

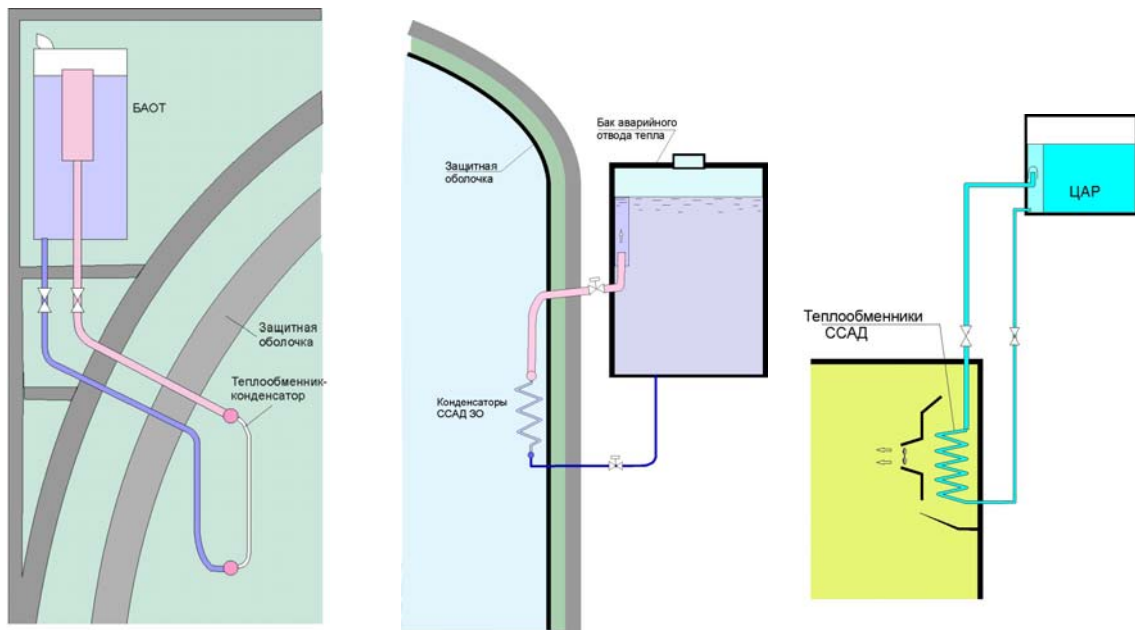
«ЗАДАЧИ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ СПОТ ЗО ДЛЯ АЭС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ»

А.М. Бахметьев, М.А. Большухин, В.А. Бабин, А.М. Хизбуллин, О.В. Макаров
ФГУП ОКБМ

С.Е. Семашко, В.Г. Сидоров, И.М. Ивков, С.Б. Алексеев
ФГУП «СПбАЭП»

Постановка задачи. Оснащение АЭС нового поколения системами управления ЗПА, основанными на пассивных принципах действия является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования безопасности атомных станций.

Подобные системы проектируются для АЭС-2006, ПАЭС с РУ КЛТ-40С и атомной станции с РУ ВВЭР-300 (рис. 1).



СПОТ ЗО АЭС-2006

ССАД ЗО РУ ВВЭР-300

ССАД ЗО РУ КЛТ-40С

Рис.1- Пассивные системы отвода тепла от защитной оболочки АЭС нового поколения

В ряду актуальных задач для проекта АЭС-2006 на площадке ЛАЭС-2 (далее по тексту – проекта ЛАЭС-2) стоит задача расчетно-экспериментального обоснования эффективности работы системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки (СПОТ ЗО). Данная система предназначена для обеспечения отвода тепла из защитной оболочки при запроектных авариях с потерей теплоносителя первого контура и отказе активных систем безопасности. Основная функция данной системы - обеспечение неперевышения максимального проектного давления под ЗО с целью сохранения целостности последнего барьера безопасности. Особенностью системы является ее непрерывная готовность к работе и отсутствие обеспечивающих систем. Работа системы осуществляется при естественной циркуляции теплоносителей.

Выбор конструктивных параметров СПОТ ЗО. Выбор основных конструктивных параметров СПОТ ЗО в проекте ЛАЭС-2 осуществляется с привлечением результатов расчетно-экспериментальных исследований аналогичных систем РУ ВВЭР-640. В частности, для обеспечения надежной работы контура

циркуляции СПОТ 30 принят ряд технических решений, направленных на предотвращение конденсационных гидроударов.

Вместе с тем, по сравнению с аналогичными пассивными системами проекта ВВЭР-640, для проекта ЛАЭС-2 изменяется геометрия и высотные отметки расположения элементов СПОТ 30, имеются отличия в конструкции теплообменника СПОТ 30 и БАОТ, а также существует разница в интенсивности теплогидравлических процессов за счет различий в мощностях и масштабах этих реакторных установок.

Комплекс расчетных исследований по выбору основных характеристик СПОТ 30 ЛАЭС-2 с использованием различных теплогидравлических кодов (КУПОЛ-М, RELAP5/MOD3.2 и др.) позволил определить геометрические характеристики контура охлаждения СПОТ 30, объемы БАОТ, величину теплопередающей поверхности, интенсивность теплопередачи от защитной оболочки и т.д.

