

**Расчетный анализ процессов в защитной оболочке и  
реакторной установке АЭС-92 при аварии с крупными течами первого  
контура и потере источников переменного тока на АЭС нового поколения**

**В.М. Беркович, Г.С. Таранов, В.Г. Пересадько, М.Б. Мальцев**

АЭП, г.Москва

**А.К. Подшибякин, С.И. Зайцев, А.М. Шумский**

ОКБ «Гидропресс», Подольск

## **1 ВВЕДЕНИЕ**

В проекте АЭС нового поколения повышенной безопасности с реакторной установкой ВВЭР-1000 для предотвращения перехода запроектных аварий в тяжелую стадию, характеризующую сверхпроектным повреждением активной зоны, предусмотрены новые пассивные системы безопасности: гидроемкости второй ступени низкого давления (ГЕ-2) и система пассивного отвода тепла (СПОТ). Пассивные системы безопасности должны обеспечить охлаждение топлива активной зоны при авариях с потерей теплоносителя, сопровождающихся отказом активной части системы аварийного охлаждения активной зоны (например, при полной потере источников переменного тока, включая дизель-генераторы), длительностью до 24 часов.

В докладе рассмотрена типичная запроектная авария, которая является определяющей для формирования проектной основы указанных пассивных систем: разрыв ГЦТ Ду 850 на входе реактора с отказом всех источников электроснабжения переменного тока на 24 часа.

Расчетный анализ теплогидравлических процессов в реакторной установке и помещениях контайнмента, которые образуют зону локализации аварии, выполнен по российским кодам ТЕЧЬ-М и АНГАР.

## **2 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Атомная станция нового поколения, АЭС-92, по международной шкале относится к усовершенствованному АЭС с легководными реакторами (ALWR).

Исходной предпосылкой при разработке проекта станции было учтено, что ввод в эксплуатацию новых блоков планируется после 2000 года. Поэтому технические решения, сформулированные концепцией проекта, были направлены на:

- достижение качественно нового уровня безопасности по сравнению с действующими блоками АЭС;

- соответствие проекта рекомендациям МАГАТЭ, ИНСАГ, новым российским требованиям и требованиям к новым европейским проектам АЭС (EUR);

- улучшение экономических характеристик проекта по сравнению с действующими;

- создание практического задела для создания к 2020 году энергоблока большой мощности с развитыми свойствами внутренней самозащищенности.

При разработке проекта АЭС были реализованы эволюционность проекта, внесены обоснованные российской и мировой практикой усовершенствования оборудования и систем станции, а также применены новые решения в структуре систем безопасности на основе принципа технологического разнообразия.

### **2.1. Эволюционность проекта**

Одним из важнейших положений проекта АЭС был принят принцип эволюционности. Т.е. повышенная безопасность, надежность и экономичность нового объекта достигается за счет применения процессов и компонентов широко известных и хорошо себя зарекомендовавших в практике референтных объектов – действующих АЭС.

Проект АЭС-92 учитывает накопленный опыт строительства и эксплуатации 18 блоков с российскими реакторами типа ВВЭР-1000.

Проект характеризуется следующими отличительными особенностями от серийных АЭС с РУ В-320:

- В проекте учтены во внимание последние требования норм безопасности, действующие в России.

- Применена усовершенствованная реакторная установка.

- В проекте рассмотрены и учтены запроектные аварии реактора и предполагаемые переходные процессы без быстрого останова реактора (ATWS).

- Расчетный срок эксплуатации основного технологического оборудования увеличен с 30 до 40 лет.

- Реактор и вспомогательные системы первого контура устанавливаются внутри двух цилиндрических защитных оболочек - внутренней, рассчитанной на полное давление во время аварии, и наружной, рассчитанной на все экстремальные внешние воздействия; между оболочками имеется контролируемый кольцевой зазор.

- Внутренняя герметичная оболочка доступна при работе блока на мощности.

- В защитных оболочках предусмотрен транспортный шлюз для транспортировки корпуса реактора, парогенераторов и топлива.

- Топливный бассейн находится в объеме внутренней защитной оболочки и рассчитан на хранение отработанного топлива в течение 10 лет. В проекте отсутствует отдельно стоящее здание хранилища отработанного топлива.

## 2.2. Принцип технологического разнообразия в структуре систем безопасности

При поиске технических решений, направленных на достижение качественно нового уровня безопасности установлено, что повышение безопасности возможно на основе развития инженерных принципов защиты в глубину. В новом проекте повышение надежности защиты в глубину реализуется сочетанием технологического и конструктивного разнообразия в системах, выполняющих критические функции безопасности.

При выборе технологического разнообразия предпочтение отдано сочетанию активных и пассивных систем безопасности, в первую очередь в отношении таких критических функций безопасности как:

- быстрое приведение реактора в подкритическое состояние;
- отвод остаточных энерговыделений от реактора, в том числе при течах теплоносителя первого контура;
- поддержание материального баланса теплоносителя в корпусе реактора;
- охлаждение бетонного контаймента в аварийных режимах и ограничение поступления энергии в контаймент при запроектных авариях;
- защита контаймента от опасного повышения давления при тяжелых авариях и глубокая очистка протечек из контаймента от радиоактивных веществ;
- подавление водорода, выделяющегося в контайменте при авариях;
- локализация и охлаждение топливного расплава при тяжелых авариях.

Технологическое разнообразие в форме сочетания активных и пассивных систем дало возможность практически избавиться от влияния отказов по общей причине и осуществить качественное и количественное повышение уровня безопасности, по сравнению с АЭС предыдущих поколений. Если для серийных АЭС частота тяжелого повреждения активной зоны (ПАЗ) составляет  $1,3 \times 10^{-5} \div 1,8 \times 10^{-5}$ , то для АЭС –92 расчетная частота ПАЗ  $-5,5 \times 10^{-8}$ .

### 2.2.1. Пассивные системы безопасности.

К числу пассивных систем относятся системы, не требующие для своей работы энергоисточника.

Реакторная установка В-320 имеет в своем составе пассивную систему гидроемкостей первой ступени.

Новыми пассивными системами являются:

- система гидроемкостей второй ступени, ГЕ-2;
- система пассивного отвода остаточного тепла, СПОТ;
- пассивная система быстрого ввода бора, СБВБ
- система пассивного удаления водорода из зоны локализации ;
- система удержания расплавленной активной зоны вне корпуса реактора;
- пассивная система фильтрации протечек из контаймента, ПСФ;
- система сдувки неконденсирующихся газов из трубчатки парогенераторов (ССНГ).

Пассивные системы СПОТ, ГЕ-2, СБВБ и ПСФ предотвращают переход широкого класса запроектных аварий в тяжелую стадию и ограничивают величину радиоактивного выброса от АЭС при этих авариях.

Технологическая схема этих систем дана на рис 1.

### **3 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОБЛОКА И СИСТЕМ АЭС**

#### **3.1 Технические характеристики реакторной установки В-392**

Технические характеристики реакторной установки В-392 в номинальном режиме даны в таблице 1

Таблица 1

Наименование параметра	Величина
Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	3000
Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, МПа	15,7
Расход теплоносителя через реактор, м <sup>3</sup> /ч	86000
Давление пара на выходе из парогенератора, МПа	6,27

#### **3.2 Технические характеристики пассивных систем АЭС, обеспечивающих преодоление запроектной аварии**

##### **3.2.1 Система гидроемкостей первой ступени.**

Система обеспечивает подачу водного раствора борной кислоты концентрацией 16 г/кг в реактор для охлаждения активной зоны и ее залива при авариях с потерей теплоносителя, когда давление в первом контуре падает ниже 5,9 МПа.

Система выполняет заданные функции при любом, требующем ее работы,

исходном событии (включая течи, вызывающие зависимый отказ одного из каналов системы) с учетом одного независимого от исходного события единичного отказа в одном из каналов.

Основными компонентами системы ГЕ-1 являются гидроемкости, трубопроводы и арматура.

Общий запас воды в емкостях  $200 \text{ м}^3$ , что обеспечивает требуемый в начальный период аварии объем, подаваемый в реактор, с учетом того, что часть воды остается в ГЕ после их отключения.

Трубопроводы от гидроемкостей подсоединены непосредственно к реактору. Подача раствора борной кислоты осуществляется в напорную и сборную камеры реактора.

С помощью двух последовательно расположенных обратных клапанов во время нормальной эксплуатации каждая емкость отделена от реактора. Когда давление в реакторе падает ниже давления в емкости, обратные клапаны открываются и борированная вода из емкости поступает в реактор.

Проектные параметры гидроемкостей первой ступени приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Проектные параметры гидроемкостей первой ступени

Наименование параметра	Величина
Количество, шт.	4
Давление расчетное, рабочее, МПа	6,4
Давление номинальное стационарного режима, МПа	5,9
Температура рабочая, °С	55 – 60
Объем гидроемкости, $\text{м}^3$	60
Объем воды в гидроемкости, $\text{м}^3$	50
Температура расчетная (для обоснования прочности), °С	90
Давление гидроиспытания, МПа	8,3
Температура гидроиспытания, °С, не менее	20
Среда, раствор борной кислоты, г/кг	16
Мощность блоков ТЭН, кВт	90

Объем и давление азота в емкости, гидравлическое сопротивление трубопроводов выбраны из условия обеспечения необходимого для охлаждения активной зоны темпа залива в первый период аварии.

Концентрация бора в емкостях выбрана из условия обеспечения подкритичности активной зоны реактора при ее расхолаживании.

### 3.2.2 Система гидроемкостей второй ступени.

Гидроемкости второй ступени предназначены для пассивной подачи раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг в активную зону реактора в течение не менее 24 часов. Система включается в работу при течах первого контура и снижении давления в реакторе  $P \leq 1,5$  МПа.

При разгерметизации первого контура гидроемкости второй ступени совместно с ГЕ-1 и СПОТ обеспечивают охлаждение активной зоны реактора.

Для обеспечения выполнения этого требования в проекте системы гидроемкостей второй ступени реализовано:

- профилирование расхода, подаваемого в активную зону, по мере снижения мощности остаточных тепловыделений;
- общий объем теплоносителя в гидроемкостях 960 м<sup>3</sup>;
- объем теплоносителя выбран из условия обеспечения в течение 24 часов надежной подпитки реактора теплоносителем при работе СПОТ в режиме расхолаживания.

Гидравлическая схема одного канала ГЕ-2 представлена на рис 2.

Система состоит из четырех групп гидроаккумулирующих емкостей, по две в каждой группе, находящихся при нормальных условиях эксплуатации под атмосферным давлением.

Емкости представляют собой вертикальные цилиндрические сосуды, размещенные на площадке обслуживания центрального зала на высоте, обеспечивающей по отношению к реактору требуемый для расхода теплоносителя из ГЕ-2 гидростатический напор.

По линии слива гидроемкости второй ступени через профилирующий расход коллектор (поз.6 рис. 2) подключены к трубопроводам подсоединения к реактору гидроемкостей первой ступени в неотключаемой от первого контура части.

В верхней части гидроемкости второй ступени через специальные невозвратно - открывающиеся обратные клапаны (поз. 5 рис. 2) подключены к холодным ниткам главных циркуляционных трубопроводов в зоне непосредственной близости их к коллекторам ПГ (на вертикальных участках). Специальные обратные клапаны настроены

на открытие при снижении давления в контуре до 1,5 МПа, после чего давление в гидроемкостях возрастает от атмосферного до давления в первом контуре. В случае повышения давления в первом контуре клапаны остаются открытыми.

