

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ СЕПАРАЦИИ И ПЕРЕГРЕВА ПАРА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Егоров М.Ю. (ГУАП, Санкт-Петербург, Россия; СПбГЛТУ,
Санкт-Петербург, Россия; ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия)

Введение

В ближайшие десятилетия намечено развитие атомной энергетики в Российской Федерации. Планируется сооружение новых энергоблоков АЭС, а также модернизация уже существующих. Большое значение имеет повышение надёжности и эффективности оборудования. Это невозможно без осмысления накопившегося за долгое время опыта эксплуатации.

В нашей стране производство электроэнергии проходит, в частности, на энергоблоках типа РБМК (реактор большой мощности канальный). В данном типе реакторов в качестве теплоносителя выступает вода, которая нагревается в активной зоне реактора до температуры насыщения, где также частично испаряется. Далее полученная пароводяная смесь поступает в барабаны-сепараторы. В данных агрегатах проводится отделение воды от пара, после чего последний направляется в турбоустановку. В турбине тепловая энергия пара превращается в механическую работу с последующим преобразованием в электрическую энергию. Надежная работа турбин в значительной степени определяет экономичность АЭС.

Одним из важнейших аспектов работы турбин на насыщенном паре является снижение влажности пара. Даже незначительное увеличение средней влажности на 1% может привести к уменьшению внутреннего относительного КПД также на 1% [1]. Вследствие повышения влажности увеличивается интенсивность эрозии лопаток турбины, что, в свою очередь, приводит к снижению надёжности оборудования и увеличению периода ремонтных работ. Для избежания негативных эффектов, вызванных повышением влажности, между цилиндрами высокого и низкого давления устанавливают блок промежуточной сепарации пара с двухступенчатым перегревом, который, в целях компактности, находится в едином агрегате сепараторе-пароперегревателе (СПП).

В настоящее время на АЭС с РБМК-1000 для осушки и перегрева применяются аппараты типа СПП-500-1. Эксплуатация данных аппаратов выявила множество проблем. В работе [2] показана недостаточная надёжность СПП-500-1 из-за возможного проноса влаги через сепаратор, что увеличивает влажность пара в ЦНД и, следовательно, эрозию лопаток турбины. В работе [3] была отмечена необходимость значительного восстановительного ремонта данного агрегата. Анализ экспериментальных данных [4] показывает, что в определенных условиях СПП-500-1 работают с частичным или полным выключением поверхности нагрева из-за подтопления перегревателей, имеет место пульсационный перекося температур. В [4, 5] обсуждаются причины тепловой и гидравлической разверок, их проявления в виде подтопления перегревателей, пульсаций давлений, расходов и температур потоков и металла стенок трактов. В работах [6, 7] отмечаются сложные условия пуска и прогрева СПП-500-1, невозможность ремонта перегревателя на работающей турбине. Применение СПП связано с капитальными затратами и снижением термического КПД цикла тепловой схемы турбоустановки, что подчеркнуто в [8]. Там, в частности, предлагаются изменения тепловой схемы турбины, но игнорируется рассмотрение вопросов, связанных с обеспечением необходимого для надёжной работы турбин уровня перегрева пара.

Стоит отметить, что подбор оптимальных параметров (разделительное давление, температура перегрева пара, потери давления в СПП и др.) окупают все затраты за счет

уменьшения потерь от влажности в проточных частях турбины – применение СПП повышает тепловую экономичность турбоустановки мощностью 500 МВт на $\sim 2,3\%$, как было указано в работе [9]. Конечной целью данной работы является разработка предложений по совершенствованию аппаратов СПП-500-1, направленному на повышение экономичности и увеличение эффективности работы турбоустановки и, следовательно, энергоблока с реактором РБМК-1000 в целом.

В частности, проведенный в данной работе анализ гидродинамических процессов сепараторе эксплуатирующихся сегодня СПП-500-1 позволяет дать рекомендации о перспективности использованных конструктивных решений.

Анализ особенностей конструкции аппарата СПП-500-1

В турбинах АЭС с РБМК-1000 после цилиндра высокого давления пароводяная смесь дисперсно-кольцевой структуры с влажностью $y \sim 15\%$ при температуре $T \sim 137^\circ\text{C}$ и давлении $p \sim 0,34$ МПа по трубопроводам подводится в СПП-500-1, 500 МВт – электрическая мощность каждой из двух турбин энергоблока электрической мощностью 1000 МВт. На рис. 1 показана схема включения СПП-500-1 в турбину. Конструкция СПП-500-1, указанная на рис. 2, включает:

- входную камеру – для приема пароводяной смеси;
- жалюзийный сепаратор – для сепарации влаги из влажного пара;
- двухступенчатый теплообменник–пароперегреватель – для осушки и перегрева нагреваемого пара (НП) до температуры, которая должна обеспечивать надежную работу ЦНД.

