ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ЧЕРЕЗ ПАРОГЕНЕРАТОРЫ НА СОСТОЯНИЯ РУ С РЕАКТОРАМИ ТИПА ВВЭР-1200 В АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССАХ

INFLUENCE OF POWER CHARACTERISTICS OF THE STEAM GENERATOR PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM ON THE STATES OF REACTOR PLANT WITH WWER-1200 TYPE REACTORS IN EMERGENCY PROCESSES

УДК 621.039.586+621.039.587

Галиев Айнур Айдарович, студент 1-го курса магистратуры,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва

Galiev A.A. galiev1aa@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматривается влияние мощностных характеристик СПОТ ПГ на состояние РУ ВВЭР-1200 в запроектной аварии «Извлечение одного ОР СУЗ с отказом по общей причине технических средств СКУ безопасности»: определяются минимальные мощностные характеристики СПОТ ПГ, необходимые для расхолаживания реакторной установки в условиях единичного отказа системы.

Annotation

The article examines the influence of the power characteristics of the SG PHRS on the state of the WWER-1200 reactor in a beyond design basis accident "Removal of one control rod with a common cause failure of the safety-related I&C system". The minimum power characteristics of the SG PHRS are determined, which

are necessary for cooling down the reactor plant under system single failure conditions.

Ключевые слова: СПОТ ПГ, ВВЭР-1200, АЭС-2006, мощностные характеристики, запроектная авария.

Keywords: SG PHRS, WWER-1200, NPP-2006, power characteristics, beyond design basis accident.

Введение

В последние годы у нас в стране и за рубежом разрабатываются проекты ядерных энергетических установок нового поколения с различными теплоносителями. Важной их особенностью является наличие пассивных систем безопасности, предназначенных для охлаждения активной зоны реактора в аварийных ситуациях, в которых вмешательство персонала атомной станции и срабатывание активных систем безопасности, требующих внешних источников энергии, невозможно. Именно этим подходом к обеспечению безопасности характеризуются реакторные установки (РУ) с реакторами ВВЭР поколения «III+». Наличие ряда пассивных систем, действующих на естественных физических принципах, и успешное их сочетание с активными системами существенно повышает безопасность РУ поколения «III+».

Одним из первых реакторов этого поколения является ВВЭР-1200 проекта АЭС-2006. Данный проект уже реализован на Нововоронежской АЭС-2, Ленинградской АЭС-2, готовится к вводу в эксплуатацию на Белорусской АЭС. На этапе строительства находятся станции в Китае, Турции и Бангладеш. На этапах лицензирования, проектирования и оформления документации находятся станции в Венгрии, Финляндии, Египте и Узбекистане.

Критерии и принципы, которым должны удовлетворять пассивные системы безопасности реакторных установок нового поколения, сформулированы в нормативных документах [1, 2], согласно которым

пассивные системы отвода тепла должны «обеспечивать расхолаживание и длительное поддержание активной зоны реактора при значениях параметров теплоносителя, обоснованных в проекте РУ». С учетом этого расчетное исследование пассивных систем охлаждения активной зоны является одним из необходимых этапов обоснования безопасности и надежности РУ, что определяет *актуальность* данной работы.

Целью работы являлось расчетное исследование влияния мощностных характеристик СПОТ ПГ на параметры состояния РУ с ВВЭР-1200 в аварийных процессах.

Исходя из поставленной цели, были сформулированы следующие *задачи*:

- на примере моделирования запроектной аварии «Извлечение одного ОР СУЗ с отказом по общей причине технических средств СКУ безопасности» ознакомиться с расчетной моделью РУ ВВЭР-1200 в программном комплексе ATHLET/BIPR-VVER;
- провести расчетное исследование аварийных процессов в РУ с ВВЭР-1200, связанных с запроектной аварией «Извлечение одного ОР СУЗ с отказом по общей причине технических средств СКУ безопасности» и определить характеристики СПОТ ПГ, влияющие на эффективность расхолаживания РУ.

Опыт аварии на АЭС «Фукусима-1» показал, что отказ или неправильное функционирование пассивных систем отвода тепла может привести к плавлению топлива. В авариях, связанных с обесточиванием и потерей контроля за установкой, СПОТ ПГ является одной из систем, предотвращающей переход аварии в запроектную с плавлением топлива для РУ с ВВЭР-1200.

Описание системы

Система пассивного отвода тепла через парогенераторы (СПОТ ПГ) предназначена для длительного отвода остаточного тепла активной зоны

конечному поглотителю через второй контур при запроектных авариях. По принципу действия СПОТ ПГ является пассивной системой, так как ее функционирование осуществляется за счет естественной циркуляции теплоносителя второго контура через теплообменные системы.

В качестве исследования была выбрана СПОТ ПГ с водоохлаждаемыми теплообменниками, реализованная на Ленинградской АЭС (РУ В-491).

Система состоит из 4 полностью независимых один от другого каналов производительностью 4х33,3%, т.е. трех работоспособных контуров циркуляции СПОТ достаточно для осуществления системой своих функций в полном объеме в любом требующем ее работы режиме.

Схема системы СПОТ ПГ показана на рисунке 1 [3].

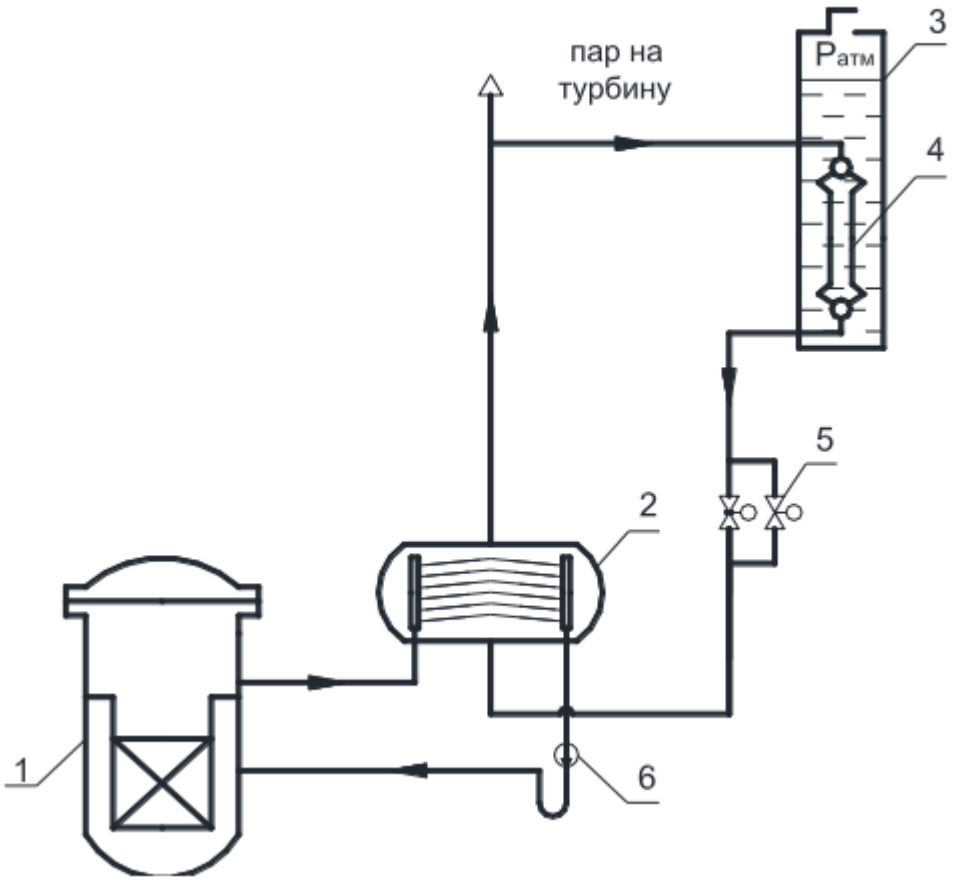

Рисунок 1– Система пассивного отвода тепла от парогенератора РУ В-491 Ленинградской АЭС:

1 – реактор, 2 – парогенератор, 3 – бак аварийного отвода тепла, 4 – теплообменник СПОТ ПГ, 5 – пусковые клапаны, 6 – ГЦН

В режиме ожидания система находится под номинальным давлением парогенератора. Подъемный трубопровод заполнен насыщенным паром, а теплообменники и опускной трубопровод заполнены конденсатом. С течением времени на поверхности теплообменников могут образоваться отложения – накипь, продукты коррозии металла. Эти отложения снижают коэффициент теплопередачи и уменьшают проходное сечение для теплоносителя. Данные эффекты приводят к ухудшению теплоотдачи и уменьшению мощностных характеристик СПОТ ПГ.

