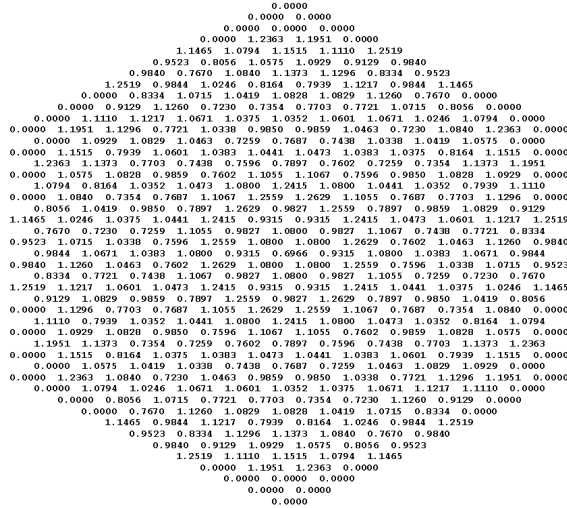


Рис.12. Поле относительного покассетного энерговыделения на начало кампании

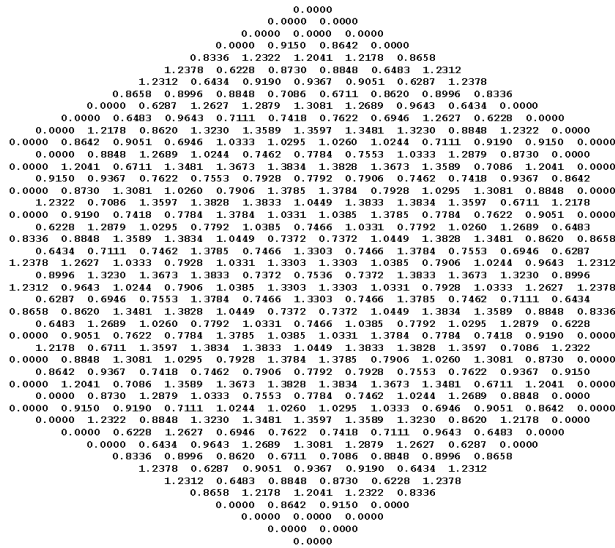


Рис.13. Поле относительного покассетного энерговыделения на конец кампании

В начале кампании максимальное относительное покассетное энерговыделение не превышает значения 1,26. В конце кампании поле энерговыделения становится более равномерным по высоте активной зоны, но при этом максимальное значение относительного покассетного энерговыделения увеличивается до 1,38.

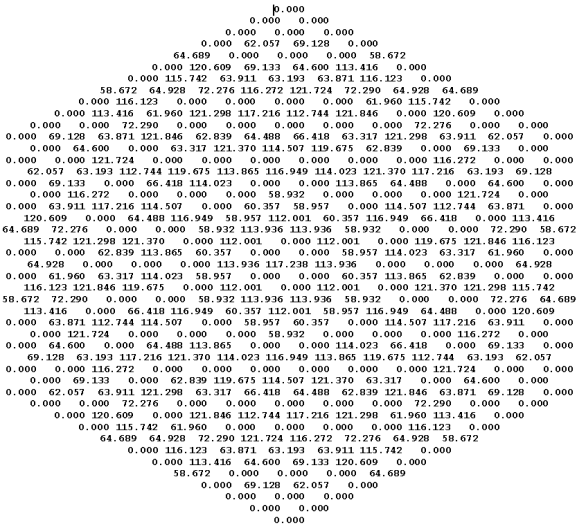


Рис. 14. Средняя покассетная глубина выгорания на начало кампании

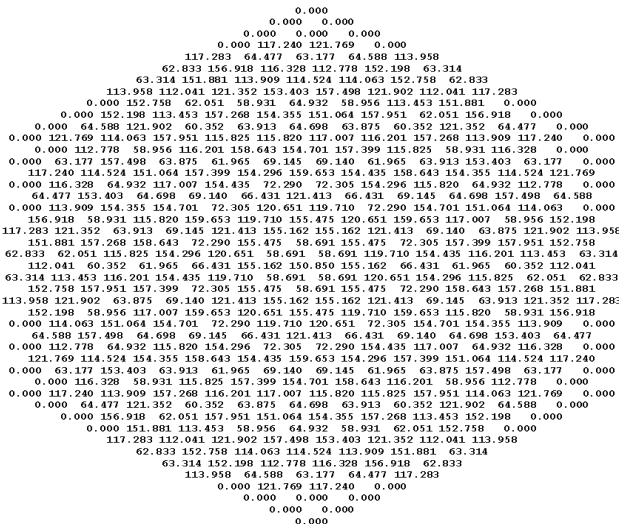


Рис. 15. Средняя покассетная глубина выгорания на конец кампании

Из рис. 14 и 15 следует, что за 1-й год нахождения топливных кассет в активной зоне их максимальная глубина выгорания достигает значения 72 МВтсут/кг_U, за 2-й год – 121 МВтсут/кг_U, после 3-го года – 160 МВтсут/кг_U.

