

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии

Кафедра Физико-энергетических установок

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Улучшение параметров реактора СМ-3 путем использования водяных ТВЭЛОВ

УДК 621.039.53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Полюга Максим Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ФЭУ ФТИ	Чертков Ю.Б.	доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.экон.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Физико-технический

Направление подготовки: (специальность): 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра: Физико-энергетических установок

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой

_____ Долматов О.Ю.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Полюга Максим Николаевич

Тема работы:

Улучшение параметров реактора СМ-3 путем использования водяных твэлов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1618/с от 26.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	17.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	– высокопоточный реактор СМ-3, – программное обеспечение MCU-RR
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	введение: цель работы, область применения и значимость рассматриваемой проблемы; основная часть: общие сведения о реакторе СМ-3 и обоснование проекта, конструктивные особенности реактора СМ-3, расчетная модель и методика проведения нейтронно-физических расчетов, использование активной зоны с 5-ти граммовыми твэлами, параметры активной зоны в процессе кампании, сравнение характеристик штатной активной зоны и зоны, сформированной из ТВС, содержащих водяные полости
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант

Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М.В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Иностранный язык	Демьяненко Н.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
High-Flux Research Reactor	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ФЭУ ФТИ	Чертков Ю.Б.	доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Полюга Максим Николаевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Малик Анатолий Анатольевич

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования</i>	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. <i>Оценочная карта конкурентных технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Иерархическая структура работ</i>
4. <i>Календарный план проекта</i>
5. <i>Бюджет проекта</i>
6. <i>Определение ресурсоэффективности проекта</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.ЭКОН.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Полюга Максим Николаевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Полюга Максим Николаевич

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	– вредных факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение); – опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	электробезопасность, пожаробезопасность, требования при работе на ПЭВМ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– воздействие на организм человека; – приведение допустимых норм; – предлагаемые средства защиты.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Полюга Максим Николаевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Физико-технический

Направление подготовки (специальность): 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Уровень образования: Магистратура

Кафедра Физико-энергетических установок

Период выполнения: весенний семестр 2016 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	6.06.2016
--	-----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ФЭУ ФТИ	Чертков Ю.Б.	Доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает в себя: 99 страниц, 29 рисунков, 31 таблицу, 3 приложения.

Ключевые слова: исследовательский реактор СМ-3, водяные твэлы, неравномерность распределения нейтронов, энерговыделение, запас реактивности.

Объектом исследования является высокопоточный исследовательский реактор СМ-3.

Цель работы оценка нейтронно-физических параметров реактора СМ с ТВС, содержащими водяные полости.

В процессе исследования проводилось исследование характеристик штатной, модернизированной активной зоны реактора СМ и зоны, скомпонованной из ТВС, содержащих водяные полости, а также производилось сравнение запаса реактивности, неравномерности распределения энерговыделения и плотности потока тепловых нейтронов в реакторе СМ.

В результате исследования выявлена значимость влияния водяных твэлов на запас реактивности, неравномерность распределения энерговыделения, длительность кампании реактора и Плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальных каналах.

Степень внедрения: высокая.

Область применения: ядерная физика.

Экономическая эффективность/значимость работы: высокая.

Обозначения и сокращения

ЦЗП – центральная замедляющая полость

КМ – конструкционные материалы

ЦКО – центральный компенсирующий орган

РО – регулирующий орган

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии;

ЯМ – ядерные материалы;

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;

ОСО – отраслевые стандартизированные образцы;

ИСР – иерархическая структура работ;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

СИЗ – средства индивидуальной защиты.

Оглавление

Введение.....	12
1 Общие сведения о реакторе СМ-3 и обоснование проекта	15
1.1 Конструктивные особенности реактора СМ-3.....	15
1.2 Расчетная модель и методика проведения нейтронно-физических расчетов	21
2 Расчетная часть проекта	26
2.1 Активная зона с 5-ти граммовыми твэлами	26
2.2 Параметры активной зоны в процессе кампании	35
2.3 Сравнение характеристик штатной активной зоны и зоны, сформированной из ТВС, содержащих водяные полости	38
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	41
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования	41
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений	42
3.1.2 SWOT-анализ.....	44
3.2 Планирование управления научно-техническим проектом.....	47
3.2.1 Иерархическая структура работ проекта	47
3.2.2 Контрольные события проекта	47
3.2.3 План проекта.....	49
3.3 Бюджет научного исследования	52
3.3.1 Расчёт материальных затрат	52
3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы	53
3.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	55
3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	56
3.3.5 Накладные расходы.....	56
3.3.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	57
3.4 Организационная структура проекта	58

