

Специализированная учебная лаборатория **«Управление и безопасность АЭС».**



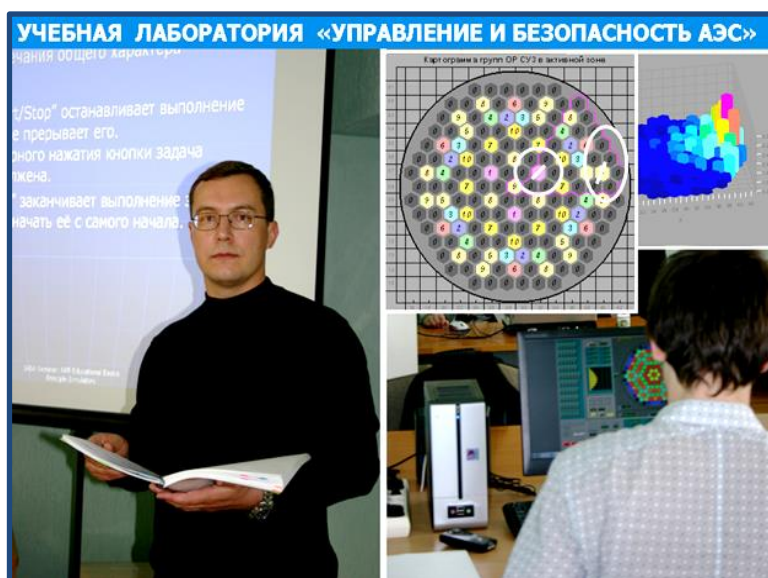
В 2010 году в НИЯУ «МИФИ» на кафедре «Автоматика» силами сотрудников лаборатории ЛТС и ЭНИКО ТСО, входящего в состав Технопарка НИЯУ МИФИ, была введена в учебный процесс на кафедре «Автоматика»

специализированная учебная лаборатория «Управление и безопасность АЭС».

Она функционирует в НИЯУ МИФИ уже много лет, и в ней проводятся лабораторные практикумы в рамках учебных программ по дисциплинам: «Автоматизация физико-энергетических установок», «Моделирование физических процессов в оборудовании АЭС» и «СУЗ ЯЭУ» со студентами четвертого и пятого курсов факультетов и магистрами «А» и «Ф».

Назначение учебной лаборатории «Управление и безопасность АЭС».

Учебная лаборатория предназначена для обеспечения:



- образовательных программ высшего профессионального образования специалистов, бакалавров, магистров по направлениям подготовки:

- ядерная физика и технологии;
- ядерные реакторы и материалы;
- атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг;
- электроника и автоматика физических установок;
- ядерная энергетика и теплофизика.

- программ послевузовского образования (аспирантуры) по специальностям:

«Ядерные энергетические установки», «Автоматизация и управление технологическими процессами и



производствами», «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления», «Теплофизика и теоретическая теплотехника»;

- программ повышения квалификации специалистов соответствующих специальностей;
- программ профессиональной подготовки работников отраслевых предприятий и организаций, области ответственности и деятельности которых связаны с проектированием, созданием и эксплуатацией технологического оборудования и систем управления ядерных энергетических установок.

В рамках данных направлений подготовки учебная лаборатория обеспечивает практические занятия по спектру дисциплин специальностей, связанных с физикой ядерных реакторов и ядерных энергетических установок, проектированием и эксплуатацией АЭС, управлением ядерным реактором и ЯЭУ, системами управления и защиты ядерных реакторов, АСУТП АЭС, безопасностью эксплуатации ЯЭУ, моделированием процессов в оборудовании ЯЭУ.

Обобщенными целями обучения, реализуемого на базе лаборатории, являются:

- практическое освоение теоретических знаний по конструкции активной зоны и оборудованию ЯЭУ, назначению и составу технологических систем ЯЭУ, нейтронно-физическим и технологическим процессам в оборудовании ЯЭУ, эксплуатационным режимам и принципам безопасной эксплуатации ЯЭУ, назначению и структуре систем управления и защиты, принципам и алгоритмам управления ЯЭУ;
- приобретение практических навыков по управлению ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000 (1200) в режимах нормальной эксплуатации и режимах с нарушениями нормальной эксплуатации, по подавлению ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реактора при их возникновении, по



формированию различных топливных загрузок при реализации различных стратегий топливного цикла, по определению нейтронно-физических характеристик активной зоны;

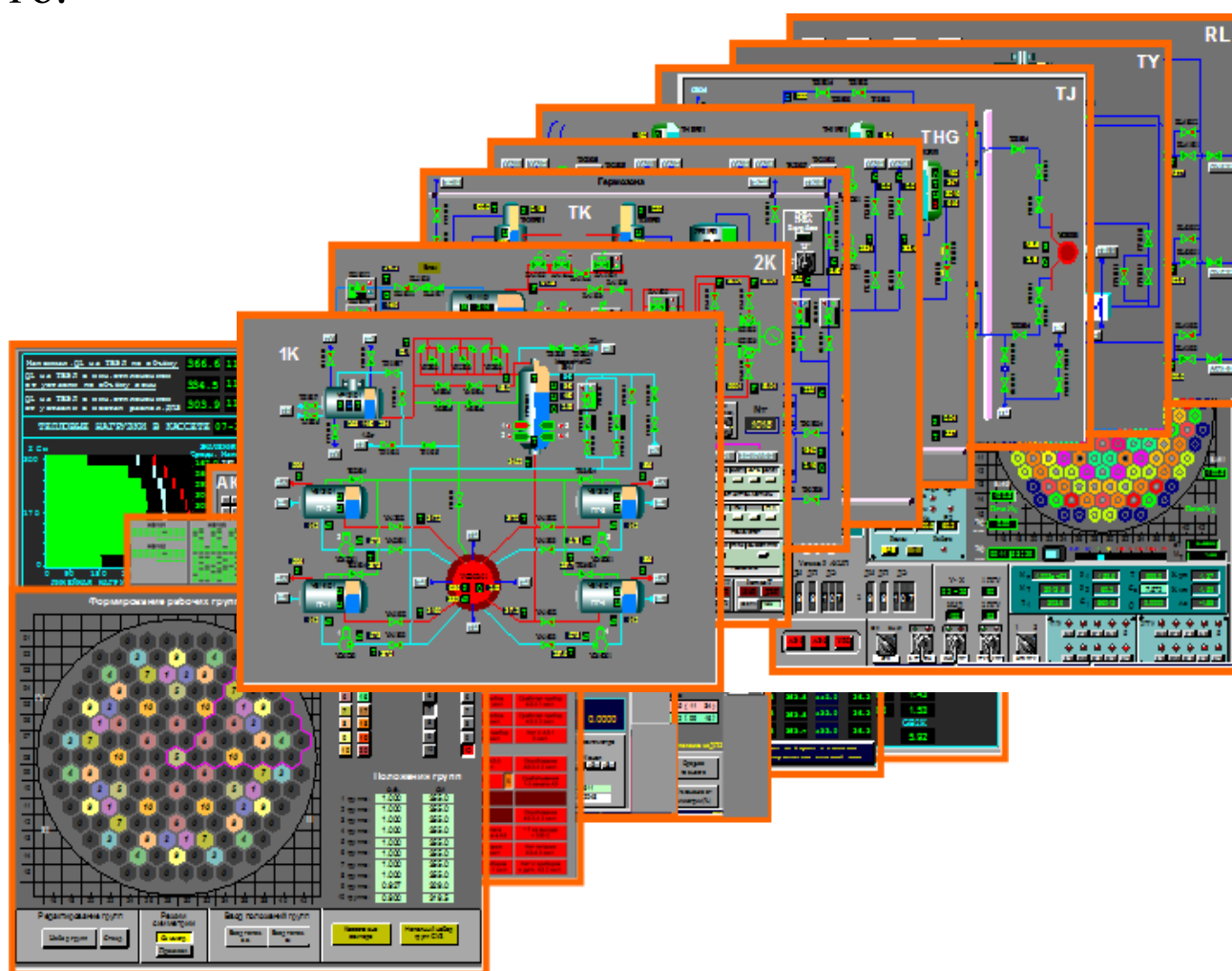
- выполнение научно-исследовательской работы студентами и аспирантами, проведение курсового проектирования, выпуск квалификационных работ, магистерских диссертаций,
- приобретение теоретических знаний и практических навыков специалистами отрасли по управлению и эксплуатации ЯЭУ



Данные учебные цели достигаются посредством реализации практических задач при выполнении комплекса лабораторных работ в соответствии с предварительно разработанными сценариями их выполнения, или в виде индивидуальных заданий студентам на проведение курсового и дипломного проектирования с разработкой сценариев совместно с преподавателем.