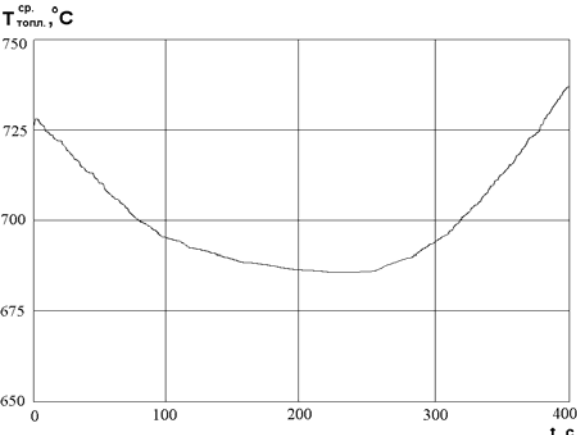


Рис. 16. Изменение средней температуры топлива в активной зоне в течение кампании

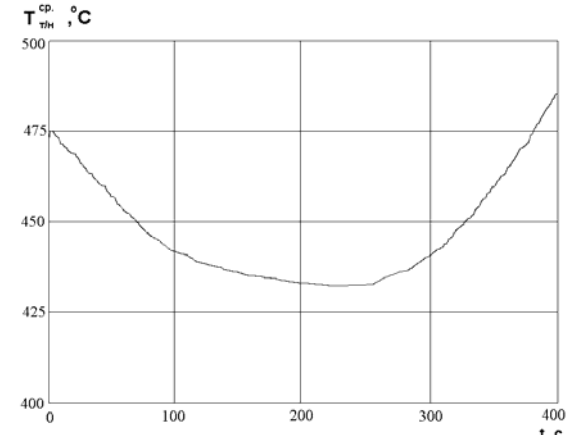


Рис.17. Изменение средней температуры теплоносителя в течение кампании

Из рис. 16 и 17 следует, что характер изменения средней температуры теплоносителя аналогичен характеру изменения средней температуры топлива. Минимальное значение средней температуры теплоносителя и топлива достигается примерно через 250 суток после начала выгорания, что связано с максимальным погружением регулирующей группы органов регулирования СУЗ и смещением поля энерговыделения в нижнюю часть активной зоны.

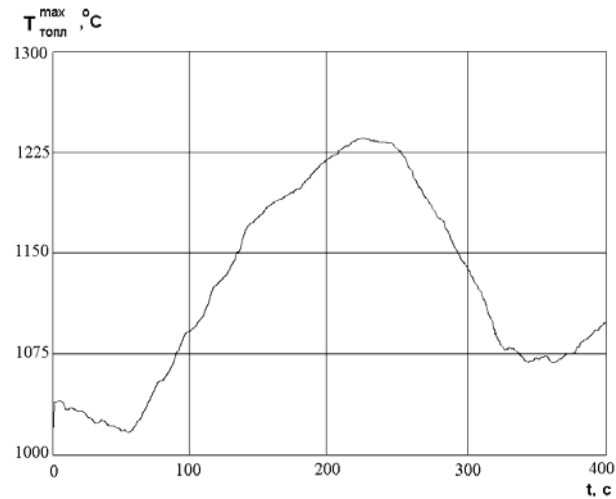


Рис. 18. Изменение максимальной температуры топлива в течение кампании

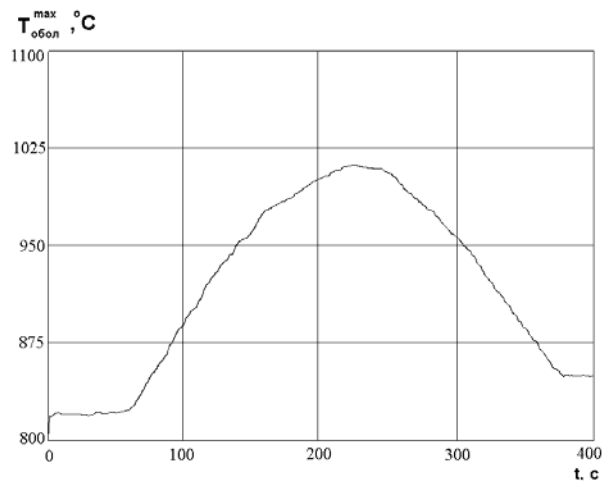


Рис. 19. Изменение максимальной температуры оболочки твэлов в течение кампании

Максимальные температуры топлива и оболочек твэлов в течение кампании достигают максимума примерно на 250 сутки, это также связано с максимальным погружением регулирующей группы органов регулирования СУЗ.