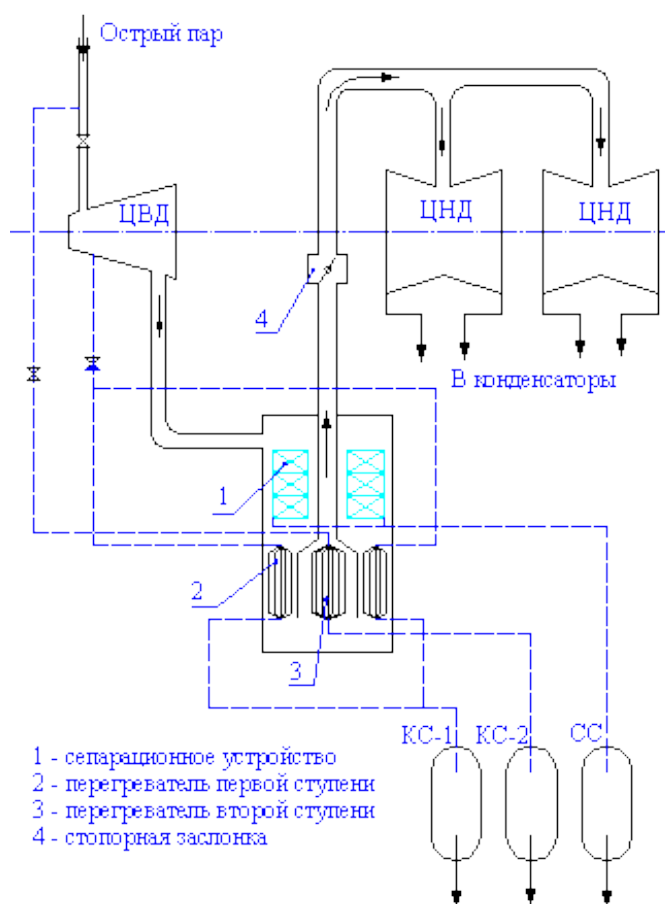


Рис. 1. Включение СПП-500-1 в схему турбины:
 СС – сепараторосборник, КС-1 – конденсаторосборник 1 ступени,
 КС-2 – конденсаторосборник 2 ступени

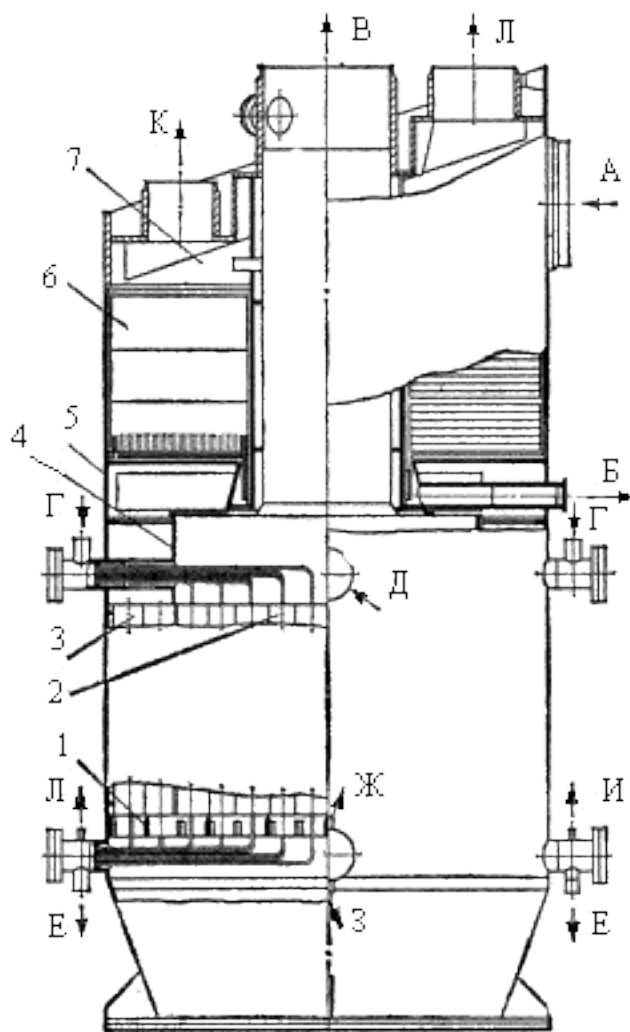


Рис. 2. Сепаратор-пароперегреватель СПП-500-1:

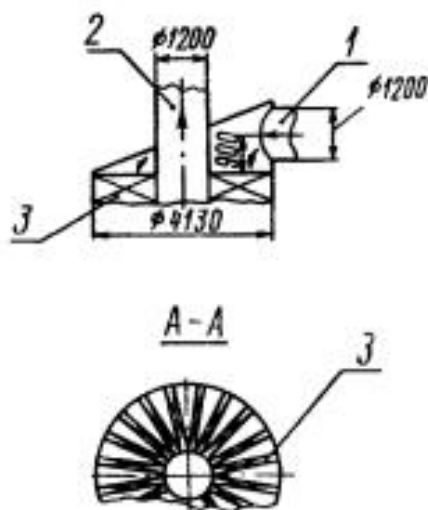
1 – опорная решетка модулей, 2 (3) – модули 2 (I) ступени, 4 – перегородка между модулями I и 2 ступеней, 5 – корпус, 6 – сепарационные пакеты, 7 – входная камера, А – вход влажного пара; Б – отвод сепарата после сепарационной части; В – выход перегретого пара; Г – подвод греющего пара к модулям II ступени; Д – подвод греющего пара к модулям I ступени; Е – отвод конденсата греющего пара из модулей II ступени; Ж – отвод неконденсирующихся газов из модулей I ступени; З – отвод конденсата греющего пара из модулей I ступени; И – отвод неконденсирующихся газов из модулей II ступени; К – к предохранительным клапанам; Л – к отбору

Для перегрева используется теплота конденсации греющего пара (ГП) – отборного (из ЦВД) и острого, отбираемого перед ЦВД.

Входные камеры и сепарационные части

Во входной камере аппарата влажный пар взаимодействует с поверхностями конструкций. Возникают условия для первичного отделения крупнодисперсной влаги. В СПП-500-1 крупнодисперсная влага из входной камеры вместе с основным потоком влажного пара направляется в радиальные коллекторы (в виде объемных клиньев) без дренажей.

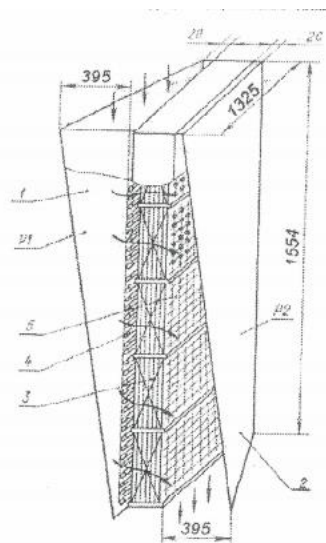
Входная камера СПП-500-1 выполнена в виде наклонного верхнего днища, как показано на рис. 3. Через боковой патрубок пара пар подводится к входной камере и огибая центральную трубу, поступает в «секторные» входные коллекторы.



1 — вход влажного пара; 2 — выход перегретого пара; 3 — сепарационный блок

Рис. 3. Входная камера СПП-500-1

Основное назначение входных коллекторов – обеспечение равномерной раздачи потока пара по жалюзийным пакетам, рис. 4. Входной коллектор образован внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и блоком направляющих лопаток, расположенных под углом так, что между корпусом и блоком направляющих лопаток создаётся клиновое сечение. В нижней части коллектора предусмотрен канал для дренажа отделенной влаги.



1 — входной коллектор; 2 — выходной коллектор; 3 — жалюзийные пакеты; 4 — направляющие лопатки; 5 — дроссельный дырчатый лист

Рис. 4. Принципиальная конструкция входного коллектора СПП-500-1

Направляющие лопатки изготовлены в виде самостоятельного блока, единого по всей высоте сепарационной части аппарата и расположенного по ходу потока пара перед жалюзийным пакетом, рис. 5.