Описание расчетного комплекса, исходного события и начальных условий

Расчет проводился по комплексу программ ATHLET/BIPR-VVER [4, 5] с квазитрехмерным описанием теплогидравлики и трехмерным описанием нейтронной кинетики в активной зоне, использовалась пространственная модель реакторной установки. Геометрия объектов моделируется, согласно чертежам.

В качестве исходного события была принята запроектная авария «Извлечение одного ОР СУЗ с отказом по общей причине технических средств СКУ безопасности». «Извлечение одного ОР СУЗ» является проектным режимом категории 2 (или нарушение нормальной эксплуатации) и в этом режиме работа СПОТ ПГ не требуется. Однако наложение отказа по общей причине технических средств СКУ безопасности переводит это исходное событие в группу запроектных аварий.

Данный режим относится к категории режимов расширенного проектирования, которые связаны с наложением на исходное событие эксплуатации с отклонениями, которые характеризуются как режимы отказов,

инициируемые проектными исходными событиями, возникновение которых можно ожидать с частотой более 10^{-2} 1/реактор·год включительно, отказа по общей причине в системе, требуемой для выполнения функции безопасности. Событие вызывает рост мощности реактора за счет введения положительной реактивности. Режим идет с ростом давления в первом и втором контурах.

Системы контроля и управления (СКУ) предназначены для выполнения функций контроля, управления, защиты и диагностики состояния РУ. Поскольку управляющие средства безопасности должны удовлетворять таким принципам безопасности, как резервирование, независимость и разнообразие, в реакторах проекта АЭС-2006 внедрена дополнительная диверсная система защиты, предназначенная для преодоления последствий запроектных аварий, связанных с наложением на проектные исходные события отказа по общей причине системы контроля и управления системами безопасности.

Таким образом, дополнительная диверсная система защиты предназначена для альтернативного автоматического управлениям системами, важными для безопасности, с целью выполнения критериев, установленных для запроектных аварий без плавления топлива, при сочетании проектных исходных событий с постулируемым отказом по общем причине системы контроля и управления системами безопасности [6, 7].

Приведем основные приемочные критерии, которые должны выполняться в ходе данной запроектной аварии:

- давление в первом и втором контурах составляют не более 115% от расчетного значения, т.е. давление в первом контуре не должно превышать 20,29 МПа, давление во втором контуре не должно превышать 9,315 МПа;
- топливные таблетки не плавятся даже локально;
- наивысшая температура оболочки, достигаемая в аварийных условиях, не превышает 1200 ℃.

Работа СПОТ ПГ моделировалась на примере РУ В-491Т. СПОТ ПГ на РУ В-491Т спроектирован аналогично РУ В-491, т.е. конечным поглотителем тепла при работе СПОТ ПГ является вода в баках аварийного отвода тепла.

Исходное событие моделировалось для начала топливной кампании, реактор до исходного события работал на полной мощности, рабочая группа в положении 50 %. Моделировалось 7200 секунд (2 часа) аварийного процесса.

Основные начальные условия РУ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные начальные условия РУ

Параметр реактора	Значение
Мощность, МВт	3200
Число работающих ГЦНА, шт.	4
Расход теплоносителя через петлю, $м^3/ч$	22250
Температура на входе в АЗ, ℃	298,4
Давление на выходе из реактора, МПа	16,2
Давление на выходе ПГ, МПа	7,0
Температура питательной воды, подаваемой в ПГ, ℃	225

Использовался детерминистический метод анализа. При выполнении расчетного анализа использовались исходные значения нейтронно-физических параметров, характеризующих исходное состояние активной зоны (АЗ), которые приводят к наиболее консервативным (наименее благоприятным) результатам по отношению к оцениваемым приемочным критериям.

Основные консервативные начальные условия для АЗ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные начальные условия для АЗ

Параметр реактора	Значение
Температурный коэффициент реактивности топлива, 10^{-5} ℃$^{-1}$	-2,53
Температурный коэффициент реактивности замедлителя (включая изменения плотности), 10^{-5} ℃$^{-1}$	-19,65
Эффективная доля запаздывающих нейтронов, %	0,50
Среднее время жизни мгновенный нейтронов, мкс	14,8

Эффективность аварийной защиты, %	8,4
Исходное положение ОР СУЗ, %	50
Скорость извлечения ОР СУЗ, см/с	2
Рассматриваемое время падения регулирующих органов, с	4

Из-за отказа СКУ по сценарию исходного события постулировался отказ следующих систем:

- автоматический регулятор мощности (АРМ);
- подпитка-продувка первого контура, электронагреватели КД, впрыск в КД;
- нормальное регулирование расходов питательной воды в ПГ;
- редукционная установка сброса пара в конденсатор (БРУ-К);
- редукционная установка сброса пара в атмосферу (БРУ-А).

СПОТ ПГ срабатывает по сигналам диверсной защиты.

В расчете используется модель горячих каналов. Выбирается ТВС, в котором достигается наибольшее значение температуры топлива. В этом ТВС в качестве первого горячего канала выбирается твэл с минимальным значением теплопроводности газового зазора, а в качестве второго – с максимальным.

Расположение кассет с ОР СУЗ, кассеты из которой извлекается ОР СУЗ, горячих каналов и кассеты с застрявшим ОР СУЗ (принято, что один наиболее эффективный ОР СУЗ из АЗ, расположенный в области наибольшего роста нейтронного потока, застревает в крайнем верхнем положении) представлено на рисунке 2.

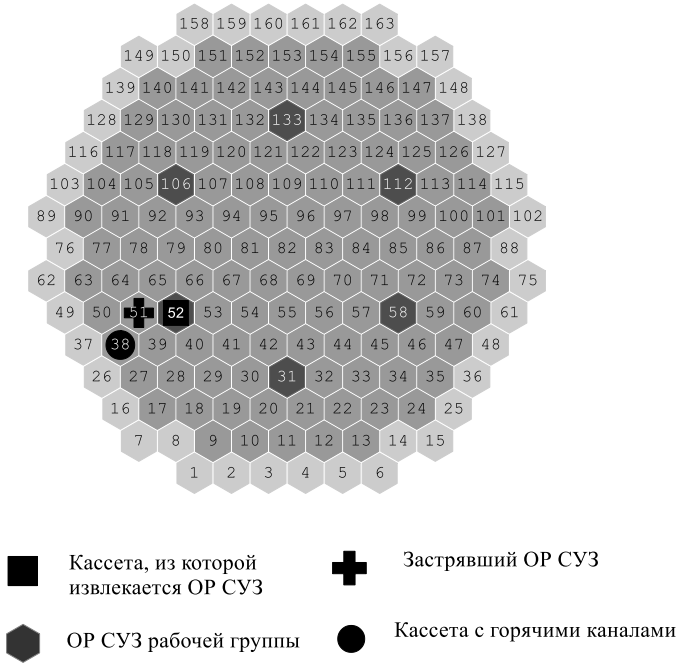

Рисунок 2 – Нумерация ТВС в картограмме АЗ, расположение ОР СУЗ и выделенных горячих каналов

Результаты моделирования запроектной аварии

Поскольку система спроектирована с учетом принципа единичного отказа, определялись мощностные характеристики СПОТ, при которых система не будет способна выполнять своих функций по расхолаживанию при отказе одного канала. Для этого проводились вариантные расчеты при пониженных мощностных характеристиках СПОТ ПГ при отказе третьего канала: мощность, снимаемая СПОТ при данном давлении в ПГ, варьировалась в интервале от 30 до 100 % от номинального значения с шагом 10 %.