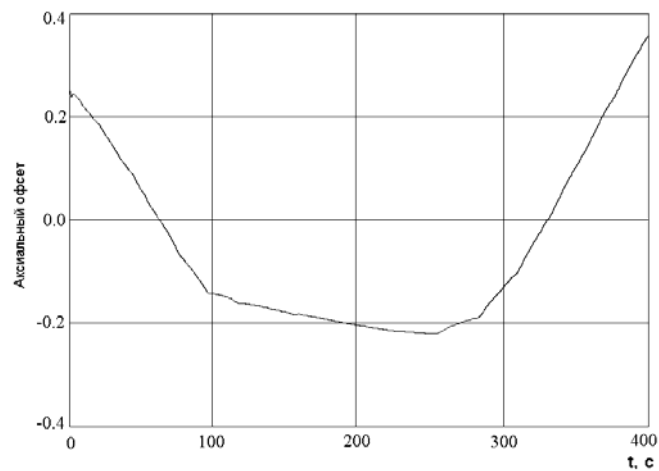


Рис. 20. Изменение аксиального офсета в течение кампании

Характер изменения аксиального офсета соответствует глубине погружения органов регулирования СУЗ, при этом максимум поля энерговыделения из верхней части активной зоны смещается к середине кампании в нижнюю, а затем снова перемещается в верхнюю часть.

На рис. 21 представлено изменение покассетного профиля энерговыделения в течение кампании.