Описание основных характеристик СПОТ 30 проекта ЛАЭС-2. СПОТ 30 включает в себя 16 теплообменников - конденсаторов, расположенных в подкупольном пространстве 30, подключенных трубопроводами к бакам аварийного отвода тепла с запасом воды, которая в процессе аварии выпаривается в атмосферу. Каждые 4 теплообменника-конденсатора подключены к отдельному БАОТ и таким образом образуется 16 индивидуальных и практически идентичных контуров (см. рис.1) охлаждения для отвода тепла от защитной оболочки.

Каждый из теплообменников-конденсаторов состоит из 132 вертикальных труб 38x3 мм, высотой ~ 5.0 м. Трубы объединяются в теплообменный пучок с помощью нижнего и верхнего коллектора. Полная теплообменная поверхность одного теплообменника-конденсатора составляет ~75.0 м², а всей системы СПОТ 30 (16 теплообменников-конденсаторов) - ~1200 м².

Подъемный трубопровод связывает верхний коллектор секции теплообменника с БАОТ. Трубопровод подключается к специальному пароприемному устройству, расположенному в БАОТ. Опускной трубопровод подключается к нижней части БАОТ и нижнему коллектору теплообменника.

Основные технические характеристики СПОТ 30 ЛАЭС-2 приведены в таблице 1

На трубопроводах системы предусмотрена локализирующая арматура с электроприводом вне защитной оболочки.

На соединительных трубопроводах, расположенных внутри защитной оболочки установлены предохранительные устройства, предотвращающие переопрессовку контура в случае аварийного закрытия локализирующей арматуры.

Максимальная расчетная мощность СПОТ 30 (3 каналов) составляет 17-19 МВт.

Запас воды в БАОТ рассчитан на длительность пассивного теплоотвода - не менее 24 часов. Для обеспечения работоспособности системы в период после 24 часов предполагается подпитка баков аварийного отвода тепла водой из резервных запасов воды, находящихся на площадке.

Описание экспериментального стенда СПОТ 30. Как уже было отмечено выше, СПОТ 30 представляет собой 16 индивидуальных и практически идентичных контуров охлаждения для отвода тепла от защитной оболочки.

Выполнение испытаний на полномасштабной модели контура охлаждения с использованием модели одного теплообменника-конденсатора позволит выполнить прямое обоснование работоспособности конструкции контура охлаждения СПОТ 30, а также исследовать влияния:

- гидродинамической неустойчивости потока в контуре охлаждения на работоспособность системы;

- условий транспорта пароводяной смеси до выхода ее в БАОТ, исключая конденсационные гидравлические удары и повышенный уровень вибрации;

- состава парогазовой смеси ЗО на эффективность работы СПОТ ЗО;
- повторной подпитки БАОТ водой на работоспособность системы.

Полномасштабный стенд контура охлаждения СПОТ ЗО устанавливается на экспериментальной площадке ФГУП ОКБМ. Схема стенда контура охлаждения представлена на рис.2.

Таблица 1

Основные технические характеристики СПОТ ЗО ЛАЭС-2

Наименование	Значение
Количество каналов, шт.	4
Количество теплообменников-конденсаторов в канале, шт.	4
Поверхность теплообмена в канале, не менее, м ²	4 × 75 = 300
Количество секций БАОТ в канале, шт.	9
Объем запаса воды БАОТ в канале, т	538
Диаметр подводящего трубопровода к каждому теплообменнику-конденсатору, мм	159x6
Диаметр отводящего трубопровода от каждого теплообменника-конденсатора, мм	220x7
Давление охлаждаемой среды, МПа (абс.)	0,1-0,5
Температура охлаждаемой среды, °С	30-150
Давление охлаждающей среды, МПа (абс.)	0,1-0,27
Температура охлаждающей среды, °С	30-125
Габаритные размеры конденсатора, м	6,3 x 0,77 x 5
Масса теплообменника-конденсатора, т	~3,0

Модель теплообменника-конденсатора по своим основным конструктивным параметрам соответствует теплообменнику-конденсатору СПОТ ЗО системы пассивного отвода тепла проекта ЛАЭС-2. В модели изменена только форма коллекторов, таким образом, чтобы разместить модель теплообменника-конденсатора в емкости, объем которой составляет 59 м³.

Контур охлаждения по своему конструктивному исполнению соответствует реальному контуру охлаждения теплообменников-конденсаторов СПОТ ЗО проекта ЛАЭС-2.

На стенде предполагается испытать несколько вариантов пароприемных устройств, позволяющих минимизировать или исключить образование конденсационных гидроударов, вызванных соприкосновением пара поступающего по подводящему трубопроводу с холодной водой в баке на начальном этапе работы системы.