Объекты изучения и программно-математическое обеспечение учебной лаборатории.

Учитывая доминирующую роль водо-водяных реакторов в современной атомной энергетике, лаборатория ориентирована на АЭС с «водо-водяными» реакторами типа ВВЭР-1000 (1200) и PWR. В состав моделируемых объектов ЯЭУ с ВВЭР входят: ГЦК и система КД, ПГ, ГПК, ТПН, системы ТК, ТН, ТЈ, ТQ, ТУ, RL, регуляторы 1-го контура и частично 2-го.



Математическое и программное обеспечение



лаборатории разработано сотрудниками ЭНИКО ТСО и кафедры «Автоматика» НИЯУ МИФИ. Оно базируется на программных комплексах, входящих в состав полномасштабных и компьютерных тренажеров и анализаторов режимов работы АЭС. Тренажеры и анализаторы используются на Калининской, Волгодонской и на других АЭС с ВВЭР-1000 с целью инженерной поддержки эксплуатации и для проведения обучения оперативного персонала в учебно-тренировочных пунктах (УТП) АЭС.

Компьютерная система лаборатории включает многофункциональный анализатор режимов (МФА-РУ) реакторной установки ВВЭР и компоненты



моделирующего обеспечения полномасштабных тренажеров (ПМТ) блоков №2 и №3 Калининской АЭС, работающие под управлением платформы ЭНИКАД. В основе многофункционального анализатора режимов МФА-РУ используется аттестованный ГАН РФ для расчетов ЯЭУ с ВВЭР-1000 программный комплекс «ПРОСТОР».

Качество моделей ЯЭУ таково, что по точности расчета основных параметров реакторной установки



ЯЭУ модели не уступают штатным программам расчетного сопровождения эксплуатации АЭС с реактором ВВЭР-1000. Комплексность и высокая адекватность используемых в лаборатории моделей физических процессов в оборудовании АЭС и алгоритмов систем управления и защиты ЯЭУ позволяют решать широкий спектр учебных и исследовательских задач, а также обеспечивают возможность их дальнейшего развития.

В отличие от тренажерных систем и, в частности от ПМТ, программный комплекс специализированной учебной лаборатория «Управление и безопасность АЭС» обладает следующими особенностями:

- модель обладают удобными для пользователя средствами организации сценариев учебных занятий и внешнего управления моделью для решения практических задач, как в диалоговом режиме, так и в режиме задания произвольных начальных и исходных данных;
- модель базируется на библиотеке нейтронных сечений и тепло-гидравлических характеристик, насчитывающих до 99 различных конструкций ТВС реактора ВВЭР, позволяющих проводить изучение различных топливных загрузок от пусковых до загрузок на стационарном режиме перегрузок при реализации двухгодичного, трехгодичного, четырехгодичного и пятилетнего топливных циклов;
- модель обладают средствами организации режима выгорания топлива с его произвольной перегрузкой, как в диалоговом режиме, так при задании внешней последовательности схем перестановок ТВС и задания произвольного графика тепловых нагрузок на активную зону в зависимости от времени выгорания;
- модель обладает средствами поддержания критичности реактора как с помощью штатных средств на АЭС, так и с помощью автоматического борного регулятора (не штатное средство),

работающего как в стационарных, так и в нестационарных режимах;

- модель обладает уникальной возможностью уплотнения времени в десятки тысяч раз без потери численной устойчивости в нестационарных режимах, что позволяет повысить эффективность учебного и исследовательского процессов во много раз;
- модель позволяет проводить расчетный анализ технической безопасности оборудования ЯЭУ с учетом неравномерности распределения энерговыделений по ТВЭЛ при задании специальных условий моделирования гидродинамики теплоносителя в ГЦК без переделки модели, приводящих к консервативной оценке уровня безопасности.

Указанные особенности модели ЯЭУ, позволяют учебной лаборатории «Управление и безопасность ЯЭУ» в отличие от других аналогичных систем проводить с большой степенью вариативности:

- разноплановые практические занятия студентов в рамках образовательных программ университетов в области ядерной физики и технологий АЭС;
- научные исследования студентами, аспирантами и научными сотрудниками университетов;
- занятия, направленные на освоение и контроль теоретических знаний персонала атомных станций в учебных центрах АЭС.

Кроме того, данная лаборатория может эффективно использоваться для уточнения алгоритмов управления энергоблоком в тех режимах эксплуатации, для

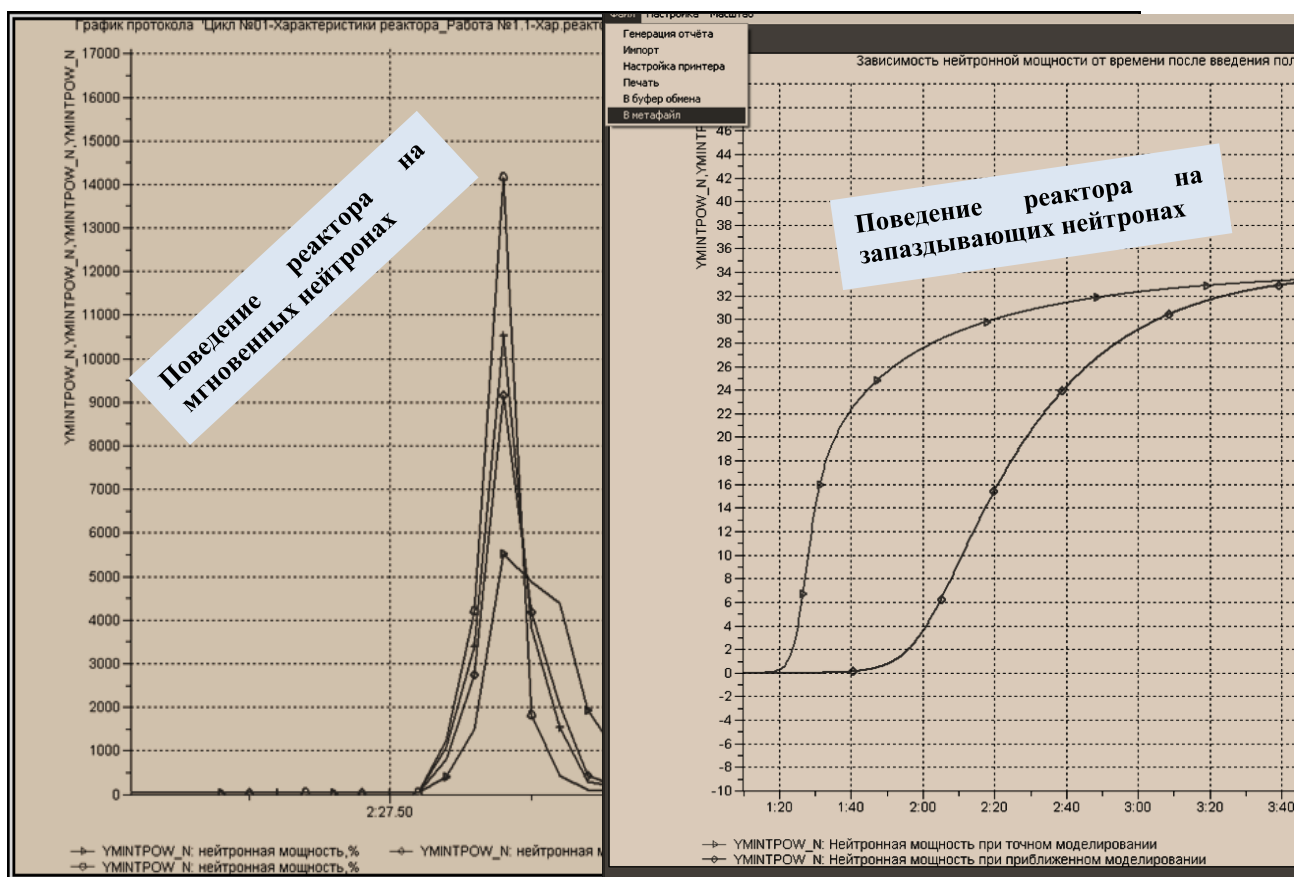
которых в настоящее время имеется дефицит эксплуатационного опыта и, соответственно, процедуры управления недостаточно регламентированы.