Результаты расчета представлены на рисунках 3 – 17.

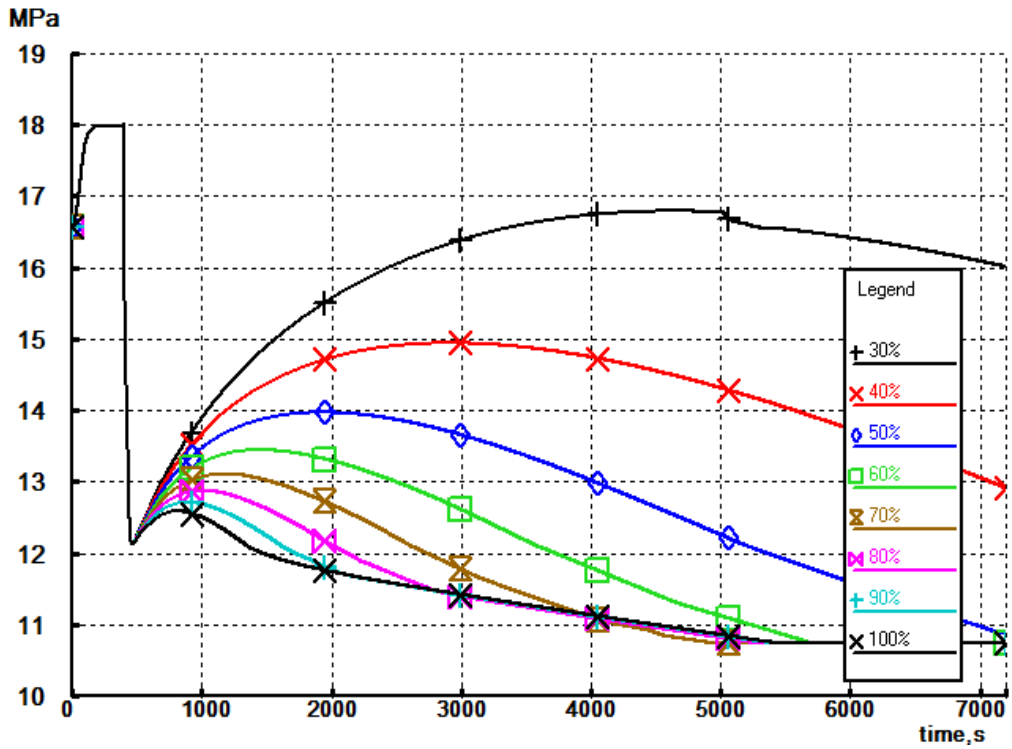

Рисунок 3 - Давление теплоносителя на выходе реактора для разных мощностных характеристик СПОТ

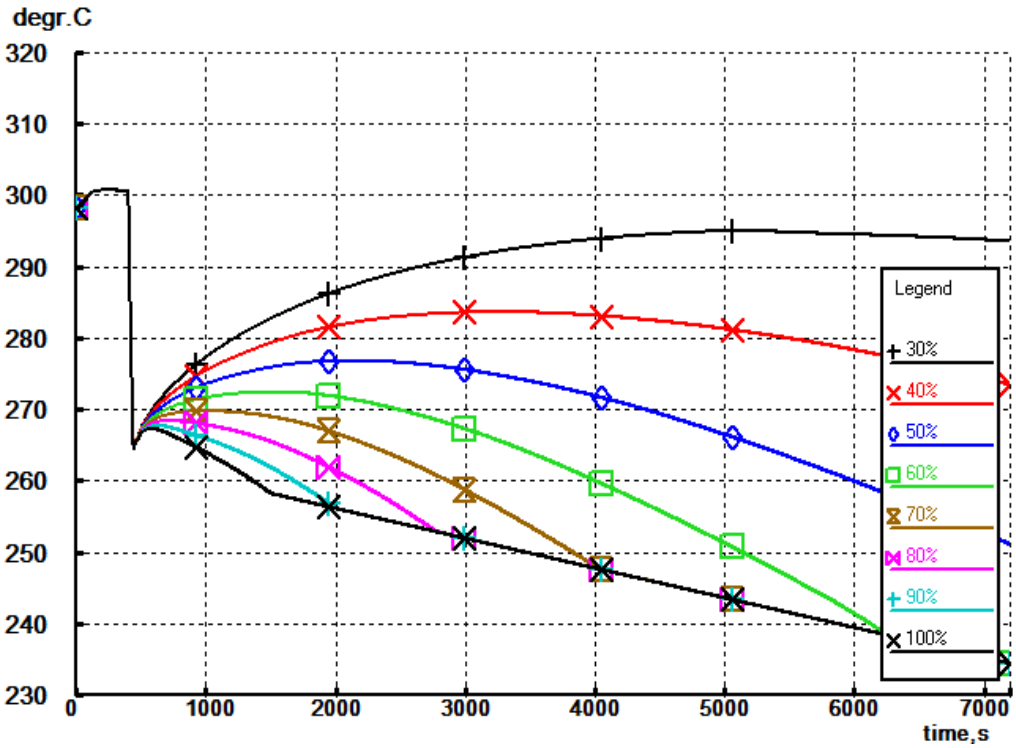

Рисунок 4 – Температура в холодных нитках первой петли для разных мощностных характеристик СПОТ

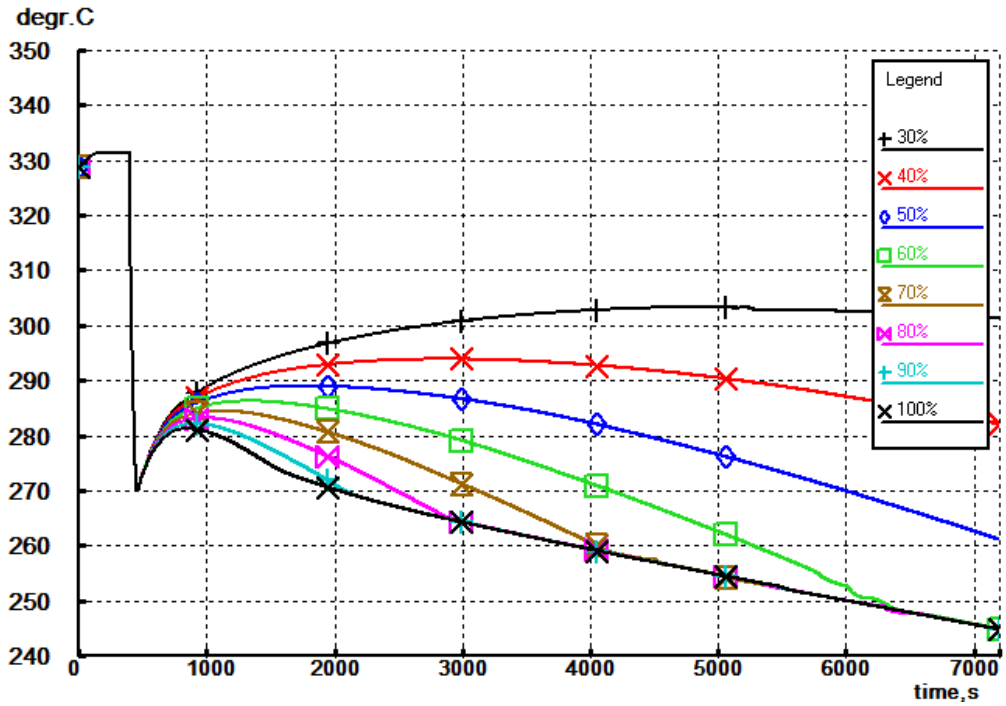

Рисунок 5 – Температура в горячих нитках первой петли для разных мощностных характеристик СПОТ

