

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Дина Али Абрагим Амер
ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР-1000
ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Амер Дина

Москва 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель:

Никонов Сергей Павлович

к.т.н., доцент кафедры «Теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов» НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Олексюк Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, ФГБУ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт, Курчатовский комплекс атомной энергетики. Начальник отдела, г. Москва.

Нигматулин Булат Искандерович д.т.н., профессор, генеральный директор, Институт проблем энергетики, г. Москва

Горбунов Владимир Александрович д.т.н., профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра АЭС, г. Иваново

Защита состоится «30» Марта 2022 г. в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета «МИФИ.01.03» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу : 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Просим принять участие в работе совета и прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.т.н.

Куликов Евгений Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Строительство атомной электростанции ставит новые задачи для египетской экономики, связанные с использованием в мирных целях атомной энергии. Предполагается, что будут построены четыре блока нового поколения ВВЭР-1200. Разработка расчетной схемы с возможным анализом стационарных и переходных режимов в республике является актуальной задачей. Однако, в настоящее время, трудности с получением достаточной открытой информации для данного типа реактора делают ее довольно проблематичной. В связи с этим было решено остановиться на разработке расчетной схемы для реактора ВВЭР-1000, открытые данные для которого широко используются последние годы в различных международных стандартных проблемах, связанных с анализом нейтронно-физических и термодинамических процессов в стационарных и переходных режимах. Впоследствии этот опыт послужит основой для работы в данном направлении для египетского варианта ВВЭР-1200, что не снижает актуальности создания на данном этапе схемы для ВВЭР-1000.

В качестве программы, для которой будет разрабатываться блок входных данных, выбран разработанный в Германии расчетный код ATHLET. Он предназначен для анализа различных видов стационарных и переходных процессов в реакторах разного типа с различным теплоносителем – вода, газ, жидкие металлы и т.д. В России этот код лицензирован для проведения расчетных анализов в обосновании безопасности реакторов типа ВВЭР. НИЯУ МИФИ имеет официальную лицензию на использование кода ATHLET, что и явилось причиной работы с ним при создании расчетной схемы установки. Разработанная схема для ВВЭР-1000 включает в себя не только геометрическое моделирование элементов первого и второго контуров, но и описывает довольно подробно работу систем управления.

Созданная расчетная модель была использована для комплексного анализа двух режимов, входящих в список обязательных при подготовке отчетов безопасности для ВВЭР – мгновенная остановка (заклинивание) работающего главного циркуляционного насоса (ГЦН) и мгновенный гильотинный разрыв с двухсторонним истечением теплоносителя (LOCA (DEB)) главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) при работе на номинальной мощности реактора. При этом основной упор был

сделан на анализе процессов в контуре циркуляции на начальном этапе зарождения аварии – первые несколько секунд: от двух (для LOCA (DEB)) до десяти (заклинивание ГЦН). При этом изучались как причины возникновения волн давления, так и их распространение по ветвям контура циркуляции. В частности, для LOCA (DEB) исследовалось поведение волн давления в зависимости от различного места разрыва в каждой из петель. Ранее подобные расчетные исследования такого плана не проводились, а полученные результаты по динамическим нагрузкам (перепадам давления) на основных элементах оборудования первого контура говорят о том, что эти нагрузки обязательно надо учитывать в анализах прочности.

В работе сделан первый шаг в этом направлении – прочностной анализ верхней части горячего коллектора парогенератора (ПГ) по первому контуру. В процессе работы было исследовано влияние «мгновенности» аварии на остановку насоса и LOCA (DEB), а также показано насколько сильно оно влияет и на амплитуду, и на частоту волн давления в разных местах контура. Таким образом, актуальность работы в данном случае говорит о направлении дальнейших исследований уже с точки зрения анализа прочности оборудования в данном процессе.

Цель работы: создание для кода ATHLET расчетной разветвленной схемы для первого и второго контура реакторной установки типа ВВЭР-1000, которую можно использовать для всестороннего анализа стационарных и переходных режимов, включая различного рода разрывы.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана расчетная схема реакторной установки ВВЭР-1000 (в качестве референтного выбран 3-ий блок Калининской АЭС) для программы ATHLET, лицензия на использование которой имеется у НИЯУ МИФИ.
2. Проведен расчет аварийной ситуации с мгновенным заклиниванием ГЦН в первой петле. Проведен анализ динамики распространения волн давления в контуре.
3. Проведен расчетный анализ LOCA (DEB) в первой петле ГЦТ при разрыве в области входного патрубка реактора (холодная петля). Выявлены причины возникновения волн давления при данной аварии. Выяснено, что наибольшие амплитуды давления наблюдаются при LOCA (DEB) по сравнению с мгновенной остановкой ГЦТ.

4. Проведен анализ неопределенности параметра «мгновенности» аварии на процесс поведения волн давления при LOCA (DEB) и ситуации с мгновенным заклиниванием ГЦН. Параметр «мгновенности» изменялся от 0.0001 секунды до 2-х секунд. Выявлено, что наибольшие динамические нагрузки возникают при наименьшем значении данного параметра. В дальнейшем все расчеты проводились при наименьшем значении параметра «мгновенности».
5. Проведена серия расчетов LOCA (DEB) в первой петле ГЦТ при разрыве до и после ГЦН, до и после ПГ, в области выходного патрубка реактора (горячая нитка петли). Проведено сравнение интенсивности динамической нагрузки на основные элементы контура циркуляции - перепады давления в активной зоне реактора (АЗ), реакторе, ГЦН петель, парогенераторах петель в зависимости от места разрыва.
6. Проведена серия расчетов LOCA (DEB) в остальных петлях ГЦТ при разрыве до и после ГЦН, до и после ПГ, в области входного и выходного патрубка реактора с целью выяснения влияния не только места разрыва, но и изменение интенсивности нагрузки на элементы. Необходимость проведения таких расчетов обусловлена несимметричностью контура циркуляции, подсоединением компенсатора давления только к одной петле.
7. Проведена серия расчетов по определению влияния распределения энерговыделения в реакторе (взяты начало и конец кампании, проведен расчет с отключением обратных связей, т.е. без изменения мощности) на характер волн давления при LOCA (DEB).
8. Результаты одного из расчётов [LOCA (DEB) на выходе из коллектора ПГ в начале холодной нитки ГЦТ первой петли] использовались в качестве граничных условий для прочностного анализа в области верхней части данного коллектора ПГ.

Научная новизна результатов исследования

1. Разработана четырех петлевая расчетная модель для кода ATHLET (версия 3.1A) РУ ВВЭР-1000, которая позволяет исследовать поведение первого и второго контуров АЭС в различных стационарных и переходных режимах. Эта модель может быть основой при разработки расчетной модели для РУ ВВЭР-1200.
2. Проведено расчетное исследование начальных стадий аварийных ситуаций, связанных с мгновенной остановкой ГЦН- STOP MCP и мгновенным разрывом ГЦТ с

двухсторонним истечением теплоносителя в течь - LOCA (DEB), что приводит к образованию волн давления в контуре циркуляции.

3. Выявлена причина образования волн давления при LOCA (DEB).

4. Проведен анализ чувствительности результатов расчета LOCA (DEB) и STOP MCP к неопределенности времени самого процесса. В требованиях надзорных органов используется термин «мгновенный», но без числового значения. Определено наиболее консервативное значение данного параметра.

5. Проведено исследование влияния места разрыва (для всех петель) на характер динамики волн давления и динамическую нагрузку (перепады давления) на основные элементы РУ.

6. Проведено исследование влияния энерговыделения в процессе аварии LOCA (DEB) на динамику волн давления.

7. Проведен первичный анализ влияния полученных динамических нагрузок на прочность одного из объектов ГЦТ – верхней части холодного коллектора первой петли при LOCA (DEB) в начале холодной нитки ГЦТ на выходе из этого коллектора.