3.5 Матрица ответственности	58
3.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	61
4 Социальная ответственность	64
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	64
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	67
4.2.1 Организационные мероприятия.....	67
4.2.2 Технические мероприятия.....	67
4.3 Условия безопасной работы.....	70
4.3.1 Регулирование уровня шума	70
4.3.2 Показатели микроклимата в помещении	70
4.3.3 Освещённость рабочей зоны.....	71
4.3.4 Электромагнитное излучение от ПЭВМ.....	72
4.3.5 Ионизирующее излучение от ПЭВМ	72
4.3.6 Психофизиологические вредные факторы	73
4.4 Электробезопасность	73
4.5 Пожарная безопасность	75
Заключение	76
Список использованных источников	77
Приложение А	80
Приложение Б.....	83
Приложение В.....	86

Введение

Анализ распределения энерговыделения в существующем варианте активной зоны реактора СМ показывает высокую неравномерность распределения энерговыделения по сечению ТВС. Особенно в сборках первого ряда ячеек, окружающих центральную замедляющую полость (ЦЗП). В штатной активной зоне при коэффициенте неравномерности 2-2,5 только 20% твэлов в них имеют значение энерговыделения, более чем в 1,1 раза превышающее среднее по ТВС значение, а у основной массы твэлов относительное энерговыделение лежит в пределах 0,8-0,9 от среднего. Соответственно, если в выгружаемых из реактора сборках среднее выгорание составляет 33%, то максимальное выгорание в отдельных твэлах достигает 60%. В находящихся в ячейках периферийного ряда сборках коэффициент неравномерности распределения энерговыделения имеет несколько меньшее значение (1,9), но и в этом случае при том же среднем выгорании в выгружаемом топливе максимальное достигает 50%.

При мощности реактора 100 МВт такая неравномерность приводит к тому, что на поверхности наиболее напряженных твэлов в активной зоне плотность теплового потока (средняя по периметру твэла) достигает предельных значений – 15 МВт/м^2 , а на поверхности твэлов в середине ТВС она составляет 8 МВт/м^2 .

Задача уменьшения неравномерности распределения энерговыделения по сечению ТВС реактора СМ приобретает особое значение при переходе к модернизированной активной зоне, в которой предполагается использовать гораздо меньшее число твэлов (в ней появляются 2 петлевых канала, устанавливаемых вместо штатных ТВС, 4 ампульных канала среднего диаметра, а для повышения плотности потока нейтронов на 2-ом этапе модернизации предполагается сократить число ТВС с 32-х до 24-х).

В данной работе предлагается заменить часть твэлов в центре каждой из ТВС реактора СМ водяными ловушками нейтронов. При такой замене

части неэффективно используемых ТВЭлов в центре ТВС образуется всплеск нейтронного потока, за счет которого в окружающих полость ТВЭлах повысится энерговыделение. Причем такое повышение с избытком компенсирует эту величину, теряемую за счет удаления ТВЭлов. В результате существенно уменьшаются коэффициенты неравномерности распределений энерговыделения по сечению всех ТВС, повышаются средние значения этих распределений и, кроме того, повышается запас реактивности реактора. Для компенсации последнего в реакторе должно быть увеличено среднее выгорание топлива на 2-2,5 % (в зависимости от размера водяных полостей).

В топливе выгружаемых из реактора СМ облученных ТВС на 4-5 % возрастет среднее выгорание и существенно уменьшится неравномерность распределения продуктов деления (выгорания) по их сечению. И, в то же время, максимальные значения плотности потока тепла с поверхности наиболее напряженных ТВЭлов уменьшатся или, по крайней мере, не увеличатся.