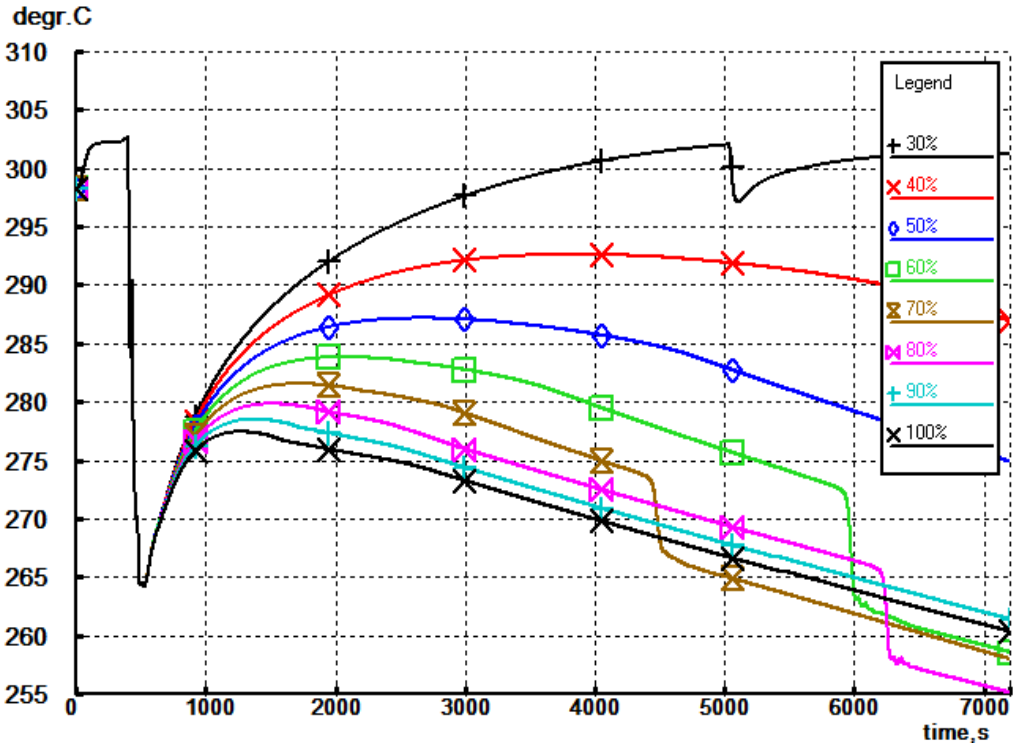

Рисунок 6 – Температура в холодных нитках третьей петли для разных мощностных характеристик СПОТ

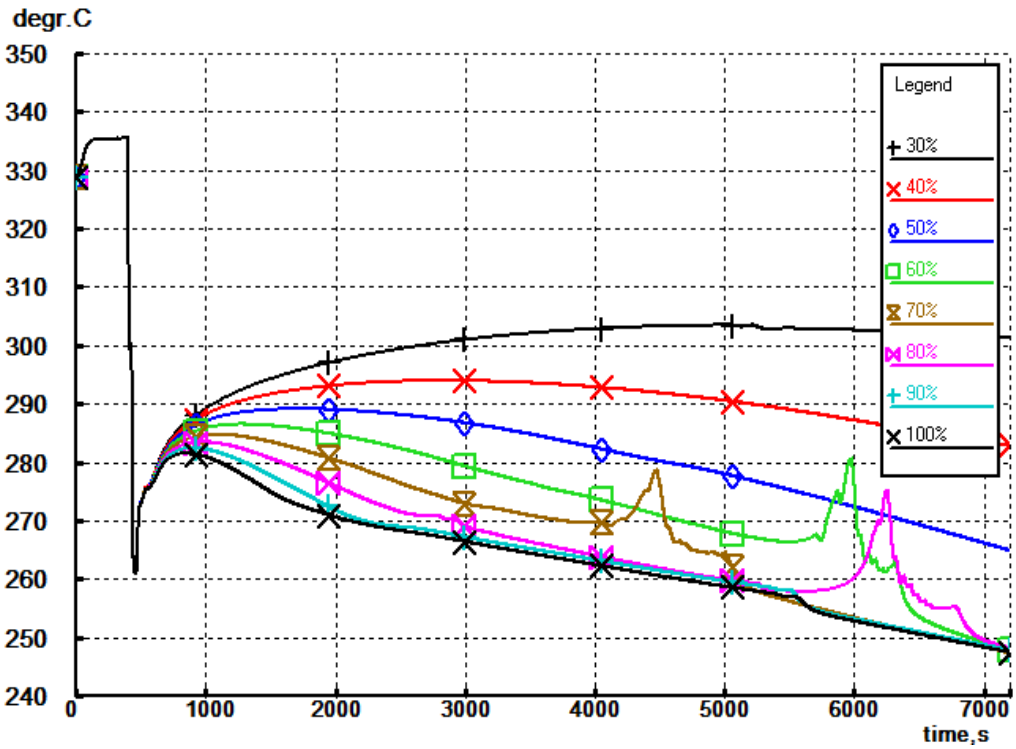

Рисунок 7 – Температура в горячих нитках третьей петли для разных мощностных характеристик СПОТ