Теоретическая и практическая значимость работы

Несколько десятилетий назад (1960 год) в Египте на реке Нил, вблизи города Асуан, при финансовой и технической помощи СССР было начато строительство мощного гидроэнергетического комплекса, включающего в себя новую Асуанскую платину (Ас-Садд аль Али), гидроэлектростанцию и линии электропередач. После завершения строительства мощность 12 агрегатов ГЭС составила 2,1 ГВт, что позволило утроить энергетическую базу Египта, расширить старые, создать новые индустриальные центры. Строительство новой плотины и ГЭС привело к дальнейшему развитию египетского гидростроения.

Идет 21 век и уже приемник СССР, Россия, и Египет заключают новое соглашение о начале строительства в Египте четырех блоков атомной станции, суммарная мощность которых более чем в два раза превысит мощность Асуанской ГЭС. Предполагается, что каждый из четырех атомных энергетических блоков будет обладать мощностью 1,2 ГВт и базироваться на новой российской разработке ВВЭР-1200, обладающей дополнительными возможностями с точки зрения ядерной безопасности по сравнению с предыдущими блоками атомных станций. Ясно, что

освоение новых технологий дает не только новые знания, но и требует определенного восприятия этих новых знаний, подготовки к их получению. В связи с этим возможность предварительного анализа может значительно помочь в освоении новых технологий. Такой анализ связан с созданием расчетных моделей установок, которые максимально приближены к изучаемому объекту, либо являются его предшественником. Одним из основных инструментов такого анализа являются расчетные коды, позволяющие описать различные явления, которые могут иметь место в изучаемом объекте.

Данная работа как раз и направлена на изучение одного из этих аспектов, возникающих при работе атомной станции. Следует сказать, что на данном этапе довольно трудно получить официальную информацию по оборудованию и конструкции новых блоков ВВЭР-1200 атомной станции, поэтому упор сделан на предшественника ВВЭР-1000.

Основные положения, выносимые на защиту

- Разработанная расчетная четырех петлевая схема реакторной установки ВВЭР-1000 (в качестве референтного выбран 3-ий блок Калининской АЭС) с описанием объектов первого и второго контуров и моделированием управления работы блока, для версии программы ATHLET (3.1A).
- Результаты расчетного исследования аварийных режимов, связанных с мгновенной остановкой и мгновенным разрывом ГЦТ с двухсторонним истечением LOCA (DEB) с точки зрения образования и поведения волн давления.
- Выявленная причина возникновения волн давления при LOCA (DEB).
- Анализ динамического воздействия волн давления на оборудование при LOCA (DEB) в различных местах ГЦТ.
- Анализ влияния распределения энерговыделения в реакторе на характер волн давления при LOCA (DEB).
- Первичный прочностной анализ в области верхней части холодного коллектора ПГ с использованием результатов динамических расчетов данных исследований.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов и выводов диссертации подтверждается:

[1] Использованием лицензионной расчетной программы ATHLET, которая имеет широкое распространение в Европе, используется в России уже более 30 лет и в

настоящее время аттестована для анализа стационарных и переходных режимов при обосновании безопасности реакторных установок типа ВВЭР.

[2] Сравнением результатов расчета по разработанной модели с результатами измерений на 3-м блоке Калининской АЭС, полученными в ходе пуско-наладочных работ по отработке стадии освоения 100% мощности РУ, которые явились основой для международной стандартной проблемы Калинин-3.

[3] Публикациями в реферируемых изданиях и выступлениями с докладами на российских и международных научных конференциях.

Апробация и реализация результатов исследования

Полученные в данной работе результаты были представлены на следующих конференциях:

1. Dina Ali Amer, Nikonov S.P. Pressure Waves In The Primary Circuit Of The VVER - 1000 Reactor At Instant Stop Of The MCP, ICNRP Volga-2018, International conference for young scientists, specialists and post-graduates on Nuclear Reactor Physics, September, 2018., IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1133 (2018) 012049 doi :10.1088/1742-6596/1133/1/012049
2. Dina Ali Amer, Nikonov S.P., LOCA and Pressure waves in the first loop of the VVER- 1000 Reactor, 28th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Olomouc, Czechia, October 8-12, 2018
3. Dina Ali Amer, Nikonov S.P., Emergency Situations and Pressure Waves in VVER-1000, 6-th Conference on Radiation sciences and applications, Ibis Dahab, Egypt, October 22-26, 2018
4. Dina Ali Amer, Nikonov S.P., Maximum Pressure drop values in the main components of VVER-1000 due to DEBLOCA in different locations, 29th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Slovakia, NPP Mochovec, October 14-18, 2019г
5. Dina Ali Amer, Nikonov S.P., The effect of reactor power behavior on LBLOCA hydrodynamics, International conference of VVER 2019 recent and future, Prague, Czech Republic, November 10-14, 2019
6. д. Амер, С. П. Никонов, Анализ неопределенности понятия "мгновенный" при расчете аварийных режимов., XIV Международная молодежная научно-практическая конференция "Будущее атомной энергетики-Atom Future 2018" г. Обнинск, Калужская область, Россия

7. Дина Али Амер, С. П. Никонов, Анализ волн давления в ВВЭР-1000 из-за LOCA в разных местах, XXI Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, АО ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Подольск, 10-11 апреля 2019г

8. Дина Али Амер, Никонова С. П., Travleev A., Первый контур ВВЭР-1000 и наиболее опасные места LBLOCA в качестве источника динамической нагрузки на оборудование, 11 МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия 21-24 мая 2019г

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано пять статей, три из которых опубликованы в журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, две - в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Личное участие автора Участие совместно с руководителем в разработке расчетной схемы реакторной установки ВВЭР-1000 (в качестве референтного выбран 3-ий блок Калининской АЭС) для версии программы ATHLET (3.1A). Совместно с руководителем постановка целей и задач исследования, разработка плана проведения расчетов, анализ полученных результатов. Личное проведение всех расчетов по программе.

Объем и структура работы Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 120 источников. Общий объем работы составляет 158 страниц, содержит 129 рисунков, в том числе графики.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены результаты, полученные лично автором. Дано краткое содержание работы.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору, актуальности работы, цели и задачам работы. В данной главе также показаны публикации автора по теме диссертации и подробное описание случаев исследования. И Верификации Результатов также включал, где: Отключение ГЦН-1 из 4-х работающих ГЦН на мощности реактора 99.8% от номинального значения и перевод мощности на уровень, соответствующий 3-м работающим ГЦН (67%). Калининская АЭС, блок 3,

1-ая загрузка, 126 эфф.с. Мощность нормирована по АКНП. Изменение мощности и основных гидродинамических параметров по реактору во время эксперимента и при расчете по созданной модели. Сравнение показывает хорошее соответствие результатов с экспериментальными данными.

Вторая глава посвящена объяснению используемого кода ATHLET и модели исследуемой установки. Итак, эта глава включает в себя: Краткое описание расчетного кода "ATHLET", Математический аппарат кода ATHLET, Модель разрыва двойного истечения в коде ATHLET, Описание компонента / элемента в модели "ATHLET", Подробное описание исследуемых чрезвычайных ситуаций и сценариев аварий.

Глава третья Эта глава включает в себя этапы исследования. - Описан этап № 1, представляющий собой изучение первой аварийной ситуации "мгновенная остановка ГЦН в первой петле первичного контура". Рассматривается начальная стадия аварии, показала появление волн давления и их распространение в аппаратуре первичного контура РУ.

В случае аварии предполагается выход из строя регулятора мощности нагрузки и реактора, автоматического регулятора мощности, систем аварийной защиты. Аварийная защита реактора (РУ-1) работает только по 2-му сигналу. ГЦН запускает остановку в первом контуре первичной цепи, которая предполагается свое начало при $t=0$. До этого это считалось нормальным условием эксплуатации. На Рис.1 показано падение разности давлений в ГЦН № 1 в течение всего процесса в течение 600 секунд после аварийной ситуации. На Рис.2 наблюдаются колебания давления на входе в реактор из аварийного контура лишь в первый период процесса.