В настоящее время в рамках учебной лаборатории реализованы лабораторные практикумы, охватывающие следующие учебные темы:

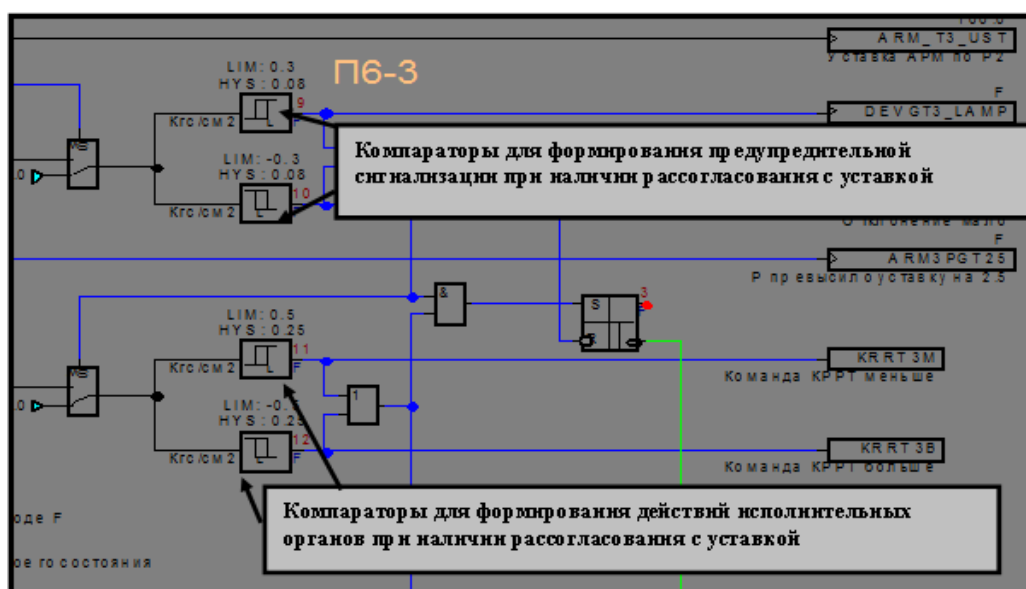
1. Изучение статических и динамических характеристик реактора как объекта управления. Управление мощностью реактора. Определение оптимальных параметров алгоритма регулирования мощности ЯЭУ в регуляторах, задействованных в этом управлении.

Фрагмент базового формата для проведения работы по изучению динамических характеристик реактора ВВЭР-1000.

Нейтронная мощность (%)	1.000e+02	Период реактора (с)	999.0	Текущая (о.е.) реактивность	0.0000	Борная кислота (г/кг)	6.536
После сброса ОР СУЗ		Температурный эффект по воде		Перестройка поля		Йодная яма	Эффект -Xe-
Вес АЗ на мощности, %	0.00	Динамика	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00						
Вес АЗ на МКУ, %	0.00	Статика	0.00720	Доля зап. нейтронов	0.000	Коефф. по N	0.00
	0.00	МКУ	0.00	На МКУ нет йодной ямы			0.00
	0.00	Статика	Число итераций	10			0.00
Номер возмущения (варианта)		0					



2.Изучение системы управления и защиты реактора (СУЗ), знакомство со структурой СУЗ ЯЭУ с ВВЭР-1000 (АРМ, РОМ, АЗ), алгоритмами работы СУЗ в различных режимах (режимы работы АРМ, ПЗ-3, ПЗ-4, АЗ-1, УРБ), включая аварийные ситуации.

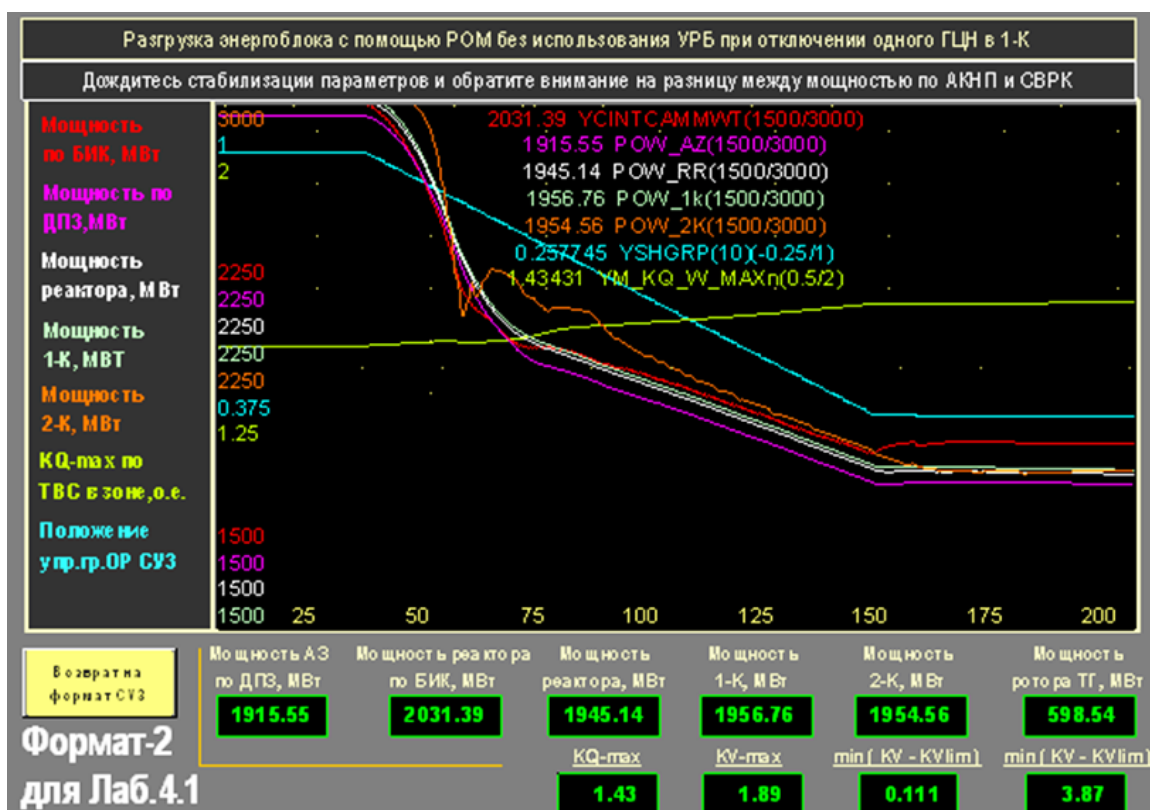


Базовые форматы для проведения работы по изучению АРМ.