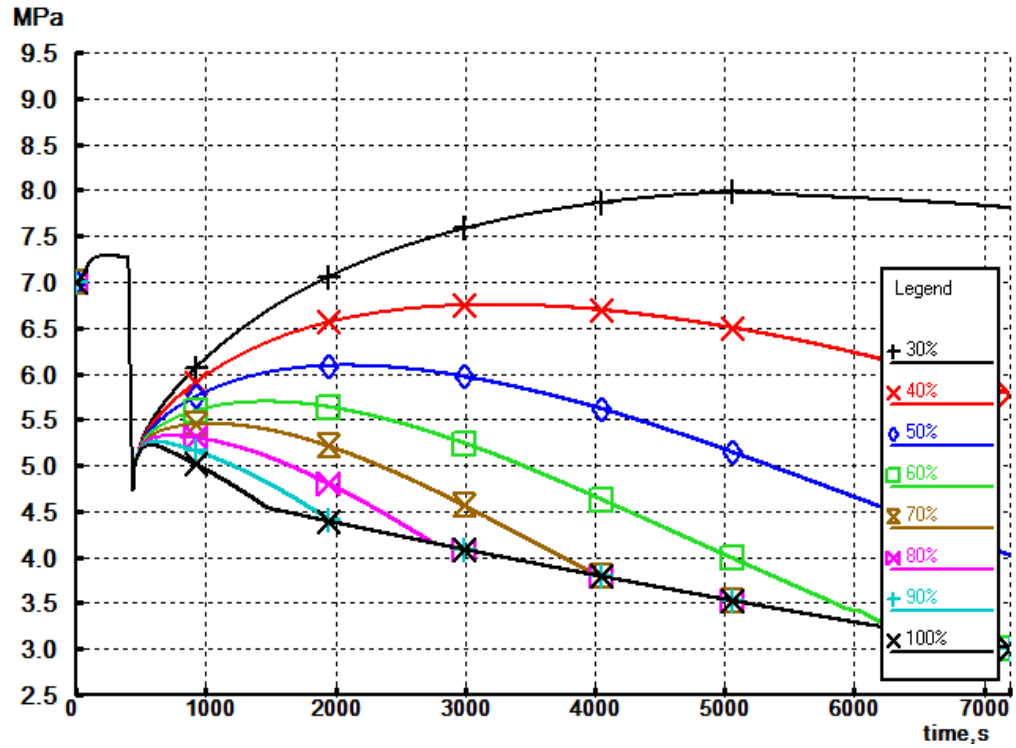

Рисунок 8 – Давление пара на выходе первого ПГ для разных мощностных характеристик СПОТ

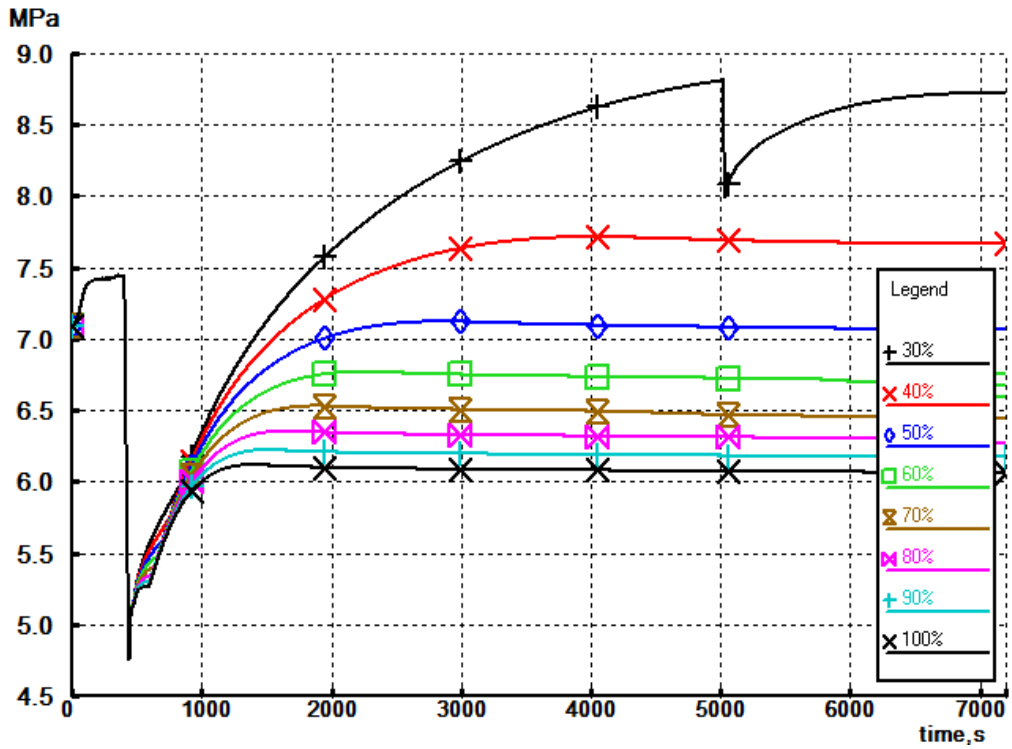

Рисунок 9 – Давление пара на выходе третьего ПГ для разных мощностных характеристик СПОТ

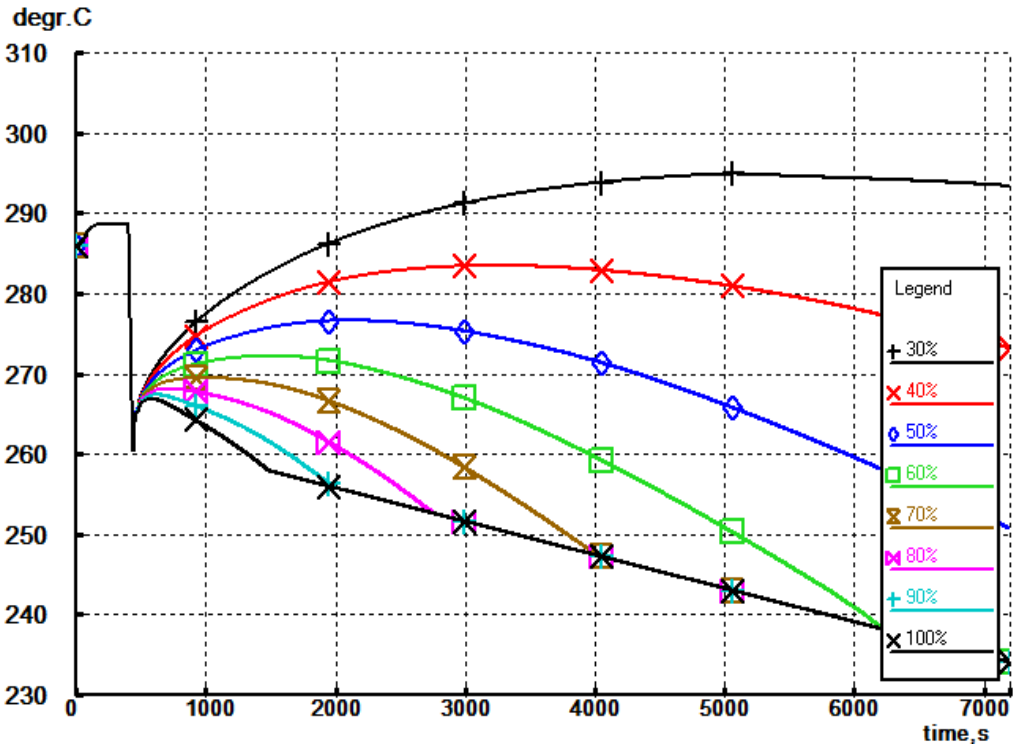

Рисунок 10 – Температура пара на выходе первого ПГ для разных мощностных характеристик СПОТ