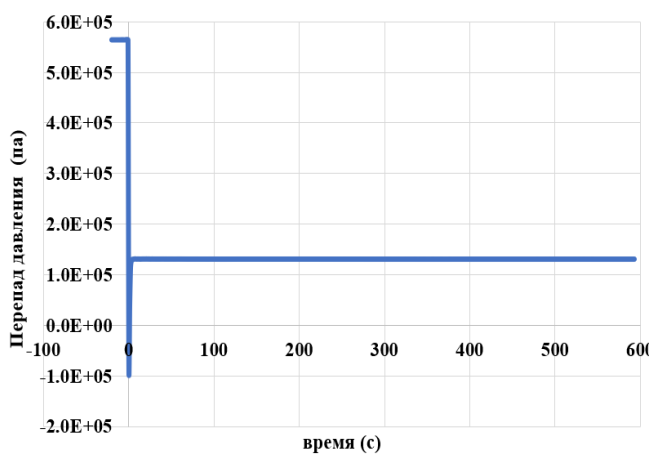


Рис.1. Перепад давления на ГЦН № 1 в течение 600 секунд после аварийной ситуации.

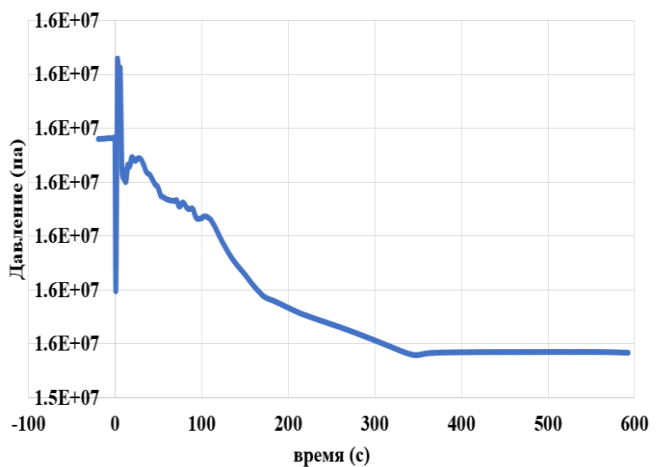


Рис.2. Давление на входе в реактор из аварийной петли (1-й) в течение 600 секунд после аварийной ситуации.

Более подробная информация представлена в первые 10 секунд после аварийной ситуации. На Рис.3 показана разница давлений в ГЦН № 1. На Рис.4 показано давление на входе в холодную петлю № 1, также в течение первых 10 секунд после аварийной ситуации

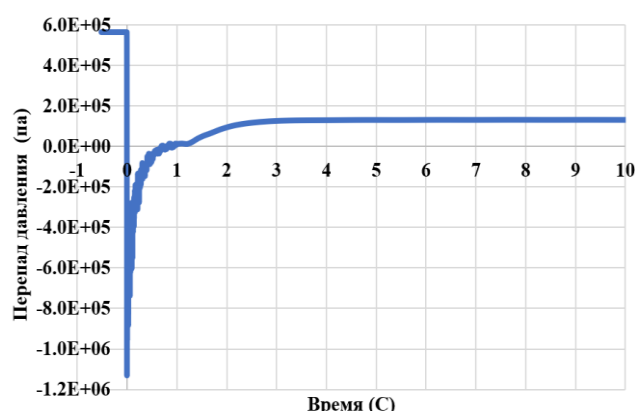


Рис.3. Перепад давления на ГЦН №1 в течение первых 10 секунд после аварийной ситуации.

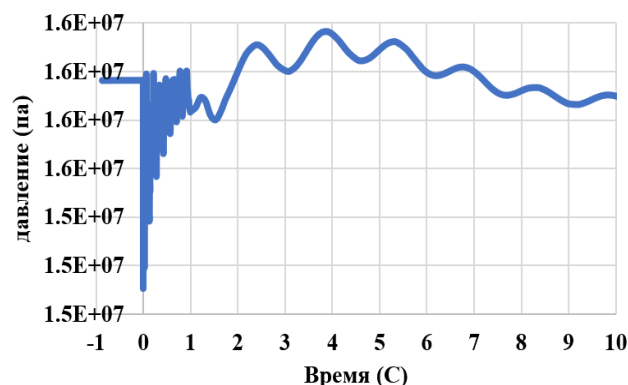


Рис. 4. Давление в холодной петле № 1 на входе реактора в течение первых 10 секунд после аварийной ситуации.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что наиболее сильные амплитуда и частота колебаний давления на основной компонент наблюдаются в начальный период аварии. Таким образом, чтобы более подробно узнать о последствиях этой чрезвычайной ситуации, нужно отслеживать давления в аварийном контуре № 1 в первую секунду.

На следующих рисунках показано изменение одного из важнейших параметров, как следствие возникновения аварийной ситуации, которая может повлиять на работоспособность основных элементов оборудования. На Рис.5 показано давление перед и после ГЦН №1. Перепады давления в АЗ, реакторе, насосе и ПГ во время аварийного петля, показано на Рис.6.

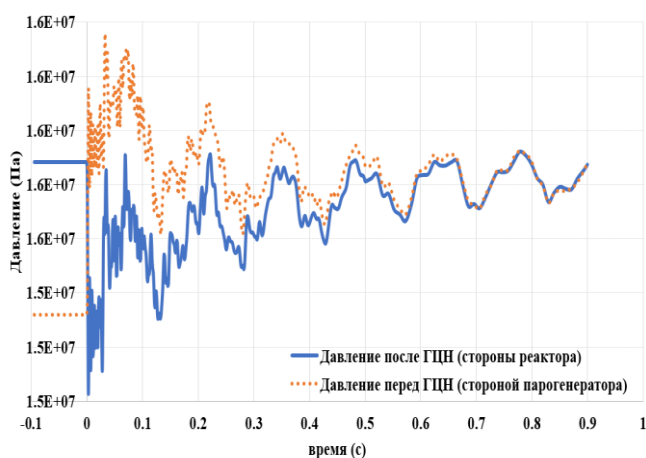


Рис.5. Изменение давления до и после ГЦН №1 в течение первой секунды после аварийной ситуации.

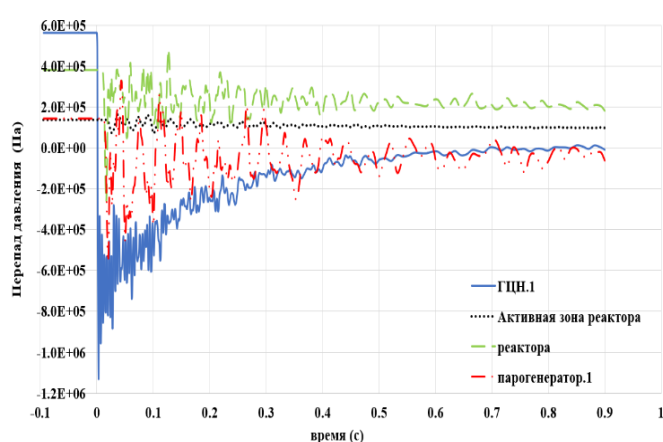


Рис.6. Перепад давления в АЗ, реакторе, ГЦН №1 и ПГ в пределах первой секунды после аварийной ситуации.

-Затем, обсуждается вторая аварийная ситуация, в которой происходит разрыв главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) первого контура с двухсторонним истечением в разрыв (DEB) на месте. “L1”.

Рассмотрим начальную стадию аварии (первые 0,5 сек.), вызванную разрывом одного из холодных контуров ($D = 850$ мм). Мгновенный разрыв (0,0001 с) трубопровода в зоне между реактором и главным циркуляционным насосом (ГЦН) с двойным торцевым истечением в разрыв. Авария с потерей теплоносителя LOCA (DEB) является проектной аварией самой концепции реактора. Его феноменология зависит от размера разрыва. На этапе рассматривается гипотетический крупно разрыв-мгновенный (гильотинный) разрыв холодной петли 1-го контура магистрального циркуляционного трубопровода (диаметр 850 мм) с двухсторонним истечением в зазоре в окрестности реактора. Это место разрыва показано на Рис.7.