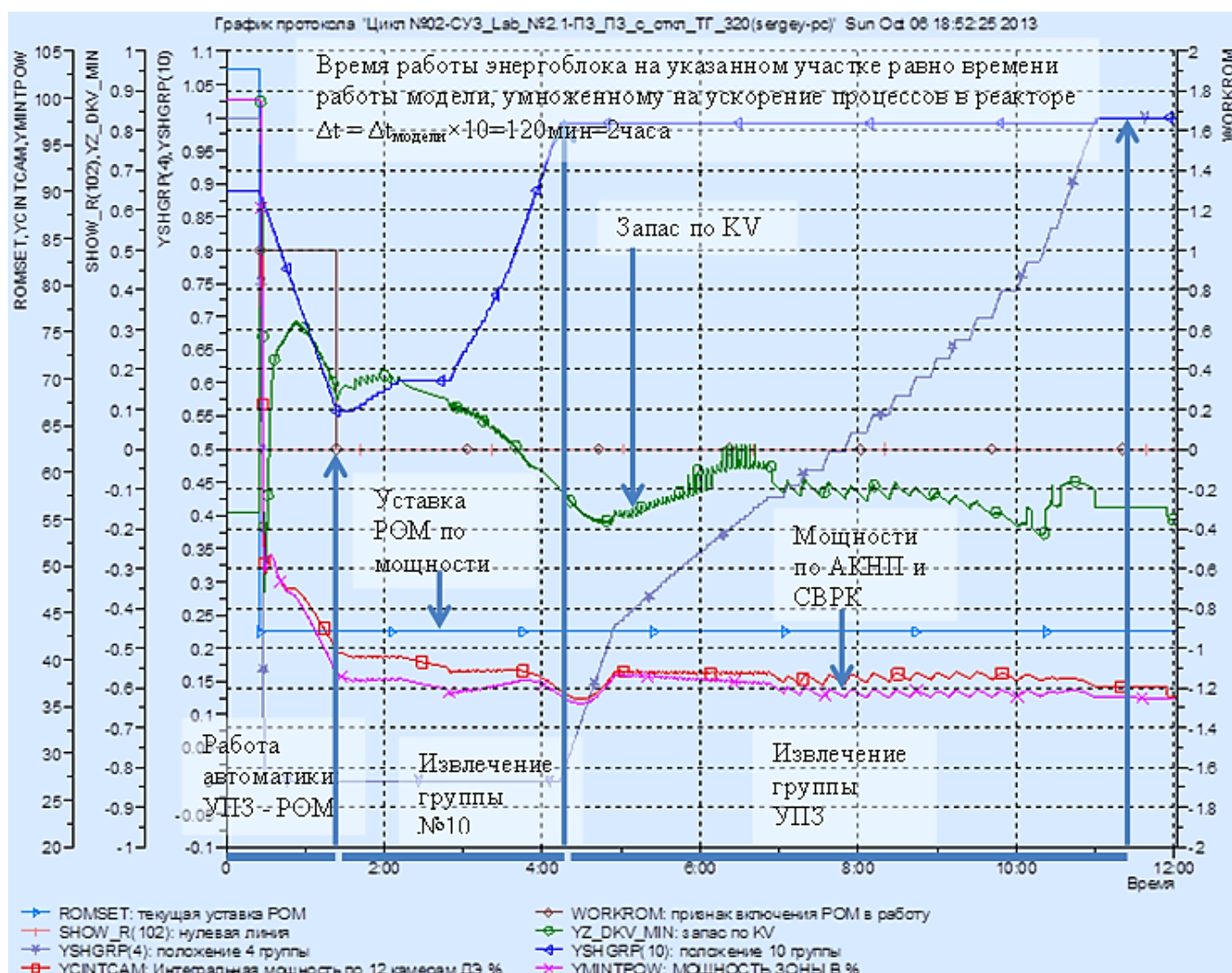


3.Изучение эксплуатационных режимов с нарушениями условий нормальной эксплуатации (НУНЭ) и решение ряда эксплуатационных задач по управлению энергоблоком в нестандартных ситуациях с целью обеспечения локальных защит по распределению энерговыделения в активной зоне.

Базовый формат для проведения работы по изучению поведения ЯЭУ при НУНЭ.