На месте удаленных ТВЭлов должна размещаться полая трубка из циркониевого сплава, заглушенная снизу для того, чтобы уменьшить проходное сечение для теплоносителя. При этом должны увеличиться скорость движения воды через ТВС, значения критических тепловых потоков на поверхности ТВЭлов и, соответственно, запас до кризиса теплообмена. В данных водяных полостях можно разместить не только существующие экспериментальные каналы (такие как в ТВС черт. 184.05.000, черт. 184.09.000, черт. 184.10.000), но и существенно увеличить их количество.

Предпосылками настоящей работы были ранее проведенные расчетные исследования конвертирующих устройств в реакторе СМ, которые показали, что слой штатных ТВЭлов из 4-5 рядов полностью изменяет спектр нейтронов. Из 15-ти рядов ТВЭлов в каждой ТВС 10 рядов (в глубине активной зоны) работают в существенно недогруженном режиме: мощности этих ТВЭлов в 1,5-2 раза ниже мощности ТВЭлов внешних рядов (примыкающих к

бериллиевым блокам центральной замедляющей полости или отражателя). Увеличить их мощность можно только создав в них замедляющие нейтроны ловушки, которые локально увеличивают плотность потока тепловых нейтронов.

Целью настоящей работы является оценка нейтронно-физических параметров реактора СМ с ТВС, содержащими водяные полости, определение изменения плотности потоков нейтронов в экспериментальных каналах реактора при переходе на такие сборки, изменения спектра нейтронов внутри и на поверхности ТВС.

1 Общие сведения о реакторе СМ-3 и обоснование проекта

1.1 Конструктивные особенности реактора СМ-3

Исследовательский высокопоточный реактор СМ-3 используется для получения радионуклидных препаратов и проведения опытов по радиационному материаловедению и ядерной физике. Большой объем проводимых исследований, требующих как жесткий энергетический спектр нейтронов (испытания КМ), но и присутствие нейтронов тепловых энергий с высокой плотностью потока (аккумуляция трансурановых элементов, получение радионуклидов с высокой удельной активностью, испытания топливных сборок), предполагал при проектировании реактора особенной компоновки активной зоны. В центре реактора находится нейтронная ловушка - полость для размещения облучаемых мишеней, которая заполняется эффективным замедлителем нейтронов. Она окружена кольцом активной зоны с высоким содержанием делящегося вещества и небольшой концентрацией ядер замедлителя, в качестве которого используется легкая вода. Вода является также теплоносителем. В активной зоне такого типа получается жесткий энергетический спектр нейтронов. Высокоэнергетичные нейтроны, испускающиеся из активной зоны, замедляются до тепловых энергий в нейтронной ловушке и боковом отражателе, окружающего со всех сторон активную зону. В ловушке получается максимальная плотность потока тепловых нейтронов. В отражателе плотность потока тепловых нейтронов заметно меньше, чем в ловушке, вследствие разницы геометрических соотношений. Боковой отражатель реактора изготовлен из бериллия, который обеспечивает большой коэффициент отражения и площадь миграции нейтронов, если сравнивать с водой. В отражателе находятся экспериментальные каналы.

В реакторах ловушечного типа эффективно используемые нейтроны получаются за счет утечки нейтронов деления из активной зоны, поэтому толщина кольцевого топливного слоя должна быть небольшой, а плотность

деления в ней - максимальной. Первое условие получается за счет применения высокообогащенного топлива (90% ^{235}U), а второе - применением твэлов особенной конструкции, которые выдерживают большое удельное энерговыделение и, которые обеспечивают эффективный отвод тепла. В качестве топливного элемента для реактора СМ-3 применен твэл стержневой конструкции, который имеет крестообразное сечение. Топливо в виде крупки диоксида урана, диспергировано в металлическую матрицу, которая состоит из меди с примесью бериллиевой бронзы. Оболочка твэла - нержавеющая сталь. Твэл такой конструкции предполагает большую поверхность теплосъема, обладает отличной теплопроводностью топливного сердечника, его оболочка может выдержать высокие температуры. Поэтому в активной зоне реактора СМ-3 среднее удельное энерговыделение достигает 2000 кВт/л, а максимальное до 10000 кВт/л (максимальный тепловой поток с поверхности твэла $\gg 15 \text{ МВт/м}^2$). Жесткий энергетический спектр нейтронов в активной зоне делает доступным использование твэлов с медной матрицей и стальной оболочкой без заметного ухудшения баланса нейтронов из-за вредного поглощения в этих материалах.