Вода из гидроемкостей поступает в реактор через коллектор (поз. 6 рис. 2), имеющий отводные патрубки с ограничительными шайбами. Пока уровень находится выше верхнего патрубка, расход воды максимальный и определяется пропускной способностью четырех линий. При прохождении уровня от верхнего бокового патрубка  $K_3$  до нижнего патрубка  $K_1$  расход воды - промежуточный и определяется суммарной пропускной способностью соответственно трех и двух параллельных линий. Минимальный расход воды возникает после того, как уровень окажется под нижним патрубком  $K_1$  и будет определяться пропускной способностью только шайбы, установленной на линии АС.

#### Функционирование при авариях с течью первого контура

При возникновении аварийного режима с течью первого контура по мере снижения давления в реакторе происходит срабатывание гидроемкостей первой ступени (при  $P < 5,9$  МПа), а затем гидроемкостей второй ступени (при  $P < 1,5$  МПа).

Расходная характеристика системы ГЕ-2 имеет 4 ступени подачи раствора. Величина расхода и длительность ступени даны в таблице 2.

Таблица 2.

№ ступени	I	II	III	IV
Расход $G$ , кг/сек	40	20	13,2	6,4
Длительность $\tau$ , сек	4000	6000	20000	56400

#### 3.2.3 Система пассивного отвода тепла (JNB50-80)

Система пассивного отвода тепла (СПОТ) предназначена для длительного отвода остаточных тепловыделений реактора в запроектных авариях с потерей всех источников электроснабжения переменного тока. В случае течи в первом контуре отвод остаточных тепловыделений система обеспечивает совместно с гидроемкостями второй ступени.

Система состоит из четырех независимых каналов (поз. 6,7,8 рис.1 ), по одному на

каждый парогенератор РУ. Каждый канал включает в себя четыре теплообменника - конденсатора, трубопроводы пароконденсатного тракта с арматурой, тракт воздухопроводов с шиберами.

Пар в теплообменник СПОТ поступает из паропровода каждого ПГ.

Конденсация пара в теплообменниках осуществляется атмосферным воздухом. Воздух забирается из атмосферы вне здания оболочки. Воздух за счет естественной тяги проходит через защитные сетки и поступает в кольцевой коллектор, расположенный вокруг здания оболочки (поз 5 рис. 1). Затем по индивидуальным воздуховодам воздух поступает на теплообменные модули (поз 6 рис. 1). В теплообменниках охлаждающий воздух отбирает тепло от пара и поступает в тяговые шахты (поз. 8 рис.1), которые заканчиваются общим коллектором с дефлектором (поз. 9,10 рис.1).

До и после каждого теплообменного модуля по ходу движения воздушного потока предусмотрены воздушные шиберы (поз. 7 рис.1).

Шибер, установленный после теплообменника (над ним) предназначен для регулирования расхода воздуха в режиме работы системы и для снижения тепловых потерь в режиме ожидания.

Шибер, установленный на входе в теплообменный модуль в режиме работы системы открывается полностью, а в режиме ожидания шибер закрыт для снижения тепловых потерь.

В режиме ожидания система прогрета до уровня температур второго контура, поскольку пароконденсатный тракт системы постоянно подключен к паропроводу парогенератора.

В случае возникновения исходного события это позволяет обеспечить наилучшую динамику при подключении теплообменников и исключает термоудары в системе.

Выходной (верхний) и входной (нижний) шиберы оснащены двумя приводами: приводом пассивного принципа действия и дублирующим приводом активного действия. Приводы активного действия имеют электропитание от системы аварийного электроснабжения первой категории, которое обеспечивает возможность управления шиберами оператором.

Привод пассивного принципа действия выходного, регулирующего, шибера представляет собой поршневой механизм. Поршень выполнен из стального сильфона со штоком и блока винтовых цилиндрических пружин. Перемещение штока осуществляется с ростом давления пара второго контура, которое, действуя на поршень, одновременно сжимает сильфоны, пружины и осуществляет открытие шибера. При падении давления

блок сжатых пружин действует в обратном направлении и шток втягивается в корпус, закрывая шибер. Опорой привода пассивного действия являются салазки, установленные в направляющих, закрепленных на раме привода активного действия. Перемещение штока привода происходит в диапазоне давления пара 6,8-8,0 МПа.

Привод активного действия содержит раму, винтовую пару и электропривод. При включении электропривода за счет работы пары "ходовой винт - гайка" происходит перемещение привода пассивного действия по направляющим и тем самым открывается шибер при любом исходном положении привода пассивного действия.

Приводы входного (нижнего) шибера по конструкции аналогичны приводам верхнего шибера.

В расчетах принято, что в течение начальных 30 минут аварии система СПОТ находится в режиме регулирования расхода воздуха, а по истечении 30 минут шибера системы открываются оператором дистанционно приводом активного действия.

Мощностная характеристика одного канала СПОТ при полностью открытых шиберах дана в таблице 3.

Таблица 3 - Изменение мощности одного канала СПОТ в зависимости от температуры атмосферного воздуха и давления в парогенераторе; N, МВт

P, МПа	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
t <sub>B</sub> =40°C	1,81	3,41	4,18	4,93	6,41	7,78	10,7	14,8	17,0	18,7	20,2	21,5	22,7	23,8
t <sub>B</sub> =50°C	1,59	2,97	3,63	4,28	5,55	6,79	9,43	13,1	15,2	16,9	18,3	19,6	20,7	21,7

### 3.2.4 Локализирующая система безопасности

В обеспечении безопасности АЭС при рассматриваемой запроектной аварии участвуют системы и элементы герметичного ограждения (СГО).

Системы и элементы герметичного ограждения образуют сложный пространственный замкнутый многослойный герметичный контур, внутри которого находится зона локализации аварии (ЗЛА).

В состав СГО входят:

- система герметичных и ограждающих оболочек (JMA);
- шлюз транспортный (JME);

- шлюз для персонала основной (JMF);
- шлюз для персонала аварийный (JMG);
- система герметичных трубных проходов (JMK);
- система герметичных электрических проходов (JML);
- локализующие элементы (локализирующая арматура, предохранительные устройства, участки трубопроводов между локализирующей арматурой), входящие в состав систем нормальной эксплуатации;
- локализующие элементы (трубопроводы и оборудование, соединенные с первым контуром или зоной локализации аварии) защитных и обеспечивающих систем безопасности.

Система герметичного ограждения обеспечивает:

- удержание в пределах зоны локализации аварий (ЗЛА) выделяющихся радиоактивных веществ,
- ограничение выхода радиоактивного излучения за установленные проектом границы,
- защиту от внешних воздействий систем и/или элементов, отказ которых может привести к выбросу радиоактивных веществ, превышающему проектное значение,
- необходимую степень разрежения в пространстве между оболочками.

Системы и элементы, расположенные в объеме ЗЛА, связаны с системами и элементами, расположенными за пределами ЗЛА, коммуникациями, которые проходят через оболочки при помощи специальных герметичных проходов. Изоляция указанных коммуникаций осуществляется при помощи изолирующей арматуры.

Режимом, определяющим основные проектные решения по герметичному ограждению, является режим мгновенного разрушения полным сечением трубопровода ГЦТ на входе в реактор с двусторонним свободным истечением теплоносителя первого контура.

В качестве технического решения, обеспечивающего выполнение указанных функций в проекте, в составе системы герметичного ограждения (СГО) принята двойная оболочка.

Двойная оболочка состоит из внутренней герметичной оболочки, в объеме которой находятся оборудование и трубопроводы с высокопотенциальным теплоносителем, и

внешней защитной оболочки.

Внутренняя герметичная оболочка выполнена из предварительно напряженного железобетона со стальной герметизирующей облицовкой и способна локализовать радиоактивные вещества, образующиеся при авариях с разгерметизацией первого контура.

Расчетная величина утечки из внутренней оболочки составляет 0,3% в сутки от объема среды.

Объем внутренней защитной оболочки составляет 65000 м<sup>3</sup>.

Во внутренней оболочке конструктивно может быть выделено не менее 20 помещений, имеющих связи.

Расчетная схема и схема связей помещений внутренней оболочки представлена на рис 3.

В расчетах приняты следующие начальные условия для параметров среды в помещениях ЗЛА:

- давление  $P=0,098$  МПа;
- температура  $t=60$  °С в необслуживаемой зоне и  $t=30$  °С в зоне ограниченного доступа;
- влажность среды 90%.

Начальная температура железобетонных и стальных конструктивных элементов защитной оболочки, “холодного” оборудования, воды в бассейне выдержки принята равной 60 °С.

Внешняя защитная оболочка выполнена без преднапряжения. Она обеспечивает восприятие внешних воздействий, снижение динамических параметров воздействий на оборудование реакторного отделения.

### 3.2.5 Пассивная система фильтрации протечек

Наличие в проекте межоболочечного пространства позволяет (при участии систем вентиляции кольцевого зазора между оболочками) ограничить уровень выбросов на границе санитарно-защитной зоны, что достигается очисткой протечек, попадающих в межоболочечное пространство через возможные неплотности во внутренней оболочке при аварийных режимах, и выброса их на высоких отметках (через венттрубу).

В режимах нормальной эксплуатации и проектных аварийных режимах удаление парогазовой среды из объема между защитными оболочками осуществляется с помощью системы вытяжной вентиляции, которая работает как активная система. При авариях, в которых имеет место потеря всех источников переменного тока, активная система вентиляции не может выполнять своей функции.

В случае таких аварий, связанных с потерей всех источников электроснабжения переменного тока, функцию удаления и очистки среды из МОП выполняет пассивная система фильтрации (ПСФ). Эту функцию система выполняет как при условии сохранения плотности контуров РУ, так и при условии возникновения течей в первом или втором контуре.

На рисунке 1 ПСФ представлена позициями 13,14,15.

#### **4 РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ И РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ**

##### **4.1 Некоторые особенности процессов протекающих в РУ и ЗО при течах первого контура с наложением потери всех источников переменного тока на АЭС**

При этой запроектной аварии отвод тепла от активной зоны реактора происходит в кипящем режиме на поверхности твэл и конденсации части генерируемого пара в парогенераторе в течение всего аварийного процесса. Особенностью процесса для реакторной установки является рост концентрации борной кислоты в теплоносителе, заполняющем активную зону, и накопление неконденсирующихся газов в трубчатке парогенератора.

Для защитной оболочки особенность тепловых процессов заключается в том, что при неработающей спринклерной системе, величина давления и температура среды определяется ограниченностью выхода пара из РУ, вследствие его конденсации в парогенераторе благодаря работе СПОТ, и теплоаккумулирующей способностью строительных конструкций оболочки.

Важнейшей особенностью является взаимосвязанность процессов в реакторной установке и защитной оболочке.

Эта особенность учтена пакетом использованных расчетных программ при численном моделировании процессов.

## 4.2 Расчетные программы

4.2.1 Расчет образования и распределения неконденсирующихся газов проводился с помощью программы МОРАВА-Н2. В качестве источников газа программой учитывается процесс термордиолиза теплоносителя, в том числе выделение газа растворенного в теплоносителе ГЕ-1, и паро - цирконивая реакция, возникающая в случае высокой температуры оболочек твэлов.

4.2.2 Теплогидравлические процессы в оборудовании реакторной установки и процесс переноса и накопления борной кислоты (далее бора) моделировались расчетным комплексом ТРАП, включающим программу ТЕЧЬ-М-97. /1/

4.2.3 Динамика тепловых параметров в защитной оболочке рассчитана с помощью программы АНГАР. Источником вещества и энергии для защитной оболочки является реакторная установка, а при численном моделировании аварии – расходы в течь, определяемые по программе ТЕЧЬ-М-97.

В программе АНГАР использован многозонный метод моделирования с сосредоточенными параметрами в зонах. Основу математической модели составляют уравнения сохранения массы, импульса и энергии для парогазовой среды в каждом из рассматриваемых контрольных объемов, уравнение теплопроводности для оборудования и конструктивных элементов защитной оболочки, уравнения состояния пара и неконденсирующихся газов, а также замыкающие соотношения.