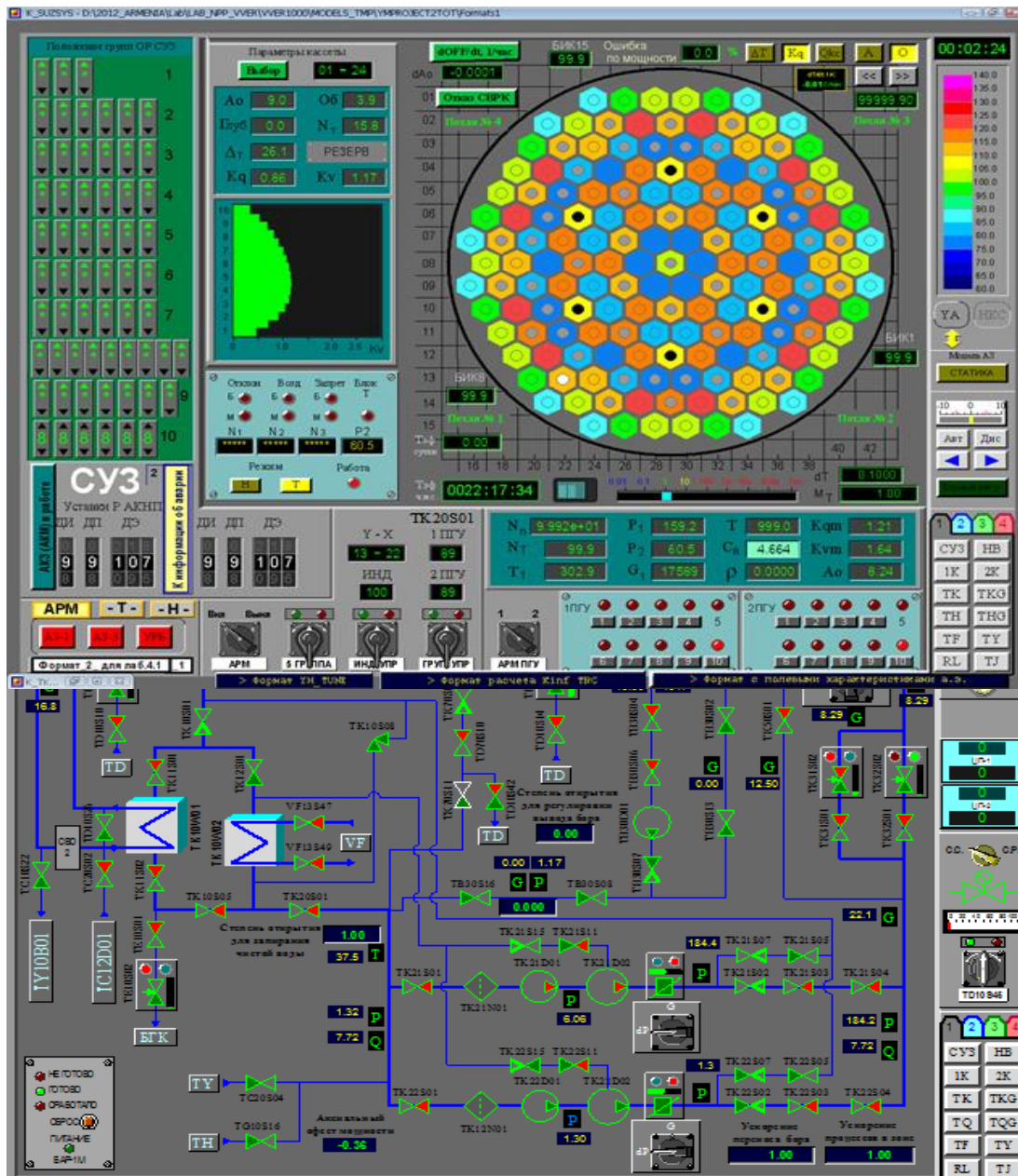


Результаты работы по изучению поведения ЯЭУ при НУНЭ



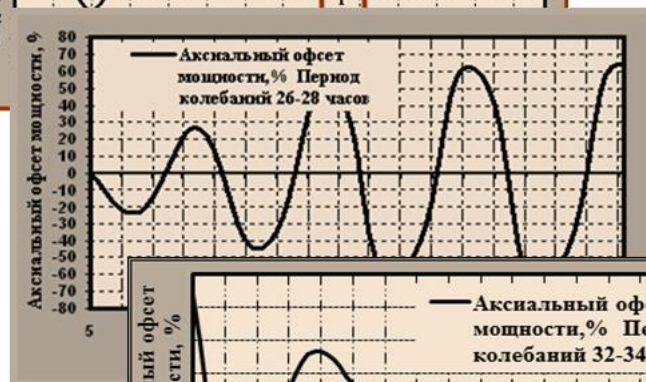
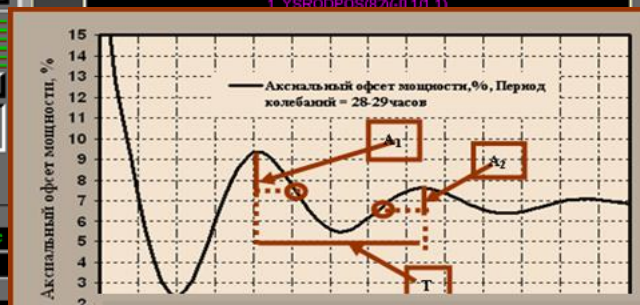
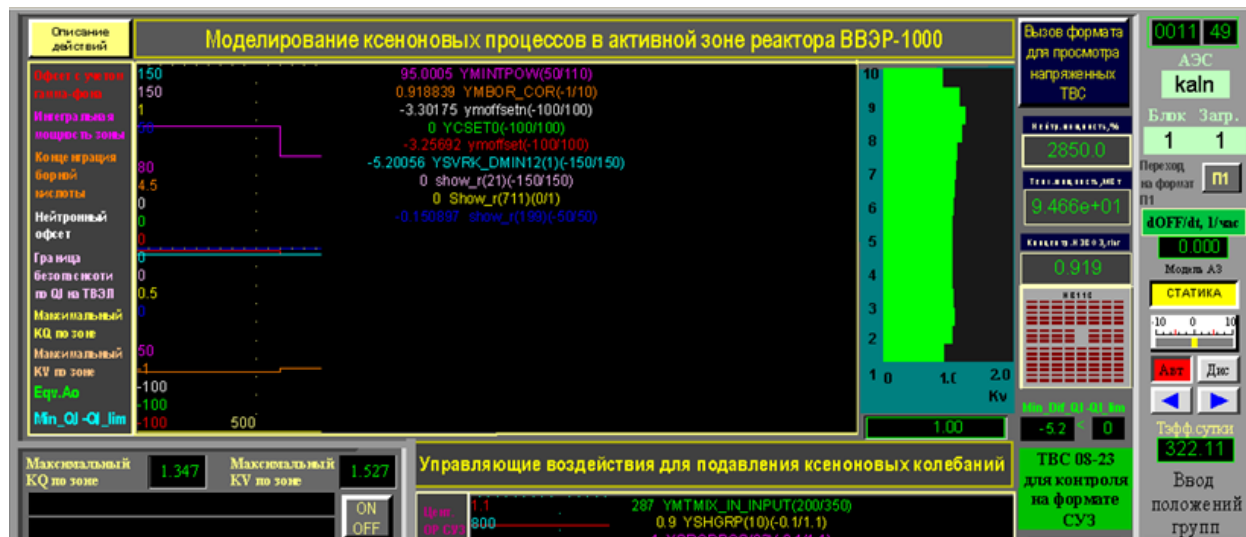
4. Изучение пусковых режимов реакторной установки. Приобретение базовых знаний по технологии пуска и решения ряда практических задач по пуску энергоблока после ликвидации последствий аварийной ситуации.

Базовые форматы для работы по пуску ЯЭУ на МОЩНОСТЬ



5. Изучение пространственной неустойчивости нейтронного поля в активной зоне реактора. Изучение причин возникновения аксиальных ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне реакторов ВВЭР-1000 и механизмов их подавления на практике эксплуатации реакторов ВВЭР-1000. Решение задач по нахождению оптимального алгоритма подавления колебаний.

Базовый формат работы по изучению ксеноновых колебаний мощности в реакторах ВВЭР

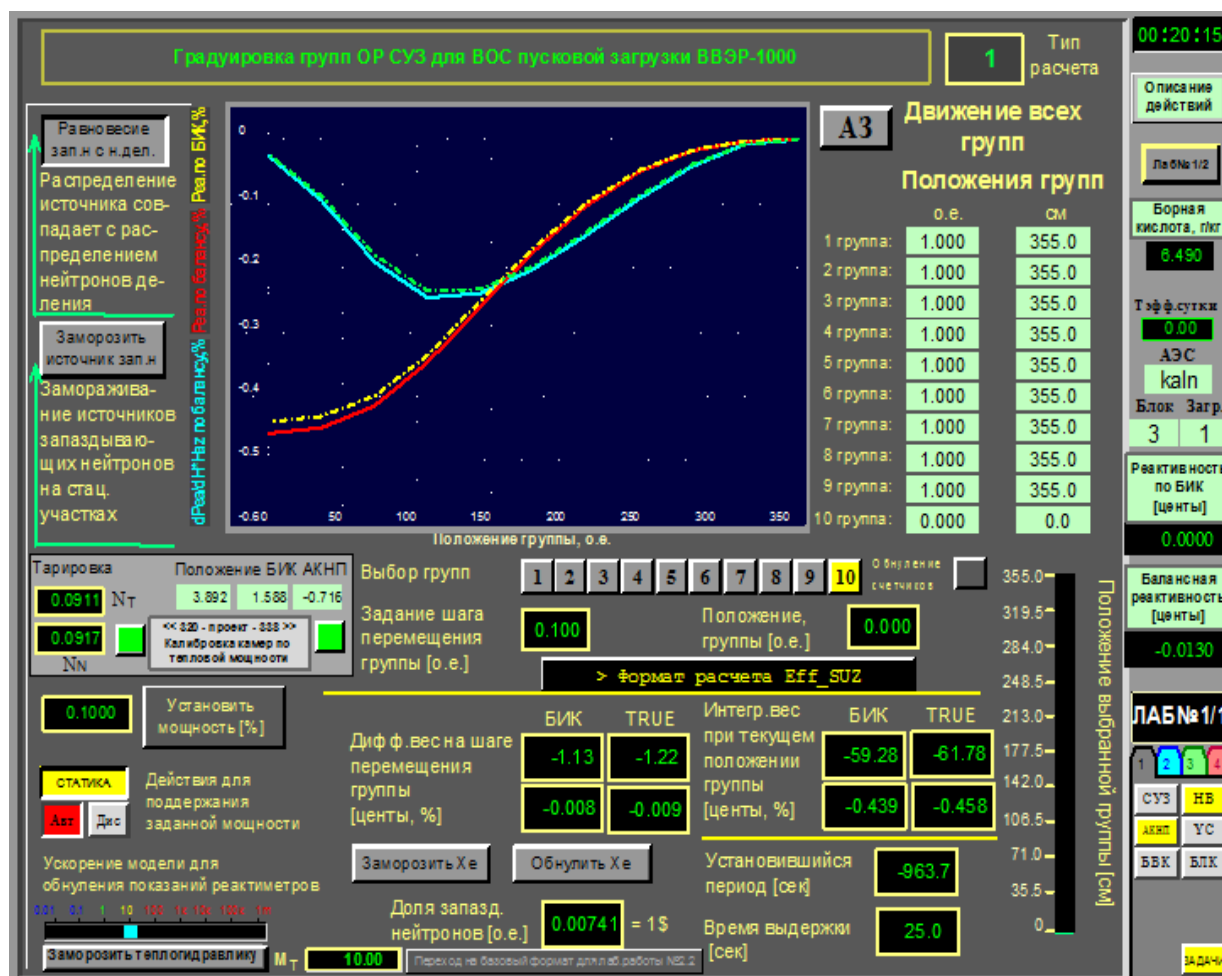


$$\frac{\Delta \rho_{Xe}}{\Delta \rho_N + 2\Delta \rho_{I2} + \Delta \rho_{lek}} > \frac{(\lambda_J + \lambda_{Xe})\Sigma_f}{\sigma_{Xe}N_0} + 1$$

