A 05.14.03.
M-18

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՃԱՐՏԱՐԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

**ՄԱԼԱՔՅԱՆ ՑՈԼԱԿ ՀԱՄԱԶԱՍՊԻ**

# ՋԵՐՄԱՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆ ԱԷԿ-ՆԵՐԻ ԱՐՏԱՆԱԽԱԳԾԱՅԻՆ ՎԹԱՐՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ե.14.03 - «Ջերմաէներգետիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

**ՍԵՂՄԱԳԻՐ**

ԵՐԵՎԱՆ – 2004

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**МАЛАКЯН ЦОЛАК АМАЗАСПОВИЧ**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ НА АЭС

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 "Теплоэнергетика"

ЕРЕВАН - 2004

© National Library of Armenia OCR by Portmind

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի Պետական Ճարտարագիտական Համալսարանում

Գիտական ղեկավար — Տեխնիկական գիտությունների թեկնածու, դոցենտ Ա. Ա. Գևորգյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ Տեխնիկական գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր Ս. Ա. Մինասյան
Տեխնիկական գիտությունների թեկնածու, դոցենտ Ա. Պ. Սահակյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ «Ատոմսերվիս» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է "25" օգոստոսի 2004թ. ժամը $14^{00}$-ին ՀՊՃՀ-ում, 044 մասնագիտական խորհրդում:
Հասցե՝ 375009, Երևան, Տերյան 105:
Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՊՃՀ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է "24" հուլիսի 2004թ.

Մասնագիտական խորհրդի գիտքարտուղար
տեխնիկական գիտությունների թեկնածու, դոցենտ Շամամյան Ռ. Ե.

---

Тема диссертации утверждена в Государственном инженерном университете Армении

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент **Геворкян А. А.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Минасян С. А.;**
кандидат технических наук, доцент **Саакян А. П.**

Ведущая организация: **"Атомсервис" ЗАО**

Защита состоится "25" августа 2004г. в $14^{00}$ часов в ГИУА на заседании Специализированного совета 044.
Адрес: 375009, Ереван, ул. Теряна 105.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГИУА.

Автореферат разослан "24" июля 2004г.

Ученый секретарь Специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент **Шамамян Р. Е.**

2973- 2004

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Реактор ВВЭР-440 модель 230 разработан в начале шестидесятых годов в соответствии с действующими в те годы советскими промышленными нормами, стандартами и правилами. Концепция безопасности проекта предполагала большую надежность компонентов первого контура и важных для безопасности систем в течение всего периода эксплуатации, а также большой консервативный проектный запас. По этой причине в обосновании безопасности проекта станции не рассматривались специальные расчеты, учитывающие возможные значительные повреждения первого контура.

Конфайнмент ВВЭР-440/230 имеет относительно малый объем (13000м$^3$) и низкое проектное давление (0.2 МПа), так как в качестве максимальной проектной аварии рассматривается разрыв Ду32мм. Для ограничения роста давления и предотвращения неуправляемых выбросов в окружающую среду при таком разрыве, была спроектирована спринклерная система и предохранительные клапаны гермозоны, открывающиеся при росте давления после аварии.

Однако разрыв трубопровода Ду500мм с двухсторонним истечением, по оценкам, приводит к избыточному давлению 0.2 МПа, даже при срабатывании всех предохранительных клапанов гермозоны. Сможет ли конфайнмент выдержать такое давление - неизвестно.

Для модернизации конфайнмента необходимо применение новых технологических систем и оборудования, еще недостаточно испытанных и без накопленного опыта эксплуатации. Исходя из этого, становится достаточно актуальной проблема устранения дефицита безопасности, связанного с охлаждением активной зоны. Устранение этого дефицита позволит снизить вероятность плавления топлива при запроектных авариях и, тем самым, ограничить количество выброса радиоактивности в окружающую среду.

**Цель работы**. Данная диссертационная работа посвящена исследованию теплогидравлических процессов при запроектных авариях на АЭС с ВВЭР440/230 на примере Армянской АЭС, а также предлагает ряд оптимальных модернизаций, внедрение которых позволит при таких авариях осуществить функцию охлаждения топлива и снижение возможных выбросов радиоактивности в окружающую среду.

**Методика исследования.** Для решения поставленной задачи в данной диссертационной работе разработана математическая модель первого и второго контуров Армянской АЭС на базе комплексного теплогидравлического кода RELAP5.



© National Library of Armenia

**Научная новизна.**

- Разработана математическая модель первого и второго контуров Армянской АЭС на базе комплексного теплогидравлического кода RELAP5.
- Впервые предложен и обоснован новый метод компенсации течей до 200мм из первого контура для АЭС с ВВЭР-440/230 с использованием имеющихся систем.
- Впервые для инициирования процедуры подпитка-сброс определен и обоснован критический параметр.
- Разработан и внедрен, в комплексный теплогидравлический код RELAP5, алгоритм для решения уравнения теплового баланса систем, не поддающихся стандартному моделированию.
- Проведен анализ запроектных аварий Армянской АЭС с использованием комплексного теплогидравлического кода, разработанного на основе принципа наилучшей оценки.

**Практическая ценность**. Предложенные в диссертации модернизации, позволяющие осуществление функции охлаждения топлива в случае запроектных аварий, не требуют значительных финансовых затрат и реализуются с использованием только имеющихся систем.

Разработанная математическая модель первого и второго контуров Армянской АЭС на базе комплексного теплогидравлического кода RELAP5 позволяет:

- анализировать большой спектр аварийных и переходных режимов станции;
- проводить лицензирование отдельных систем АЭС;
- принимать решения по дальнейшей модернизации АЭС.

**Апробация работы.** Полученные результаты диссертационной работы были доложены на научных семинарах сектора "Теплоэнергетика", на научных конференциях Государственного Инженерного университета Армении, и на 10-ой, 11-ой и 12-ой международных конференциях по атомной технике в США и в Японии.

**Публикации.** По полученным научным результатам опубликовано пять научных статьи. Список опубликованных работ приведён в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и списка литературы.

Работа изложена на 160 страницах машинописного текста, включает 69 иллюстраций, 6 таблиц.



**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Математическая модель первого и второго контуров Армянской АЭС разработанная на базе комплексного теплогидравлического кода RELAP5.
2. Анализ запроектной аварии «Течь из первого контура эквивалентным диаметром Ду 200 мм» и предложения по ее переводу в проектную.
3. Анализ запроектной аварии «Полная потеря питательной воды парогенераторов с наложением обесточивания» и предложения по ее переводу в проектную.
4. Расчет температуры воды во всасывающем трубопроводе аварийного сейсмического насоса при низких температурах окружающего воздуха.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

***Во введении*** обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформирована цель работы, научная новизна, практическая ценность, а также кратко изложено содержание данной диссертационной работы.

***В первой главе*** "Состояние вопроса и постановка задачи исследования" анализируется современный подход к безопасности АЭС.

Представлены проектные и эксплуатационные недостатки, выявленные при пересмотре проекта ВВЭР-440/230. Приводится обзор модернизаций по повышению безопасности на конкретных АЭС с реактором типа ВВЭР-440/230. Обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформирована цель работы.

***Во второй главе*** "Математическая модель АЭС с ВВЭР-440/230" представлено краткое описание комплексного теплогидравлического кода RELAP5 и описание математической модели первого и второго контуров Армянской АЭС. Также представлена методика расчета для определения температуры воды во всасывающем трубопроводе аварийного сейсмического насоса (АСН) АЭС при низких температурах окружающего воздуха.