Предусмотрено проведения испытаний эффективности теплообмена в условиях повышенных концентраций неконденсирующихся газов в парогазовой смеси. Заполнение емкости воздухом до определенного давления осуществляется непосредственно перед проведением эксперимента. В процессе эксперимента создается парциальное давление воздуха до 0,25-0,35 МПа (абс.).

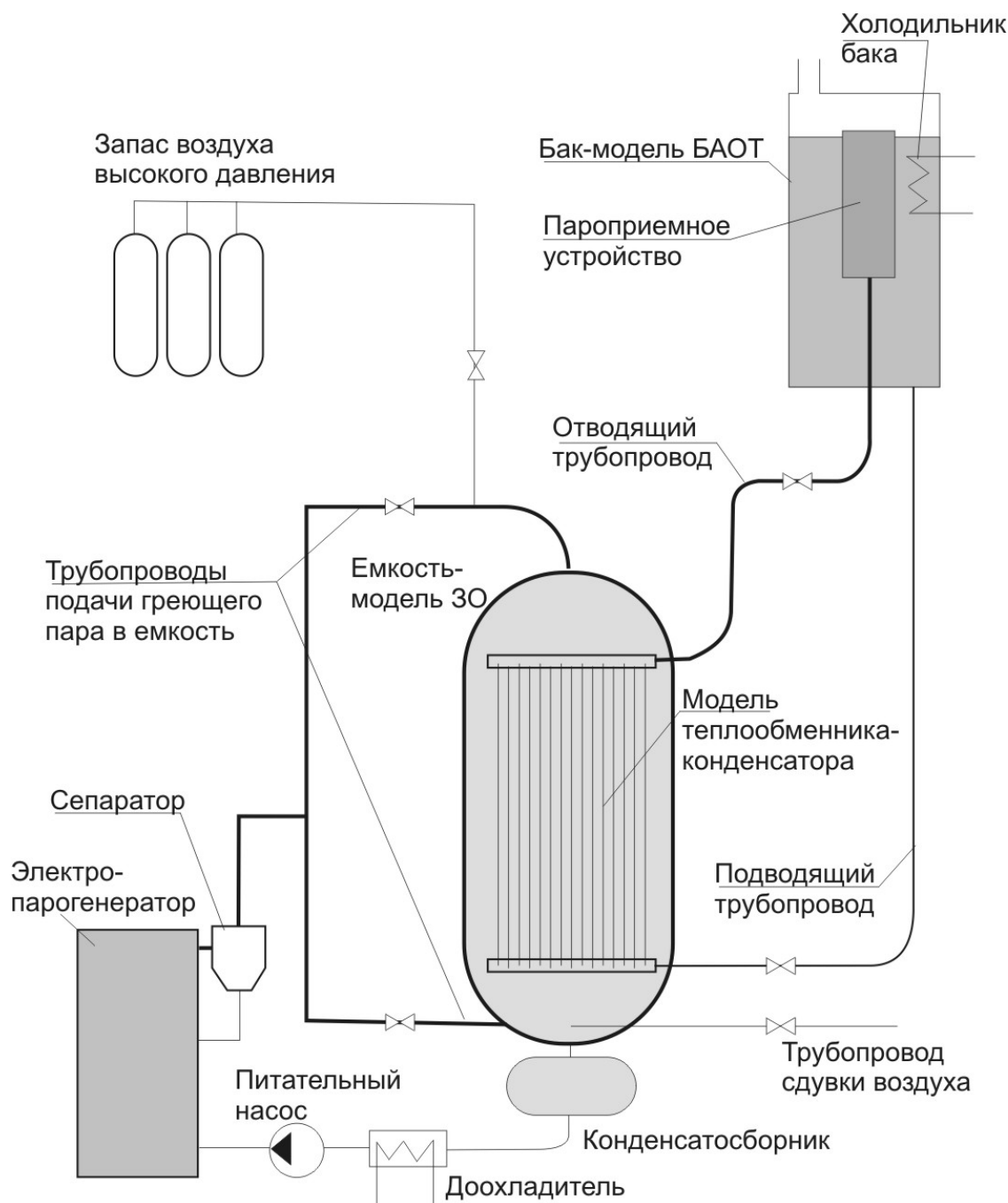


Рис.2 Схема полномасштабного стенда контура охлаждения СПОТ 30

Для проведения испытаний на «чистом паре» предусматривается предварительное удаление воздуха из емкости за счет подачи пара в верхнюю часть емкости и удаления газа из нижней части полости емкости в атмосферу.

Система управления электропарогенератора обеспечивает режимы поддержания заданной мощности и заданного давления пара. Максимальная мощность электропарогенератора составляет 2400 кВт. Максимальное расчетное давление – 1.0 МПа.