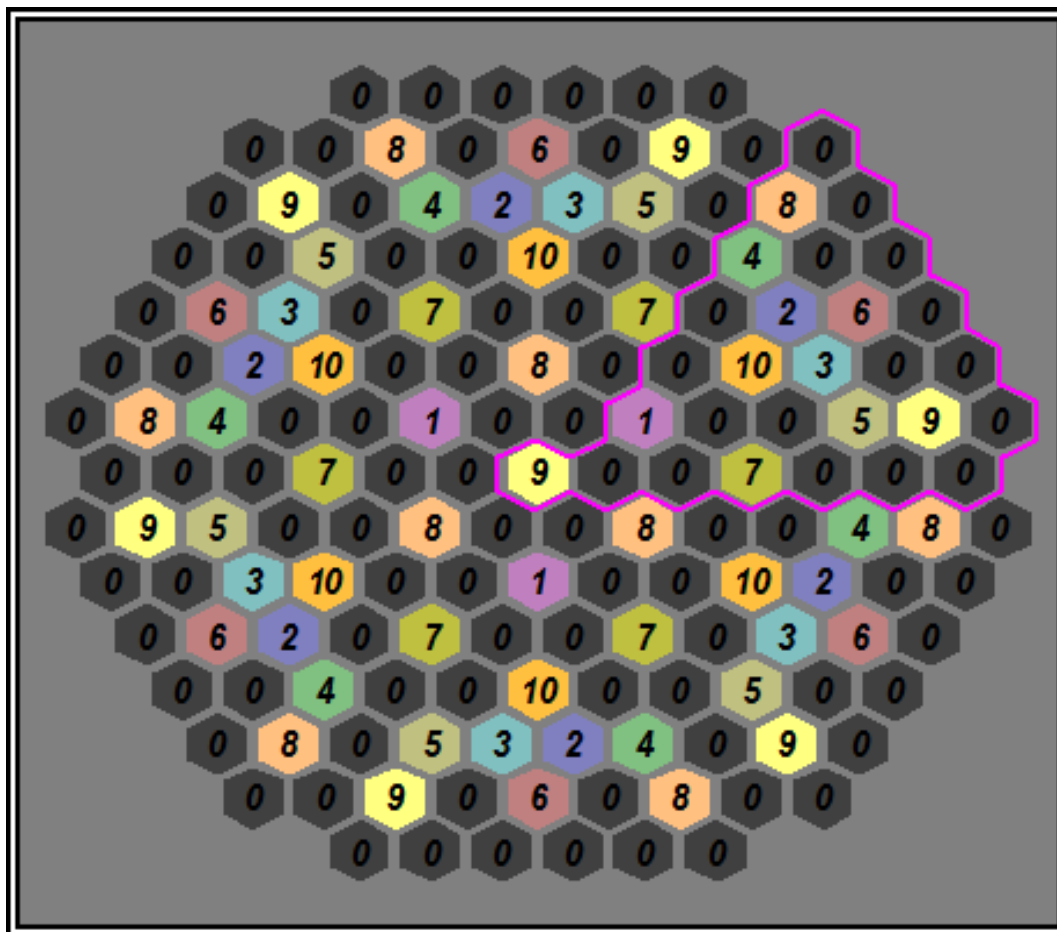
Условие возникновения ксеноновых колебаний

6. Изучение нейтронно-физических характеристик органов управления, особенностей их измерения на АЭС с реактором ВВЭР-1000, сопоставление измеренных по БИК характеристик с расчетными данными. Исследование причин рассогласования измеренной эффективности групп ОР СУЗ с расчетной эффективностью и определение методов устранения этого рассогласования.

Базовый формат для проведения градуировки ОР СУЗ



Расположение групп ОР СУЗ в активной зоне ВВЭР-1000



7. Изучение основных свойств самозащитенности активной зоны реактора ВВЭР-1000 (1200): температурного и плотностного коэффициентов реактивности. Определение основных параметров и факторов, определяющих величину данных коэффициентов реактивности.

Базовый формат по расчету коэффициентов реактивности

Иницируйте расчет, нажав кнопку рядом с надписью: Начнем расчеты

00:02:11

Расчет темп., барометрического и плотностного коэффициентов реактивности

Для графиков

1983

1989

2003

2005

2012

Расчет темп.коэф. реакт. на МКУ для пусковых загрузок различных АЭС раб.гр. ОР в раб.пол.	
1-ая кампания энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 - 1983г.	0.0000
1-ая кампания энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 - 1989г.	0.0000
1-ая кампания энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 - 2003г.	0.0000
1-ая кампания энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 - 2005г.	0.0000
1-ая кампания энергоблока АЭС с ВВЭР-1200 - 2012г.	99.9999

Включение расчета коэф.ф.реактивности ☐

Наименование коэффициентов реактивности	dRo/dT, %/град*10**3	dRea/dP, %/бар*10**3	dRea/dRo, %/г/см**3
Значения коэффициентов реактивности	-3.563e+00	0.000e+00	0.000e+00

Текущая реактивность **9.7114e-07**

Обеспечение баланса нейтронов в соответствии с эталонным расчетом **1.00000**

Установить мощность [%] **100**

Заморозить Xe ☐

Подключение библиотеки н/ф констант ☐ 1

Более точная библиотека - 1 Менее точная библиотека - 0

Тип интерполяции н/ф констант **1**

Более точный - 1 Менее точный - 0

Начнем расчеты

Включение опции задания Tin, C ☐

Тип на вх.в зону, C **340**

P над зоной, ат. **160**

Концентрация НЗВОЗ, г/кг **4.708**

Тип пространственной дискретизации уравнения диффузии нейтронов ☐

Кнопка отжата: нодальная дискретизация эталонного типа ☐

Кнопка нажата: дискретизация 1-го порядка ☐

Нодальная дискретизация с увеличенным коэффициентом диффузии ☐

АЭС

kaln

Блок Загр.