Исполнение нейтронной ловушки, которое используется в реакторе СМ-3, выбрано из условий накопления ^{252}Cf . Для решения этой задачи более предпочтительным является блочный вариант в виде ЦБТМ с вытеснением части воды элементом с меньшей замедляющей способностью (бериллием) и формированием оптимального нейтронного спектра с максимальным потоком резонансных и умеренной плотностью потока (в пределах $(1,1,5) \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) тепловых нейтронов. Выход ^{252}Cf на грамм облучаемых изотопов кюрия растет в сравнении с канальной водяной ловушкой на 40%. На рисунке 1 представлено радиальное распределение плотности потока нейтронов и радиационного энерговыделения в реакторе СМ-3.

Для проведения достаточно продолжительной работы высокопоточного реактора на заданном уровне мощности он должен поддерживать значительный запас реактивности, так как только для компенсации стационарного отравления топлива ^{135}Xe необходимо не менее $4\% \beta_{k_{\text{эф}}}/k_{\text{эф}}$, а малый объем активной зоны при высоком удельном энерговыделении приводит к большому темпу потери реактивности на выгорание. Для компенсации начального запаса реактивности нужны компенсирующие органы большой эффективности. В такой небольшой активной зоне непросто найти место для размещения органов СУЗ. В реакторе СМ-3 для этого применен объем нейтронной ловушки. В бериллиевых вкладышах находятся четыре РО аварийной защиты. При работе реактора они находятся вне активной зоны и не влияют на плотность потока нейтронов в ловушке, но имеют высокую эффективность, поскольку при сбросе поглотитель вводится в область максимального нейтронного потока. В центральной полости находится также кольцевой высокоэффективный компенсирующий орган (ЦКО), который предназначен для компенсации снижения реактивности в начале кампании вследствие температурных эффектов и, частично, отравления топлива ^{135}Xe . ЦКО уже в начале работы реактора на номинальной мощности удаляется из активной зоны и поэтому практически не экранирует мишени с облучаемыми материалами в центральной части реактора. Четыре компенсирующих органа (КО), которые предназначены для компенсации снижения реактивности при выгорании топлива и окончательном отравлении продуктами деления, вносятся в угловых ячейках активной зоны. Для увеличения эффективности КО представляют собой конструкцию состоящую из двух частей. Верхняя часть собрана из поглощающих элементов, которые размещены по сторонам квадрата, имеющего размеры реакторной ячейки, в качестве нижней используют штатную топливную сборку. РО автоматического регулирования

(АР) имеют небольшую эффективность, поэтому располагаются в боковом отражателе.