Перепад давления в АЗ, реакторе, насосе и ПГ в петле показан на Рис.8 в первой 0,1 секунде, которая включает самые высокие значения разности давлений.

Изменения давления во всех точках аварийного петля отслеживаются, как показано на рисунках 9 и 10, при этом отмечается, что воздействие на давление началось в местах разрыва P1-CL-18, P1-CL-19, холодной петли назад к выходу ПГ, горячей нитки P1-HL-3, U-образной трубки ПГ P1-SG-UT04.3, входа ПГ (P1-SG-IN) соответственно.

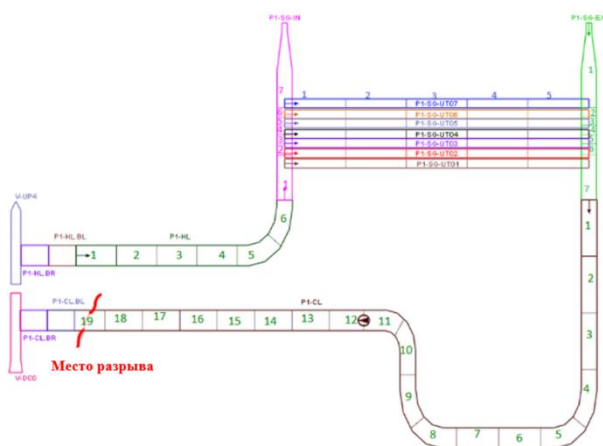


Рис. 7. Схема холодного петля первого контура и рассматриваемое место разрыва

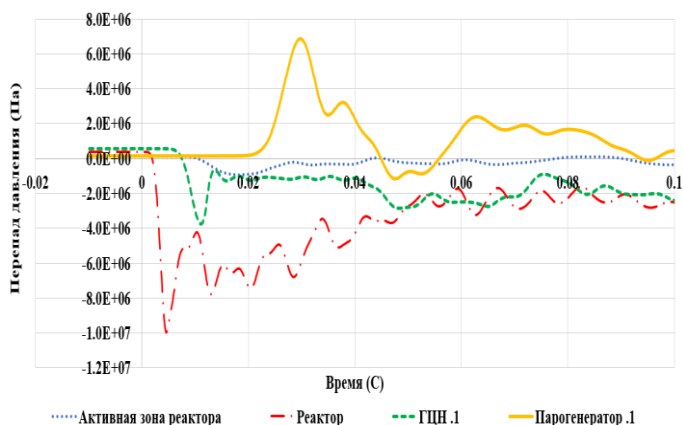


Рис. 8. Перепад давления в АЗ, реакторе, ГЦН №1 и ПГ в первой 0,1 секунде

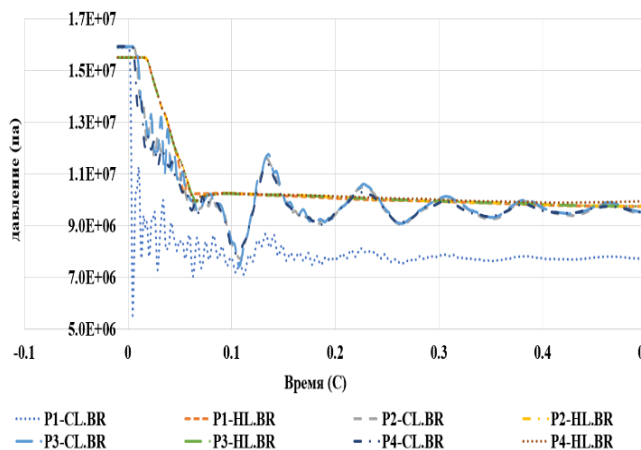


Рис. 9. Давление на входе/выходе реактора в четвертой петле первичного контура

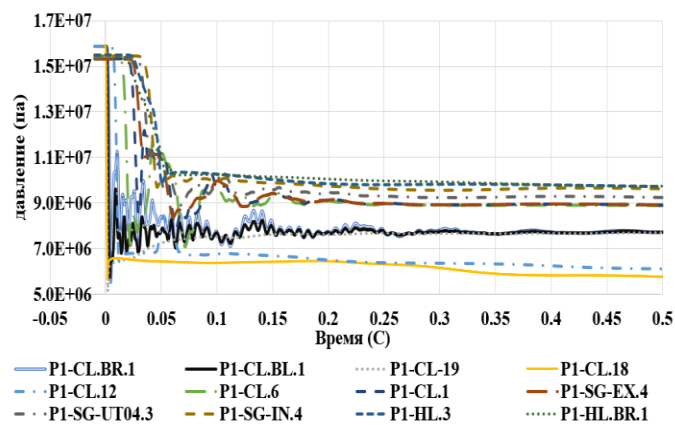


Рис. 10. Давление вдоль аварийной первой петли входа реактора до выхода)

Причина возникновения волн давления показана на рисунках 11-13. На Рис.11 видно, что происходит начало перегрева теплоносителя над температурой насыщения жидкости (резкое увеличение энтальпийного качества " >0 " с последующим увеличением объемного качества пара), в то время как AV равен нулю. То есть жидкость находится в метастабильном, неустойчивом, фазовом состоянии и в какой-то момент происходит резкое кипение - достижение критической температуры при заданном давлении, пересечение, так называемой синодальной линии, следствием чего является повышение давления теплоносителя и образование волны давления. В этом случае слева от места истечения соответствует началу уменьшения перегрева и в течение нескольких тысячных долей секунды жидкость переходит в стабильное двухфазное состояние. Диаграмма p-V, которая объясняет этот процесс, показана на Рис.12.

На Рис.13 показано возникновение волны давления справа от места разрыва и до насоса. Нужно заметить, что уравнение синодами (spinodal) используется в ATHLET для расчетов свойств.

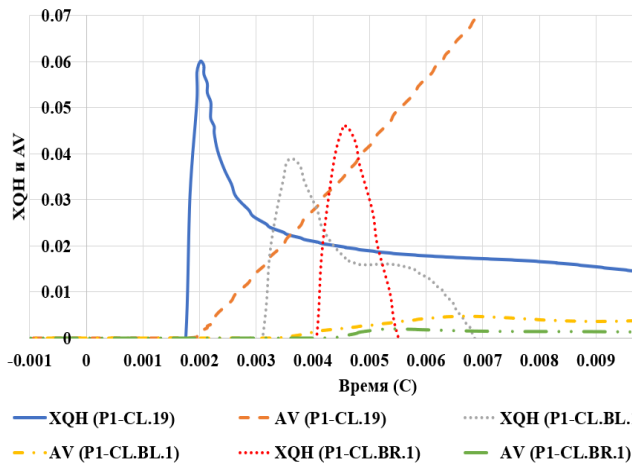


Рис.11. Энтальпийное (XQH) и объемное качество пара (AV) впервой аварийной петле от место разрыва в сторону реактора

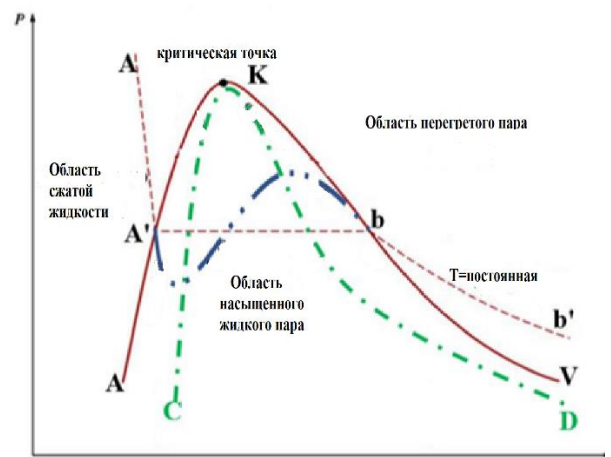


Рис.12. Диаграмма P-V включает в себя:- Граничная кривая (бинодальная) фазового равновесия жидкость-пар
- Изотерма равновесия a'abb' с участком ab двухфазных состояний