3 1

Помощь по выполнению занятий

Переход на формат перечня занятий

Переход на формат тип загрузки

Модель АЗ

СТАТИКА

10 0 10

Авт Дис

EFF

1 2 3 4

СУЗ НВ

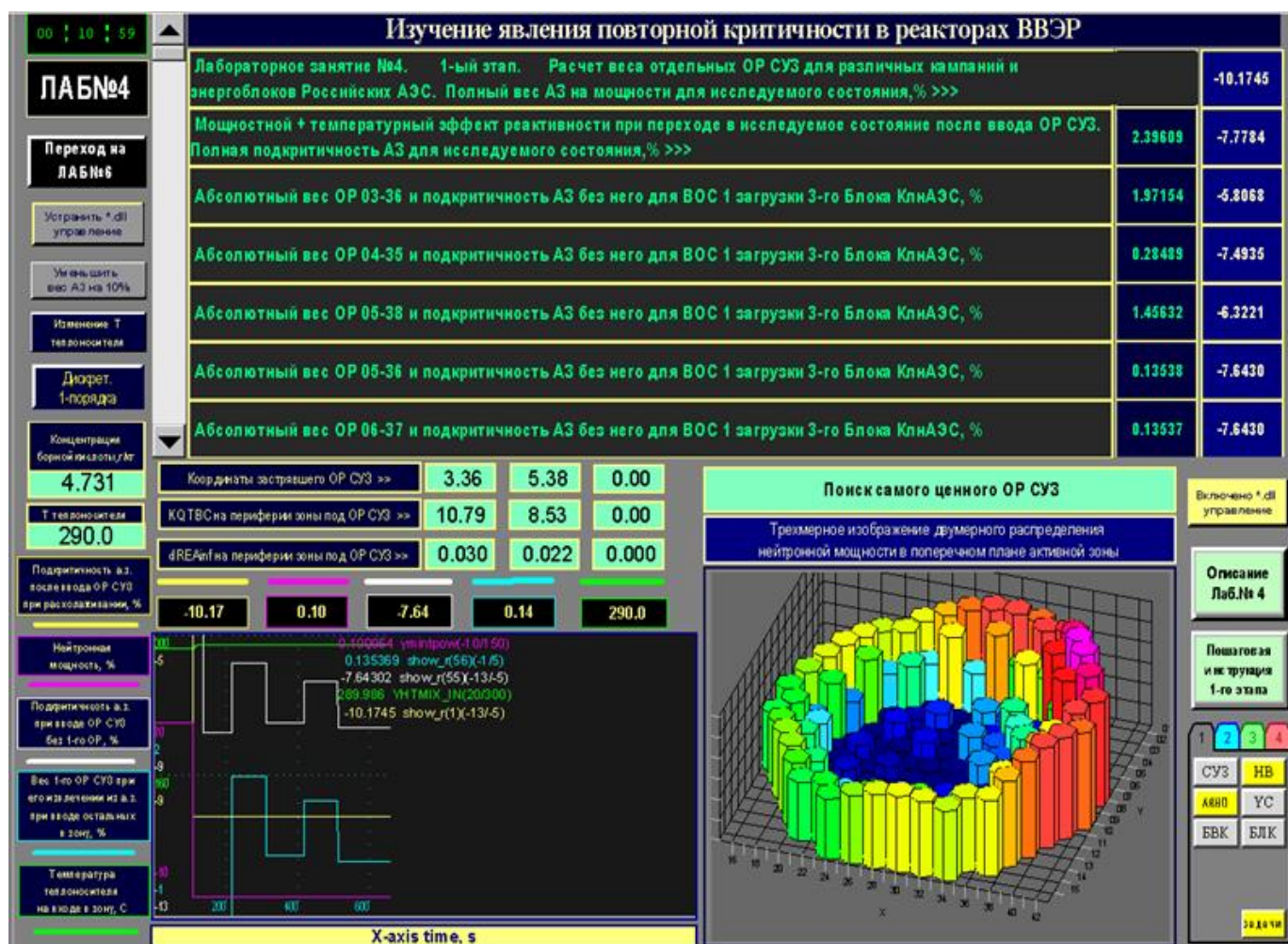
АКНП УС

БВК БЛК

ЗАДАЧИ

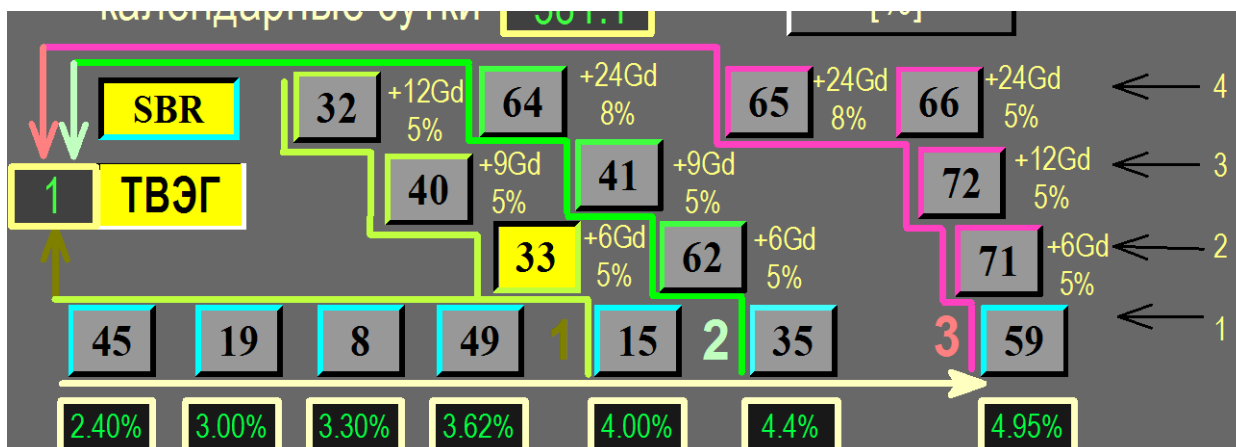
8.Изучение явления повторной критичности в реакторах ВВЭР-1000 и причин его возникновения. Изучение мер по устранению явления повторной критичности в проекте АЭС-2006. Расчет основных параметров, характеризующих явление повторной критичности и последствий данного явления в реакторах ВВЭР.