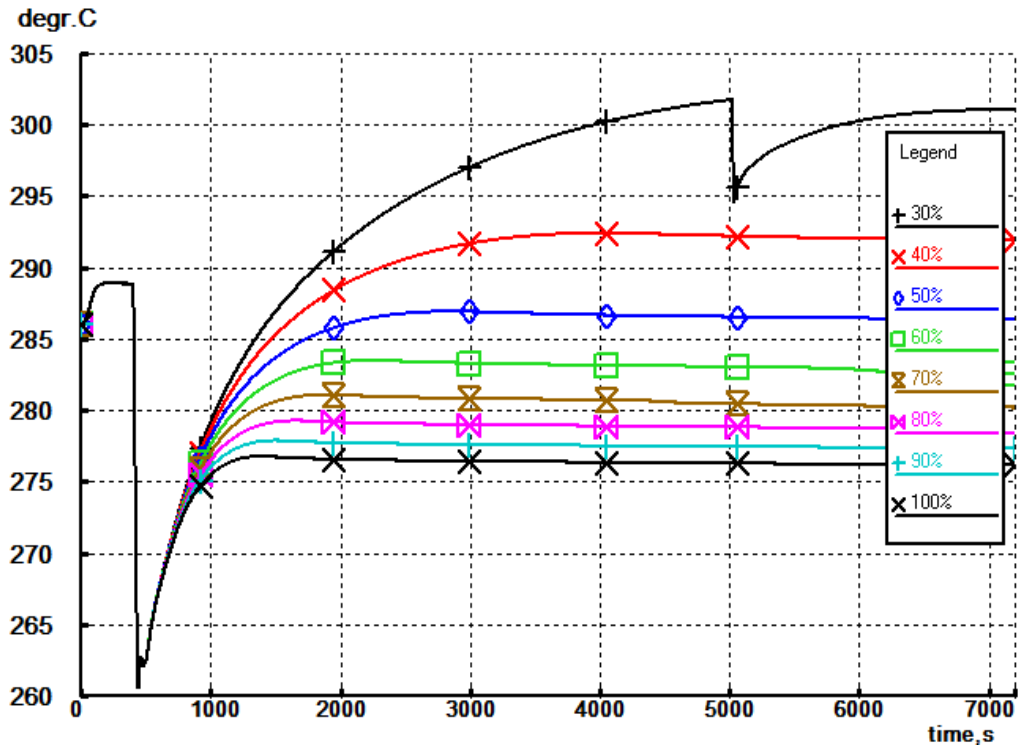

Рисунок 11 – Температура пара на выходе третьего ПГ для разных мощностных характеристик СПОТ

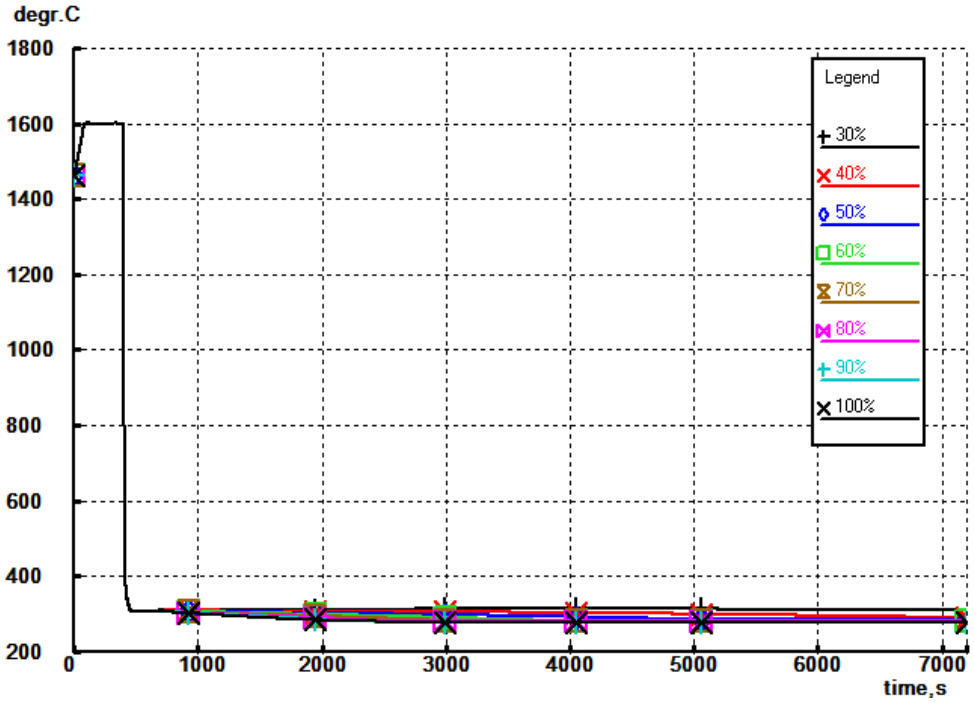

Рисунок 12 – Максимальная температура топлива в центре твэл в горячем канале ГК 1 для разных мощностных характеристик СПОТ

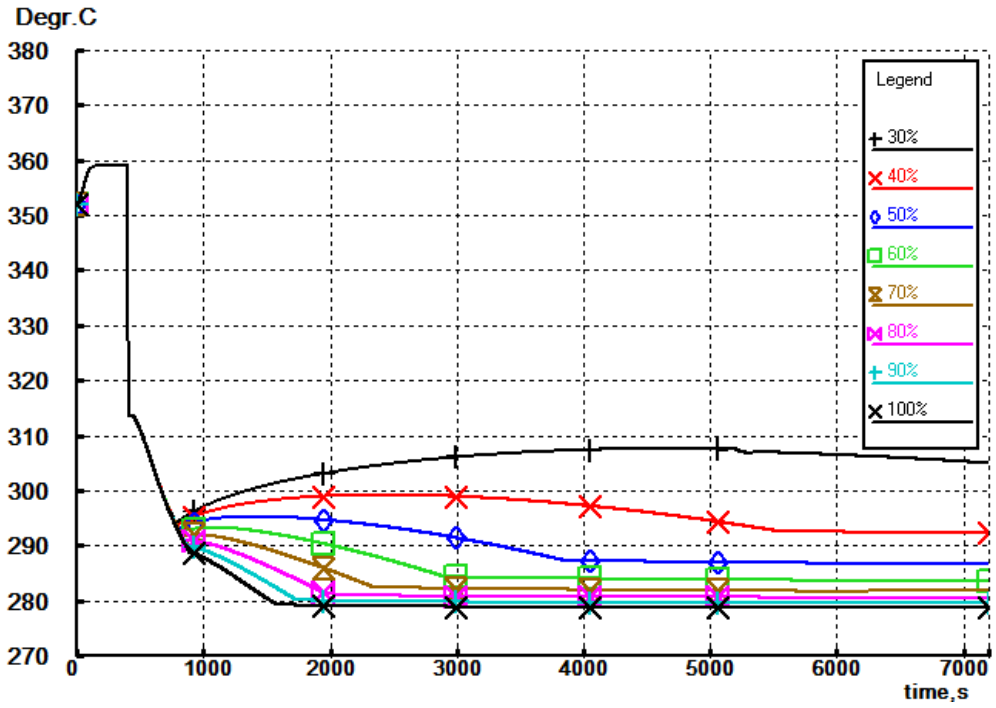

Рисунок 13 – Максимальная температура оболочки твэл в горячем канале ГК 2 для разных мощностных характеристик СПОТ

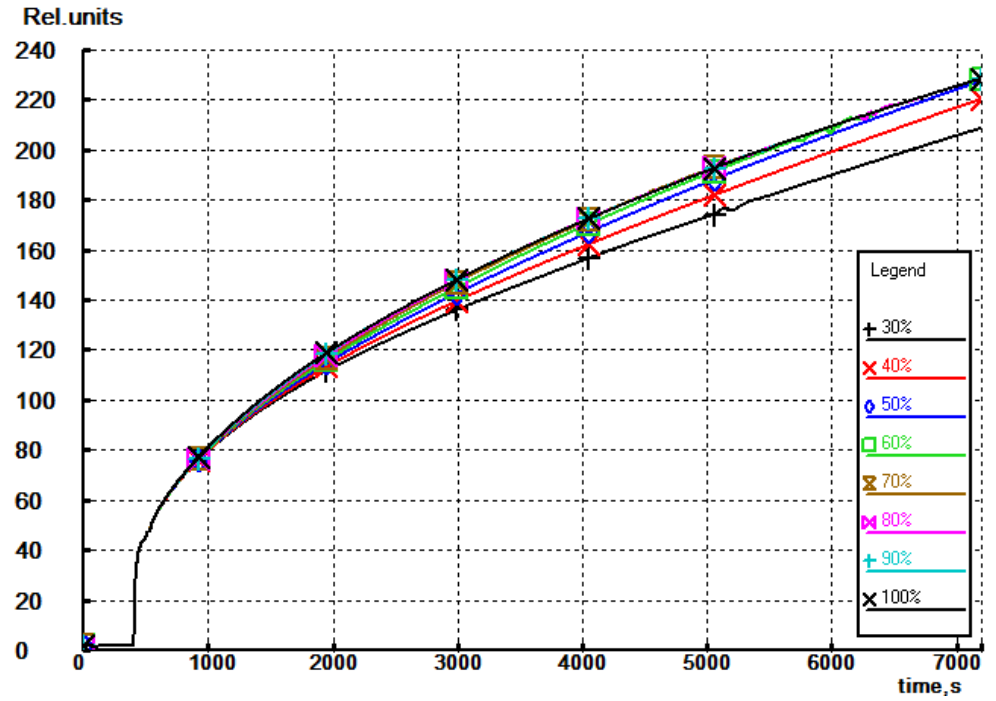

Рисунок 14 – Минимальный запас до кризиса теплообмена твэл в горячем канале ГК 2 для разных мощностных характеристик СПОТ