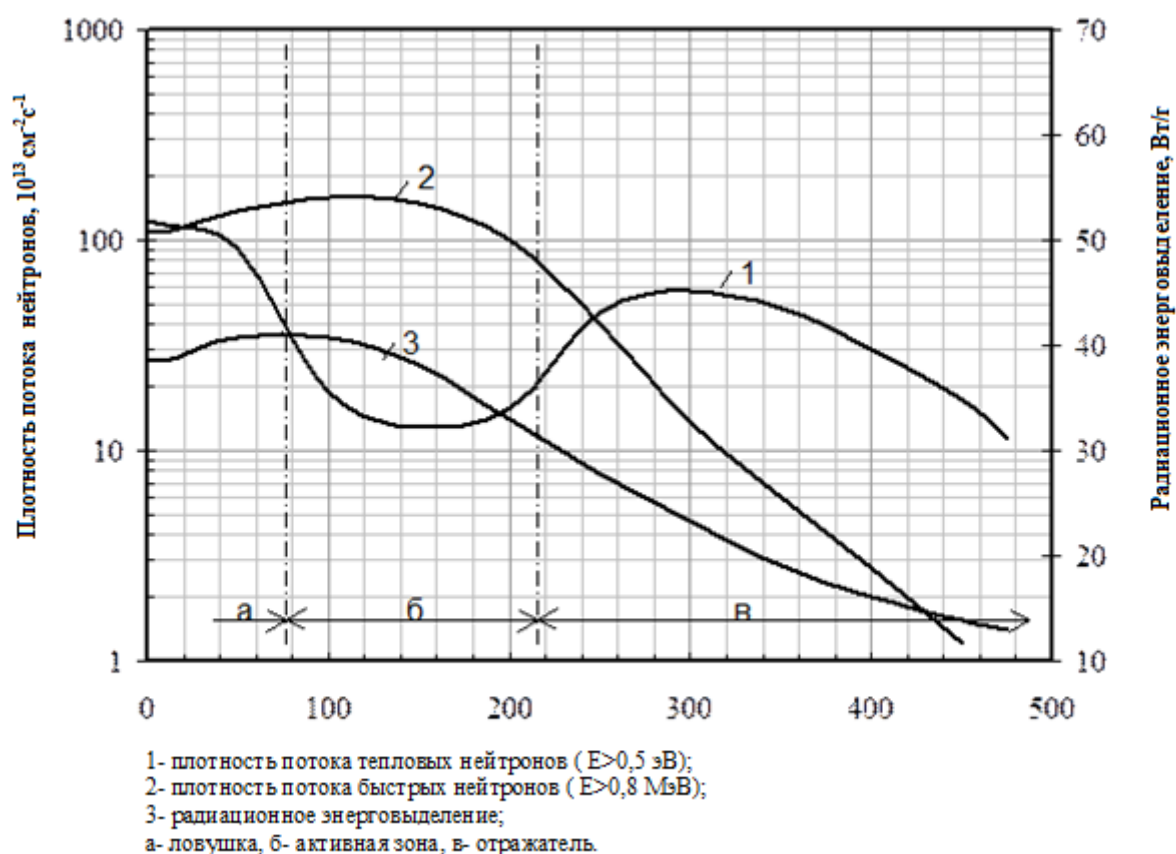


Рисунок 1 - Радиальное распределение плотности потока нейтронов и радиального энерговыделения в реакторе СМ

Реализация концепции ловушечного реактора предполагает большие неравномерности распределения энерговыделения в активной зоне реактора СМ-3. Рост плотности потока тепловых нейтронов на границе активная зона - отражатель и, особенно, активная зона - ловушка нейтронов приводит к тому, что плотность деления в твэлах, которые расположены на этих границах, заметно выше, чем в среднем по зоне. Объемный коэффициент неравномерности в реакторе может достигать 5,6.

В данном реакторе СМ-3 органы СУЗ не компенсируют запас реактивности активной зоны, которая полностью загружена свежим топливом. Из за этого, а также для повышения эффективности использования топлива, используется режим частичных перегрузок ТВС в активной зоне.

Одновременно перегружаются не все топливные сборки, а лишь небольшая их часть, поэтому в активной зоне всегда есть ТВС с различным выгоранием. Это позволяет уменьшить начальный запас реактивности и снизить требования к нужной эффективности органов СУЗ. Режим частичных перегрузок приводит к тому, что распределение энерговыделения в активной зоне не фиксировано. Оно изменяется в некоторых диапазонах от кампании к кампании. В течение кампании распределение энерговыделения в активной зоне также подвергается изменению вследствие преобразования объема активной зоны, за счет введения топливных подвесок КО, неравномерного выгорания топлива и накопления продуктов деления с высоким сечением поглощения нейтронов.

Практически для всех исследовательских реакторов существенное влияние на физические характеристики активной зоны оказывают экспериментальные устройства.

В таблице 1 представлены основные паспортные и проектные физические характеристики реактора СМ-3, уточненные по результатам физического и энергетического пусков, а также опыта его эксплуатации в течение пяти лет после реконструкции 1991, 1992 гг. [7]

Таблица 1 - Основные физические характеристики реактора СМ-3

Наименование параметра	Значение
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов, достигаемая в нейтронной ловушке активной зоны реактора, $n/(cm^2s)$	$1,7 \cdot 10^{15}$
топливо	UO ₂ , 90% обогащения по ²³⁵ U
замедлитель	H ₂ O
Коэффициент неравномерности энерговыделения:	
по высоте активной зоны	1,25
по сечению активной зоны	2,16
по сечению ТВС, прилегающей к ЦЗП	2,06
объемный	5,56
Среднее выгорание топлива по объему активной зоны, %:	
в начале кампании	15,18
в конце кампании	19,22
Максимальная эффективность органов СУЗ, $b_{эф}$:	
АЗ (одного)	1,5
ЦКО КО (одного)	4,5
АР (одного)	3,5
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	0,00755
Время жизни мгновенных нейтронов, с	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Подкритичность активной зоны при взведенных органах АЗ в состоянии активной зоны с максимальным запасом реактивности, Dk/k	не менее 0,01
Мощностной коэффициент реактивности при рабочих параметрах активной зоны	$-(3 \pm 1) \cdot 10^{-5}$