Базовый формат работы по изучению явления повторной критичности

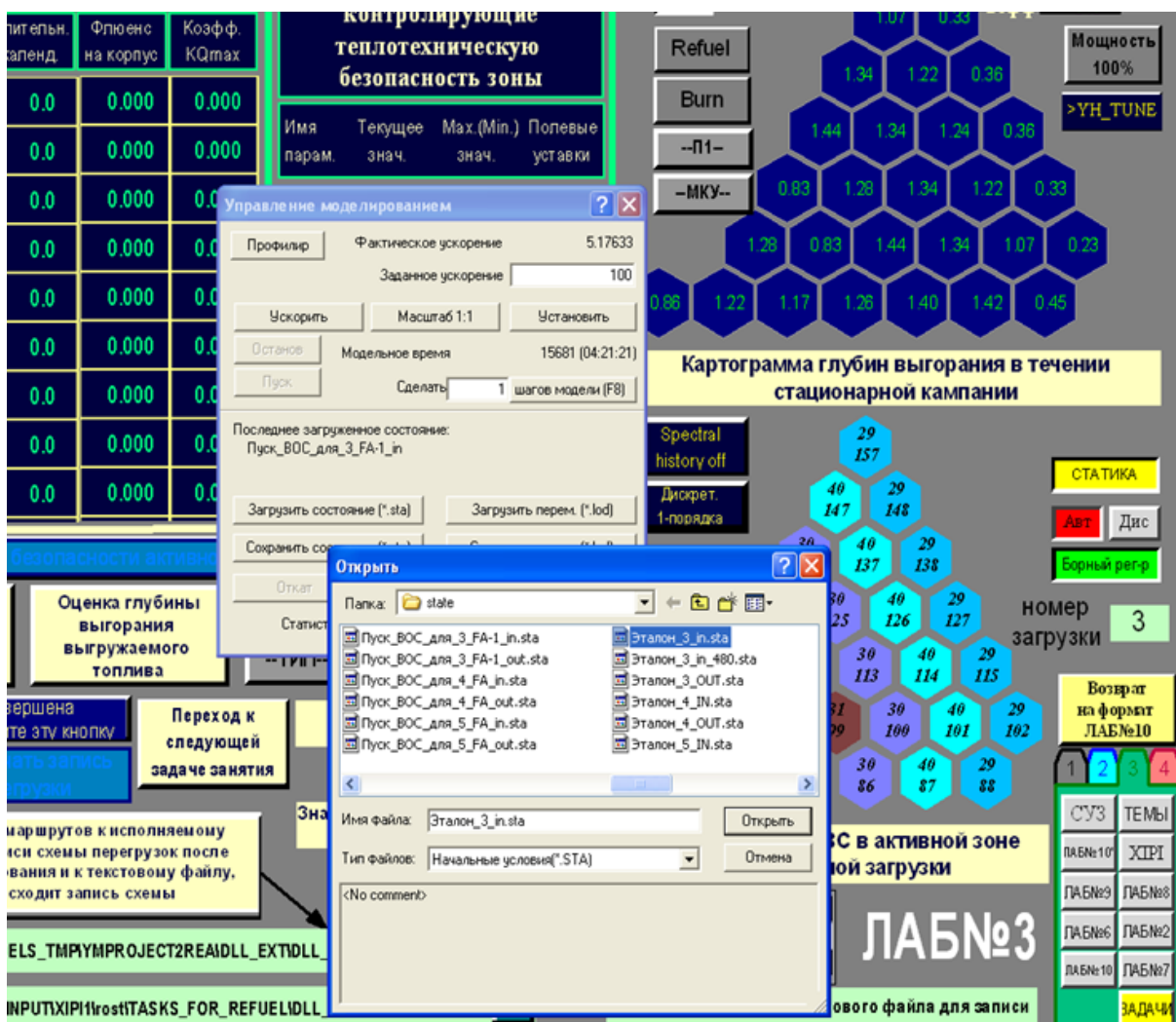


9. Изучение основных характеристик топливного цикла в реакторах ВВЭР-1000. Исследование зависимости этих характеристик от базового обогащения топлива подпитки по урану-235. Расчетное обоснование экономических показателей и показателей технической безопасности выбранного топливного цикла. Сопоставление показателей топливных циклов, реализованных с использованием различных схем перегрузок топлива.

Фрагмент базового формата для 1-ой части работы по топливным циклам

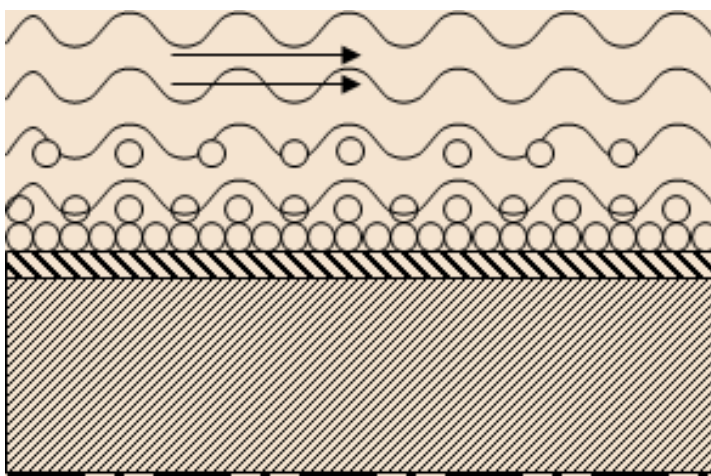


Фрагмент базового формата для 2-ой части работы по топливным циклам



10.Изучение явления кризиса теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ в активной зоне реактора ВВЭР-1000 (1200). Изучение причин возникновения кризиса теплоотдачи и мер по уменьшению последствий данного явления на состояние основных защитных барьеров реактора. Моделирование и анализ ряда аварий, приводящих к данному явлению, включая аварию на АЭС «Three Mile Island» с расплавлением топлива в активной зоне.

Схематическое изображение кризиса теплоотдачи



Базовый формат работы по изучению аварии на АЭС «Three Miles Island»



Моделирование аварии, подобной аварии, произошедшей на АЭС Three Mile Island в США
 Анализ ошибочных действий операторов АЭС и определение правильных действий

00 01 09

Помни не только о ядерной безопасности !!!

События и действия персонала, приведшие к аварии на АЭС - Three Miles-

2-Сработала аварийная защита (АЗ), все ОР СУЗ на НКВ

3-Превышение давления в КД выше значения 175ати, сработало ИПУ

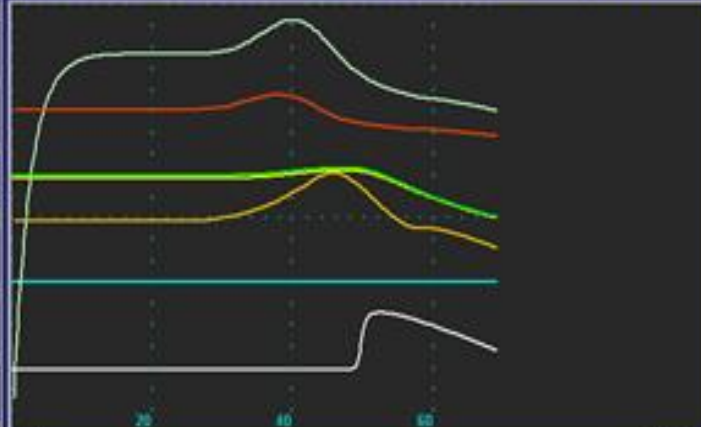
4-Давление 1-К и уровень в КД падают, неполадка клапана ИПУ - персонал не видит отказа

Переход на головной формат МФА
Вызовчик клапана в -Т-

Давление в 1-К, ати	133.91	Н	771	317.033	макс.Т-Zr,C
Расход через реактор,кг/сек	17745.4			771.754	макс.Т-УO2,C
Давление в САОЗ,ати	60.3503			35.700602	Расход течи из КД
Темп.насыщ. при Р-1К,град.С	331.898			306.525	Темп.тепл. над зоной
Ср.тем.тепл. в 1-К,град.С	207.99			709.632	Плотность темп.над зоной
Уровень воды в КД, см	771.024			726.729	Плотность темп.в зоне

Контролируемые параметры, доступны оператору АЭС

Р-1К, ати	Уровень воды в КД, см	Расход через реактор,кг/сек	Темп.насыщ. при Р-1К,град.С	Темп.до 3-ой петле ГЦК	Темп.до 2-ой петле ГЦК	Р в баках САОЗ,ати
-----------	-----------------------	-----------------------------	-----------------------------	------------------------	------------------------	--------------------



Неконтролируемые параметры, не доступны оператору АЭС



Для каждого из выше указанных тематических направлений сформировано одно или несколько учебных занятий. Для проведения учебных занятий имеется лабораторный практикум с описанием учебных занятий и задач, входящих в состав каждого занятия, инструкций по проведению занятий и обработки результатов их выполнения.

Для практических занятий по каждой теме сформулированы:

- приобретаемые знания по предмету исследования,
- учебные цели,
- критерии достижения учебных целей,
- методики оценки содержания и проведения занятий и их модификаций.

Формируемые и контролируемые на практических занятиях компетенции соответствуют компетенциям, определенным в соответствующих образовательных стандартах и программах.

В 2010 году Учебная лаборатория «Управление и безопасность АЭС» была тематически расширена до решения задач по теме: Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация АЭС с ВВЭР.

В 2011г. МАГАТЭ провело тендер по предложенным вариантам учебной лаборатории по теме: Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ, - с целью её поставки в ВУЗы Армении, Беларусь и Украины. В данном тендере приняла участие и лаборатория, разработанная в НИЯУ МИФИ, которая и стала победителем в этом тендере. При спонсировании МАГАТЭ представители кафедры «Автоматика» НИЯУ МИФИ в течение 2011-

2013г.г поставили Учебную лабораторию по теме: Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ, - в ВУЗы Армении, Беларусь и Украины. В настоящее время данная учебная лаборатория начала успешно использоваться в учебном процессе ВУЗов названных стран.