Математическая модель является многопараметрической. Для нее характерно подробное моделирование термодинамических процессов, происходящих в зонах. Гидродинамика моделируется в виде энерго- и массопереноса между зонами. При разбиении моделируемого объекта на достаточно большое количество зон можно моделировать сложные явления конвекции.

Конструкция исследуемого реального объекта моделируется рядом контрольных объемов, или равновесных зон. Принято, что в каждом объеме среда является гомогенной. Баланс масс и энергий подводится для каждого контрольного объема. Поскольку контрольные объемы соединяются связями, между ними учитывается перенос массы и энергии. В результате получается сложная нелинейная система дифференциальных уравнений.

Учитываемые в программе процессы и физические явления схематично представлены на рисунке 3а.

Каждая балансная зона имеет определенный свободный объем, заполненный атмосферой и водой в приемке. Зона может быть полностью или частично окружена поверхностью из стен. Зоны без ограничивающих стен также возможны.

Атмосфера зоны может состоять из водяного пара, неконденсирующихся газов и воды в форме тумана. Атмосфера считается термодинамически равновесной.

При расчете изменения состояния в атмосфере для неконденсирующихся газов используются соотношения для идеального газа. Осредненная газовая постоянная для атмосферы вычисляется исходя из состава и величин газовых постоянных для отдельных ее компонентов. Параметры пара находятся из таблиц свойств пара как функция давления и температуры.

Между атмосферой и стенами учитывается тепло- и массообмен. Принимается во внимание как перенос тепла посредством конвекции, так и массоперенос посредством конденсации.

Массопередача на поверхности стен рассматривается только в одном направлении. Вода, которая конденсируется на стенах или выпала в виде осадков из атмосферы зоны, собирается на дне (на полу) зоны, являющейся приемком. В программе имеется модель тепло- и массообмена между приемком и атмосферой зоны.

Для объема воды на полу, или в приемке, решаются уравнения баланса массы и энергии. При полном расчете параметров среды для объема воды на полу помещения учитывается как теплообмен за счет конвекции, так и за счет конденсации или испарения и соответствующие этим явлениям потоки тепла к поверхности воды. Моделируется полное испарение объема воды.

В случае резкого падения давления в балансной зоне ниже давления насыщения, соответствующего температуре среды в зоне, возникает спонтанное кипение.

Зоны могут быть связаны различным образом:

- связь через атмосферу с помощью соединений ( свободных проемов, каналов с вентиляторами и т.д.);
- втекание или вытекание воды из объема воды на полу;
- теплообмен через стены.

Возможно задание дополнительных путей перетока воды для приемков. Пополнение конденсатом нижележащих зон происходит в случае, когда объем воды в данной зоне превышает допустимый. Потоки воды, возникающие за счет переполнения, зависят только от геометрии зоны и не влияют на давление в зонах.

В балансных уравнениях для атмосферы и приямка, стены выступают как источник или сток тепла, в зависимости от температуры поверхности и термодинамического состояния атмосферы. Параметры среды внутри стены учитываются посредством нестационарного уравнения теплопроводности. Стена может иметь контакт с различными зонами баланса через две свои поверхности, вследствие чего есть возможность передачи тепла через стену от одной зоны к соседней зоне. В расчетной модели стена может состоять из трех слоев различных материалов. Кроме того, есть возможность представлять средний слой в виде воздушного зазора, в котором тепло передается за счет конвекции.

Нестационарное уравнение теплопроводности решается методом конечных разностей.

Имеется большое число различных физических моделей для использования при расчете коэффициентов тепло- и массопереноса на поверхности стен. Кроме того, поверхности стен также могут быть смоделированы как изотермические или адиабатические, или с наличием как натекающего на них, так и истекающего с них теплового потока.

Для моделирования поступления массы и энергии при течах из РУ или в результате выделения энергии продуктами распада, каждую зону можно снабдить учитываемыми при расчете источниками тепла.

Пар всегда остается в атмосфере, а жидкая фаза может дополнительно разделяться на взвешенную в воздухе аэрозольную фракцию и на объем воды в виде жидкости, которая попадает в приямок.

4.2.4 Ввиду сложности процессов в РУ в контрольных целях были проведены расчеты по кодам SCDAR/RELAP5/MOD.33 и ATHLET.

## **5 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ**

При выполнении расчета использован метод "реалистической оценки", а именно:

- начальные условия АЭС соответствуют режиму нормальной эксплуатации без учета возможных отклонений и неопределенностей в параметрах величинах уставок и т.д.;
- не учитываются отказы оборудования (сверх исходных) и ошибки персонала.

### **5.1 Теплогидравлические параметры**

Изменение теплогидравлических параметров в реакторной установке при разрыве ГЦТ полным сечением на входе в реактор показано на рис 4-11.

Динамика давления теплоносителя на выходе из активной зоны и давления в парогенераторах показана на рис. 4 и 5.

Давление в реакторе в течение короткого времени ( $\tau < 8$  сек) снижается до величины срабатывания ГЕ-1, а затем при  $\tau < 18$  сек достигает значения равного установке открытия невозвратно открываемого обратного клапана, соединяющего верх ГЕ-2 с РУ.

В дальнейшем давление в реакторе остается близким к давлению в защитной оболочке (рис. 5). Объем теплоносителя в первом контуре, реакторе и напорной камере показан на рис. 6, рис.13.

В течение первых 30 минут аварии шиберы СПОТ находятся в режиме регулирования давления в парогенераторах, а далее оператор переводятся в режим расхолаживания РУ, т.е. полностью открываются. В течение приблизительно 4800 сек после открытия шиберов давление и температура во втором контуре выравнивается с соответствующими параметрами в реакторе, и парогенераторы начинают конденсировать пар, генерируемый в активной зоне (рис. 5).

Большая часть образующегося конденсата сливается из ПГ в холодную нитку петли, а часть - в горячую нитку петли и сборную камеру реактора. Слив конденсата в СКР затруднен из-за встречного потока пара из СКР. Конденсат, сливающийся, в основном, в холодную нитку петли, попадет в реактор с некоторой задержкой, так как необходимо заполнить гидрозатворы в петлях ГЦТ, которые осушились на этапе выброса теплоносителя в разрыв. Только после заполнения гидрозатворов наступает возможность поступления конденсата непосредственно в напорную камеру реактора, что наблюдается приблизительно через 3,5 часа после начала аварии (или через 1,5 часа после начала работы ПГ в режиме конденсации). Это наглядно иллюстрирует рисунок 7, где представлены данные для оценки баланса массы в реакторе (поступление – выброс): подача воды из ГЕ-2, поступление конденсата из парогенераторов и в реактор, генерация пара в активной зоне, течь воды из реактора. Благодаря работе СПОТ и конденсации пара в ПГ при выбранной расходной характеристике ГЕ-2 в течение всего времени опорожнения ГЕ-2 наблюдается превышение поступления теплоносителя в реактор над выбросом кроме отрезка времени длительностью около 2600 сек после переключения ГЕ-2 со второй на третью степень подачи воды (на 10000 с).

## 5.2 Накопление бора в реакторе

Возможность накопления бора в активной зоне реактора связана с длительной подпиткой реактора теплоносителем из ГЕ-1 и ГЕ-2, содержащем борную кислоту концентрацией 16 г/кг, и кипением теплоносителя на поверхности ТВЭЛ.

Вывод бора из теплоносителя осуществляется за счет следующих процессов:

- растворение бора в насыщенном паре, которое приобретает значение при высоких концентрациях кипящего раствора;

- капельный унос с паром, который может иметь определенное значение, когда при потере активных систем безопасности и большой течи из первого контура возникают относительно большие скорости пара;

- унос бора с избытком воды, поступающей в зону над генерацией пара в зоне при условии, что этот избыток достаточно хорошо перемешивается в реакторе и уходит в течь.

Вышеуказанные процессы накопления и уноса бора отражены в комплексе ТРАП. Причем модели процессов разработаны на основании обзора имеющихся опытных данных, относящихся к рассматриваемой проблеме. При разработке моделей применен консервативный подход.

На рисунке 8 представлено изменение концентрации бора на входе и выходе активной зоны реактора. Из анализа рисунка следует, что максимальное значение концентрации бора не превышает 120 г/кг, что ниже порога кристаллизации.

## 5.3 Поведение неконденсирующихся газов

При рассматриваемой запроектной аварии в течение первого периода аварии, (до момента начала расхолаживания первого контура за счет работы СПОТ) идет интенсивный выброс пара из первого контура. Вместе с потоком пара в защитную оболочку выносятся и неконденсирующиеся газы. Объемная доля газов в потоке пара невелика и в среднем составляет 0,02%. Процесс выноса газов продолжается до момента начала образования гидрозатвора в холодных нитках петель ГЦК. При закрытии гидрозатворов начнется процесс накопления газов за счет конденсации пара. Газы будут скапливаться в трубчатке ПГ, заполняя также опускной участок холодного трубопровода ниже холодного коллектора.

До и после закрытия гидрозатворов неконденсирующиеся газы могут уходить в гидроемкости второй ступени, а так же удаляться системой сдувки неконденсирующихся газов (ССНГ), если система включена в работу.

В данном расчете работа ССНГ, а также уход неконденсирующихся газов в ГЕ-2 не учитывались. Для такого, достаточно консервативного варианта моделирования накопления неконденсирующихся газов, при рассмотренной ЗПА с разрывом ГЦК на входе в реактор, не получено существенного снижения конденсационной мощности парогенератора из-за накопления неконденсирующихся газов в трубчатке ПГ. Этот эффект связан с периодическим прорывом пара через гидрозатворы, вследствие превышения генерации пара в зоне над конденсацией в парогенераторах. Прорыв пара через гидрозатворы способствует очищению парогенераторов от скопившихся газов.

В связи с малой объемной долей газов в парогазовом потоке и периодическим прорывом гидрозатворов на протяжении аварийного процесса сохраняется высокая конденсационная способность парогенераторов, а мощность СПОТ при этом составляет около 4 МВт (рис. 9).

#### **5.4 Температура топлива**

Вследствие подачи теплоносителя из ГЕ-2 в реактор и поступления конденсата из парогенераторов, в реакторе после прекращения работы ГЕ-1 сохраняется и поддерживается объем теплоносителя (рис. 6), достаточный для надежного охлаждения активной зоны. Кратковременное повышение температуры оболочек твэл при данной ЗПА, как и при проектной протекании аварии, имеет место только в первый период аварии (рис. 10 и рис. 11).

Количественно близкие значения температурного состояния топлива дают результаты расчетов по программам SCDAR/RELAP5/MOD.33 и ATHLET.

Надежность охлаждения активной зоны реактора при рассмотренной ЗПА обеспечивается новыми пассивными системами безопасности – ГЕ-2 и СПОТ. Целесообразность оснащения АЭС системами ГЕ-2 и СПОТ подтверждается результатами расчета температуры топлива при ЗПА в отсутствие этих систем. В этой ситуации запроектная авария - разрыв ГЦК полным сечением с наложением потери источников переменного тока - в течение 5 минут переходит в тяжелую аварию (рис 12).

## 5.5 Параметры в защитной оболочке

Изменение давления и температуры среды в защитной оболочке в течение 24 часов аварийного процесса представлено на рисунке 13 и 14. На рисунке 15 показано соотношение между энергией, поступающей в оболочку и энергией, поглощенной конструкциями оболочки.

Необходимо отметить, что благодаря конденсации пара, генерируемого в активной зоне, за счет работы СПОТ давление и температура среды в ЗО при рассмотренной запроектной аварии находятся в проектных пределах.