1.2 Расчетная модель и методика проведения нейтронно-физических расчетов

При проведении нейтронно-физических расчетов была использована программа MCU-RR, предназначенная для решения уравнения переноса нейтронов и фотонов в исследовательских реакторах методом Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных в трехмерной геометрии без внесения каких-либо приближений в описание геометрии рассматриваемой системы и физики взаимодействия частиц с веществом. При моделировании работы реактора рассчитывается изменение состава делящихся и поглощающих нейтроны материалов, накопление продуктов деления.

Разработанная расчетная модель реактора СМ на базе кода MCU-RR позволяет описывать каждый твэл исследуемых ТВС индивидуальными регистрационными и материальными зонами. Полномасштабная расчетная модель реактора СМ, подробно описывает активную зону реактора, органы регулирования, центральный блок трансурановых мишеней и ближайшие к активной зоне пластины отражателя.

При проведении расчетов энергетический спектр нейтронов, рассчитываемый в регистрационных зонах, разбивался на 4 группы с граничными энергиями 0,1 МэВ, 200 эВ, 0,64 эВ. Рассматривались твэлы с загрузкой по ^{235}U 5 г на твэл, сердечники твэлов с медной и алюминиевой матрицами, стальными и циркониевыми оболочками твэлов и чехлов ТВС.

На рисунке 2 приведена картограмма штатной компоновки активной зоны реактора СМ. На ней показана нумерация ячеек активной зоны, положение регулирующих органов и экспериментальных каналов в отражателе и центральном блоке.

Традиционно методика расчета максимального значения плотности потока тепла с поверхности твэлов (q_s^m) без учета азимутальной

неравномерности распределения энерговыделения на их поверхности основана на использовании следующей формулы:

$$q_s^m = \frac{N}{N_t} \cdot \frac{K_k \cdot K_z}{h \cdot P};$$

где: N – мощность, МВт;

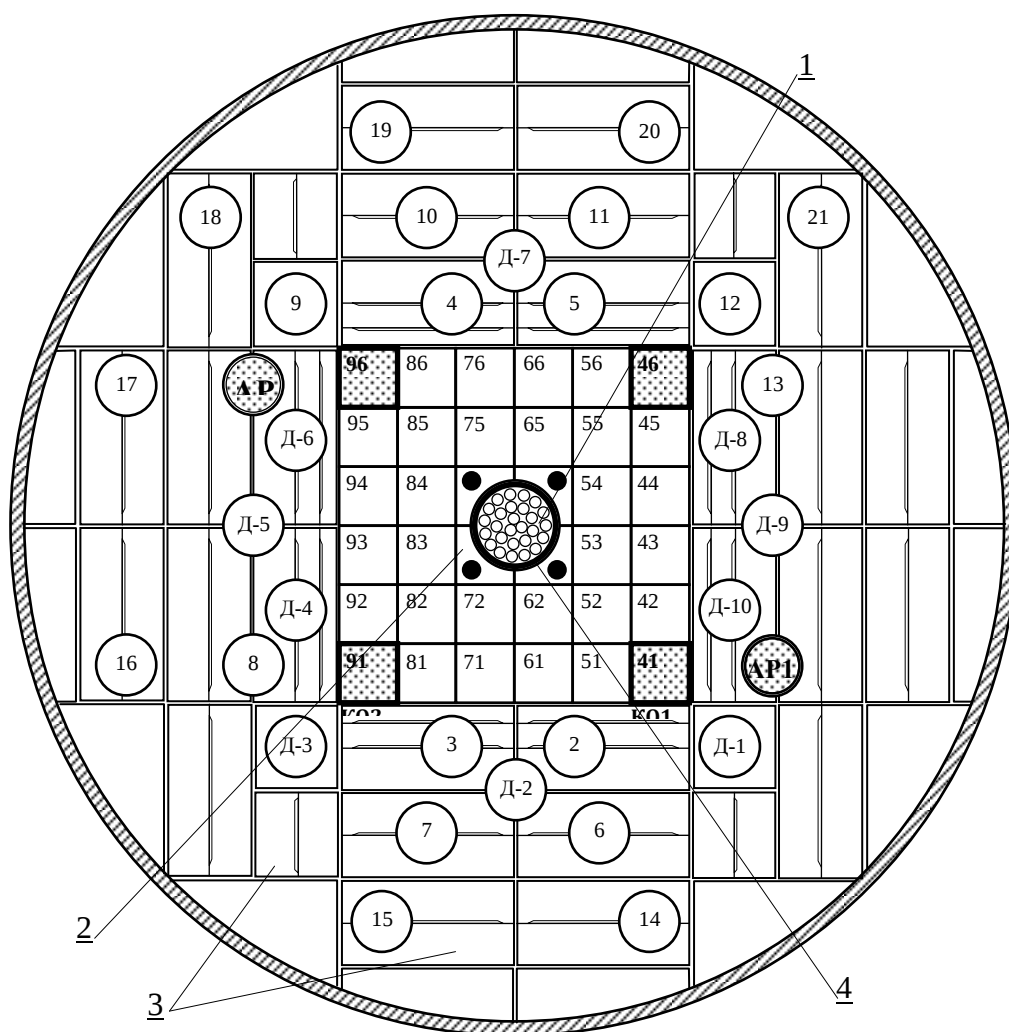
N_t – число ТВЭлов в данной ТВС;