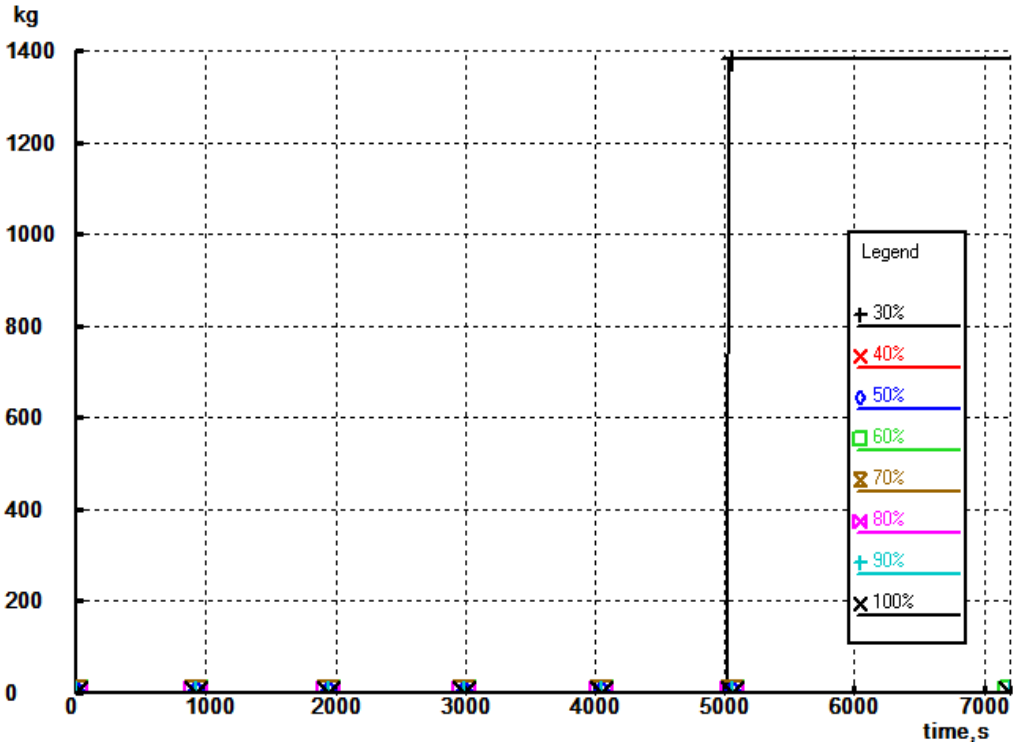

Рисунок 15 – Суммарная масса, стравленная через все ИПУ ПГ для разных мощностных характеристик СПОТ

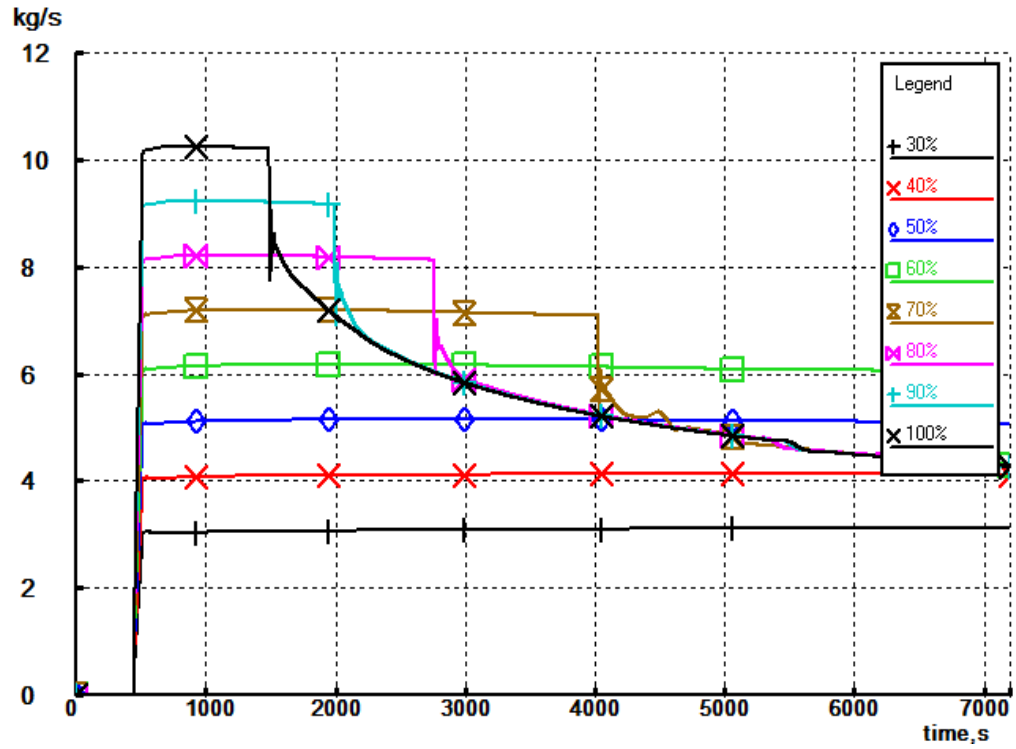

Рисунок 16 – Расход через первый канал СПОТ для разных мощностных характеристик СПОТ