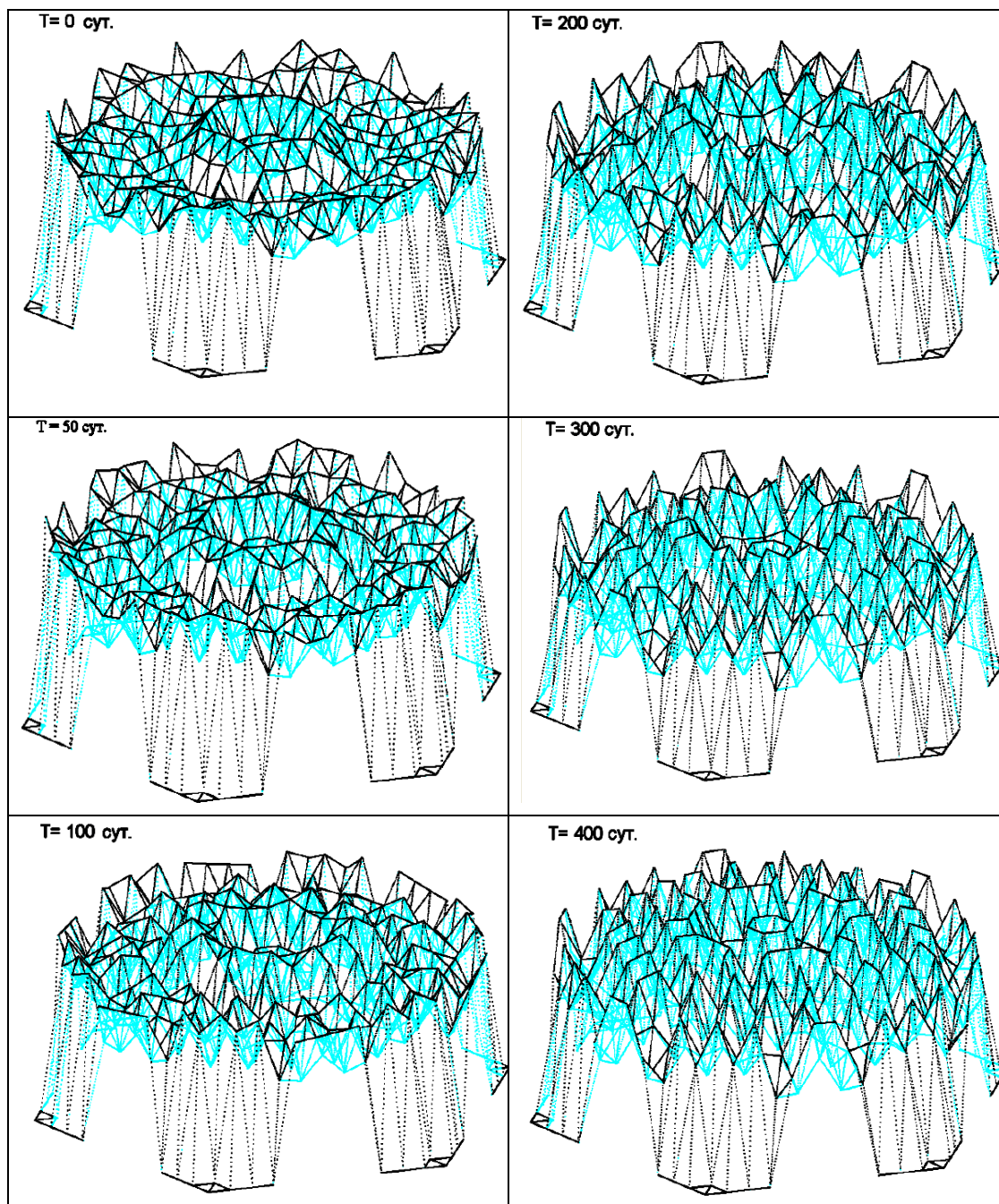


Рис. 21. Покассетный профиль энерговыделения в течение кампании

В табл. 1 представлены результаты расчета эффективности групп органов СУЗ в холодном (20 °С) и разогретом до минимально-контролируемого уровня мощности (300 °С) состояниях.

Таблица 1

Эффективность групп органов СУЗ в холодном (20 °С) и разогретом до минимально-контролируемого уровня мощности (300 °С) состояниях

Номер группы	Эффективность	
	Холодное состояние (20 °С)	Разогретое состояние (300 °С)
1	7,93%	7,68%
2	3,58%	3,55%
3	3,15%	3,08%
4	4,04%	3,80%
5	3,62%	3,59%
6	3,05%	2,74%
7	4,14%	3,93%

Эффективность аварийной защиты при работе реактора на номинальной мощности для трех моментов топливной кампании представлена в табл. 2.

Таблица 2

Эффективность аварийной защиты при работе реактора на номинальной мощности в процессе топливной кампании

Момент топливной кампании	Эффективность аварийной защиты
0 суток	12,4%
200 суток	9%
400 суток	12,8%

Минимальная эффективность аварийной защиты в середине топливной кампании объясняется тем, что регулирующая группа СУЗ находится в максимально погруженном положении. Максимальная температура топлива также достигается в середине топливной кампании и не превышает 1240 °С.

Выводы

Таким образом, в результате большой серии связанных трехмерных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов активной зоны реактора ВРТТ получены следующие результаты:

- выбрана конструкция активной зоны реактора ВРТТ при использовании ТВС в виде шестигранных призм;
- разработана равновесная схема перегрузок топлива с подпиткой активной зоны свежими однотипными ТВС;
- выбрана схема расположения органов СУЗ;

Полученные результаты могут быть использованы для технического проектирования как собственно активной зоны ВРТТ, так и реакторной установки в целом.

Предварительные результаты данной работы были опубликованы в [5, 6, 7, 8].

Список использованной литературы

1. Денискин В.П., Дмитриев А.М., Хренников Н.Н. и др. Концепция и особенности компоновки высокотемпературного ядерного реактора с твердым теплоносителем. Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 3, с. 156–161.
2. Игнатенко В.В., Кавун О.Ю., Козлов О.С. и др. Программный комплекс РАДУГА-ЭУ для моделирования динамики энергоблока АЭС // Сб. трудов ГНИПКИИ «Атомэнергопроект». -М.: 2000. Вып. 1, с. 45–60.

3. Программа САПФИР_95 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95// Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности: Аттестационный паспорт на программное средство № 116 от 02.03.2000.
4. Кавун О.Ю., Куно М.Я., Фейман В.Г. Программа «ТРР» для теплогидравлического расчета сложных теплогидравлических сетей.//Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов НЕЙТРОНИКА-97: Сб. трудов семинара МАЭ РФ. Обнинск, 1998, с.111–118.
5. Дмитриев А.М., Кавун О.Ю., Хренников Н.Н., Пискунова Н.А., Марьенков А.А. Разработка компьютерной модели энергоблока на базе высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем//Сб. докладов международного семинара «Вода и пар сверхкритических параметров в атомной энергетике: проблемы и решения» 22–23 октября 2008, Москва.
6. Дмитриев А.М., Кавун О.Ю., Хренников Н.Н., Пискунова Н.А., Марьенков А.А. Нейтронно-физический расчет высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем // Сб. докладов международного семинара «Вода и пар сверхкритических параметров в атомной энергетике: проблемы и решения» 22–23 октября 2008, Москва.
7. Дмитриев А.М., Кавун О.Ю., Хренников Н.Н., Марьенков А.А. Разработка компьютерной модели энергоблока на базе высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем//Сб. докладов III-й Международной научно-практической конференции STAR-2008: «Компьютерные технологии решения прикладных задач тепломассопереноса и прочности», 13–14 мая 2008, Нижний Новгород.
8. Дмитриев А.М., Кавун О.Ю., Хренников Н.Н., Пискунова Н.А., Марьенков А.А. Концептуальный проект конструкции высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем//Сб. докладов научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов «Молодежь ЯТЦ: наука, производство, экологическая безопасность» 18–22 ноября 2008, Сибирский химический комбинат, Северск, Томская обл.