K_k – коэффициент неравномерности распределения энерговыделения по сечению данной ТВС;

K_z – коэффициент неравномерности распределения энерговыделения по высоте активной части ТВЭлов (1.30);

h – высота активной части ТВЭлов, м; для ТВЭла СМ $h = 0,346$ м;

P – периметр поперечного сечения ТВЭла, м; для ТВЭла СМ $P = 0,01657$ м.



-  – ячейка активной зоны с
-  – компенсирующий орган
-  – стержень аварийной защиты;
-  – стержень АР;
-  – ячейка в отражателе и ее

Рисунок 2 - Картограмма штатной компоновки активной зоны и отражателя реактора:

1– центральный блок с облучаемыми объемами; 2– бериллиевый вкладыш;
3– бериллиевые блоки отражателя; 4– центральный компенсирующий орган (ЦКО).

При проведении расчетов был рассмотрен вариант компоновки реактора СМ, показанный на рисунке 3, не содержащий ТВС черт. 184.10.000

с ампульными каналами среднего диаметра и петлевые каналы. На этом же рисунке приведена нумерация ячеек активной зоны.

Рассмотрено влияние водяных полостей внутри ТВС, содержащих твэлы с загрузкой 5 г ^{235}U .

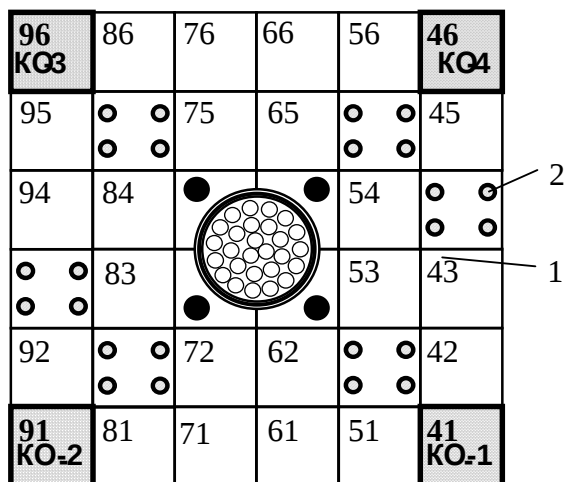


Рисунок 3 - Картограмма активной зоны в штатном варианте компоновки. 1 – ТВС со 188-ю твэлами; ТВС с 4-мя ампульными каналами $\varnothing$ 12 мм и со 160-ю твэлами.

В настоящей работе рассмотрена картограмма загрузки (см. рисунок 4), с загрузкой твэлов 5 г и соответствующим средним выгоранием в активной зоне.