Комплексный теплогидравлический код RELAP5 предназначен, главным образом, для анализа переходных режимов в реакторах с водой под давлением и в их системах методом наилучшей оценки. Код также применяется для расчета аварий с большой и малой течью теплоносителя, и для других переходных режимов, таких как полное обесточивание станции и потеря питательной воды. С помощью комплексного теплогидравлического кода можно моделировать работу клапанов, систем нормальной и аварийной подпитки, аварийный останов



© National Library of Armenia

реактора, а также теплоотвод вторым контуром при этих процессах. Реакция системы моделируется вплоть до повреждения топлива.

Характерной особенностью кода является ее универсальность, позволяющая проводить с желаемой точностью анализ процессов широкого спектра (например, аварии с большой и малой течью теплоносителя, обесточивание станции, реактивностные аварии, аварии с полной потерей питательной воды ПГ-ов).

Для решения вышеуказанных задач в комплексный теплогидравлический код RELAP5 заложена двухфазная, неравновесная, негомогенная гидродинамическая модель для симуляции переходных состояний двухфазной системы.

Математическая модель реакторной установки второго блока ААЭС разработана на базе комплексного теплогидравлического кода RELAP5.

Детально смоделированы все важнейшие системы первого и второго контура, а также системы безопасности и контроля. Модель содержит 990 объемов, 1153 соединений, 725 тепловых структур и 300 контрольных переменных. Нодализационные схемы первого контура блока №2 ААЭС показаны на рис. 1, 2 и 3.

Математическая модель реактора содержит опускной участок, нижнюю камеру реактора, активную зону и верхнюю камеру.

Тепловыделяющие сборки имитируются цилиндрическими тепловыми структурами с внутренним источником, мощность которого вычисляется с помощью математической модели точечной кинетики.

Тепловая мощность реактора рассчитывается как сумма мощности мгновенных нейтронов и мощности распада осколков деления. В расчете используются встроенные в комплексный теплогидравлический код RELAP5 данные для продуктов деления и делящихся материалов, данные о запаздывающих нейтронах вычисляются специальными кинетическими расчетами. В модели сделано допущение о не взаимосвязанности обратных эффектов реактивности.

Смоделированы все шесть петель реакторной установки. Математическая модель каждой петли содержит модели "холодной" и "горячей" ниток, парогенератора (ПГ), главного циркуляционного насоса (ГЦН) и главной запорной задвижки.

Компенсатор давления (КД) присоединен двумя трубопроводами к одной из петель.

Горизонтальная трубчатка парогенератора разделена на 9 параллельных пучков, каждый из которых разделен на 4 равных продольных узла. Математическая модель ПГ со стороны второго контура



содержит следующие элементы: пространство, занятое трубчаткой, паровое пространство над уровнем воды, зазор между пространством, занимаемым трубчаткой, и корпусом ПГ, и два предохранительных клапана ПГ.

Математическая модель содержит систему контроля предохранительных клапанов парогенератора и компенсатора давления. Система питательной воды ПГ, включающая в себя коллектор и трубопровод питательной воды, имитируется как соединение зависящее от времени.

Важнейшие системы контроля, такие как контроль давления первого контура, уровня воды в КД, уровня воды в ПГ, стопорные клапаны турбогенератора и аварийная защита реактора, вошли в модель для более полной имитации динамической характеристики АЭС.

Разработан и внедрен в комплексный теплогидравлический код RELAP5 алгоритм для решения уравнения теплового баланса систем, не поддающихся стандартному моделированию.

Такой системой является спринклерная система, которая предназначена для конденсации пара в конфайнменте и охлаждения воды в баке аварийного запаса борной кислоты (Б-8/2) при аварийных режимах. В исходных данных RELAP5 с помощью контрольных переменных моделируется уравнение энергетического баланса между водой, истекающей в конфайнмент, баком Б-8/2 и теплообменниками спринклерной системы.

Уравнение теплового баланса для такой системы будет иметь вид:

$$MC_{p,B-8}\frac{dT_{B-8}}{dt} = i_{кон}G_{кон} - i_{АПН}G_{АПН} - G_{тех}C_{тех}(T_{B-8} - T_{тех}). \qquad (1)$$

Для решения дифференциального уравнения (1) использован метод конечных разностей:

$$MC_{p,B-8}\frac{T^{n+1}_{B-8} - T^{n}_{B-8}}{\Delta t} = i^{n}_{кон}G^{n}_{кон} - i^{n}_{АПН}G^{n}_{АПН} - G_{тех}C_{тех}(T^{n}_{B-8} - T_{тех}), \qquad (2)$$

$$T^{n+1}_{B-8} = \frac{\left(i^{n}_{кон}G^{n}_{кон} - i^{n}_{АПН}G^{n}_{АПН}\right)\Delta t + \left(MC_{p,B-8} - G_{тех}C_{тех}\Delta t\right)T^{n}_{B-8}}{MC_{p,B-8}} + \frac{G_{тех}C_{тех}T_{тех}}{MC_{p,B-8}}. \qquad (3)$$

На каждом шаге температура воды в баке Б-8/2 рассчитывается с использованием энтальпии, расхода пароводяной смеси, истекающей в конфайнмент, и расхода воды, подаваемой насосами аварийной подпитки



© National Library of Armenia

первого контура. Из основного расчета теплогидравлического кода RELAP5 полученное значение температуры возвращается в основной расчет на следующем временном шаге.

Задача по определению температуры во всасывающем трубопроводе АСН разделена на две стадии. В первой стадии вычисляется температура в помещении, где проходит всасывающий трубопровод АСН, исходя из потери энергии через бетонные стенки в окружающую среду и поступления энергии от греющего трубопровода. Во второй стадии, исходя из рассчитанной температуры помещения, вычисляется температура во всасывающем трубопроводе.

Для расчета температуры воздуха в помещении используется точечная модель. Температура в помещении усреднена по всему объему и рассчитывается уравнением теплового баланса (4).

$$Mc_p \frac{dt}{d\tau} = R_h l_h (t_s - t) - R_{ata} S_r (t - t_{ata}) . \qquad (4)$$

Потери через бетонные стены и приток энергии от греющего трубопровода учитываются, соответственно, коэффициентом теплопередачи для бесконечной пластинки $R_{ata}$ (4) и линейным коэффициентом теплопередачи для бесконечного цилиндра $R_h$ (4).

Решая уравнения (4) относительно температуры воздуха в помещении, с учетом начального условия t(0)=0°C, получим:

$$t = t_0 e^{-\frac{(R_h l + R_{ata} S_r)\tau}{Mc_p}} + \frac{R_h l t_{ata} + R_{ata} S_r t_s}{R_h l + R_{ata} S_r} \times$$

$$\times \left( 1 - e^{-\frac{(R_h l + R_{ata} S_r)\tau}{Mc_p}} \right). \qquad (5)$$

Во второй стадии для расчета температуры воды во всасывающем трубопроводе АСН использовано уравнение теплового баланса, с граничными условиями $t(x,0) = 5^0 C, t(\pm H, \tau) = 5^0 C$:



$$\rho c_{p_w} S \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_w S \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - R_{cl_a} 2H(t - t_{ss}) . \qquad (6)$$

Для учета тепловых потерь в боковом направлении, в уравнение теплового баланса введен член, где, как функция от температуры по длине трубопровода, задается количество тепла, проходящего через боковую поверхность.

$$R_{cl_a} =$$

$$= \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_{asn}} \ln \frac{d_{asn} + 2\Delta_1}{d_{asn}} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_{asn} + 2\Delta_1 + 2\Delta_2}{d_{asn} + +2\Delta_1} + \frac{1}{h_{at_a}(d_{asn} + 2\Delta_1 + 2\Delta_2)}} . \qquad (7)$$