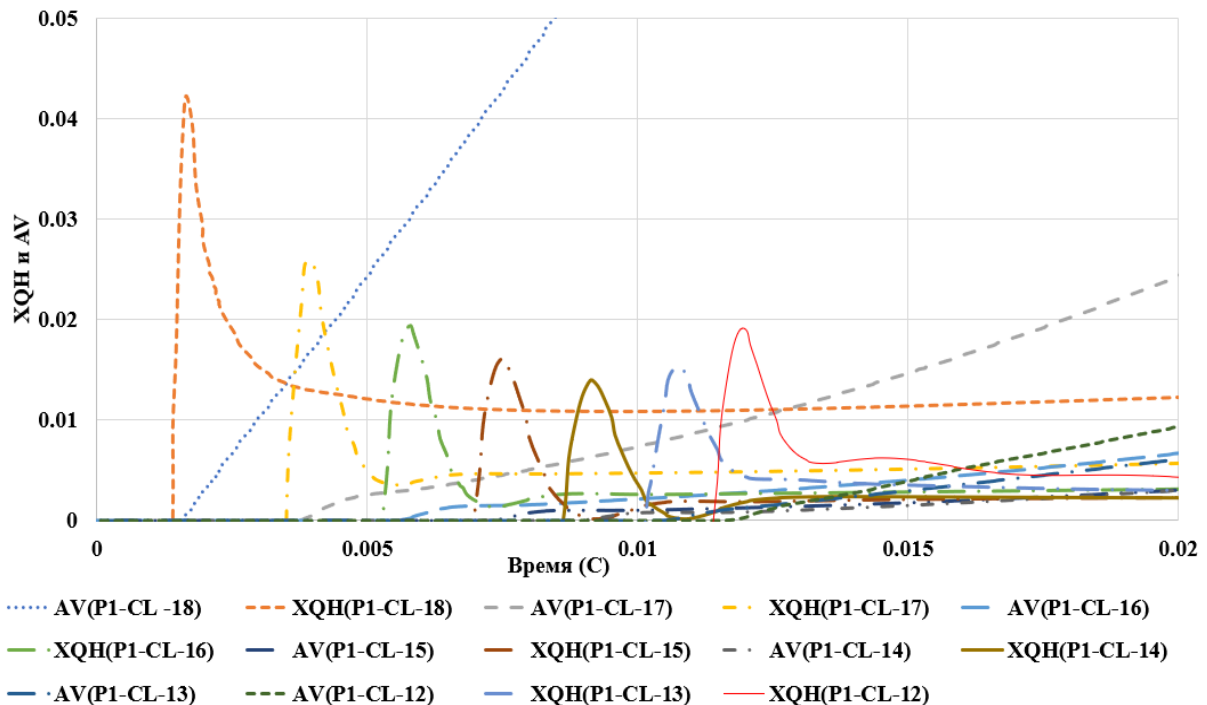


Рис.13 Энтальпийное (XQH) и объемное качество пара (AV) в холодной петле первого контуре от место разрыва до ГЦН (контрольные объемы холодного контура от 18 до 12)

- После этого , обсуждается сравнение последствий волн давления при остановке ГЦН и LOCA (DEB) в ВВЭР-1000. Сравнивая два случая, ГЦН №1 мгновенная остановка и LOCA (DEB), можно сделать вывод, что изменение всех параметров более резкие и сильные в случае LOCA (DEB).

В случае безопасности анализируются аварийные ситуации, которые также могут привести к значительным колебаниям давления на первом этапе, в частности, это аварии с мгновенным разрывом магистрального циркуляционного трубопровода.

Итак, следующим шагом в направлении анализа возникновения волн давления будет как раз изучение таких аварий при разрывах в разных частях трубопроводов.

- Этот шаг посвящен анализу неопределенности в понятии "мгновенный" при расчете аварийных режимов. Как указано в заключении последнего шага, рассматриваемый период времени не определен в руководстве. Таким образом, в настоящем исследовании для двух аварийных случаев рассматривается разный промежуток времени (10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} и 1 секунда):

- 1) главный циркуляционный насос (ГЦН) в первом контуре охлаждения останавливается
- 2) двойной конец большого разрыва LOCA (DEB) на входе реактора в первый контур первичного контура (рассматриваемое место "L1" для разрыва)

Случай 1: ГЦН останавливается:

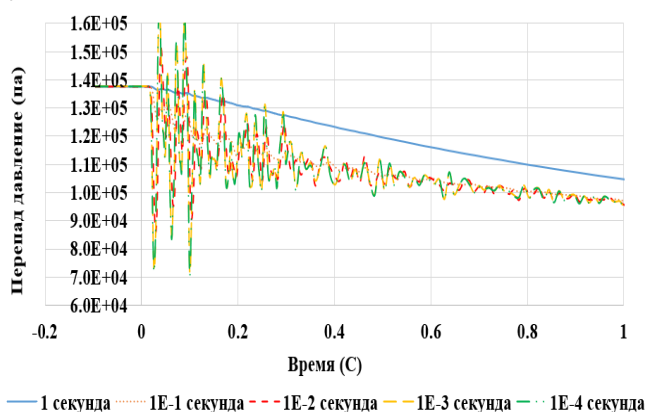


Рис.14. Перепад давлений в АЗ со стороны аварийного контура в случае остановки ГЦН

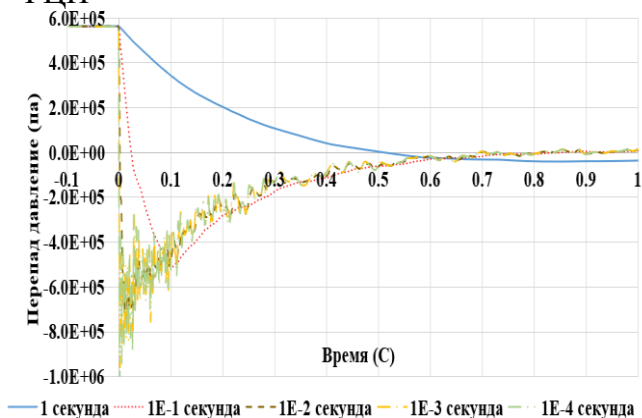


Рис.16. Изменение перепада давлений на ГЦН в аварийном контуре в случае остановки ГЦН

Случай 2: LOCA (DEB):

В случае двойного конца большого разрыва LOCA (DEB) рассматриваются две группы временных промежутков:

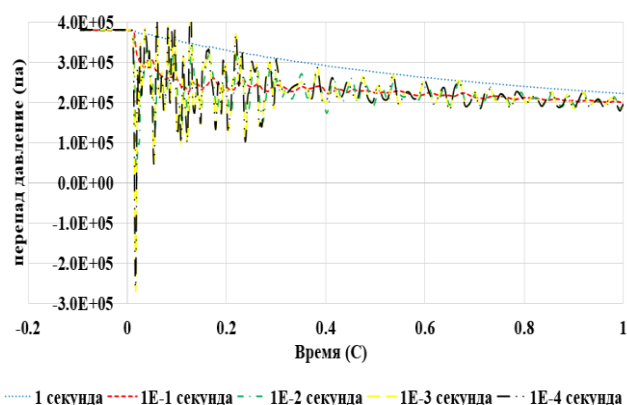


Рис.15. Перепад давлений в реакторе со стороны аварийного контура в случае остановки ГЦН