2.2	19	14.5	21.4	26.1	2.2
22.5	13.9	21	0	14	16.7
25.9	10.2			10.4	4.4
0	5.5			0	8.4
16.3	4.6	15.8	20.9	4.3	19
2.4	7.3	25.8	13.6	26.5	2.2

Рисунок 4 - Картограммы загрузки активной зоны реактора СМ с ТВС черт. 184.03.000 и 184.05.000 (5-ти граммовые твэлы, среднее выгорание 12,4%)

На рисунке 5 приведены примеры вариантов размещения водяных полостей внутри ТВС реактора СМ. При организации водяных полостей внутри ТВС исходили из условия, чтобы примыкающие к бериллиевым блокам (ЦЗП, отражатель) 4-5 рядов твэлов оставались неизменными.

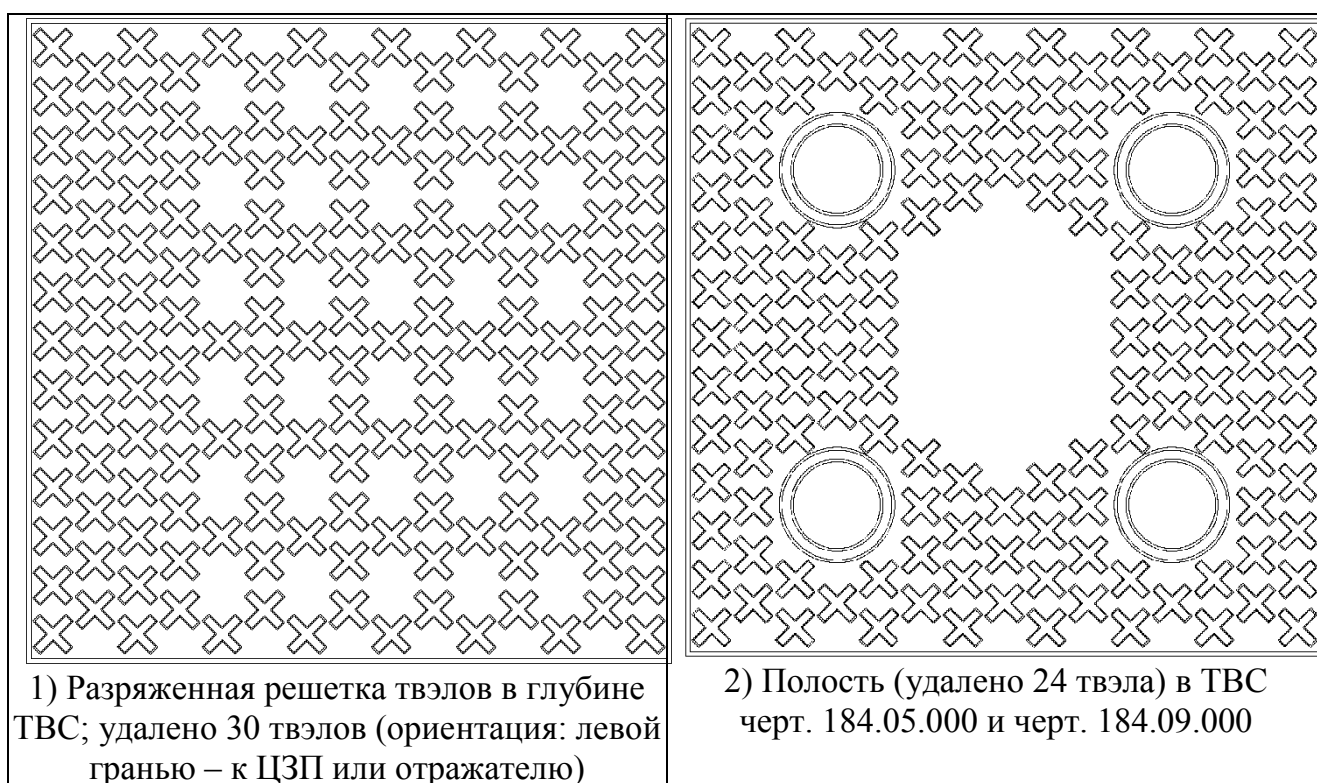


Рисунок 5 - Примеры вариантов размещения водяных полостей внутри ТВС реактора