Решением уравнения (6) будет разложение в ряд Фурье по собственным функциям однородного уравнения:

$$t = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \varphi_n . \qquad (8)$$

Решение уравнения (6) для температуры воды в трубопроводе, с использованием (8), имеет вид:

$$t(x,\tau) = t_0 + (t_{ss} - t_o) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n} (1 - e^{-\xi_n \tau}) \cos\left(\frac{2n-1}{2H} \pi x\right) , \qquad (9)$$

$$\xi_n = \frac{R_{cl_a} 2H}{S\rho c_{p_w}} + a \left( \frac{2n-1}{2H} \pi \right)^2 ,$$

$$f_n = \frac{4 \frac{R_{cl_a} 2H}{S\rho c_{p_w}} \sin\left(\frac{2n-1}{2} \pi\right)}{(2n-1)\pi} .$$

Из уравнения (9) видно, что при стационарном состоянии ($\tau \to \infty$):

$$t_{s_asn}(x) = t_0 + (t_{ss} - t_o) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n} \cos\left(\frac{2n-1}{2H} \pi x\right) .$$

Минимальное значение температуры воды во всасывающем трубопроводе АСН будет равно:

$$t_{s_asn} = t_0 + (t_{ss} - t_o) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{f_n}{\xi_n} .$$



© National Library of Armenia

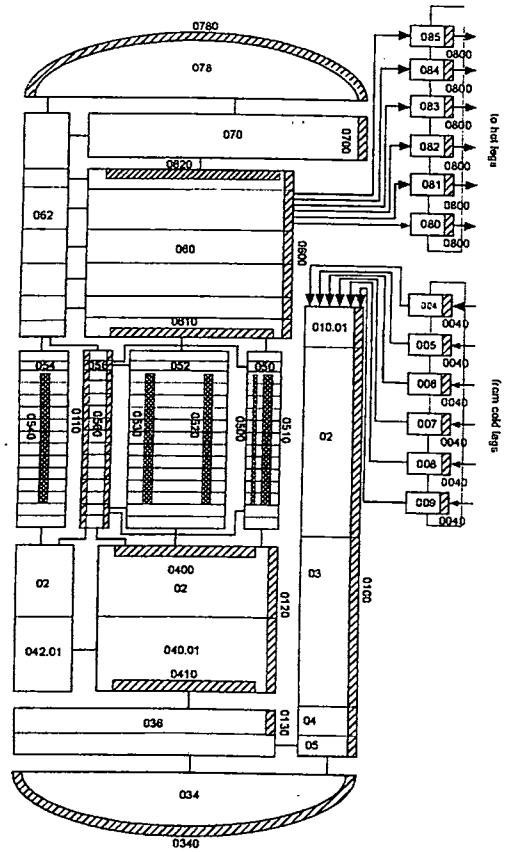


Рис. 1. Нодализационная схема блока 2 ААЭС для программного кода RELAP5/MOD3.2.2 – реактор

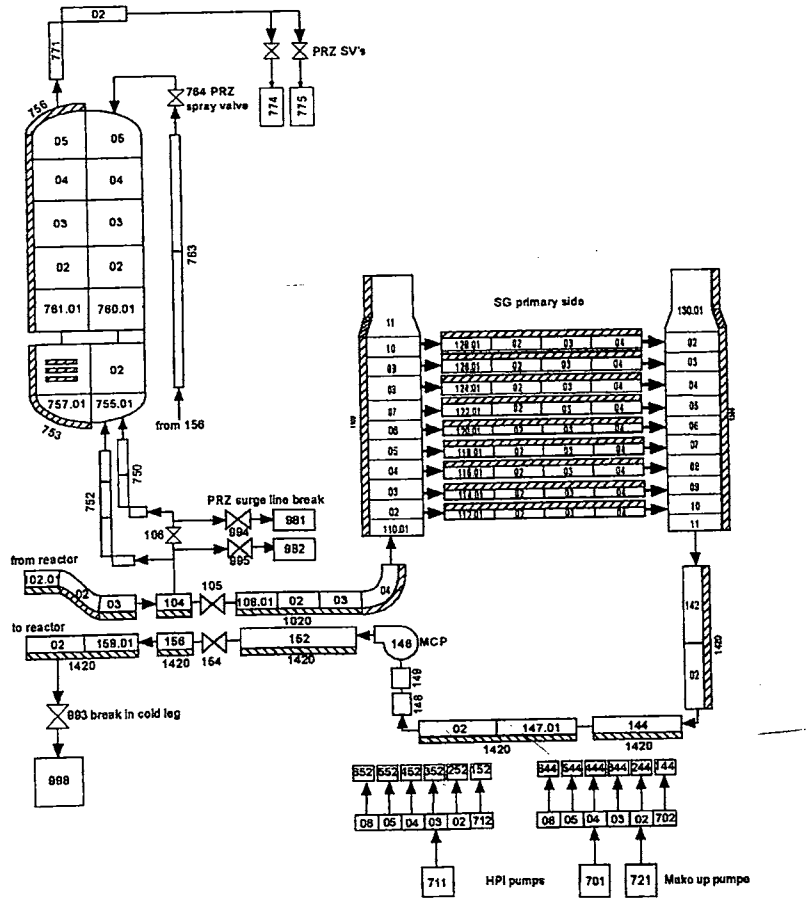


Рис. 2. Нодализационая схема блока 2 ААЭС для программного кода RELAP5/MOD3.2.2 – циркуляционная петля





© National Library of Armenia

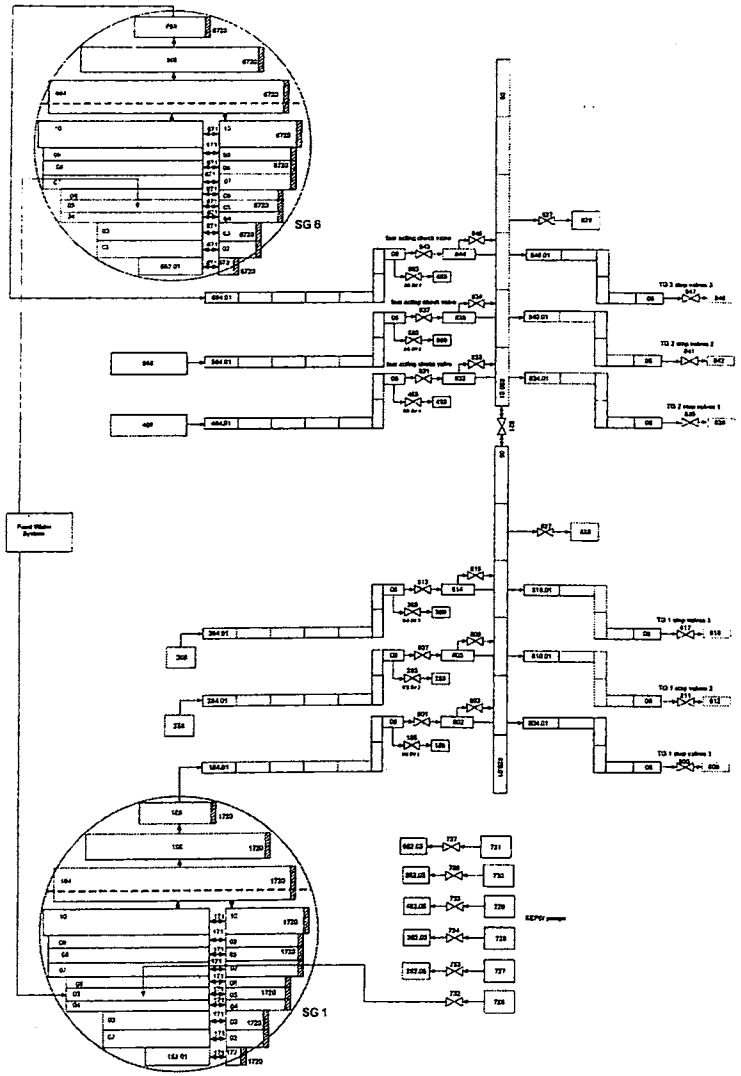


Рис. 3. Нодализационая схема блока 2 ААЭС для программного кода RELAP5/MOD3.2.2 – второй контур



***<u>В третьей главе</u>*** - "Анализ аварии с течью из первого контура эквивалентным диаметром Ду 200мм (Консервативный и реалистический подход)" - представлен анализ аварии с течью из первого контура эквивалентным диаметром Ду 200мм для Армянской АЭС. В частности, проведен консервативный анализ разрыва трубопровода, соединяющего компенсатор давления с "горячей" петлей, и частичный разрыв "холодной" нитки главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) эквивалентным диаметром Ду 200мм. При этом предполагается, что после закрытия стопорных клапанов обоих турбин, происходит полное обесточивание станции.