Система измерений. Предусматривается измерение следующих параметров:

- температуры парогазовой среды в объеме емкости, в том числе и вблизи поверхности нескольких теплообменных труб на различных участках по высоте трубного пучка, для определения поля концентрации пара и газа по высоте трубной системы, что позволит дать качественную картину эффективности теплообмена на различных участках трубной системы, а также получить количественные оценки

эффективности теплообмена на участках и их влияния на интегральную мощность всего теплообменника;

- температуры на внешней и внутренней поверхности одной из теплообменных труб на нескольких участках по высоте трубного пучка;

- температуры охлаждающего теплоносителя внутри нескольких теплообменных труб теплообменника-конденсатора. Наличие поверхностных термопреобразователей и термопреобразователей внутри трубной системы позволит оценить величину коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи на участках теплообмена, мощность теплосъема на участках модели теплообменника, степень однородности теплообмена в параллельных теплообменных трубах;

- температуры на участках греющего и охлаждающего контуров;

- температуры на различных участках бака и пароприемного устройства;

- расхода воды по контуру охлаждения и греющему контуру;

- давления теплоносителя в емкости;

- давлений на различных участках контура охлаждения;

- перепада давления на модели теплообменника-конденсатора;

- перепада давления на отводящей и подводящей трубах.

Для оценки уровня вибрации, на поверхности коллекторов и трубной системы теплообменника-конденсатора установлены датчики – виброакселерометры.

Кроме того, предусмотрено измерение ряда параметров, необходимых для управления и защиты оборудования стенда.

Проведение экспериментов. Экспериментальный стенд позволяет выполнить исследования в достаточно широком диапазоне по параметрам рабочих сред и тепловых потоков. Помимо прямого обоснования работоспособности СПОТ 30 в определенном диапазоне параметров охлаждаемой и охлаждающих сред целью испытаний является также получение достаточного объема данных для верификации расчетных кодов.

Проведение испытаний при **различной мощности электропарогенератора** позволит оценить эффективность и работоспособность контура охлаждения в условиях расчетных, повышенных и пониженных тепловых нагрузок.

Испытания в режиме **поддержания заданного давления в емкости** проводятся с целью имитации штатных условий СПОТ 30.

Цикл испытаний при **повышенной концентрации неконденсирующихся газов и на чистом паре** позволит получить зависимость конденсационной мощности теплообменника-конденсатора при различных газосодержаниях в контуре. Испытания на чистом паре проводятся после предварительной сдувки воздуха из емкости.

Режим повторной подпитки баков водой позволит обосновать работоспособность конструкции теплообменника-конденсатора и работу контура охлаждения после подачи холодной воды на осушенные участки контура охлаждения.

Отработка пароприемных устройств при различной мощности контура выполняется с целью выбора оптимальной конструкции, минимизирующей образование конденсационных гидроударов в баке при смешении пара с холодной водой.

Результаты расчетного обоснования стенда контура охлаждения СПОТ 30.

Расчетный анализ параметров экспериментального стенда выполнен с использованием интегрального кода «Купол-Раснар». Нодализация объема емкости-модели 30 (для Купола) представлена на рис.3

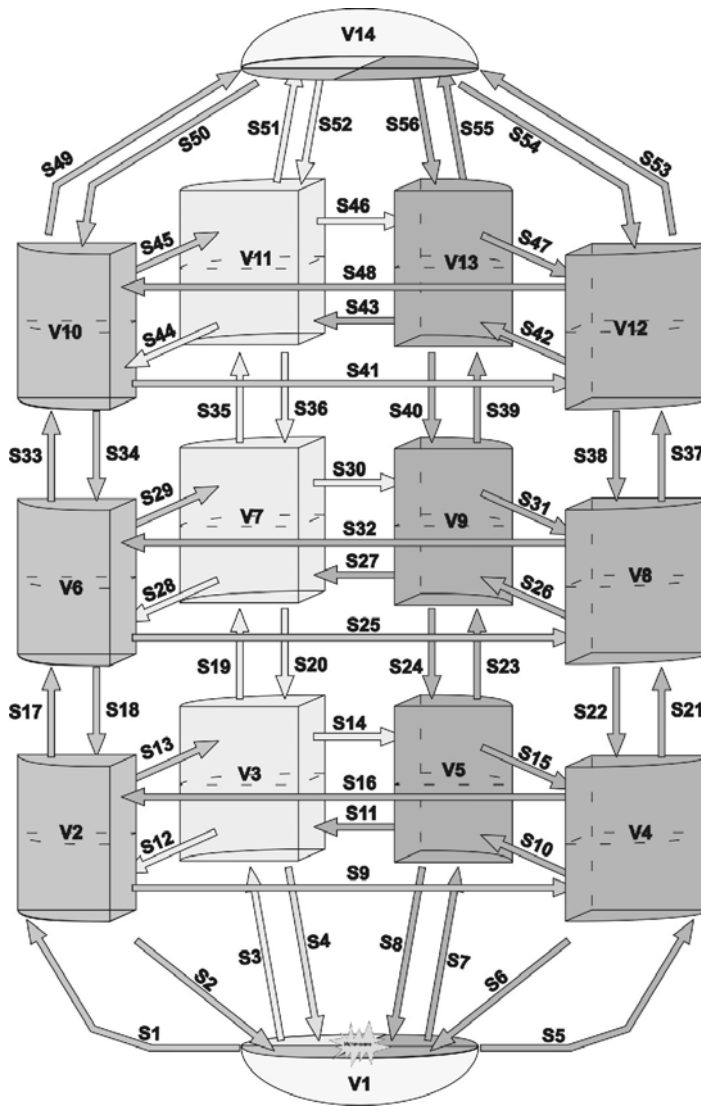


Рис.3 Расчетная схема объема емкости-модели 30

Объем емкости, разбит 14 объемами (боксов). Из них два объема – полости верхнего и нижнего днищ и 12 объемов в цилиндрической части емкости, в которой размещена модель теплообменника-конденсатора. С помощью тепловых структур каждый из данных объемов имеет тепловую связь с соответствующими участками поверхности модели теплообменника-конденсатора.