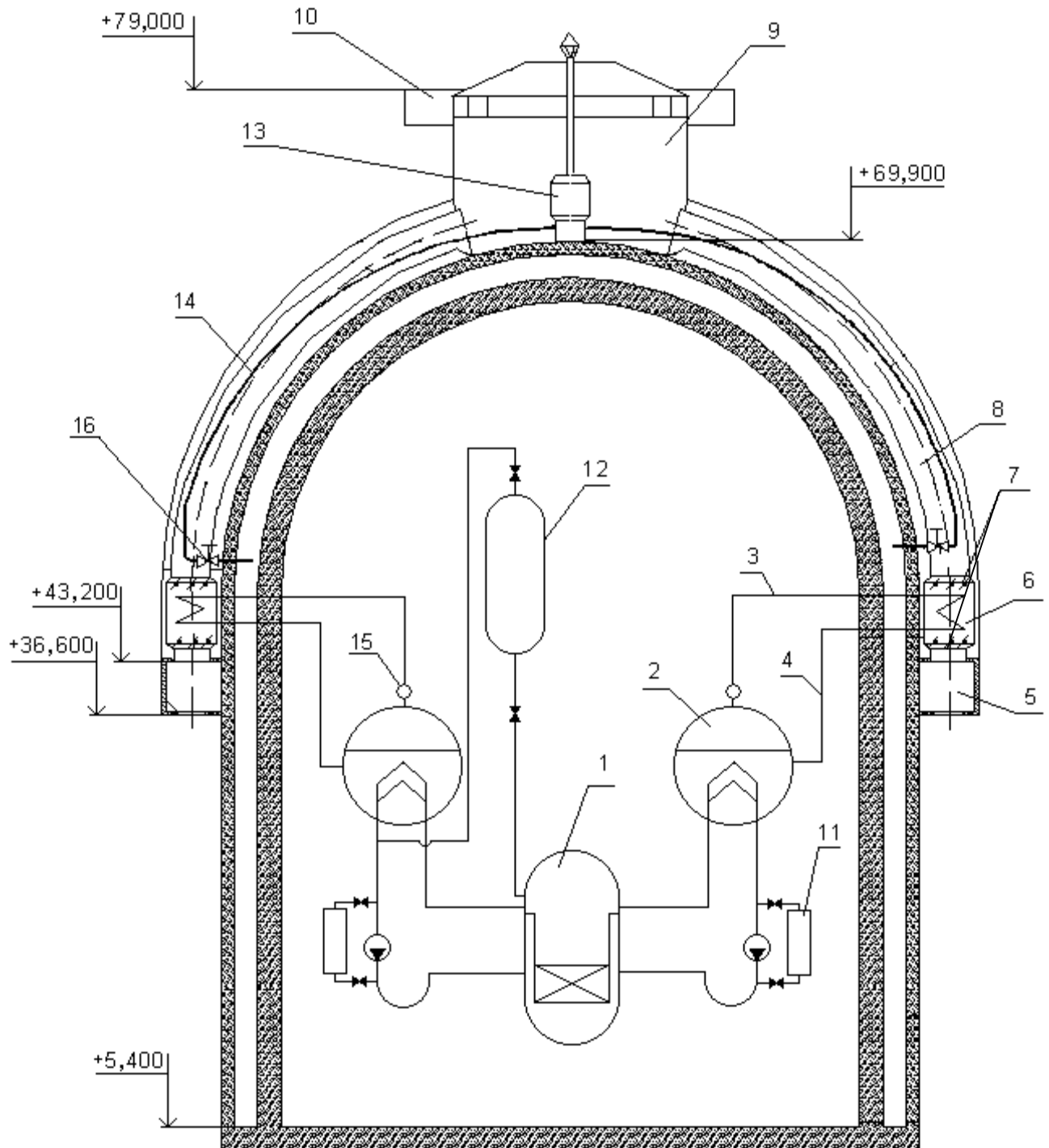
### Заключение

1 Проведено численное моделирование запроектной аварии разрыв ГЦК полным сечением на входе в реактор с наложением потери источников переменного тока для АЭС нового поколения. В структуре систем безопасности АЭС использован принцип технологического разнообразия, т. е. сочетание активности и пассивности в системах, выполняющих критические функции безопасности.

При расчетах учтено влияние таких отрицательных факторов, как накопление борной кислоты в реакторе и накопление неконденсирующихся газов в парогенераторах.

2 Расчет показал, что ГЕ-2 и СПОТ предотвращают переход запроектной аварии в тяжелую стадию, характеризующуюся сверхпроектным повреждением активной зоны.

3 Выбранные проектные технические характеристики СПОТ и ГЕ-2 АЭС нового поколения с РУ В-392 достаточны для надежного отвода тепла от РУ при запроектных авариях в течение времени не менее 24 часов.



1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – трубопровод подвода пара к СПОТ; 4 – трубопровод отвода конденсата; 5 – входной кольцевой коллектор; 6 – теплообменник СПОТ; 7 – шиберы СПОТ; 8 – тяговая шахта СПОТ; 9 – выходной коллектор СПОТ; 10 – дефлектор; 11 – система быстрого ввода бора; 12 – GE-2; 13 – фильтровальная установка; 14 – труба-теплообменник пассивной системы фильтрации (ПСФ); 15 – паровой коллектор 16 – вентиль ПСФ.