В настоящем проекте Армянской АЭС при полном обесточивании станции запускаются четыре дизель - генератора по фактору обесточивания.

После запуска дизель - генераторов по программе ступенчатого пуска 2 рода, предусмотрен запуск двух из шести насосов аварийной подпитки первого контура. Рабочая мощность каждого дизель - генератора равна 1500 кВт. Четыре дизель - генератора разделены на два независимых канала безопасности.

Мощность каждого насоса системы аварийной подпитки – 500 кВт. Однако пусковая мощность этих насосов – 1000 кВт, поэтому при обесточивании станции запускается только один из трех насосов каждой группы. Невозможность одновременного включения более, чем одного насоса каждой группы, связана с возможно неправильной синхронизацией двух дизель - генераторов на одну шину.

В данном исследовании консервативно предполагается, что один из каналов дизель - генераторов неработоспособен, но после запуска другого канала по программе ступенчатого пуска, в работу включаются два насоса системы аварийной подпитки первого контура. В настоящее время в программе ступенчатого пуска не предусмотрена такая конфигурация, однако в данной работе предполагается, что это будет возможно после модернизации программы.

Исходным событием аварии с разрывом трубопровода, соединяющего КД с "горячей" петлей, является разрыв на стыке соединительного трубопровода и "горячей" петли.

Результаты анализа показали, что повышение температуры оболочек твэлов продолжается до 760-ой секунды и достигает максимального значения 575 °С (рис. 4). К этому времени уровень в реакторе достигает вершины твэлов и температура оболочек твэлов начинает падать. Во время всего расчета температура оболочек твэлов намного ниже предела безопасности и нет опасности его достижения.



© National Library of Armenia

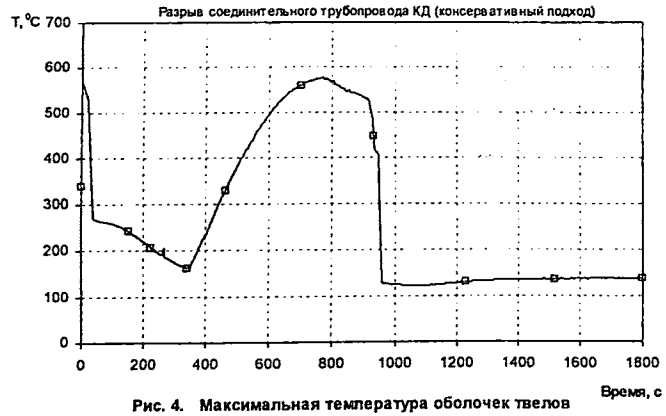


Рис. 4. Максимальная температура оболочек твелов

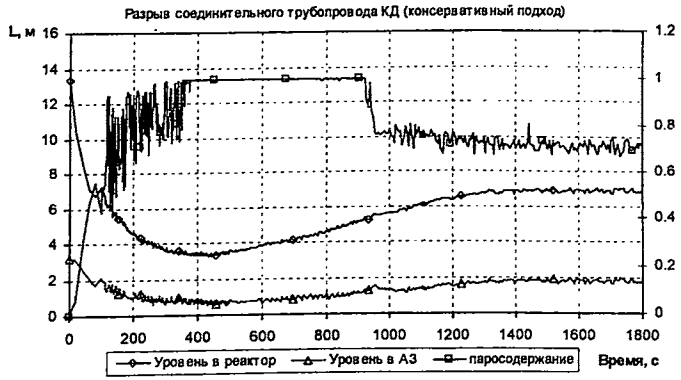


Рис. 5. Паросодержание в верхней части твэлов и уровень воды в АЗ и в реакторе

Исходным событием аварии с течью из "холодной" нитки ГЦТ эквивалентным диаметром Ду 200мм является частичный разрыв ГЦТ у входного патрубка реактора эквивалентным диаметром 200 мм.

Результаты анализа показали, что повышение температуры оболочки твэлов продолжается до 907 секунды и достигает максимального значения - 1235 °С (рис. 6). К этому времени уровень теплоносителя в реакторе достигает вершины твэлов, и температура начинает падать. В данной аварии температура оболочки твэла превышает максимально допустимое значение критериев приемлемости.



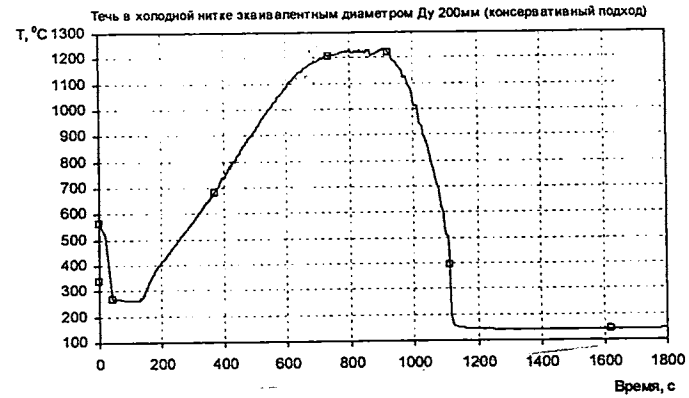


Рис. 6. Максимальная температура оболочек твелов

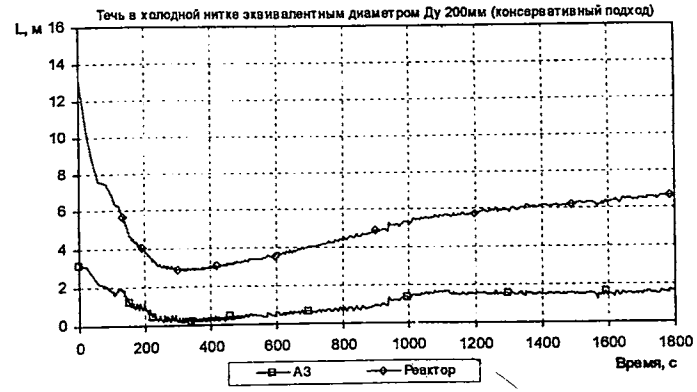


Рис. 7. Уровень воды в АЗ и в реакторе

Проведен анализ аварии с частичным разрывом "холодной" нитки ГЦТ эквивалентным диаметром Ду 200 мм с использованием реалистического подхода, в котором учитывается отказ одного дизель - генератора и предполагается, что три насоса системы аварийной подпитки первого контура включаются после запуска дизель – генераторов.