Контур охлаждения моделируется средствами «Раснара». Нодализационная схема контура охлаждения и бака представлена на рис.4

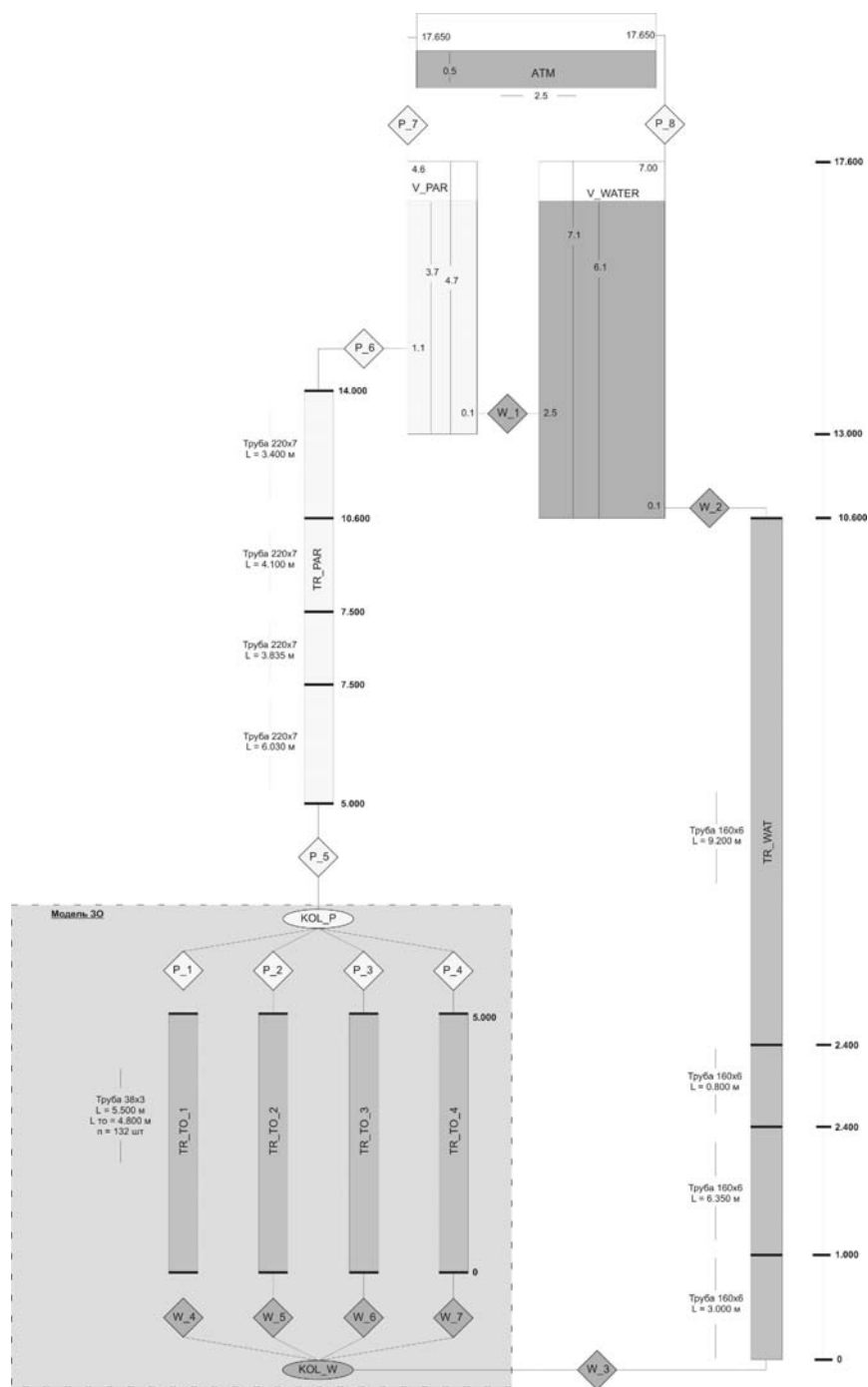


Рис.4- Расчетная схема контура охлаждения

Модель теплообменника-конденсатора условно разбита на 4 участка (по 33 теплообменных трубы) по проходному сечению и на 30 участков по высоте трубной системы. Трубная система с помощью 12 тепловых структур имеет тепловую связь с объемом емкости. Подводящий и отводящий трубопроводы по длине условно разбиты по 20 участков каждый. Бак и пароприемное устройство моделируется как объемы с уровнем и связаны между собой и с «атмосферой» гидравлическими соединениями.