Рисунок 1 Технологическая схема пассивных систем

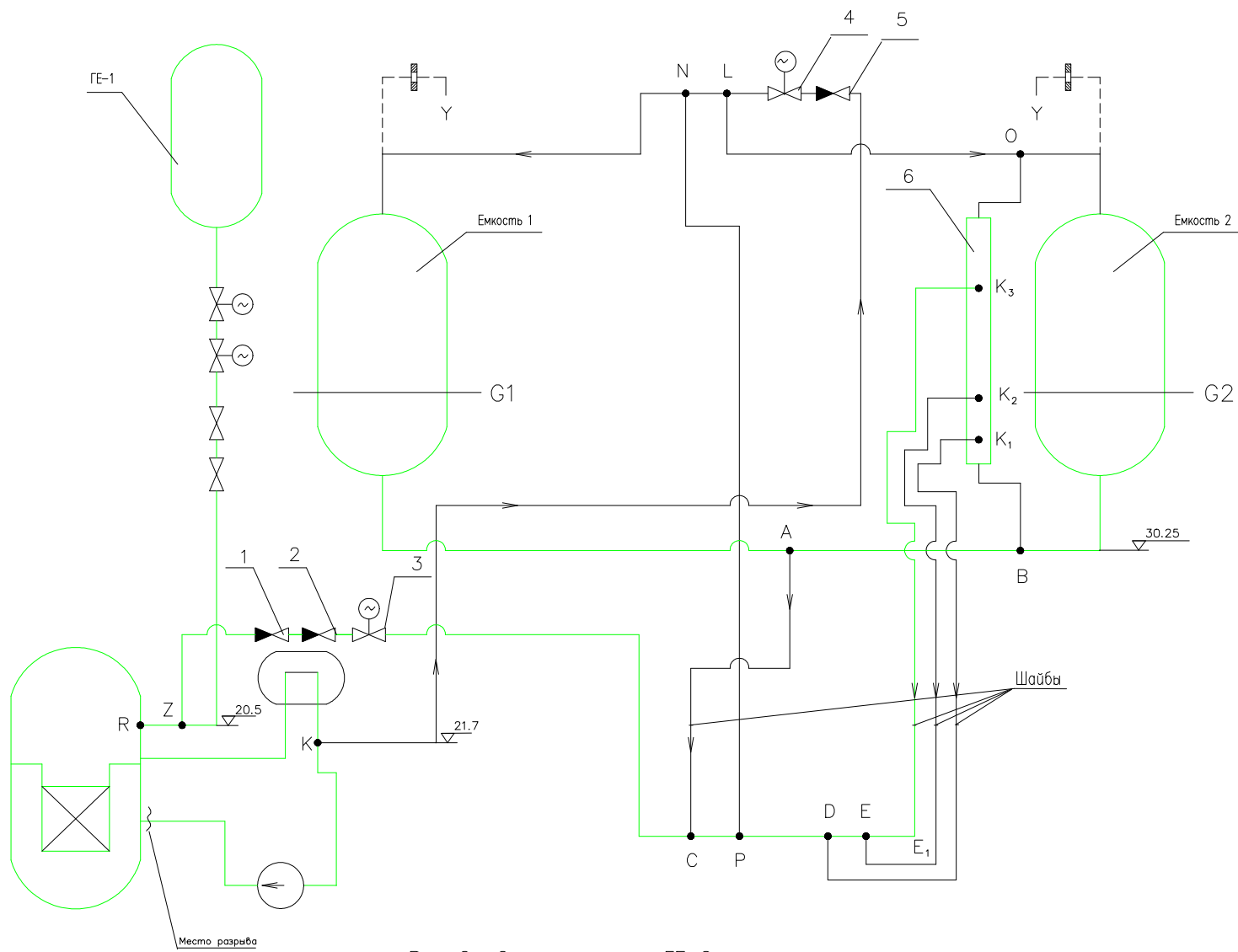


Рис. 2 Схема системы GE-2

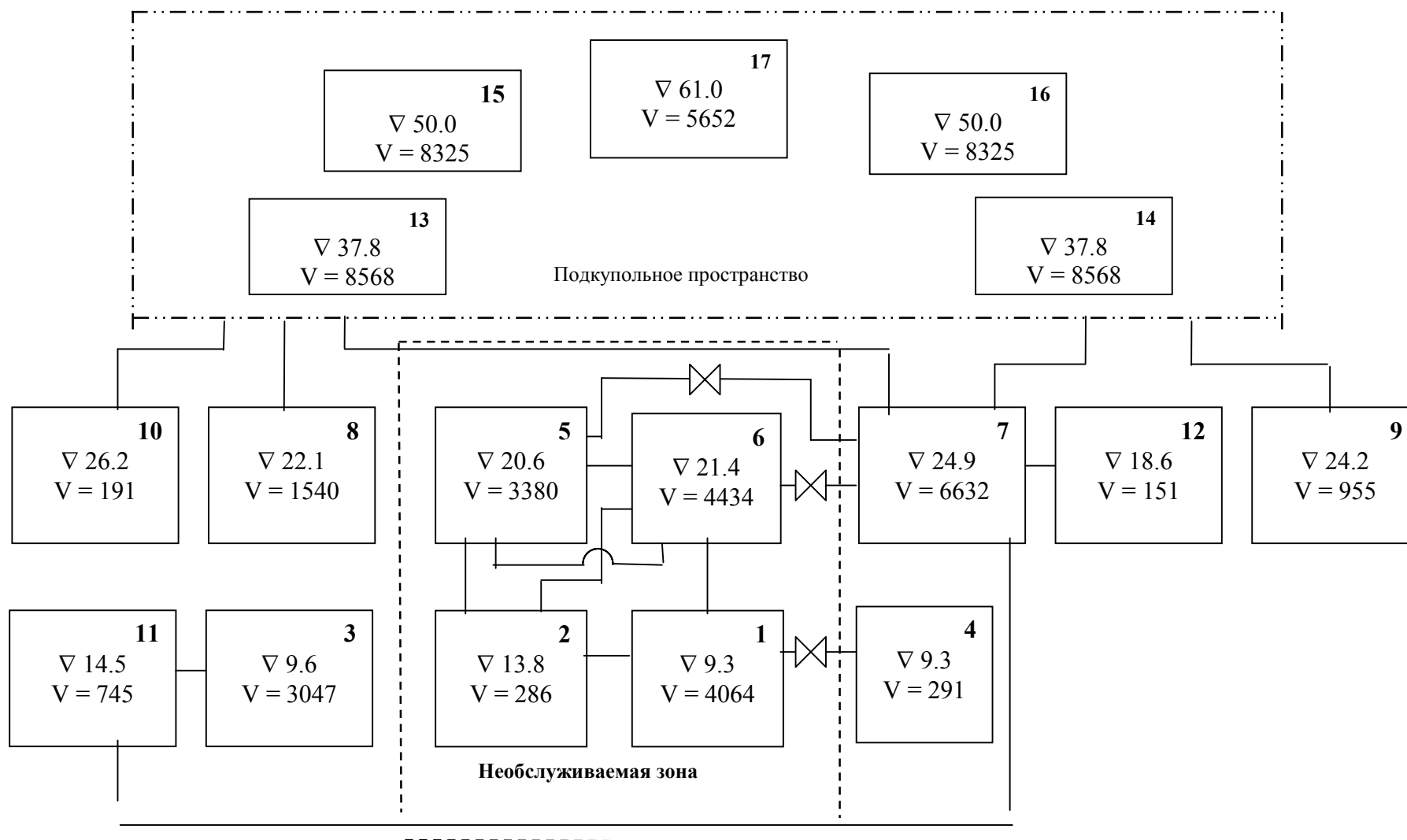


Рисунок 3 Расчетная схема помещений защитной оболочки

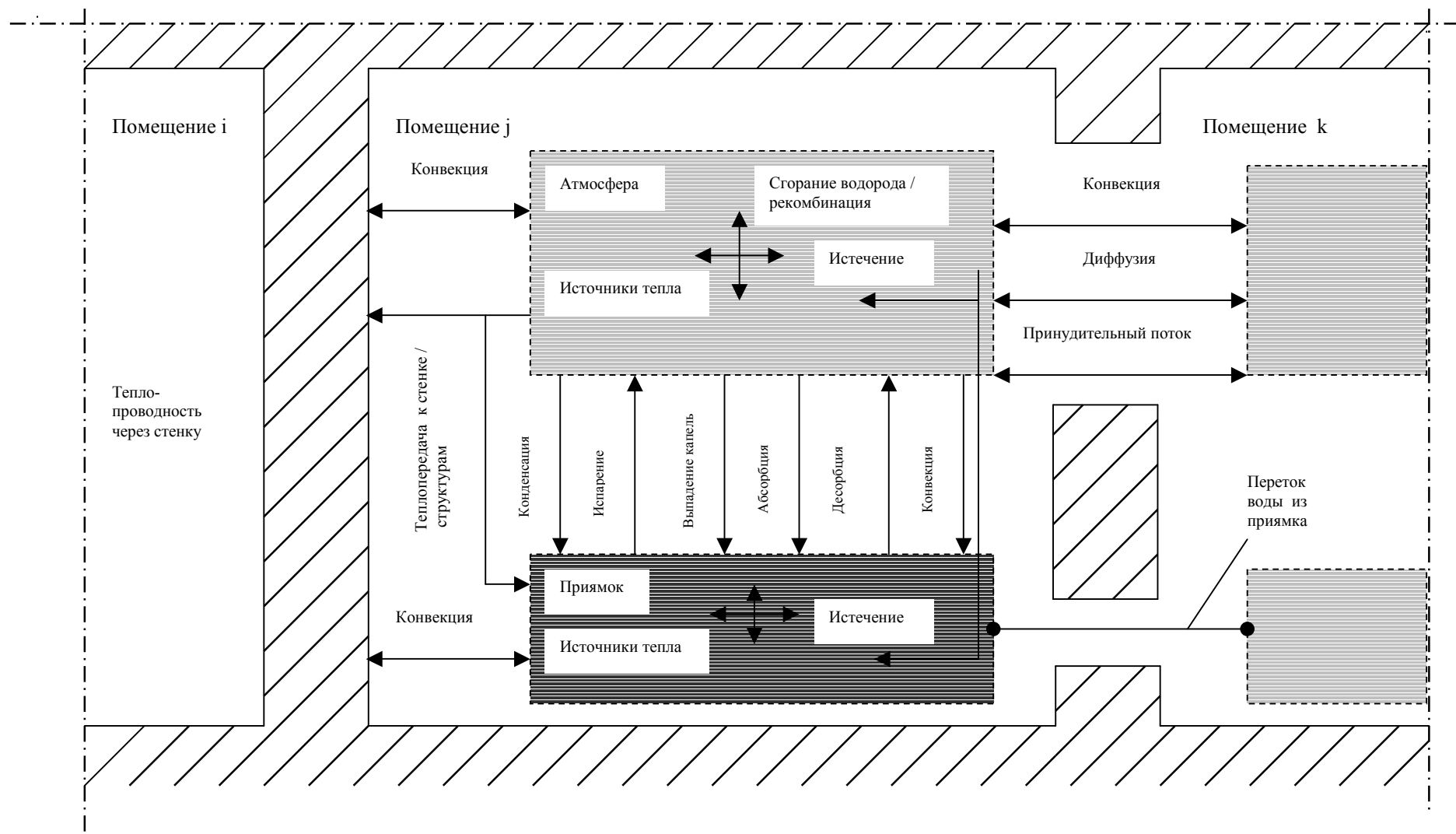


Рисунок 3а Основные физические явления, моделируемые в программе АНГАР

НВАЭС-2, ТЕЧЬ-М-97, ЗА (2 x Ду 850 хол.), ГЕ-1, ГЕ-2, СПОТ (4 канала)

P

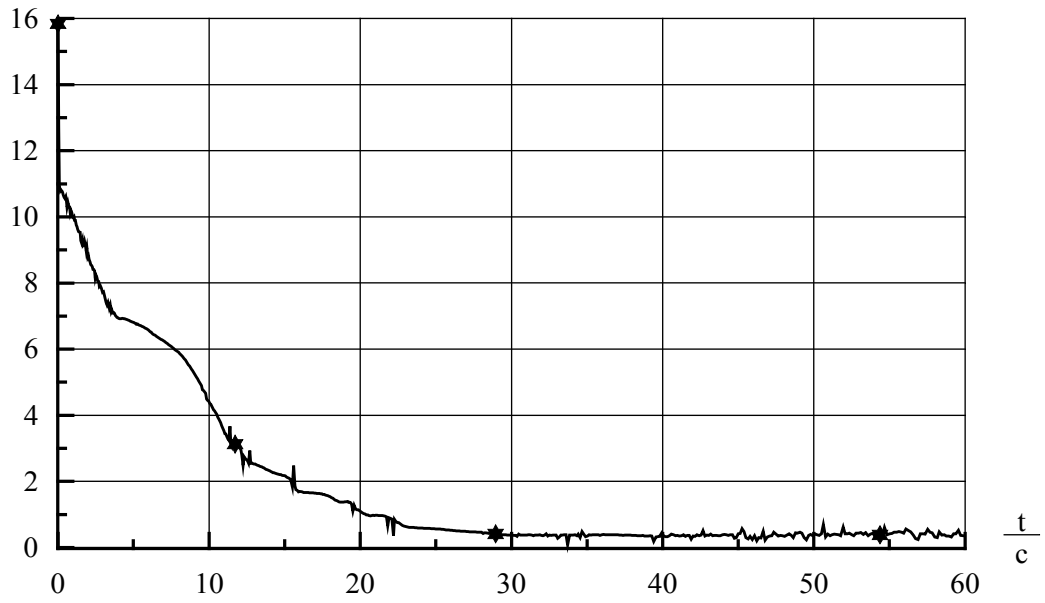
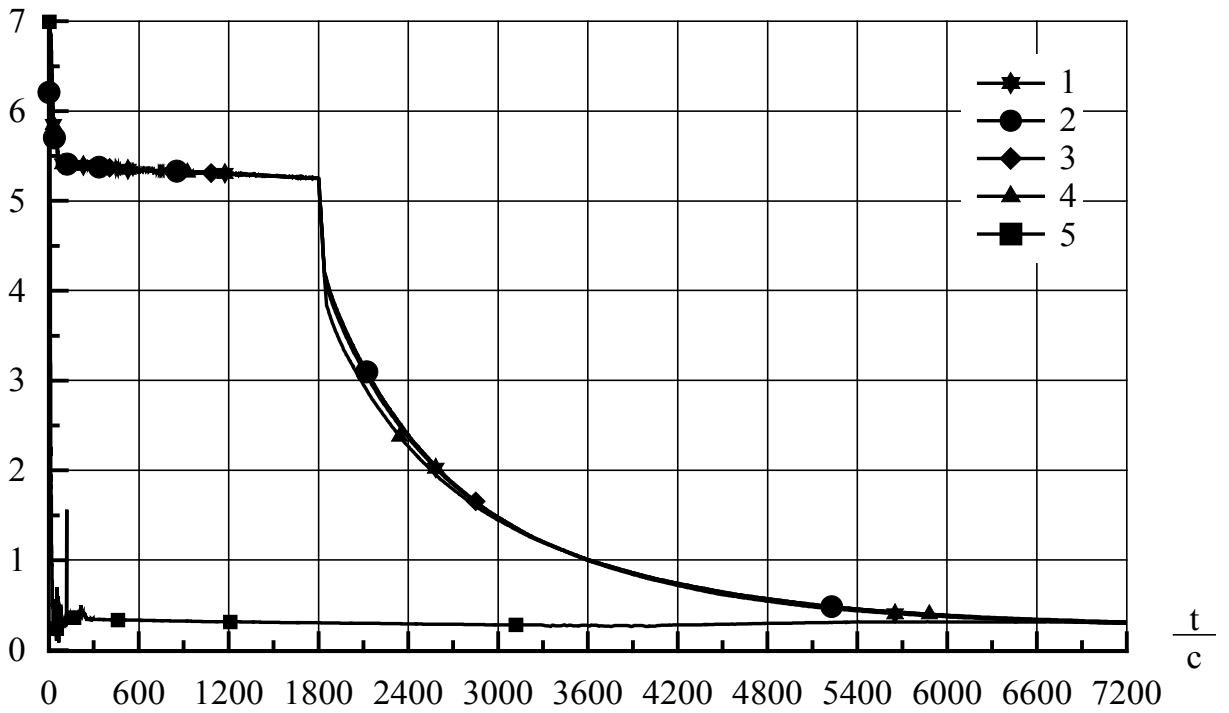


Рисунок 4 Изменение давления на выходе из активной зоны

НВАЭС-2, ТЕЧЬ-М-97, ЗА (2 x Ду 850 хол.), ГЕ-1, ГЕ-2, СПОТ (4 канала)

P



1-4 - давление в ПГ 44

5 - давление на выходе из активной зоны

Рисунок 5

НВАЭС-2, ТЕЧЬ-М-97, ЗА (2 x Ду 850 хол.), ГЕ-1, ГЕ-2, СПОТ (4 канала).