Система аварийной подпитки первого контура включает в себя два канала по три насоса в каждом, которые объединены в два напорных коллектора и независимо друг от друга подают раствор в петли ГЦК. Насосы одного из каналов подают воду на напор ГЦН-ов четных петель № 2,4,6 через коллектор продувки, а другого - на всас ГЦН-ов нечетных петель № 1,3,5 через коллектор возврата продувки. В рамках данного



© National Library of Armenia

исследования предполагается, что два насоса одного канала и один насос другого канала системы аварийной подпитки первого контура одновременно включаются после запуска дизель - генераторов.

Так как оба канала системы аварийной подпитки первого контура симметрично подсоединены к "холодным" ниткам ГЦК и исходя из того, что течь равновероятно может иметь место на всех шести "холодных" нитках ГЦК, возможны два независимых местоположения течи. Течь на одной из четных или нечетных "холодных" нитках ГЦК (рис. 8, 9)

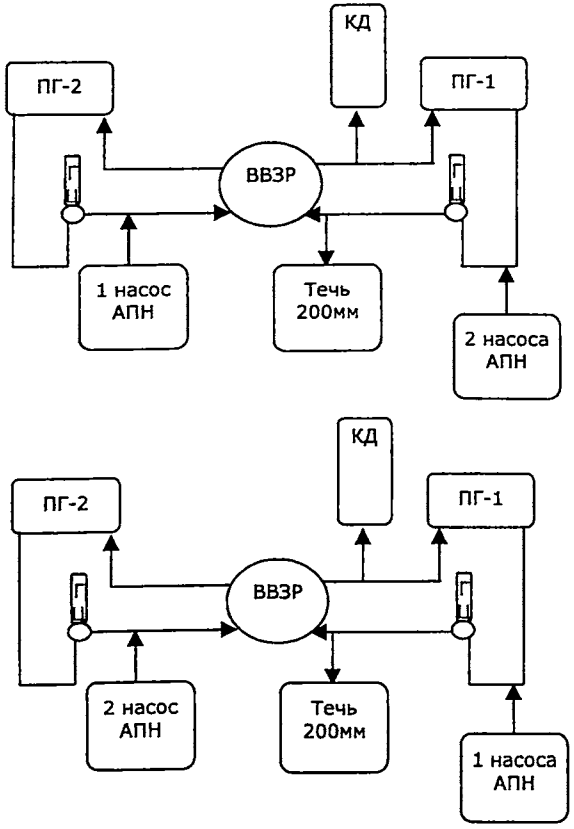


Рисунок 8. Схема подсоединения системы аварийной подпитки первого контура к петлям ГЦК при течи на одной из нечетных "холодных" ниток.



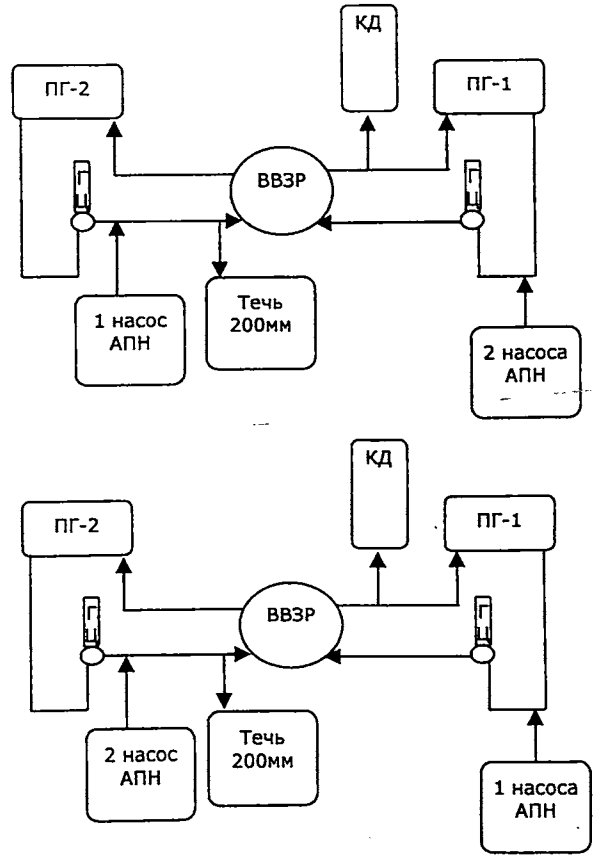


Рисунок 9. Схема подсоединения системы аварийной подпитки первого контура к петлям ГЦК при течи на одной из четных "холодных" ниток.

Исходя из вышесказанного, в данном анализе выбраны два варианта с различными граничными условиями, соответствующие наихудшей конфигурации охлаждения активной зоны:

Вариант 1: течь на одной из нечетных "холодных" ниток ГЦК; два насоса системы аварийной подпитки первого контура подключены на всас ГЦН нитки, имеющей частичный разрыв, через коллектор возврата очищенной продувки.



© National Library of Armenia

Вариант 2: течь на одной из четных холодных ниткок ГЦК; два насоса системы аварийной подпитки первого контура подключены на напор ГЦН нитки, имеющей частичный разрыв, через коллектор продувки.

Результаты анализа показали, что на 576 сек. в первом варианте уровень теплоносителя в реакторе уже достигает вершины твэлов, максимальная температура которых 843°С, и их температура начинает падать (рис. 10). Повышение температуры оболочки твэлов во втором варианте продолжается до 627 секунды. К этому времени уровень теплоносителя в реакторе достигает вершины твэлов, и температура оболочек твэлов также начинает снижаться (рис. 10).

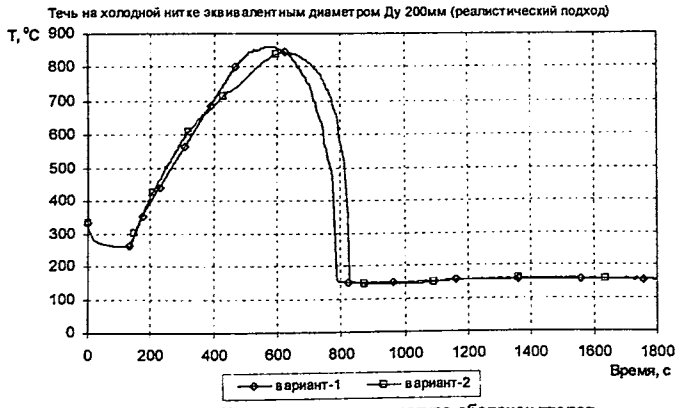


**Рис. 10. Максимальная температура оболочек твелов**

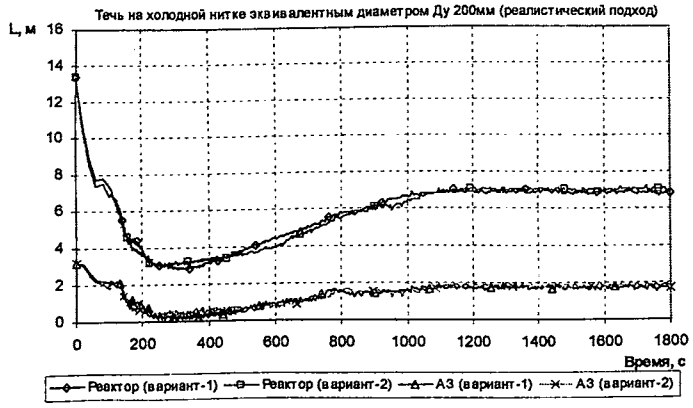


**Рис. 11. Уровень воды в АЗ и в реакторе**



Суммарное местное окисление оболочки в первом варианте достигает 0.148%, а во втором - 0.139%. Общее количество водорода, образовавшегося в результате реакции оболочек твэлов с пароводяной средой, в первом варианте достигает 0.17% а во втором - 0.14%.