Расчетный анализ выполнен для режима работы электропарогенератора на заданной мощности с подачей в емкость пара заданного расхода и энтальпии. Исходное давление воздуха – атмосферное.

Результаты расчетного анализа при подаче пара от электропарогенератора расходом 3 т/ч с энтальпией пара 2800 кДж/кг представлены на рис.4-8.

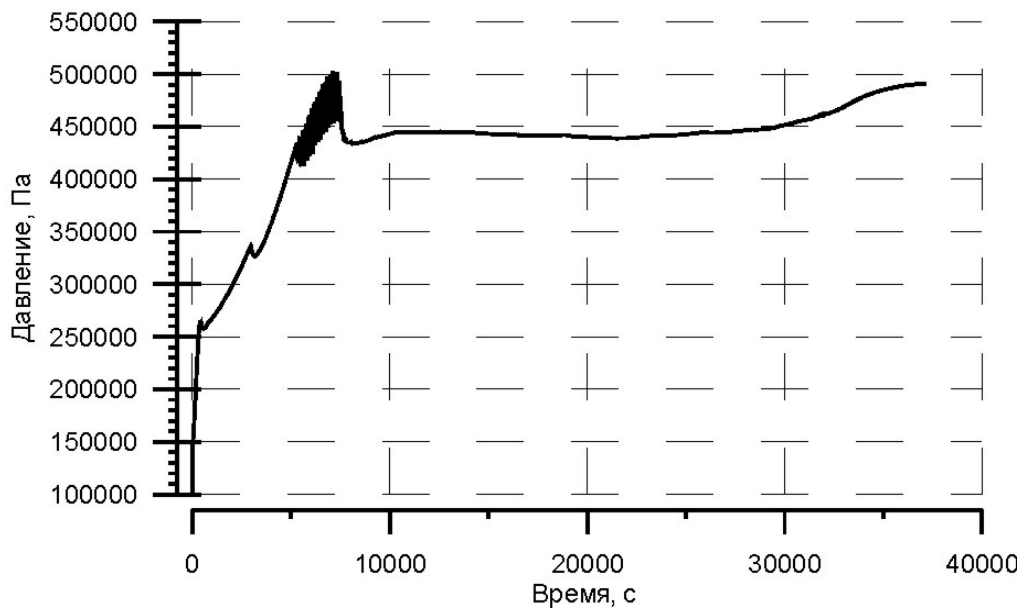


Рис.4 Давление в емкости

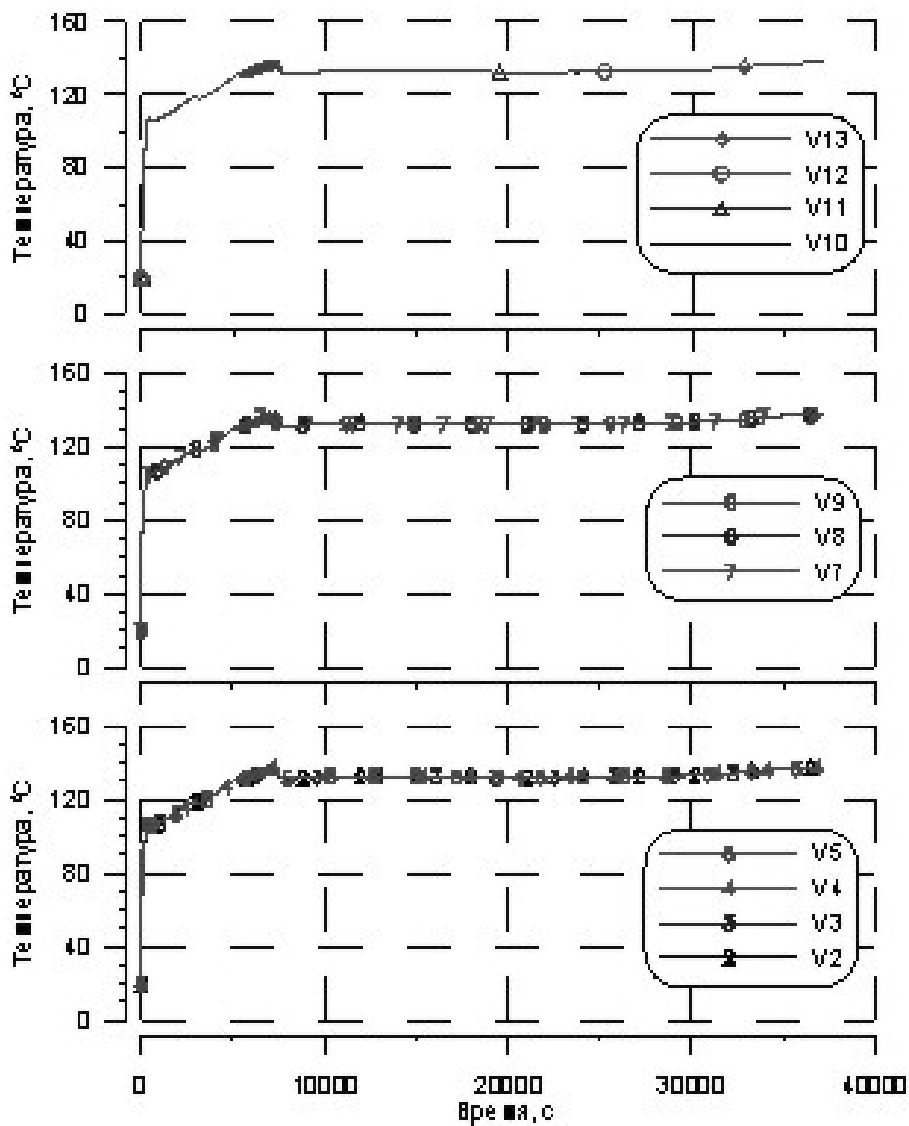


Рис.5 Температура в различных участках емкости

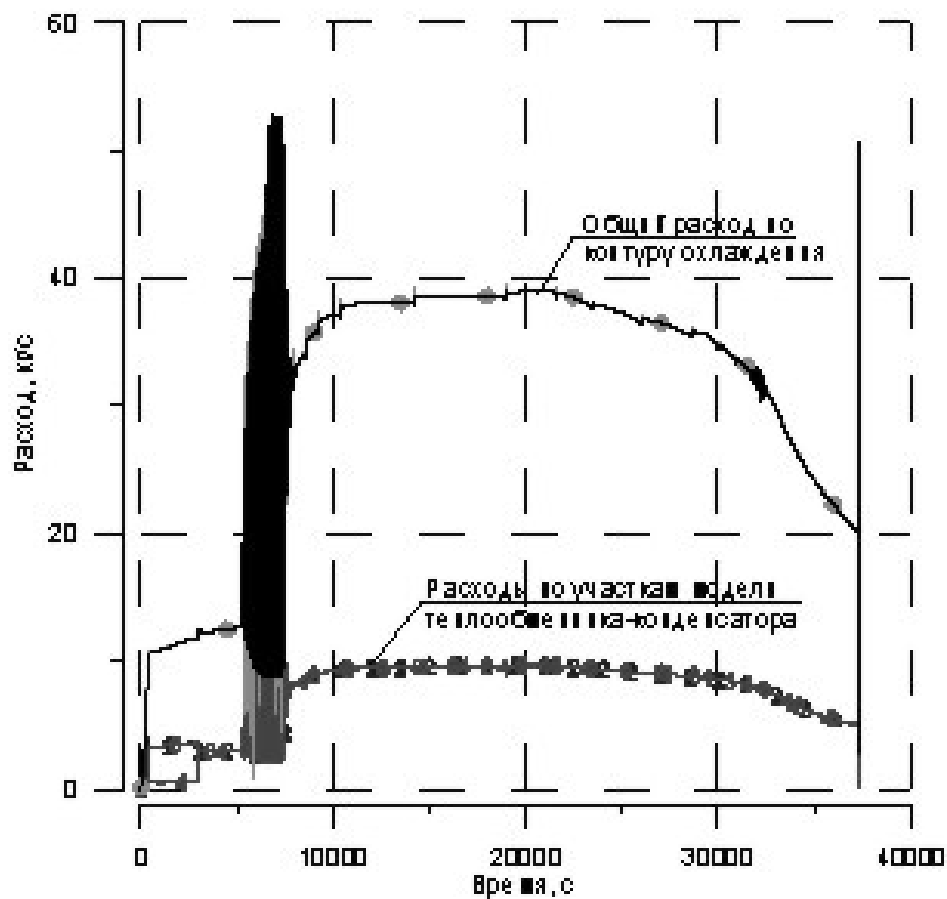


Рис.6. Расход по участкам контура охлаждения и теплообменника-конденсатора