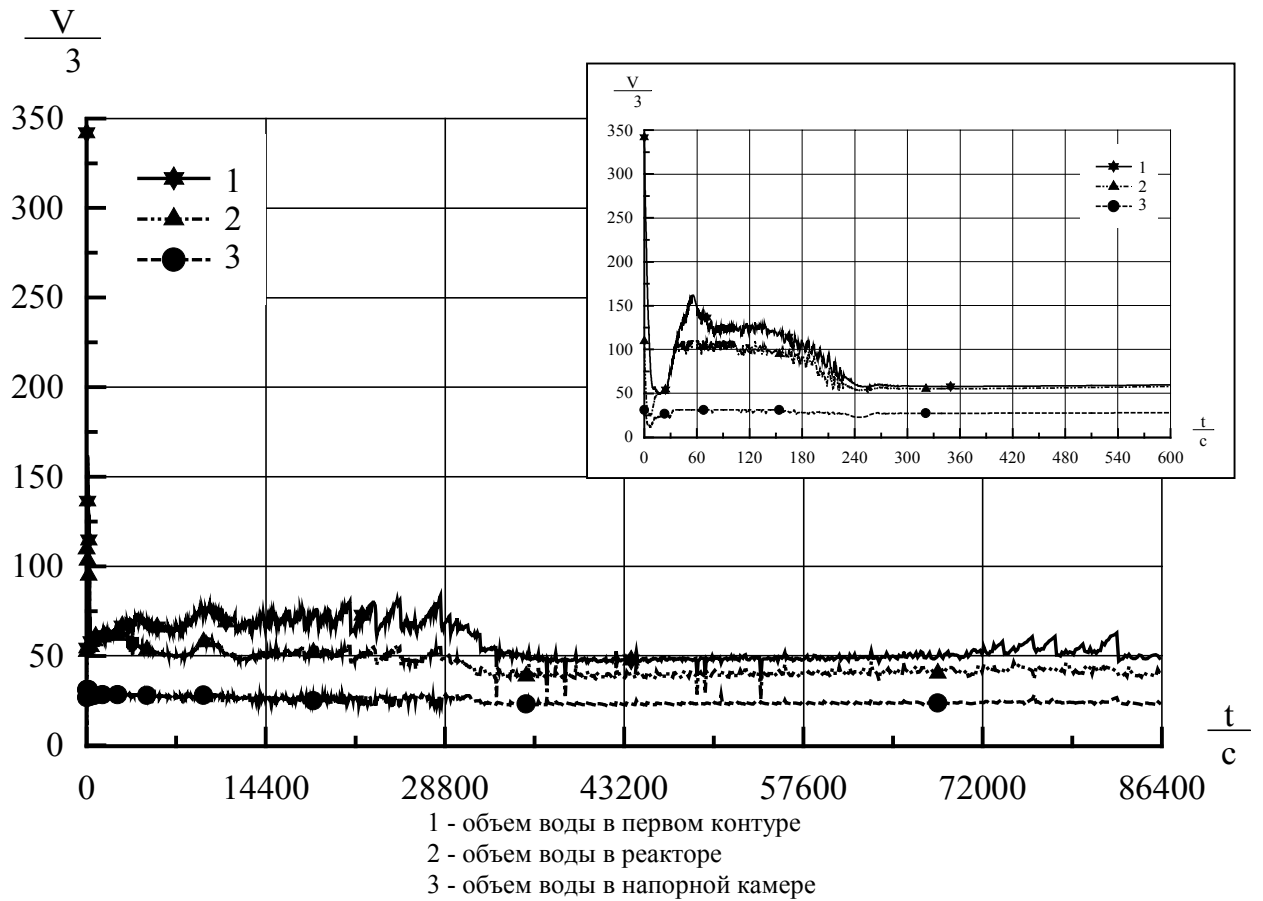


Рисунок 6 Объем воды в первом контуре, реакторе и напорной камере

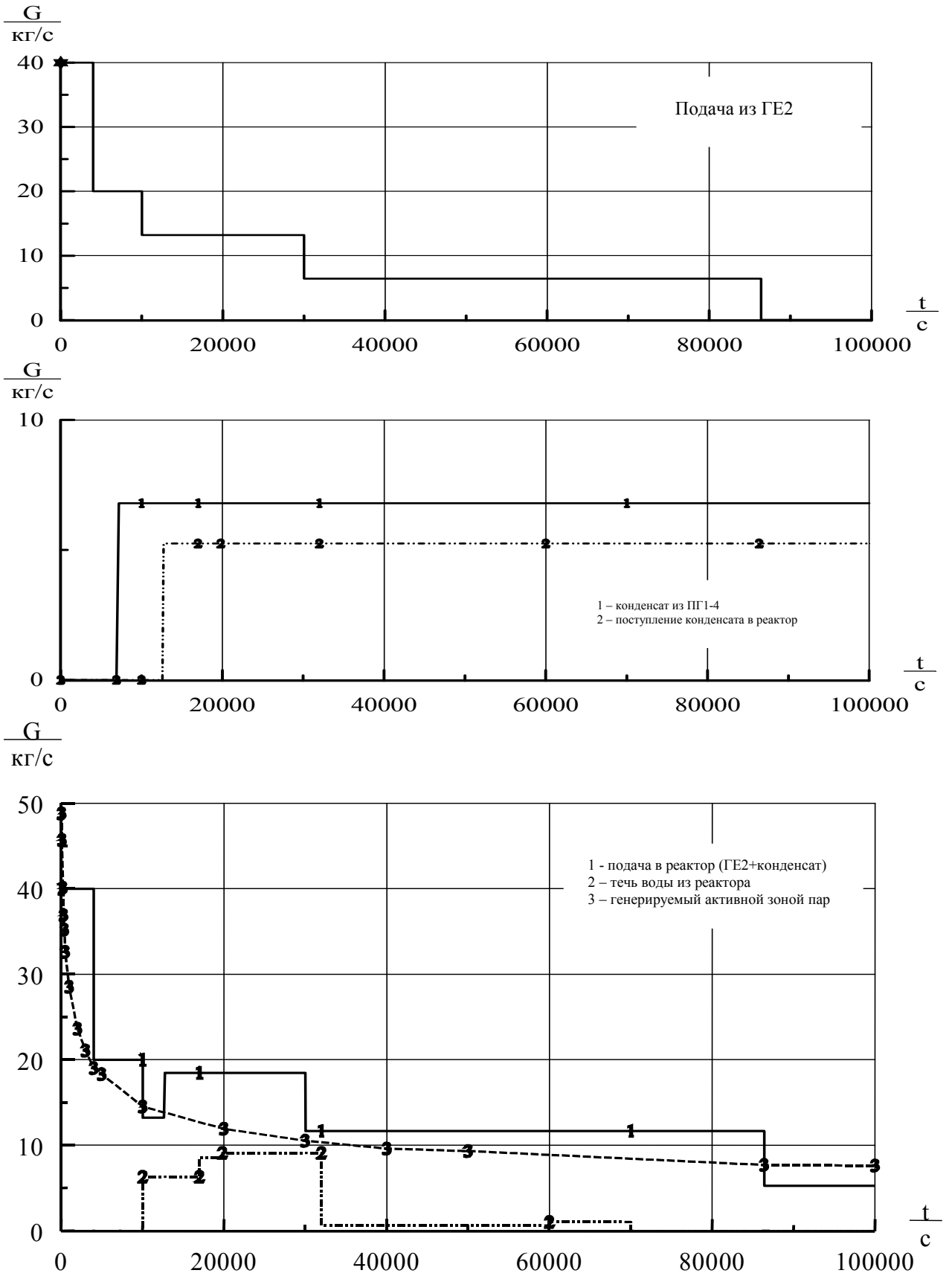
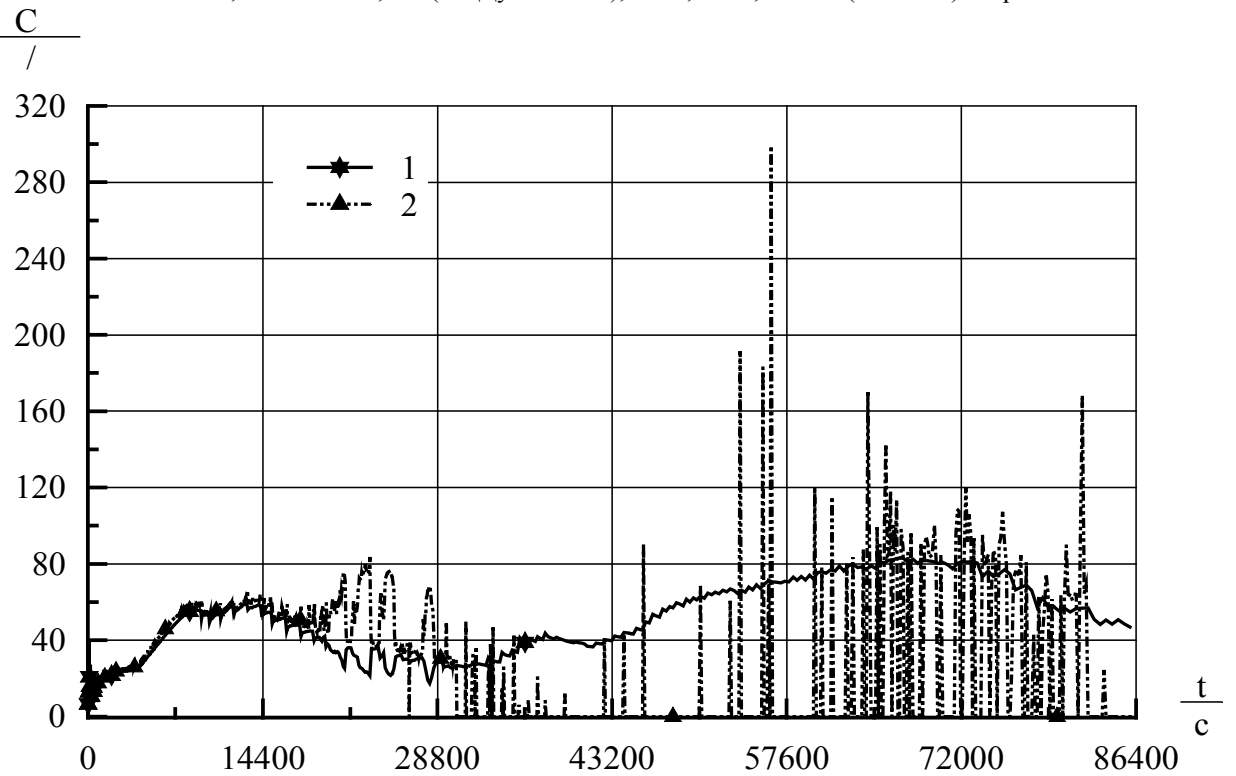


Рисунок 7 Данные для баланса массы в реакторе

НВАЭС-2, ТЕЧЬ-М-97, ЗА (2 x Ду 850 хол.), ГЕ-1, ГЕ-2, СПОТ (4 канала). Вариант 2



1 - концентрация бора на входе в активную зону  
 2 - концентрация бора на выходе из активной зоны  
 Рисунок 8 Концентрация на входе в активную зону и на выходе из нее