***В четвертой главе*** "Расчетный анализ процедуры подпитка - сброс для первого контура блока №2 Армянской АЭС" проведен анализ возможности охлаждения первого контура при полной потере питательной воды ПГ.

Подпитка первого контура осуществляется системой аварийной подпитки, а сброс - через предохранительные клапаны КД - процедура подпитка – сброс (ПС). Также проведена оценка изменения температуры воды в баке Б-8/2 и оценена возможная ситуация, при которой аварийная питательная вода ПГ становится недоступной.

В анализе рассматривается гипотетический случай с полной потерей питательной воды в ПГ. Такой случай возможен при полном обесточивании станции, или вследствие разрушения турбинного помещения (где находятся системы аварийной и нормальной подпитки ПГ), или бака химически обессоленной воды (которая питает аварийные сейсмические насосы) по причине сейсмического воздействия. Предполагается, что реактор находится в конце кампании, когда имеет место максимальное остаточное энерговыделение в активной зоне. Анализ выполнен в две стадии. На первой стадии, предшествующей процедуре ПС до-ПС, реактор охлаждается естественной циркуляцией воды, еще оставшейся в ПГ. На второй стадии (процедура ПС) остаточное тепловыделение снимается при помощи процедуры ПС первого контура, которая включает подачу в первый контур охлажденной воды от насосов аварийной подпитки первого контура с одновременным сбросом пароводяной среды через систему ПК КД.

Результаты анализа стадии, предшествующей процедуре ПС, показали, что, в конце концов, ПГ-ры осушаются и остаточное энерговыделение превышает количество тепла, уносимого через ПГ-ры (рис. 12). В течение всего периода расчета (20000 сек.) процесс кипения в активной зоне не наблюдается и температура самого нагретого твэла не достигает критического значения 1200°С. В течение этого времени оператор должен восстановить снятие остаточного энерговыделения через ПГ-ры во второй контур или инициировать процедуру ПС.



© National Library of Armenia

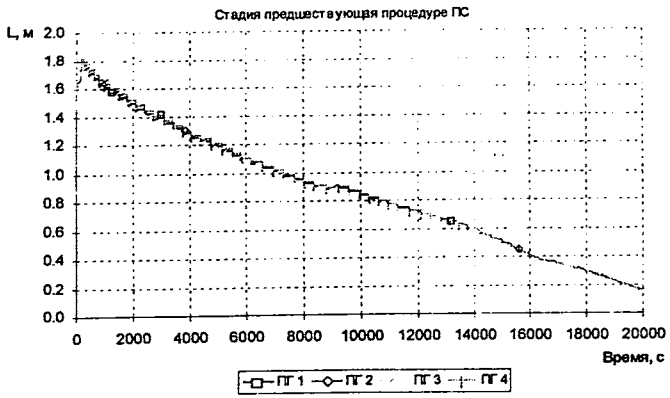


Рис. 12 Уровень в ПГ

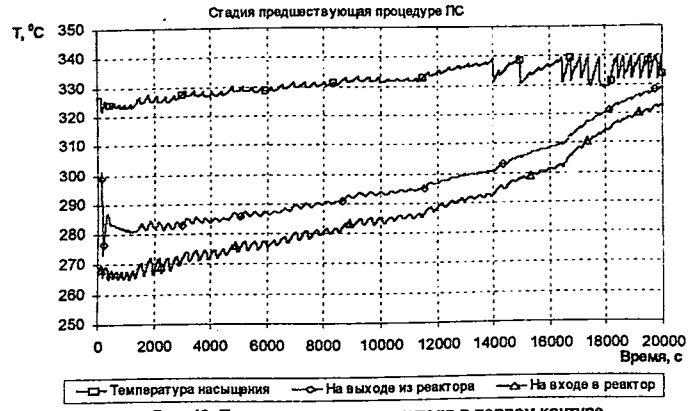


Рис. 13 Температура теплоносителя в первом контуре

Время начала **ПС** в данном анализе - 11000 сек после срабатывания АЗ-1. Уровень в ПГ 0.8м, а остаточное энерговыделение начинает превышать количество тепла, уносимого через ПГ ко второму контуру (рис. 14). Данное значение времени (11000) является критическим параметром начала процедуры ПС, так как после этого времени наблюдается, устойчивый рост параметров первого контура (рис. 13).

Начало процедуры **ПС** инициируется оператором одновременным открытием одного ПК КД и включением двух насосов аварийной подпитки первого контура.



Рассмотрены два режима процедуры **ПС**. В первом учитывалась работа одного насоса НБС через один теплообменник спринклерной системы. Во втором - работа двух насосов НБС через два теплообменника спринклерной системы.

Результаты анализа процедуры **ПС** показали, что в течение **ПС** температура (рис. 14) и давление первого контура снижаются до тех пор, пока реактор не придет к состоянию, при котором возможен безопасный останов.

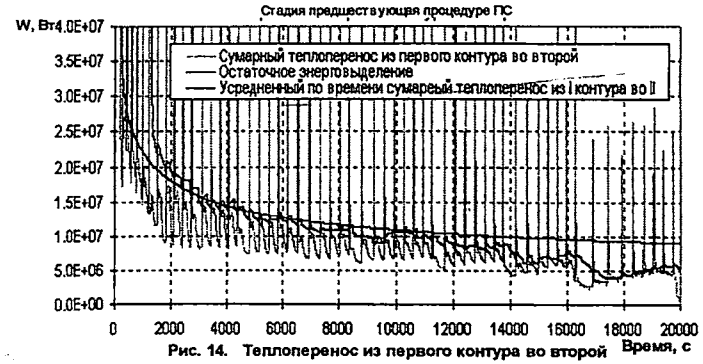


Рис. 14. Теплоперенос из первого контура во второй

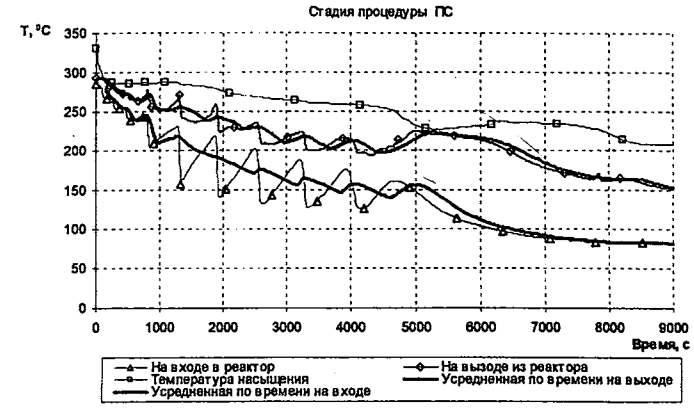


Рис. 15. Температура теплоносителя в первом контуре

Для расчета температуры в баке Б-8/2, с помощью контрольных переменных моделируется уравнение энергетического баланса между водой, истекающей из ПК КД, баком Б-8/2 и теплообменником



© National Library of Armenia

спринклкрной системы (рис. 16). Для решения этого дифференциального уравнения использовался метод, изложенный во второй главе.

Цель данного анализа - выяснить, остается ли вода в баке Б-8/2 недогретой до температуры насыщения при работе двух насосов НБС. В расчете принято допущение, что вода, возвращающаяся в бак Б-8/2 из теплообменников спринклерной системы, охлаждена до выходной температуры охлаждающей теплообменники технической воды. Начальная температура воды в баке Б-8/2 равна 55$^0$С, температура технической воды на входе в теплообменники 35$^0$С.

Результаты анализа расчета температуры в баке Б-8/2 показали, что в первом режиме температура воды в баке Б-8/2 достигает температуры кипения, а во втором - максимальное значение 78$^0$С (рис. 17).