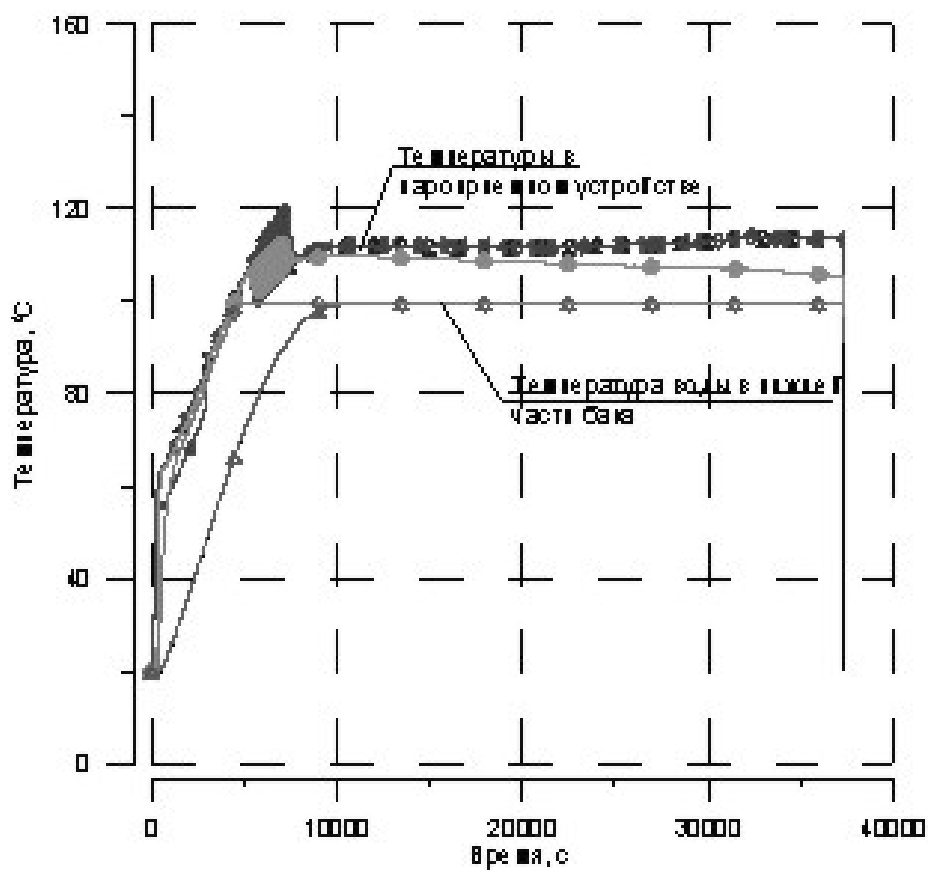


Рис.7. Температура воды на участках бака

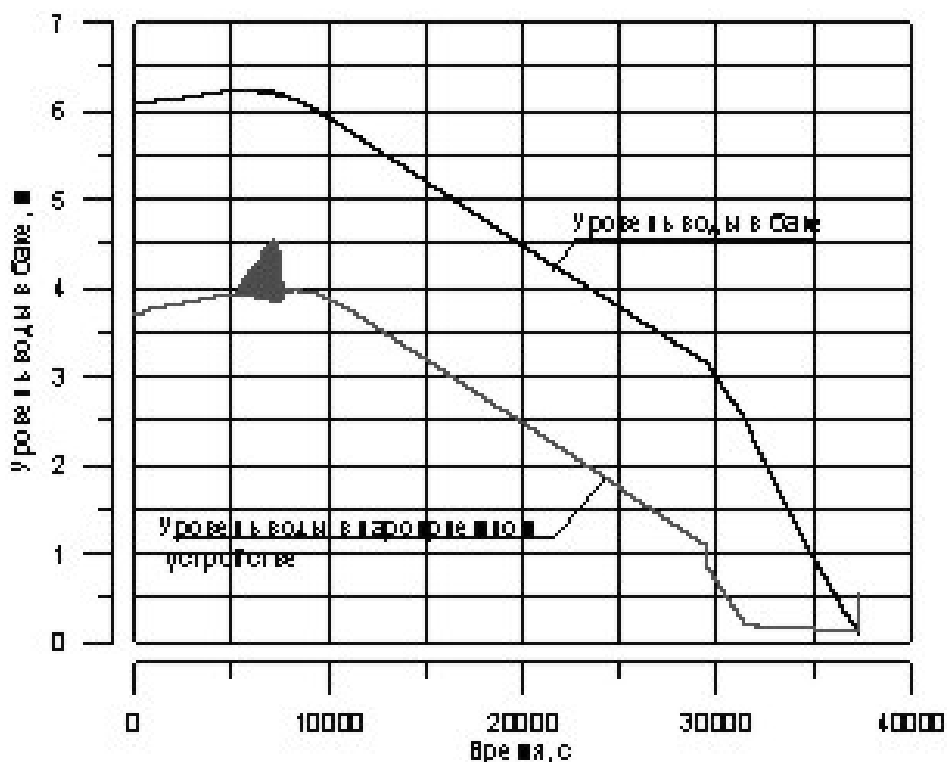


Рис.8. Уровень воды в баке и пароприемном устройстве (относительно дна пароприемного устройства)

Результаты расчетного анализа работы стенда при постоянной заданной мощности электропарогенератора на уровне 2000 кВт выполненного с использованием интегрального кода «Купол-Раснар» показывают, что контур охлаждения обеспечивает заданный теплосъем при давлении в емкости не превышающем 0.5 МПа. До прогрева воды в баке до уровня 80 °С охлаждение обеспечивается без парообразования в контуре охлаждения благодаря высокому уровню циркуляции теплоносителя (на уровне 11-12 кг/с) и аккумуляции тепла в баке. При увеличении температуры воды на входе в теплообменник-конденсатор выше 80°С на верхних участках отводящего трубопровода начинается парообразование, которое вызывает периодическое изменение расхода теплоносителя по контуру охлаждения. Период пульсаций расхода составляет 120-150 с. После прогрева воды в баке до линии насыщения пульсации расхода прекращаются и обеспечивается устойчивое парообразование на участках отводящего трубопровода.