НВАЭС-2, ТЕЧЬ-М-97, ЗА (2 x Ду 850 хол.), ГЕ-1, ГЕ-2, СПОТ (4 канала). Вариант 2

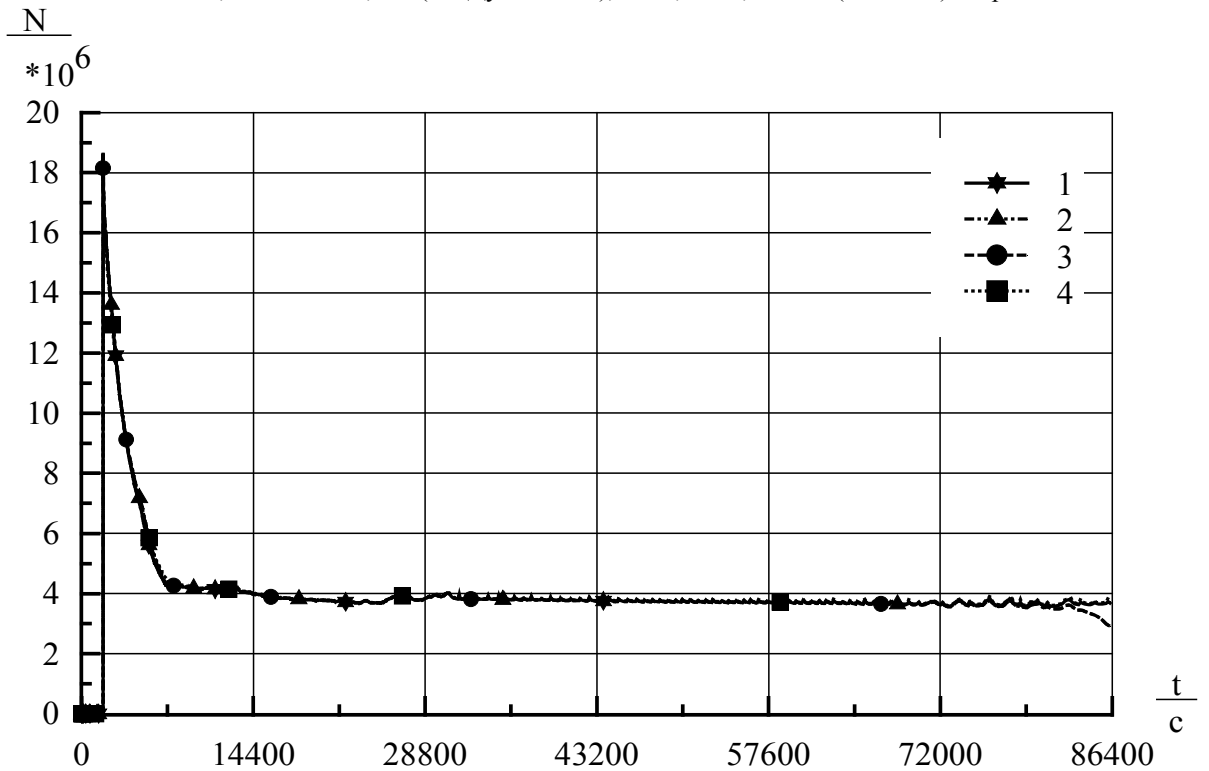


Рисунок 9 Мощность СПОТ ПГ 1-4

НВАЭС-2, ТЕЧЬ-М-97, ЗА (2 x Ду 850 хол.), ГЕ-1, ГЕ-2, СПОТ (4 канала). Вариант 2

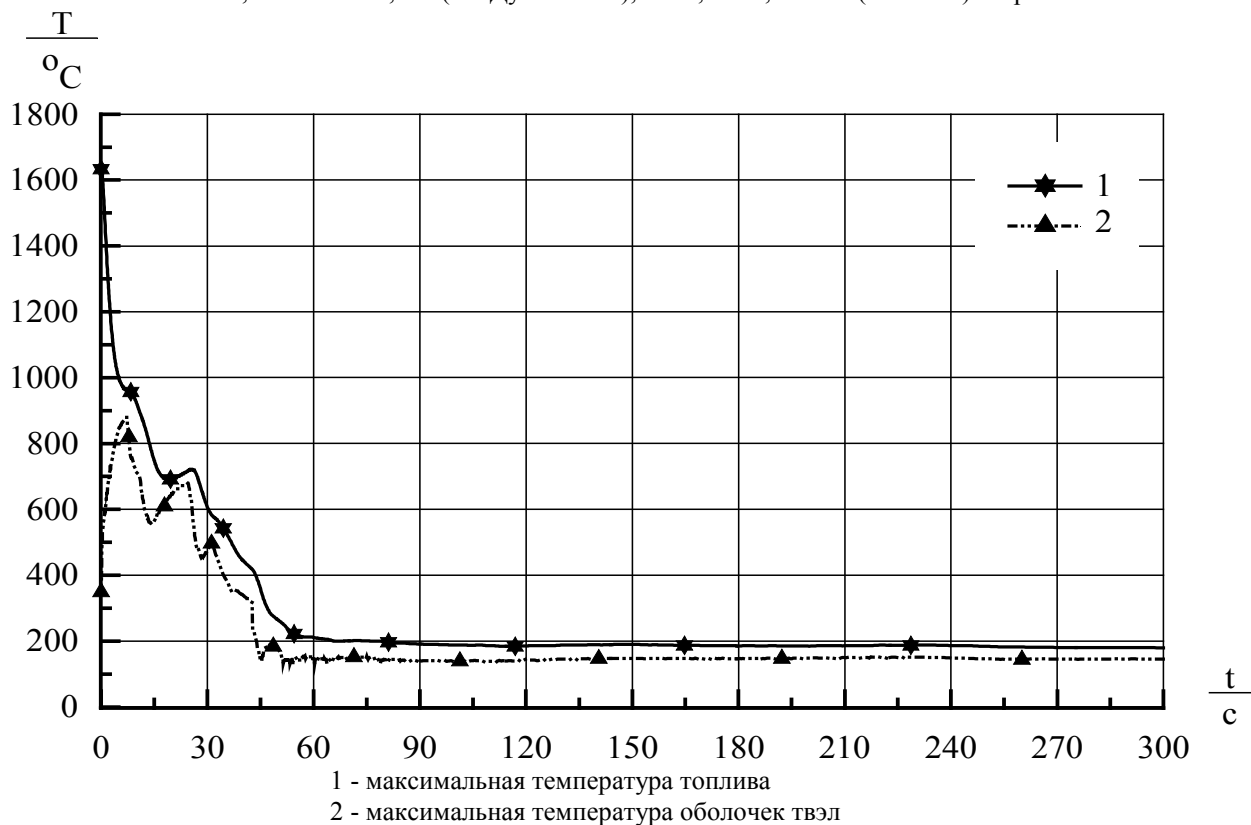


Рисунок 10 Максимальная температура топлива и оболочек твэл

НВАЭС-2, ТЕЧЬ-М-97, ЗА (2 x Ду 850 хол.), ГЕ-1, ГЕ-2, СПОТ (4 канала). Вариант 2

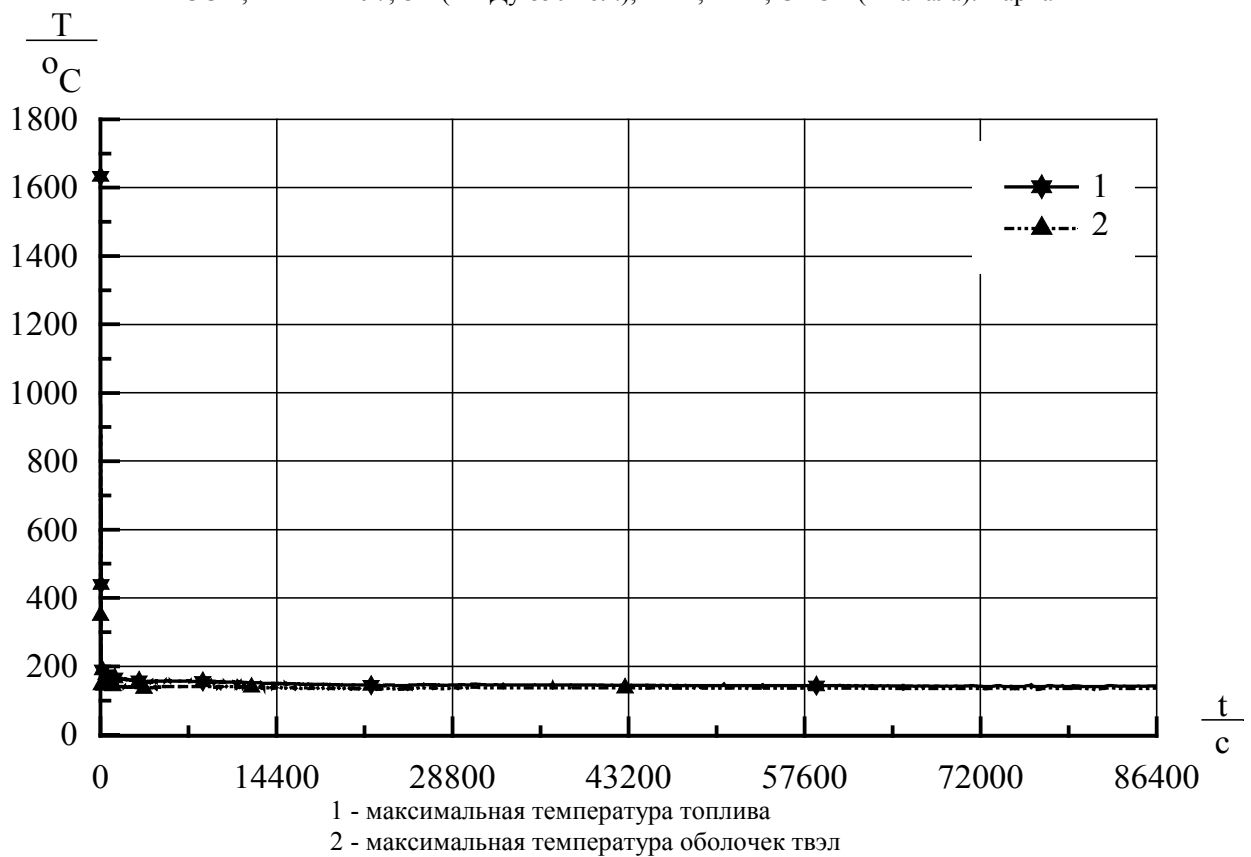
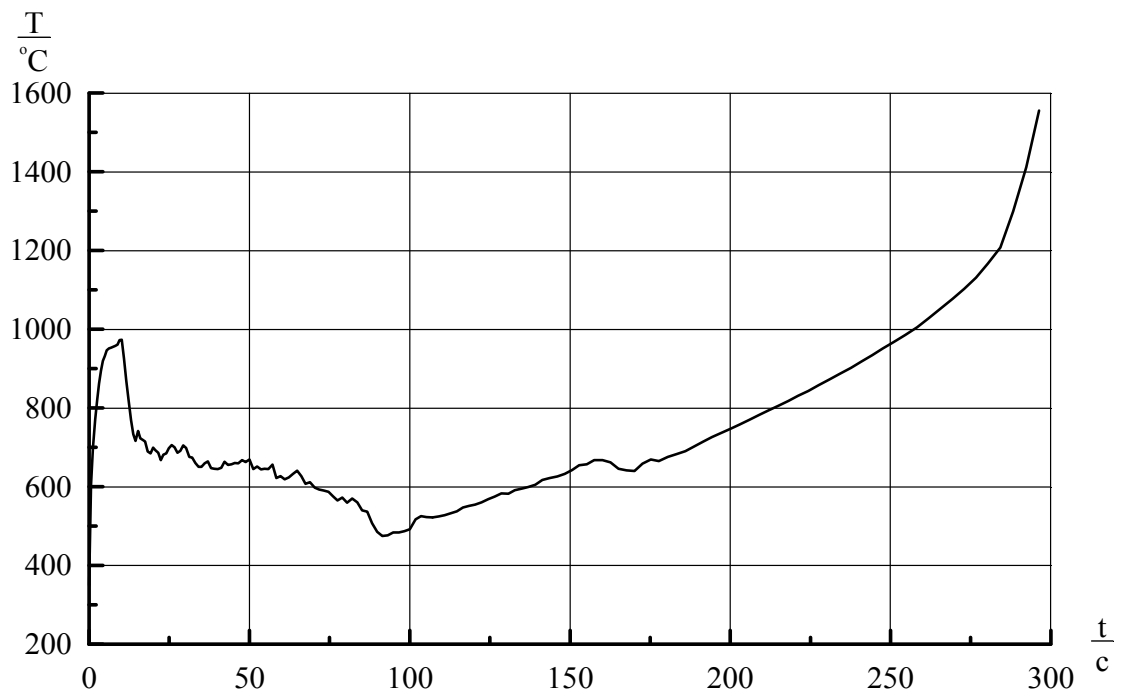


Рисунок 11 Максимальная температура топлива и оболочек твэл

Разрыв ГЦТ Ду850 на входе в реактор с отказом всех источников электроснабжения  
переменного тока (без ГЕ-2 и СПОТ)