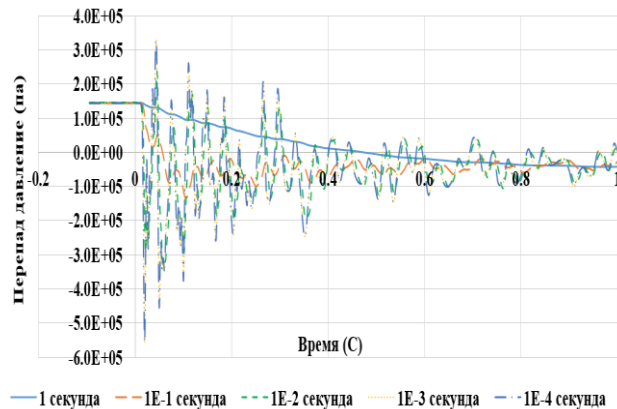


Рис.17. Изменение перепада давлений на ПГ со стороны аварийного контура в случае остановки ГЦН

- 1) $1E-1, 1E-2, 1E-3, 1E-4$ по сравнению с 1-ой секундой, и
- 2) 0.3, 0.5, 0.7 и 1 секунду

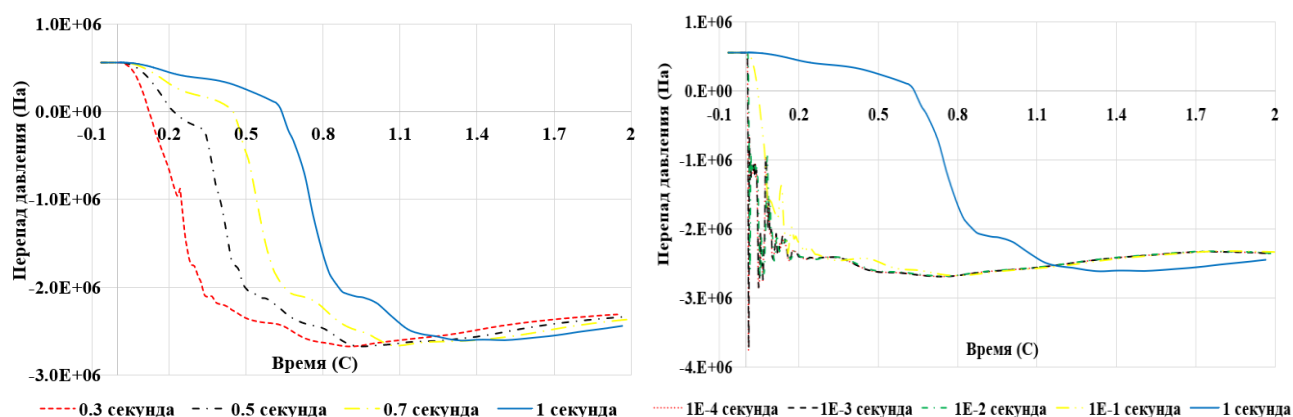


Рис.18. Изменение перепада давлений на ГЦН в аварийной ситуации (временные промежутки первой группы) в случае LOCA (DEB)

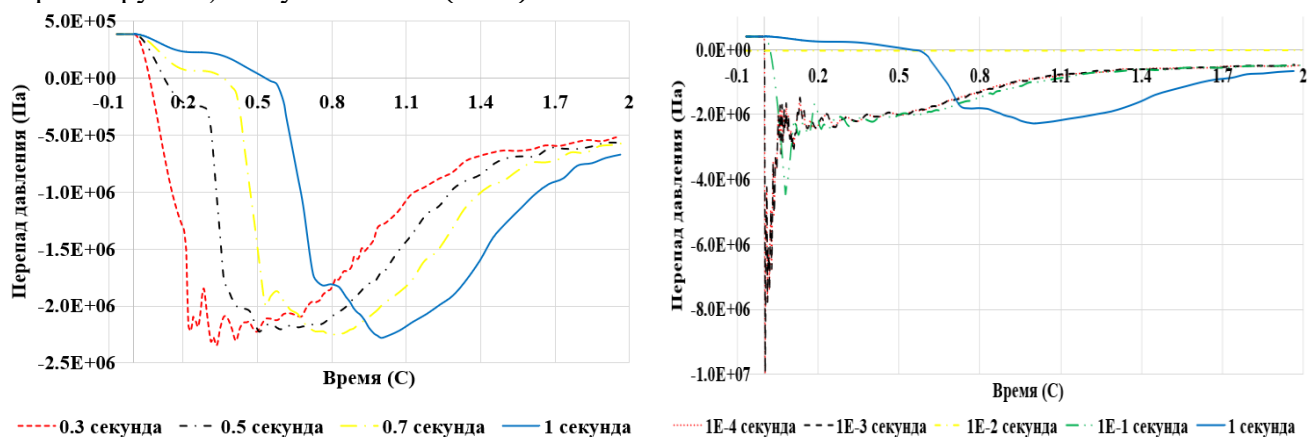


Рис.19. Изменение перепада давлений в реакторе со стороны аварийного контура (первая группа временных промежутков) в случае LOCA (DEB)

В различном временном промежутке изменяются величины давления. Кроме того, слово «мгновенное» должно быть более определенным во время исследования для отчетов о безопасности ядерного реактора. Выявлено, что наибольшие динамические нагрузки возникают при наименьшем значении данного параметра. В дальнейшем все расчеты проводились при наименьшем значении параметра «мгновенности».

- Этот шаг включает в себя анализ волн давления в ВВЭР-1000 для LOCA (DEB) в разных местах в первом контуре первичной цепи. На этом этапе было рассмотрено 6 мест.

Рассматривается пятая часть этого исследования. На Рис.20 также показаны 6 различных местоположений для LOCA (DEB) в первом цикле, которые являются:

- 1) в холодной петли, вход реактора
- 2) в горячую петлю, выход реактор
- 3) перед ГЦН
- 4) после ГЦН
- 5) в горячую петлю вход генератора (горячего сборника)
- 6) в холодной петлю выход генератора (холодного сборника)

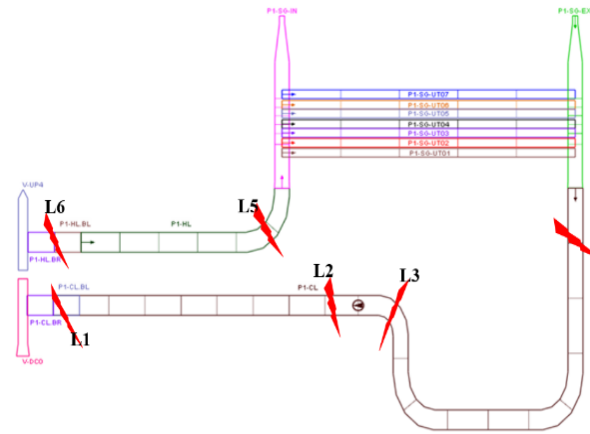


Рис.20. Рассматриваемые места для исследования

Примеры из результатов этого этапа:

1- Значение давления в главных компонентах

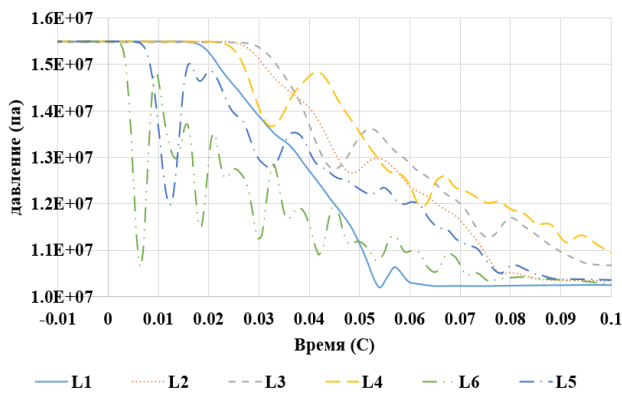


Рис.21. Волны давления на выходе из реактора (P1-HL.BR) из-за LOCA (DEB) в 6 различных местах