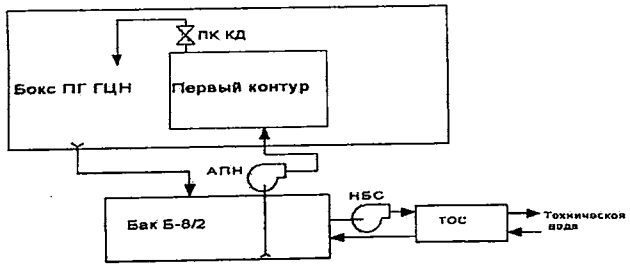


Рис. 16. Схема движения теплоносителя во время процедуры ПС

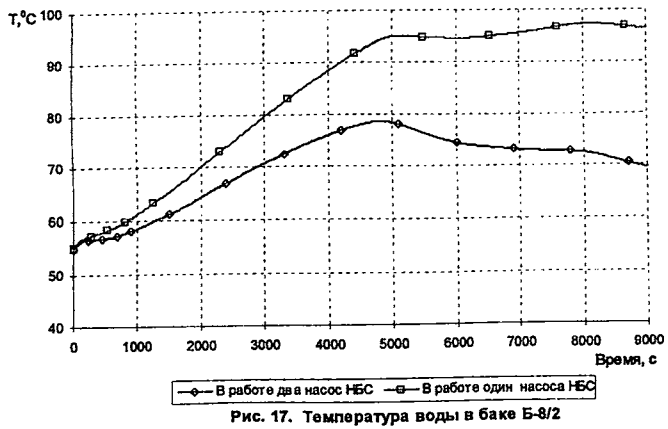


Рис. 17. Температура воды в баке Б-8/2



Вариантами возможных ситуаций, при которых система аварийной питательной воды ПГ становится недоступной, являются экстремальные климатические условия. При низких температурах окружающей среды возможно замерзание воды во всасывающих трубопроводах систем аварийного расхолаживания высокого (АСН) давления.

Баки с запасом обессоленной воды (БЗОВ) находятся на площадке АЭС. Основная роль данных баков - обеспечение химобесоленной водой насосов систем аварийного расхолаживания высокого и низкого давления при крупных авариях оборудования или проектных сейсмических воздействиях в случае повреждений основного оборудования второго контура, исключающих возможность штатного расхолаживания АЭС. Химобесоленная вода из БЗОВ подается на всас АСН по всасывающему трубопроводу АСН, который, проходя под землей, соединяется с БЗОВ в бетонном помещении. Бетонное помещение находится также на площадке АЭС и граничит с окружающей средой.

По технологическому регламенту температура в БЗОВ должна поддерживаться не ниже 5$^0$С. В холодное время года вода в баках обогревается паром. Пар подается в БЗОВ по обогревающему трубопроводу и проходит через то же самое помещение. Тем самым он является единственным источником нагрева данного помещения.

Бетонное помещение, где проходят всасывающий трубопровод АСН и обогревающий трубопровод, в холодное время не обогревается. Единственным источником нагрева этого помещения являются потери энергии от обогревающего трубопровода. Исходя из вышесказанного, при температуре окружающей среды ниже 0$^0$С возможны понижения температуры в бетонном помещении и, тем самым, замерзание воды во всасывающем трубопроводе АСН. Для расчета температуры во всасывающем трубопроводе АСН используется методика, изложенная во второй главе.

Результаты расчетов температуры воды во всасывающем трубопроводе аварийного сейсмического насоса АЭС при низких температурах окружающего воздуха показали, что при температуре окружающей среды равной –40$^0$С возможно замерзание воды в всысывающем трубопроводе АСН, что может привести к невозможности подачи воды от системы аварийного расхолаживания высокого давления в парогенераторы при аварийных режимах. Температура окружающей среды, при которой температура воды во всасывающем трубопроводе будет выше 0$^0$С в течении 22 часов, должна быть не ниже –31.50С.

***В пятой главе*** "Определение температуры хрупкого разрушения для металла корпуса реактора с учетом радиационного воздействия"



© National Library of Armenia

проведен анализ по определению температуры хрупкого разрушения для металла корпуса реактора с учетом радиационного воздействия.

Так как направленность основной диссертационной работы это анализ аварий с потерей теплоносителя из первого контура то возникает вопрос о механизмах, которые приводят к этим авариям.

Существуют три механизма, при котором имеет место авария с потерей теплоносителя из первого контура.

1. Открытия и не закрытие предохранительных клапанов компенсатора давления.
2. Течь или разрыв из трубопроводов первого контура.
3. Разрыв корпуса реактора.

Однако по сравнению с течью из трубопроводов первого контура аварии с разрывом корпуса реактора приводят к более тяжелым последствиям. Исходя из этого, в данной работе анализируются механизмы, приводящие к разрыву корпуса реактора.

В отличие от обычных сосудов высокого давления корпус реактора подвергается воздействию мощного нейтронного и $\gamma$-излучения, вызывающего значительные изменения свойств материала. Наиболее неблагоприятными из них является потеря пластичности, и увеличение склонности стали к хрупким разрушениям. Большую роль для определения радиационной стойкости корпуса реактора играет расчет критической температуры хрупкого разрушения ($T_к$).

Критическая температура хрупкости корпуса реактора вычисляется следующим эмпирическим выражением:

$$T_{кр}=T_{ко}+\Delta T_{ст}+\Delta T_N+\Delta T_ф. \qquad (10)$$

Здесь $T_{ко}$- критическая температура хрупкости материала корпуса реактора до начала его эксплуатации; $\Delta T_{ст}$ учитывает сдвиг температуры перехода металла корпуса в хрупкое состояние, вследствие процесса старения; $\Delta T_N$- сдвиг температуры вследствие периодически изменяющихся нагрузок; $\Delta T_ф$- сдвиг температуры вследствие интенсивного нейтронного облучения.

Основным фактором, определяющим степень радиационного повреждения металлов, является величина флюенса быстрых нейтронов и температура облучения.

Для определения сдвига температуры хрупкого разрушения вследствие интенсивного нейтронного облучения используется следующее эмпирическое выражение:

$$\Delta T_ф=(A_ф)F^{1/3}. \qquad (11)$$

Где $A_ф$ - параметр, зависящий от примесей внедрения.



$$A_ф=800[(\%P)+0.07(\%Cu)]. \qquad (12)$$

В ранее проведенных исследованиях при определении критической температуры хрупкого разрушения не учитывалось влияние изменения химического состава металла в течение эксплуатации. В данном анализе этот эффект был учтен.

Для исследования этой зависимости рассмотрена следующая схема изменения концентрации примесей внедрения для металла корпуса реактора ВВЭР-440/230:

$$^{30}_{14}Si + n = ^{31}_{14}Si^* \xrightarrow[158мин]{\beta^-} ^{31}_{15}P, \qquad (13)$$

$$^{31}_{15}P + n = ^{32}_{15}P^* \xrightarrow[44.3дней]{\beta^-} ^{32}_{16}S, \qquad (14)$$

$$^{63}_{29}Cu + n = ^{64}_{29}Cu^* \xrightarrow[12.8час]{\beta^-} ^{64}_{30}Zn, \qquad (15)$$

$$^{64}_{28}Ni + n = ^{65}_{28}Ni^* \xrightarrow[2.6час]{\beta^-} ^{65}_{29}Cu. \qquad (16)$$

Для решения вышеуказанных реакций, были построены соответствующие системы дифференциальных уравнений, решение которых было найдено численными методами.

Согласно полученным результатам изменение химического состава металла в течении эксплуатации (30 лет) не влияет на $\Delta T_ф$ и можно пренебречь этой зависимостью. Расчетное значение для $\Delta T_ф$ в течении эксплуатации 14 лет (к 2000г) и 30 лет (проектный срок эксплуатации) равно соответственно 96.24$^0$C и 130.7$^0$C.