Максимальная температура оболочек ТВЭЛ

Рисунок 12

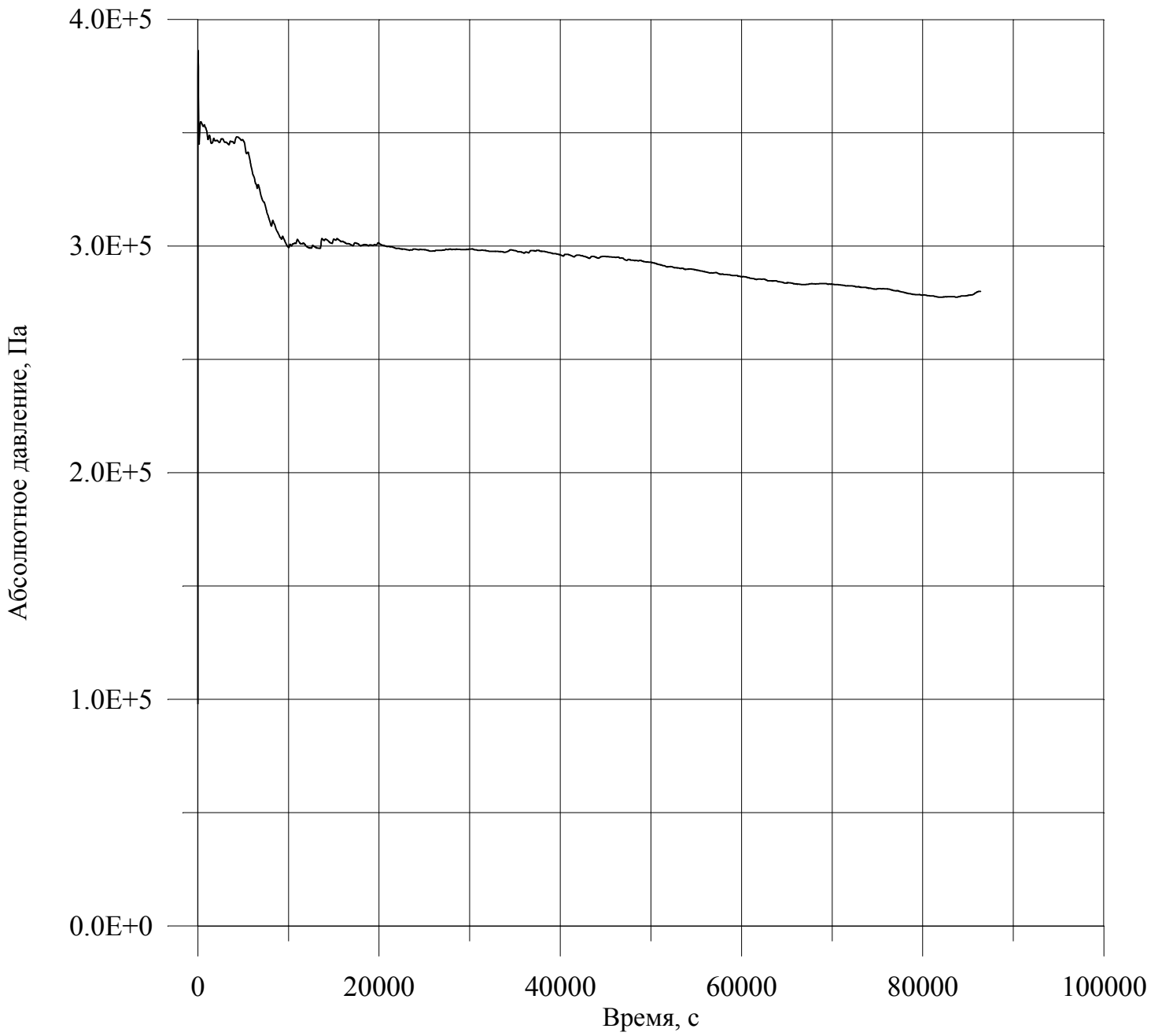


Рисунок А-1 - Изменение абсолютного давления внутри ЗО

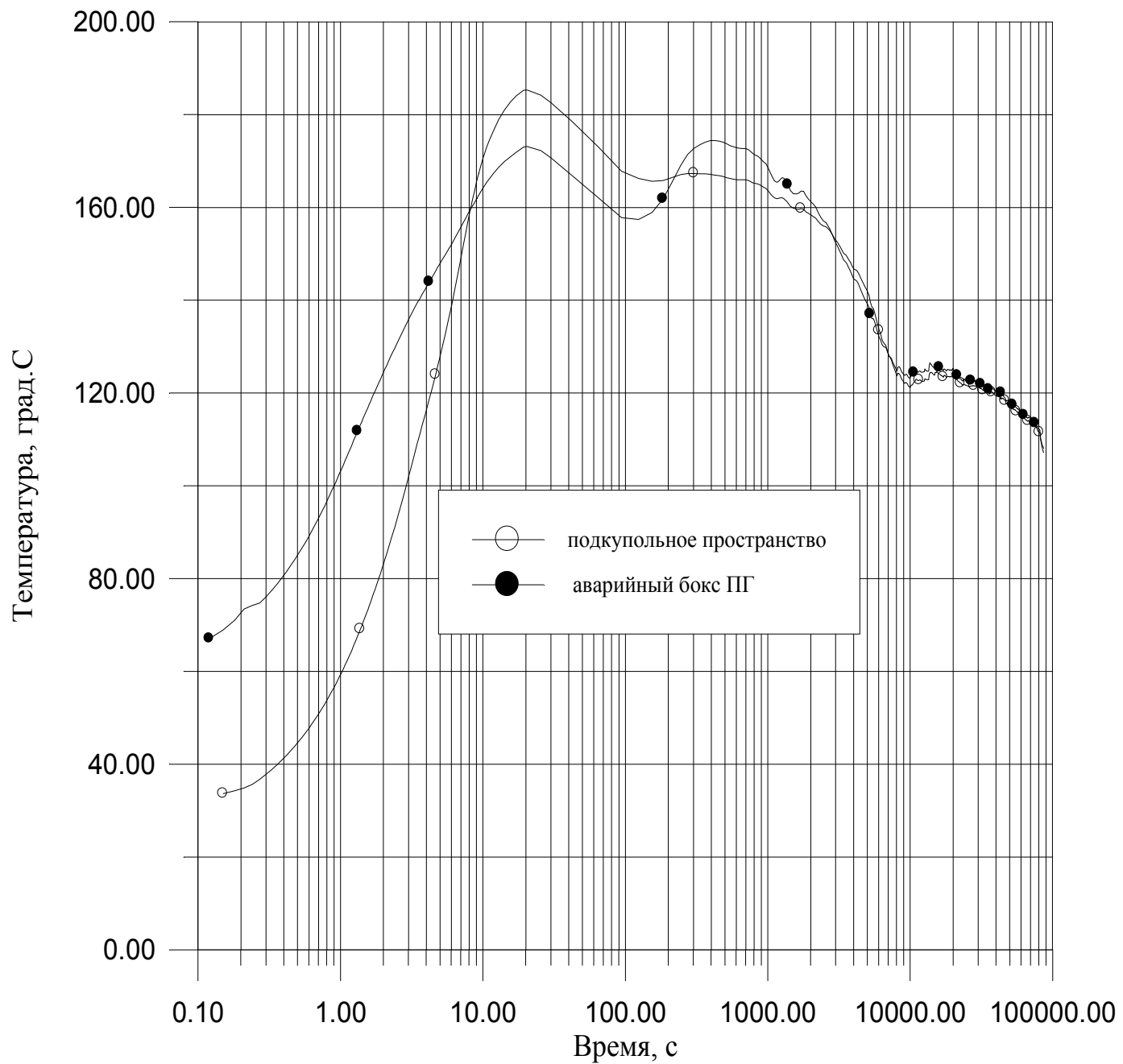


Рисунок 14 Изменение температуры парогазовой среды в помещениях ЗО

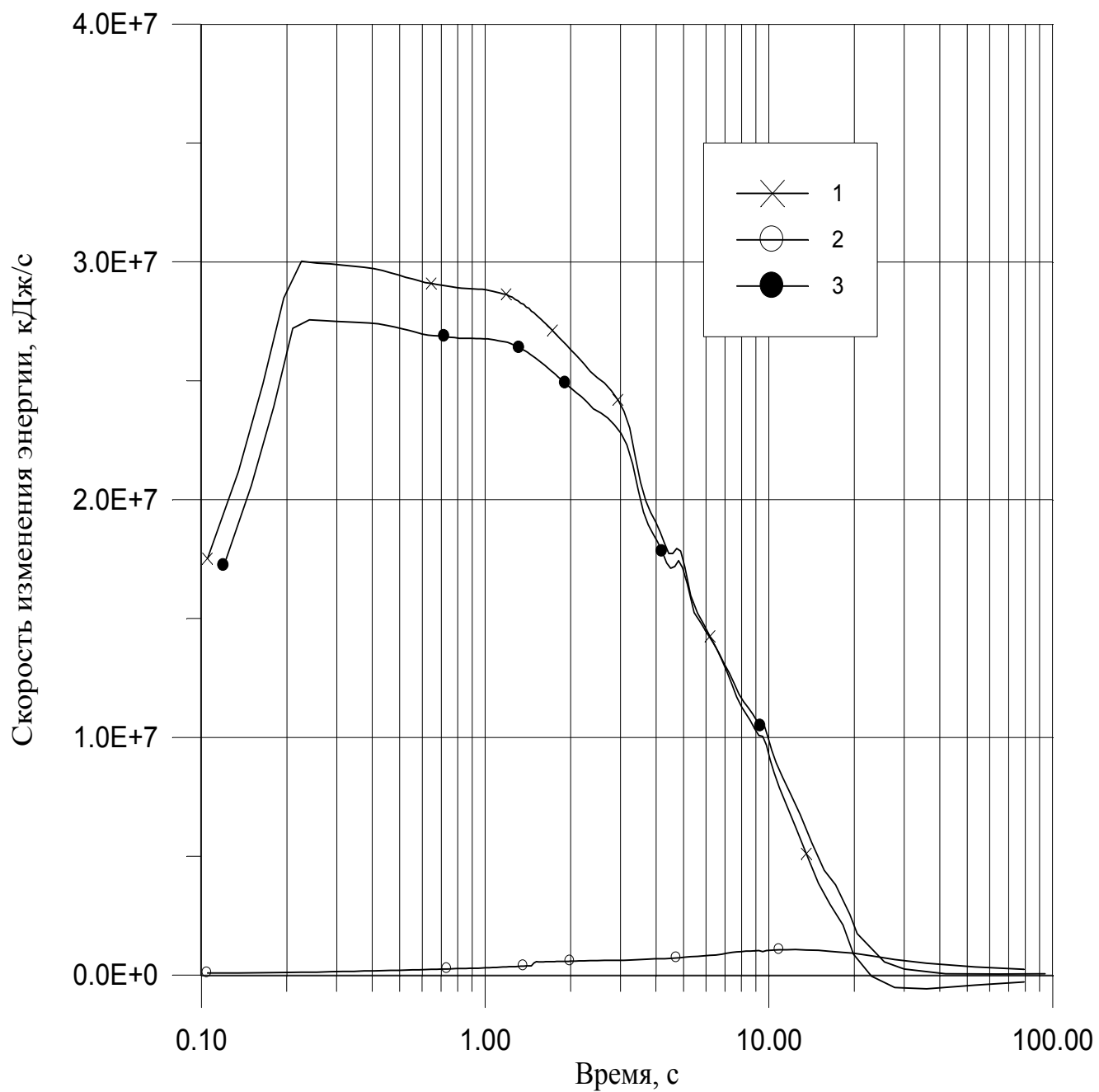


Рисунок 15 Поступление тепловой энергии из РУ в газовый объем ЗО (3), поглощение энергии строительными конструкциями (2) и изменение энтальпии парогазовой среды в ЗО (1)