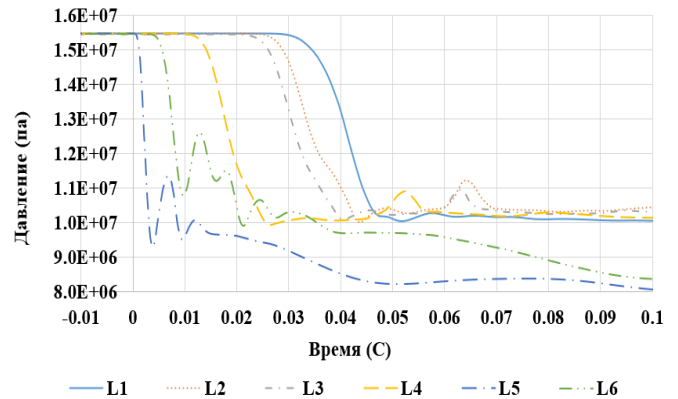


Рис.22. Волны давления на входе ПГ (P1-SG-IN.1) из-за LOCA (DEB) в 6 различных местах

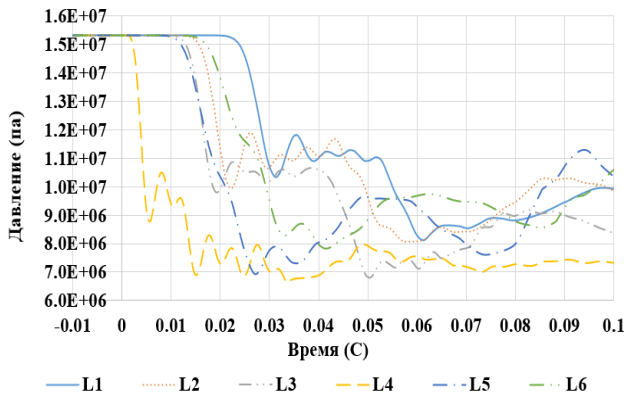


Рис.23. Волны давления на выходе ПГ (P1-SG-EX.7), к LOCA (DEB) на 6 различных местах

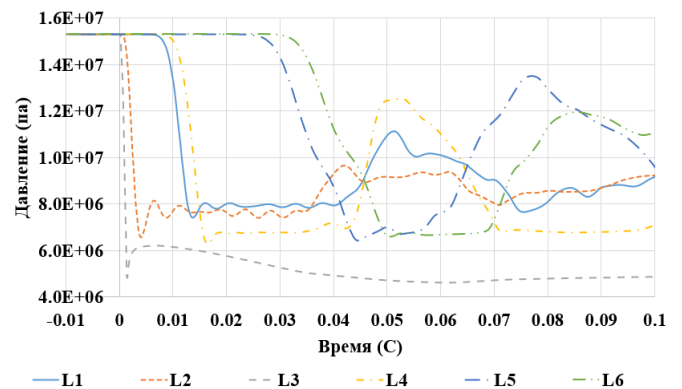


Рис.24. Волны давления непосредственно перед ГЦН №.1 (P1-CL.11) из-за LOCA (DEB) в 6 различных местах

2-Перепад давления через главные компоненты

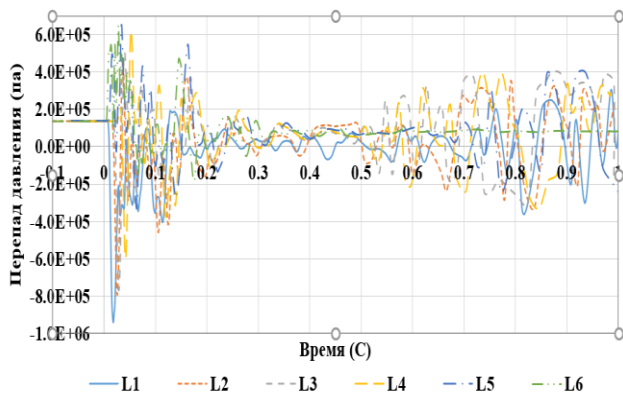


Рис.25. Перепад давления через АЗ (петля 1), из-за LOCA (DEB) в 6 различных местах

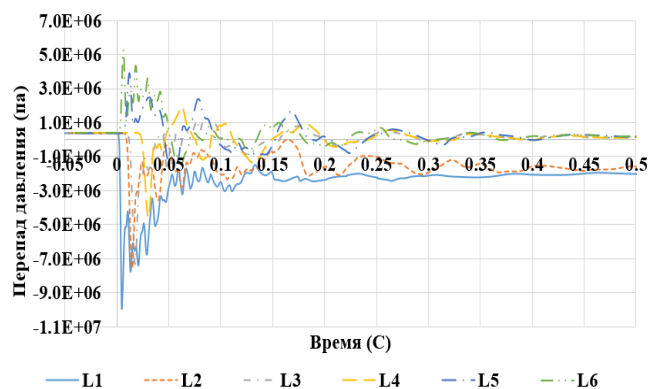


Рис.26. Перепад давления через реактор, обусловленный LOCA (DEB) в 6 различных местах

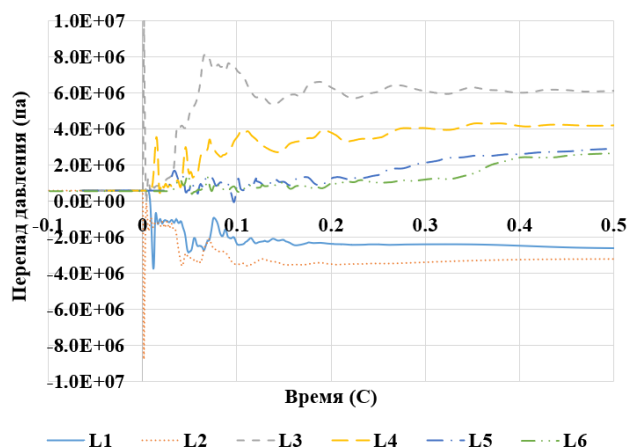


Рис.27. Перепад давления через ГЦН №1 из-за LOCA (DEB) в 6 различных местах

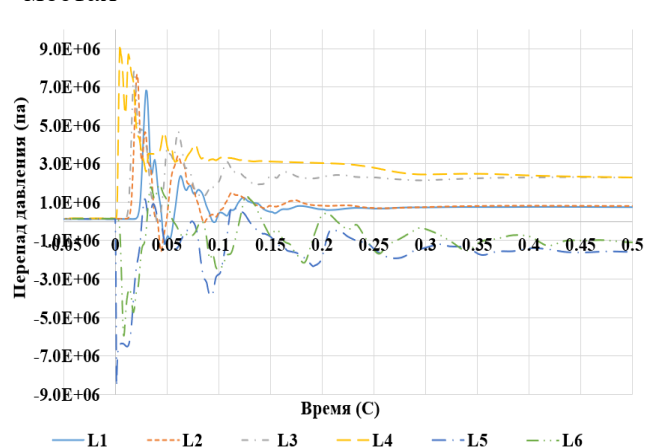


Рис. 28. Перепад давления через ПГ.1 из-за LOCA (DEB) в 6 различных местах

Первое общее замечание касается знака / направления изменения давления. Обычно, во всех рассмотренных точках, изменение давления было уменьшением / падением поведения. Другими словами, давление обычно было с отрицательным знаком, т. е. в отрицательном направлении оси Y. Однако в случае перепада давления изменение зависит от места разрыва.

Наиболее опасны места LOCA (DEB) в четырех петлях первичного теплоносителя, как источника динамической нагрузки на оборудование, были исследованы на шестом этапе, который был включен в **восьмую главу**. Максимальные перепады давления в АЗ зависят от места разрыва. Так же, как уже упоминалось при вскрытии, происходит изменение давления в другом направлении / знаке.

Кроме того, рекомендуется изучить, главным образом, поведение давления из каждого места разрыва на других трех петлях. Также важно рассмотреть то же самое исследование в других трех петлях охлаждения, особенно в четвертом, который соединен с компенсатором давления.

- Этот шаг показывает, что в влиянии мощности реактора поведения LOCA (DEB) на гидродинамику. На текущем этапе рассматривается влияние энергетического поведения реактора в начальный момент процесса (0-1 секунда).