Для расчета $\Delta T_N$ используется следующее эмпирическое выражение:

$$\Delta T_N = 20\Sigma\frac{N_i}{[N_o]_i}. \qquad (17)$$

где $N_i$ - количество циклов нагружения, $[N_o]_i$ - допускаемое количество циклов.

Исходя из циклов нагружения, полученных для ААЭС, результаты расчета показали что $\Delta T_N$<1$^0$C.

Значения $T_{ко}$ равно 26$^0$C, что соответствует начальному значению температуры хрупкого разрушения для металла типа 15Х2МФА.

Сдвиг критической температуры для стали типа 15Х2МФА по причине старения равно нулю.



© National Library of Armenia

Обобщая полученные результаты по расчету критической температуры хрупкости для металла корпуса реактора АЭС с ВВЭР-440/230 вследствие интенсивного нейтронного облучения приходим к выводу, что при эксплуатации корпуса 14 лет $T_{кр}$ достигает значения - 122.24$^0$С, а для 30 лет - 156.7$^0$С.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | |
|---|---|
| ААЭС | Армянская атомная электростанция |
| ВВЭР | Водо-водяной энергетический реактор |
| АСН | Аварийный сейсмический насос |
| ПГ | Парогенератор |
| КД | Компенсатор давления |
| АЗ | Активная зона |
| ГЦН | Главный циркуляционный насос |
| Б-8/2 | Бак аварийного запаса борной кислоты |
| ГЦК | Главный циркуляционный контур |
| ПС | Подпитка – сброс |
| ПК КД | Предохранительный клапан компенсатора давления. |
| НБС | Насос бора спринклерной установки |
| ТОС | Теплообменник спринклерной установки |
| БЗОВ | Бак с запаса обессоленной воды |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана математическая модель первого и второго контуров Армянской АЭС блока №2 на базе комплексного теплогидравлического кода RELAP5.
2. Результаты консервативного анализа для аварий с течью из первого контура эквивалентным диаметром 200мм показали, что в случае разрыва соединительного трубопровода КД температура оболочек твэлов не достигает 1200°С. Однако, при аварии с течью в "холодной" нитке ГЦТ эквивалентным диаметром Ду 200мм, температура оболочки достигает максимально допустимого значения для температуры оболочки - 1200°С.
3. Результаты реалистического анализа для аварий с течью из первого контура эквивалентным диаметром 200мм показали, что температура оболочек твэлов не достигает 1200°С.
4. Исходя из результатов консервативного и реалистического анализа можно заключить, что понятие максимальной проектной аварии можно расширить до аварии с течью из первого контура диаметром до 200мм, с использованием имеющейся системы аварийной подпитки первого контура.
5. Результаты анализа для аварии с полной потерей питательной воды ПГ показали, что оператор имеет достаточно времени, около 5 часов, для восстановления снятия остаточного энерговыделения через ПГ-ры во второй контур или инициировать процедуру **ПС**.
6. Для инициирования процедуры ПС было определено и обосновано критическое значение.
7. Оценка температуры воды в баке Б-8/2 показала, что в течение процедуры ПС температура воды не достигает критического значения при работе двух насосов НБС через два теплообменника спринклерной системы.
8. Результаты расчета температуры воды во всасывающем трубопроводе АСН показали, что минимальная температура окружающей среды при которой температура воды во всасывающем трубопроводе будет выше 0$^0$С в течение 22 часов, должна быть не ниже –31.5$^0$С (которое имеет обеспеченность 0.1%).
9. Изменение химического состава металла, как следствие нейтронного облучения в течение эксплуатации (30 лет), не приводит к значительному влиянию на критическую температуру хрупкого разрушения.

**Основные положения работы отражены в следующих публикациях:**


1. А. Геворкян, В. Григорян Ц. Малакян Изменение структуры металла корпуса реактора при работе под радиацией // Годичная научная конференция ГИУА. Сборник материалов, Ереван, 2001, том 1, с.174-175.
2. A. Amirjanyan, T. Malakyan, Jae Jo, Analysis of primary side feed and bleed operation at Armenian NPP Unit 2// Proceedings of the 10TH International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, VA, USA, 2002 p. 305.
3. А. Геворкян, Ц. Малакян Иследование запроектной аварии "Течь из первого контура эквивалентным диаметром Ду 200мм " для Армянской атомной станции // Годичная научная конференция ГИУА. Сборник материалов, Ереван, 2002, том 1, с.183-185.
4. A. Amirjanyan, T. Malakyan, Jae Jo, Sensitivity Analysis of 200mm LOCA at Armenian NPP Unit 2// Proceedings of the 12TH International Conference on Nuclear Engineering, Arlington, VA, USA, 2004 p. 243.




© National Library of Armenia

5. Ц. Малакян Расчет температуры воды во всасывющем трубапроводе аварийного сейсмического насоса ААЭС при низких температурах окружающего воздуха// ИЗВЕСТИЕ НАН РА и ГИУА, том LVII, число 1, 2004 г. с. 100-106.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ատենախոսությունում ուսումնասիրված են ջերմահիդրավլիկական պրոցեսները՝ ԱԷԿ-ների արտանախագծային վթարների դեպքում: Մանրամասն վերլուծության են ենթարկվել միջուկային անվտանգությանը վերաբերվող միջազգային նորմերը և ելնելով դրանից բացահայտվել են ՋՋԷՌ տեսակի ռեակտորներով ԱԷԿ-ների անվտանգության հիմնական «պակասորդները»: Կատարված հետազոտություններով հիմնավորված է ՋՋԷՌ-440/230 տեսակի ռեակտորներով ԱԷԿ-ների անվտանգության զգալի «պակասորդը»: Կատարված հետագա ուսումնասիրությունների անրաժեշտությունը պայմանավորված է ԱԷԿ-ների արտանախագծային վթարների ժամանակ ռեակտորի ակտիվ գոտու հովացման «պակասորդի» վերացման խնդրով:

Ատենախոսությունում մշակված է ՋՋԷՌ-440/230 տեսակի ռեակտորներով ԱԷԿ-ների առաջին և երկրորդ կոնտուրների մաթեմատիկական մոդել՝ հիմնված RELAP-5 համալիր կոդի վրա: Այն թույլ է տալիս կատարել ԱԷԿ-ներում տեղի ունեցող տարբեր վթարային և անցումային ռեժիմների ժամանակ ջերմահիդրավլիկական պրոցեսների ուսումնասիրություններ: Մշակված մաթեմատիկական մոդելի օգնությամբ, Հայկական ԱԷԿ-ի օրինակի վրա, կատարված են. առաջին կոնտուրից ջերմակրրի 200մմ տրամանագծով խողովակներից արտահոսքի և շոգեգեներատորների սնող ջրի ամբողջական կորուստի դեպքում, ջերմահիդրավլիկական պրոցեսների հետազոտություններ: Աշխատանքում քննարկված է նաև վթարների առաջացման հիմնապատճառները:

Հետազոտությունների արդյունքում առաջարկվել են Հայկական ԱԷԿ-ի համար արդիականացումներ, որոնց իրականացումը կբերի ռեակտորի ակտիվ գոտու հովացման «պակասորդի» վերացմանը՝ մի շարք արտանախագծային վթարների դեպքում: Այդ արդիականացումների իրականացումը չի պահանջում զգալի ֆինանսական ներդրումներ, և արդիականացումները նախատեսվում է իրականացնել Հայկական ԱԷԿ-ում առկա համակարգերի օգտագործմամբ:

15.05.2014

© National Library of Armenia

© National Library of Armenia