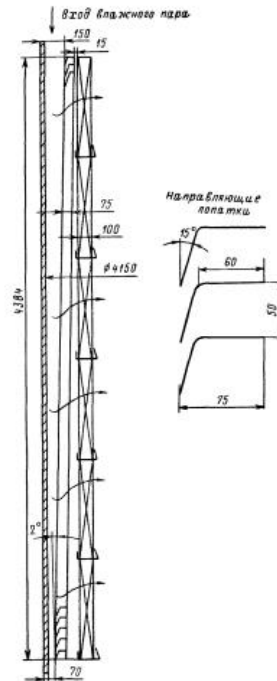
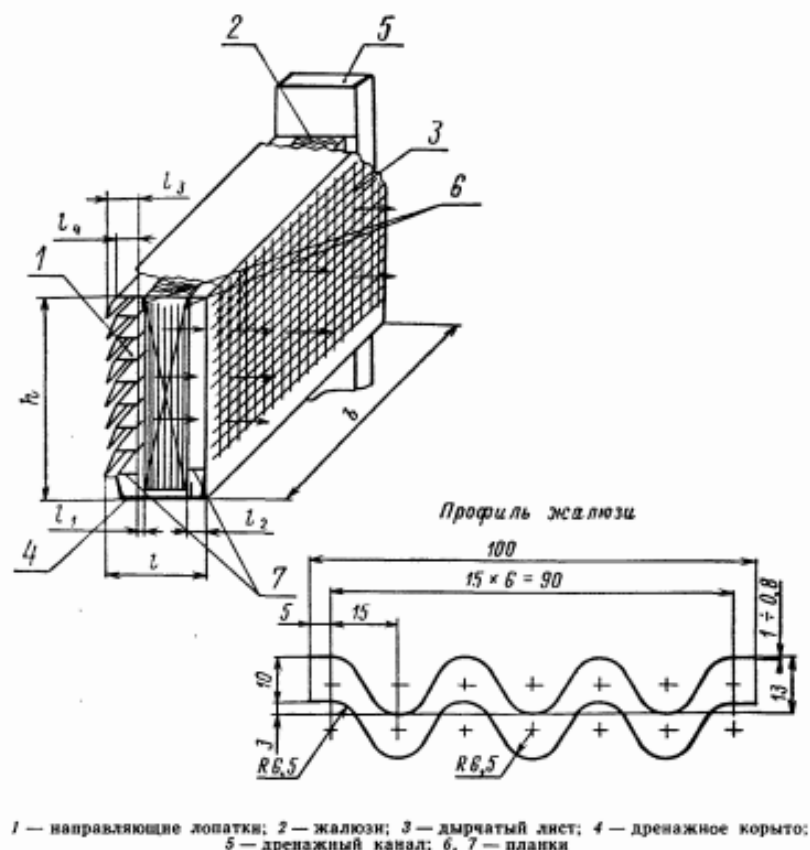


Рис. 5. Принципиальная конструкция направляющих лопаток входного коллектора СПП-500-1

Поток пара при входе в направляющий аппарат поворачивает на 165° , затем делает поворот между лопатками на 75° и практически в горизонтальном направлении поступает на жалюзийные пакеты. Блок направляющих лопаток обеспечивает достаточно равномерное поле скоростей перед пакетами жалюзи и отделение от влажного пара некоторого количества жидкости.

Жалюзийные пакеты являются основным устройством для отделения капель воды от потока пара, см. рис. 6. Поток пара проходит через жалюзийные пакеты в горизонтальном или близком к горизонтали направлениях. Капли воды отделяются от потока пара в основном под действием центробежных сил при поворотах потока в криволинейных каналах между пластинами жалюзи. Пленка отсепарированной жидкости стекает по поверхности жалюзи перпендикулярно направлению движения потока пара. Нарушение нормальной работы жалюзийных пакетов обусловлено увлечением пленки жидкости в направлении потока пара и срывом капель с выходных кромок жалюзи в нижней части пакетов.



1 — направляющие лопатки; 2 — жалюзи; 3 — дырчатый лист; 4 — дренажное корыто; 5 — дренажный канал; 6, 7 — планки

Рис. 6. Принципиальная конструкция жалюзийного пакета

Для предотвращения выноса отсепарированной жидкости из нижней части пакета и дренажного корыта с обеих сторон пакета на высоте около 50 мм от нижних торцевых кромок жалюзи устанавливаются планки 7. Жидкость, собираемая в дренажное корыто, затем поступает в дренажный канал 5.

В ходе эксплуатации в данной конструкции было выявлено множество проблем. Одной из этой проблем, решению которой посвящена данная работа, является значительная неравномерность потока влажного пара внутри жалюзийных пакетов и пульсации скорости внутри входных коллекторов сепарационных блоков.

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ

Одним из основных мероприятий проекта модернизации сепарационной части является установка входных устройств в плоскости входа пароводяной смеси во входные (разделяющие) коллекторы сепарационных блоков. Это коллекторы с профильными (наклонными) листами и вертикальными плоскостями входа потока в жалюзийные пакеты. Входная горизонтальная плоскость коллектора имеет трапециевидальную (близкую к треугольной) форму.

По предложению отечественных и зарубежных специалистов в этой плоскости должны быть установлены входные устройства с достаточно большим загромождением проходного сечения, чтобы уменьшить амплитуду пульсаций скорости и изменить частотные характеристики этих пульсаций. Кроме того, очевидно, что установка входных устройств будет способствовать механическому раскреплению сепарационных блоков и уменьшению динамических нагрузок на них, возникающих при их взаимодействии с потоком теплоносителя. Конструктивно входные устройства выполнены в виде дырчатых листов.