Таким образом, здесь были учтены три различных состояния работы - начало загрузки, конец загрузки и деятельность постоянной мощности. Различие между этими тремя случаями заключается в данных модели нейтронной кинетики, то есть эффективной фракции замедленных нейтронов, что приведено в следующей таблице:

Эффективная доля запаздывающих нейтронов в начале и конце загрузки		
	Начало загрузки	Конец загрузки
β_1	0.019E-2	0.017E-2
β_2	0.110E-2	0.099E-2
β_3	0.104E-2	0.091E-2
β_4	0.240E-2	0.209E-2
β_5	0.113E-2	0.103E-2
β_6	0.044E-2	0.041E-2

Результаты падения давления в основных компонентах в трех случаях:

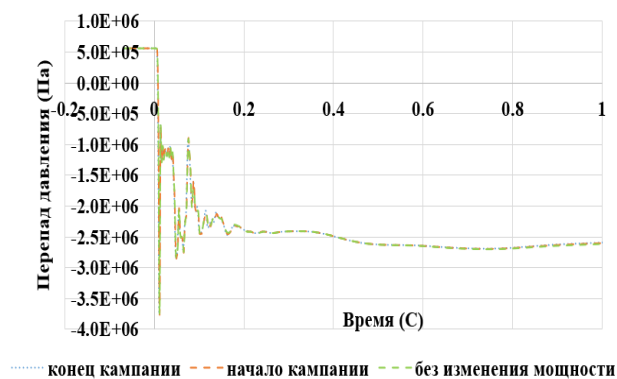


Рис.29. Перепад давления на ГЦН №1 в трех случаях исследования

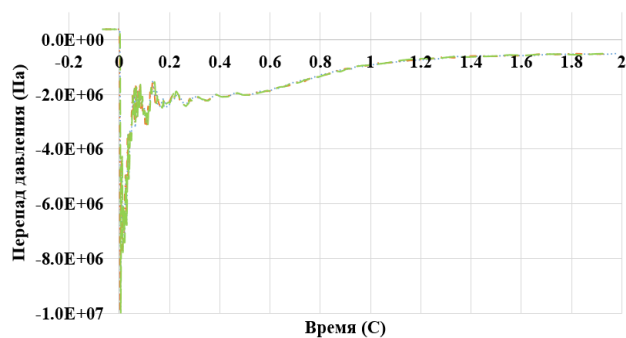


Рис.30. Перепад давления на реакторе после появления в трех случаях исследования

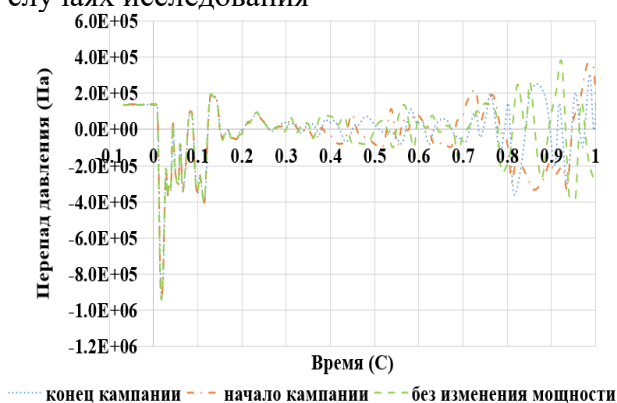


Рис.31. Перепад давления в АЗ после появления в трех случаях исследования

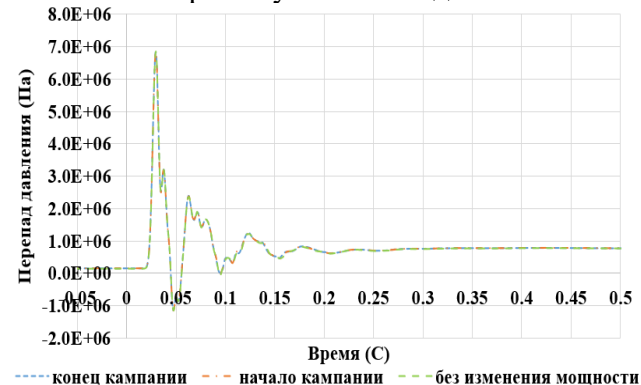


Рис.32. Перепад давления ПГ после появления в трех случаях исследования

Показано, что изменение мощности практически не влияет на гидродинамическое поведение процесса в рассматриваемом интервале времени.

- Это последний этап исследования, которому посвящено оценке верхней части коллектора ПГ. Результаты, полученные в первой части этого шага, рассматриваются в качестве граничных условий для расчета динамических нагрузок. Трехмерная модель используется в пакете конечных элементов ANSYS для моделирования верхней части холодного коллектора при возникновении максимальных волн давления во время аварии. Оцениваются и объясняются напряжения на моделируемой детали. Полученные результаты отражают высокий коэффициент запаса прочности расчетной зоны при такой тяжелой аварии. Максимальное генерируемое напряжение фон Мизеса находится в диапазоне 23,8 МПа, что далеко от предела текучести рабочей стали, который составляет 295 МПа.

- Глава четвертая - это последняя глава, которая включает в себя общий вывод и рекомендации для будущей работы и заключение.

Основные выводы

1) Выполнен анализ динамики распространения волны давления в контуре при аварийной ситуации с мгновенным заклиниванием ГЦН в первом контуре. Установлено, что первая секунда характеризуется максимальной амплитудой и частотой разности давлений.

2) Проведен расчетный анализ LOCA (DAB) в первой петле ГЦТ при разрыве в области входного патрубка реактора (холодная петля). Выяснено, что наибольшие амплитуды давления наблюдаются при LOCA (DEB) по сравнению с мгновенной остановкой ГЦ.

3) Проведен анализ неопределенности параметра «мгновенности» аварии на процесс поведения волн давления при LOCA (DEB) и ситуации с мгновенным заклиниванием ГЦН. Параметр «мгновенности» изменялся от 0.0001 секунды до 2-х секунд.

4) Проведена серия расчетов по определению влияния распределения энерговыделения в реакторе (взяты конец кампании, начало кампании, проведен расчет с отключением обратных связей, то есть без изменения мощности) на характер волн давления при LOCA (DEB). Показано, что изменения мощности практически не влияют на гидродинамическое поведение процесса в рассматриваемом интервале времени.

5) В качестве применения, результаты одного из расчетов [LOCA (DEB) перед холодным коллектором реактора первой петли] в качестве граничных условий

использовались для прочностного анализа в области верхней части холодного коллектора ПГ.

Флуктуации возникают с двумя пиками наибольшей амплитуды $1,87E+7$ и $2,38E+7$ Па в моменты времени 0,06 и 0,094 сек соответственно, что значительно ниже допустимого напряжения. Полученные результаты свидетельствуют о безопасной эксплуатации оборудования.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- [1] Dina Ali Amer, Nikonov S.P. Pressure Waves In The Primary Circuit Of The VVER - 1000 Reactor At Instant Stop Of The MCP, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1133 (2018) 012049 doi :10.1088/1742-6596/1133/1/012049
- [2] Dina Ali Amer, Nikonov S.P., Comparing the Consequences Pressure Waves due to MCP pump stops and LOCA in VVER-1000, Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета МИФИ, том 8, № 4, с. 309–320
- [3] Dina Ali Amer, Nikonov S.P., Stresses Induced by LOCA in Steam Generator Collector of VVER1000, The Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications, AJNSA-2002-1325, Accepted: 14/4/2020
- [4] Dina Ali Amer, Nikonov S.P., Effect of reactor power level on the induced pressure waves after LBLOCA in VVER-1000, The Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications, AJNSA-2004-1346, Accepted: 14/5/2020
- [5] д. Амер, С. П. Никонов, Неопределенность в расчетах из-за “мгновенных” аварийных ситуаций на ВВЭР-1000, научно - практический журнал «Глобальная ядерная безопасность», № 1(34)-2020.