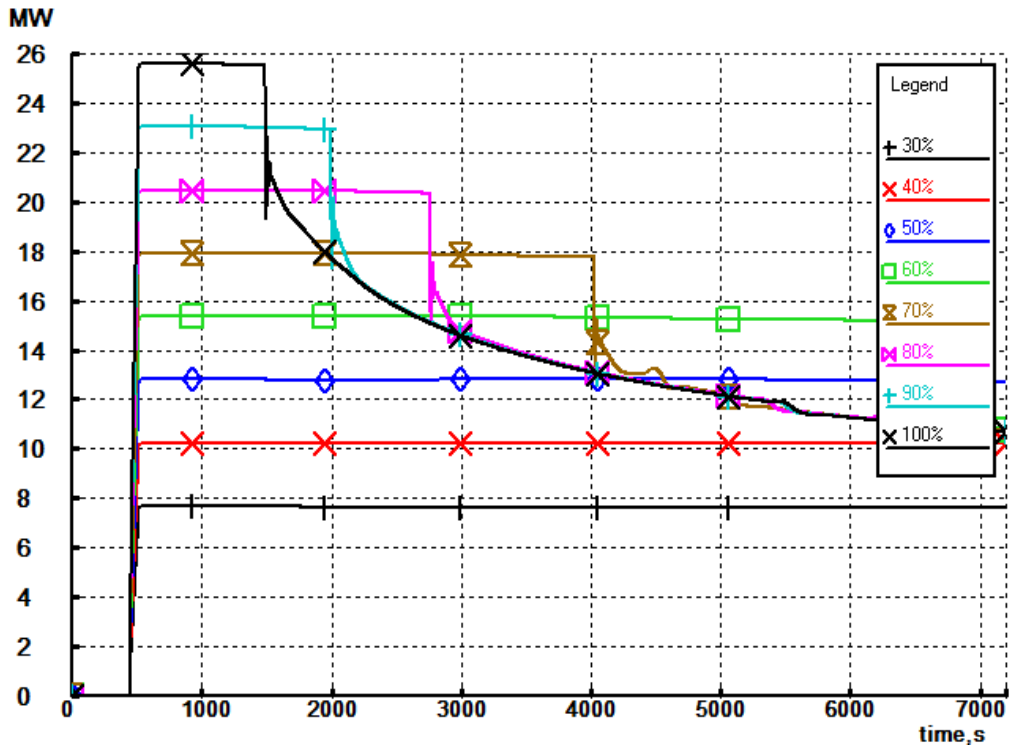

Рисунок 17 – Мощность, снимаемая первым каналом СПОТ для разных мощностных характеристик СПОТ

Параметры первой, второй и четвертой петли меняются похожим образом, поэтому все изменения параметров петель с работающей СПОТ с течением времени приведены на примере первой петли.

Для всех рассматриваемых мощностных характеристик СПОТ ПГ выполняются приемочные критерии данной запроектной аварии: давление в первом и втором контуре не превышает предельных (рисунки 3, 8 и 9); температура топлива не достигает температуры плавления (рисунок 12); температура оболочки не достигает температуры начала самоподдерживающейся пароциркониевой реакции (рисунок 13).

Давление пара на выходе ПГ с работающими СПОТ согласно рисунку 8 в первое время растет, однако спустя время начинает падать и в какой-то момент начинает расхолаживаться с постоянной скоростью для любой рассмотренной мощностной характеристики СПОТ.

Давление пара на выходе ПГ с неработающей СПОТ согласно рисунку 9 растет до тех пор, пока не стабилизируется до определенного постоянного

значения, причем чем меньше мощностная характеристика СПОТ, тем выше это постоянное значение (например, при мощности СПОТ равной 80 % от номинальной, давление стабилизируется на уровне 6,3 МПа, а при мощности СПОТ равной 50 % от номинальной, давление стабилизируется на уровне 7,1 МПа). Если это постоянное значение окажется выше уставки срабатывания контрольного ИПУ ПГ 8,8 МПа, то будет произведен сброс пара через клапан, после чего давление резко упадет, но спустя время снова достигнет уставки. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока уровень воды в ПГ не упадет и не начнут расти параметры первого контура. Поэтому критерием работоспособности СПОТ ПГ примем отсутствие факта сброса пара через сбросные клапаны ИПУ. Исходя из этого следует, что минимальная мощностная характеристика СПОТ, необходимая для расхолаживания РУ в случае отказа третьего канала в рассматриваемой запроектной аварии, составляет 40% от проектной мощностной характеристики.

Заключение

Выполнено моделирование запроектной аварии «Извлечение одного ОР СУЗ с отказом по общей причине технических средств СКУ безопасности» РУ ВВЭР-1200 в программном комплексе ATHLET/BIPR-VVER. Получено, что минимальная мощностная характеристика СПОТ, необходимая для расхолаживания РУ в рассматриваемой запроектной аварии с учетом принципа единичного отказа и условий ухудшенного теплообмена, составляет 40% от проектной мощностной характеристики. Можно сделать вывод, что система спроектирована с высоким запасом по мощности. Объясняется это тем, что остаточное тепловыделение составляет порядка процентов от номинальной мощности реактора, и при достаточно высоком давлении пара во втором контуре мощности СПОТ ПГ с запасом хватает для того, чтобы расхолаживать РУ. Но спустя несколько часов после срабатывания аварийной защиты, мощность остаточного тепловыделения остается порядка процентов

от номинальной мощности, в то время как давление пара во втором контуре значительно снижается, и, соответственно, снижается мощность, снимаемая СПОТ. Поэтому теплообменники спроектированы таким образом, чтобы при низком давлении пара во втором контуре СПОТ ПГ продолжала расхолаживать РУ.

Полученные результаты подтверждают пассивную безопасность РУ ВВЭР-1200 в авариях с обесточиванием или отказом СКУ, а также свидетельствуют о том, что СПОТ ПГ спроектирован с высокой степенью резервирования по мощности.

Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» ОПБ-88/97 (НП-001-97): утв. постановлением Госатомнадзора России от 14.11.1997 г. № 9
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций» НП-082-07: утв. постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 декабря 2007 г. № 4
3. Схемные решения и принципы работы пассивных систем аварийного охлаждения различных типов ЯЭУ: Учебное пособие / А.В. Морозов, О.В. Ремизов, Ю.А. Маслов, В.С. Харитонов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015
4. Лизоркин М., Никонов С., Лангенбах С., Велков К. Разработка и применение комбинированного кода термогидравлики и нейтронной кинетики ATHLET/BIPR-VVER для анализа безопасности, EUROSAVE-2006, Париж, 13-14 ноября, 2006

5. Программное средство ATHLET/BIPR-VVER. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер 455 от 24.10.2018

6. Алпеев А.С. Диверсные защиты. Обеспечение разнообразия при проектировании аварийных защит атомных станций // Ядерная и радиационная безопасность, 2015. № 2 (76), стр. 11-14. Режим доступа - https://www.secnrs.ru/publications/nrszine/2-76-2015/paper2.pdf (дата обращения - 04.05.2020)

7. В.И. Крыжановский, М.А. Подшибякин, В.М. Рогов, А.В. Кирсанов, С.А. Щедрина. Разработка алгоритмов для дополнительной диверсной системы защиты АЭС-2006. Режим доступа - http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/yb-2014/documents/18.pdf (дата обращения - 04.05.2020)

Literature

1. Federal norms and rules in the field of atomic energy use "General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants" OPB-88/97 (NP-001-97): approved. Resolution of the Gosatomnadzor of Russia dated November 14, 1997 No. 9

2. Federal norms and rules in the field of the use of atomic energy "Nuclear safety rules of reactor facilities of nuclear power plants" NP-082-07: approved. Decree of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of December 10, 2007 No. 4

3. Schematic solutions and principles of operation of passive emergency cooling systems of various types of nuclear power plants: Textbook / A.V. Morozov, O. V. Remizov, Yu.A. Maslov, V.S. Kharitonov. Moscow: NRNU MEPhI, 2015

4. Lizorkin M., Nikonov S., Langenbuch S., Velkov K. Development and Application of the Coupled Thermal-Hydraulics and Neutron-Kinetics Code ATHLET/BIPR-VVER for Safety Analysis, EUROSAVE-2006, Paris, November 13-14, 2006

5. ATHLET/BIPR-VVER software tool. Attestation passport of the software tool. Registration number 455 from 10.24.2018

6. Alpeev A.S. Diverse actuation systems. Provision of Diversity in the Design of Emergency Protection of Nuclear Power Plants // Nuclear and Radiation Safety, 2015. No. 2 (76), pp. 11-14. Access mode - https://www.secnrs.ru/publications/nrszine/2-76-2015/paper2.pdf (date of access - 04/05/2020)

7. V.I. Kryzhanovsky, M.A. Podshibyakin, V.M. Rogov, A.V. Kirsanov, S.A. Shchedrin. Development of algorithms for an additional diverse actuation system for NPP-2006. Access mode - http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/yb-2014/documents/18.pdf (date of access - 04/05/2020)