Были проведены расчеты аэродинамических характеристик входной камеры СПП (в однофазной постановке). По результатам этих расчетов была определена оптимальная

степень перфорации входного устройства. Она составила 25%.

На стенде изучались глобальные характеристики течения во входной камере и входных коллекторах сепарационных блоков, включая распределение расходов фаз по макетам всех двадцати сепарационных блоков. При этом, в качестве основного метода исследования использовалась визуализация течения, для чего была создана геометрически подобная (в масштабе 1:4) прозрачная модель верхней части СПП.

Изучено влияние входного устройства на аэродинамику входного коллектора путем детального исследования локальных аэродинамических характеристик течения. Визуализация применялась в наладочных опытах для отработки измерительных процедур.

Эксперименты проводились при наличии различных неблагоприятных условий, и эффективность входного устройства подтверждалась, если при любых входных условиях установка устройства приводила к улучшению характеристик скоростного поля в объеме самого коллектора. Оценка эффективности входного устройства проводилась по степени его влияния на равномерность распределения скорости потока на величину дисперсии (среднеквадратичного отклонения) скорости и на частотные спектральные характеристики.

По результатам экспериментов наличие входного устройства (перфорированной пластины) привело к следующим изменениям:

1. Была уменьшена величина энергии, переносимой низкими частотами, что приведет к уменьшению динамического воздействия на конструктивные элементы сепарационных блоков;
2. Уменьшение среднеквадратичного отклонения скорости было только в случае завихрения потока, в остальных же случаях значительных изменений не наблюдалось;
3. Равномерность профиля скорости ухудшалась.

Наличие перфорированной пластины в качестве входного устройства в сепарационный блок со степенью перфорации 25% было бы оптимальным вариантом для решения задачи о модернизации СПП-500-1, однако, сильная неравномерность профиля скорости остается направлением дальнейших работ.

Выводы

В ходе анализа результатов было выявлено, что наличие перфорированного листа хоть и не приводит к выравниванию профиля, но получившейся профиль всегда примерно одинаков во всех сериях экспериментов. В связи с этим фактом появилось предположение о том, что лист с неравномерной перфорацией сможет решить оставшуюся проблему неравномерности профиля скорости.

Список литературы

1. *Маргулова Т.Х.* Атомные электрические станции: Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. АТ, 1994. 296 с.
2. *Петкевич И.Л., Судаков А.В.* Исследование надежности сепаратора–пароперегревателя для РБМК-1000. / XXXIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научно-технической конференции. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2005. Ч. II, с. 154–155.
3. *Лебедев В.И., Орешкин Б.М., Судаков А.В.* Продление ресурса оборудования энергоблоков АЭС. / Труды ЦКТИ. СПб: НПО ЦКТИ, 2002. Вып. 282, с. 28–44.
4. *Мухачев В.Л., Десятун В.Ф., Назаров О.И.* Оптимизация работы системы промпрегрева турбины К-500-60/3000 на основе продувки тракта греющего

- пара второй ступени перегрева СПП-500-1. / Труды ЦКТИ. СПб: НПО ЦКТИ, 1992. Вып. 269, с. 87–93.
5. *Мухачев В.Л., Симкин Б.П.* Разработка системы промперегрева турбоустановки с исключением дефицита расхода греющего пара в СПП. / Труды ЦКТИ / СПб: НПО ЦКТИ, 1992. Вып. 269, с. 94–98.
 6. *Гольдштейн А. Д., Кругликов П. А., Федер Е. В. и др.* Некоторые аспекты повышения надежности тепломеханического оборудования АЭС. / Труды ЦКТИ / СПб.: НПО ЦКТИ, 2002. Вып. 282, с. 75–83.
 7. *Самусев Л.Е., Гасанов И.К., Ананьев А.Н. и др.* Повышение надежности работы СПП-500-1 в пусковых и ремонтных режимах. / Труды ЦКТИ / СПб.: НПО ЦКТИ, 2002. Вып. 285, с. 191–197.
 8. *Лахтионов А.Е., Боровков В.М.* Повышение эффективности работы сепараторов– промперегревателей в тепловых схемах ПТУ АЭС // XXXII Неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научно-технической конференции / СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. Ч. II, с. 159–160.
 9. *Кунегин Е.П., Крамеров А.Я.* К вопросу о параметрах пара АЭС с водоохлаждаемыми реакторами. // Теплоэнергетика, 1972. № 3. С. 2–4.