

УДК 621.165

**Сравнительный анализ турбогенераторов с турбинами К-1200-6,8/50 и «Arabelle» для АЭС-2006**

Цыганкова С.Д.

Научный руководитель – к.э.н., доцент КРАВЧЕНКО В.В.

*«XXI век – век знания, наукоемких производств, высоких технологий и стремительных инноваций...»*

Мурзабеков Ш.М.

На сегодняшний день одними из самых актуальных проблем мировой энергетики остаются энергосбережение и повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в условиях возрастающего энергопотребления, грядущего истощения мировых запасов нефти и газа и, как следствие, обострения конкуренции на рынке ископаемых энергоресурсов. В этих условиях страны, зависимые от нефтегазового импорта, столкнутся с проблемой обеспечения своей энергобезопасности.

Одним из самых перспективных вариантов решения данной проблемы является развитие атомной энергетики – одной из самых молодых и динамично развивающихся отраслей глобальной экономики. Именно мирному атому отведена роль скомпенсировать нехватку топливно-энергетических ресурсов.

31 января 2008 года было подписано постановление Совета Безопасности № 1 «О развитии атомной энергетики в Республике Беларусь», в котором было принято решение о строительстве собственной АЭС на территории нашей страны. В 2009 г. для строительства БелАЭС был выбран проект реактора Санкт-Петербургского «Атомэнергопроекта» АЭС-2006 с реактором типа ВВЭР-1200 [1]. Необходимо отметить, что по данному проекту планировалось также сооружение Балтийской АЭС, строительство которой в 2013 г. было приостановлено [2].

Согласно [3] БелАЭС представляет собой два энергоблока мощностью 1200 МВт каждый и предназначена для выработки электроэнергии как в базовом (базисном) режиме, так и в режиме суточного регулирования. Тепловая схема преобразования и передачи энергии от реактора к турбогенератору двухконтурная. Тепло, получаемое за счёт реакции деления ядерного топлива в активной зоне реактора, передаётся теплоносителю первого контура. Теплоноситель первого контура по четырём циркуляционным петлям ГЦТ поступает в парогенераторы. Пар, произведённый в парогенераторах, поступает на турбину.

В техническом проекте БелАЭС в здании турбины к установке была принята турбина К-1200-6,8/50, предназначенная для непосредственного привода генератора переменного тока типа ТЗВ-1200-2АУХЛЗ.

Стоит отметить, что первоначальный вариант проекта Балтийской АЭС, которая, как уже отмечалось выше, являлась аналогом БелАЭС, также предусматривал установку в здании турбины К-1200-6,8/50 производства филиала ОАО «Силовые Машины» «ЛМЗ» и генератора переменного тока типа ТЗВ-1200-2АУХЛЗ производства филиала ОАО «Силовые Машины» «Электросила». Однако в 2012 г. концерном «Росэнергоатом» по результатам конкурса на поставку турбинного оборудования для строящейся АЭС было принято решение о внесении корректировок в проект Балтийской АЭС: замене турбины К-1200-6,8/50, генератора переменного тока типа ТЗВ-1200-2АУХЛЗ и соответствующего вспомогательного оборудования на турбину «Arabelle», генератор «Gigator» и соответствующее вспомогательное оборудование машинного зала [4].

В связи с этим возникает вопрос: что сподвигло Заказчика строительства – концерн «Росэнергоатом» – внести такие значительные корректировки в проект Балтийской АЭС в условиях, когда часть строительных работ уже выполнена? Отвечая на этот вопрос, произведём сравнительный анализ турбогенераторов для АЭС-2006 с реакторами типа ВВЭР-1200.

Согласно [3] быстроходная турбина К-1200-6,8/50 производства филиала ОАО «Силовые Машины» «ЛМЗ» представляет собой паровую, конденсационную, одновальную турбину с промежуточной сепарацией и двухступенчатым перегревом пара, с рабочей частотой вращения 3000 об/мин, длиной последней лопатки ЦНД 1200 мм, которые изготавливаются из титанового сплава ВТ-6. Парораспределение турбины – дроссельное. Турбина устанавливается в закрытом машинном зале и рассчитана на работу в базовой части графика нагрузок, а также на участие в нормальном и аварийном регулировании мощности энергосистемы (с возможностью покрытия переменной части графиков нагрузок). Данная турбина предназначена для работы на насыщенном паре со следующими параметрами: давление пара перед турбиной 6,8 МПа, температура 283,8 °С.

На рис.1 представлен продольный разрез турбины К-1200-6,8/50.

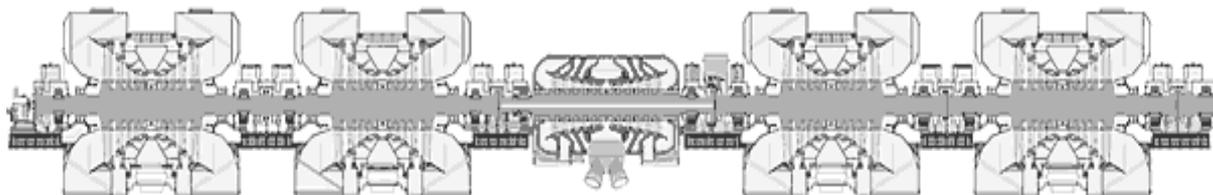


Рисунок 1 – Продольный разрез турбины К-1200-6,8/50

По своему конструктивному исполнению турбина К-1200-6,8/50 напоминает «бабочку», по соотношению числа цилиндров высокого и низкого давления: 2ЦНД+ЦВД+2ЦНД. Симметрия турбины относительно ЦВД позволяет обеспечить равномерное нагружение опор, снижение усилий, приходящихся на патрубки турбины, упрощает компенсацию тепловых расширений паропроводов; позволяет выполнить симметричную обвязку трубопроводами сепараторов-пароперегревателей, обеспечивающую надежную эксплуатацию этих аппаратов. ЦВД имеет 6 ступеней давления в каждом потоке. Из камер отбора за 2, 3 и 5 ступенями каждого из потоков ЦВД предусмотрены отборы пара на регенеративный подогрев питательной воды в ПВД6, ПВД5 и деаэраторе. Из выхлопа ЦВД пар отбирается на ПНД4. Проточная часть ЦНД состоит из 5 ступеней.

На рис.2 представлена принципиальная технологическая схема энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1200 и турбиной К-1200-6,8/50.

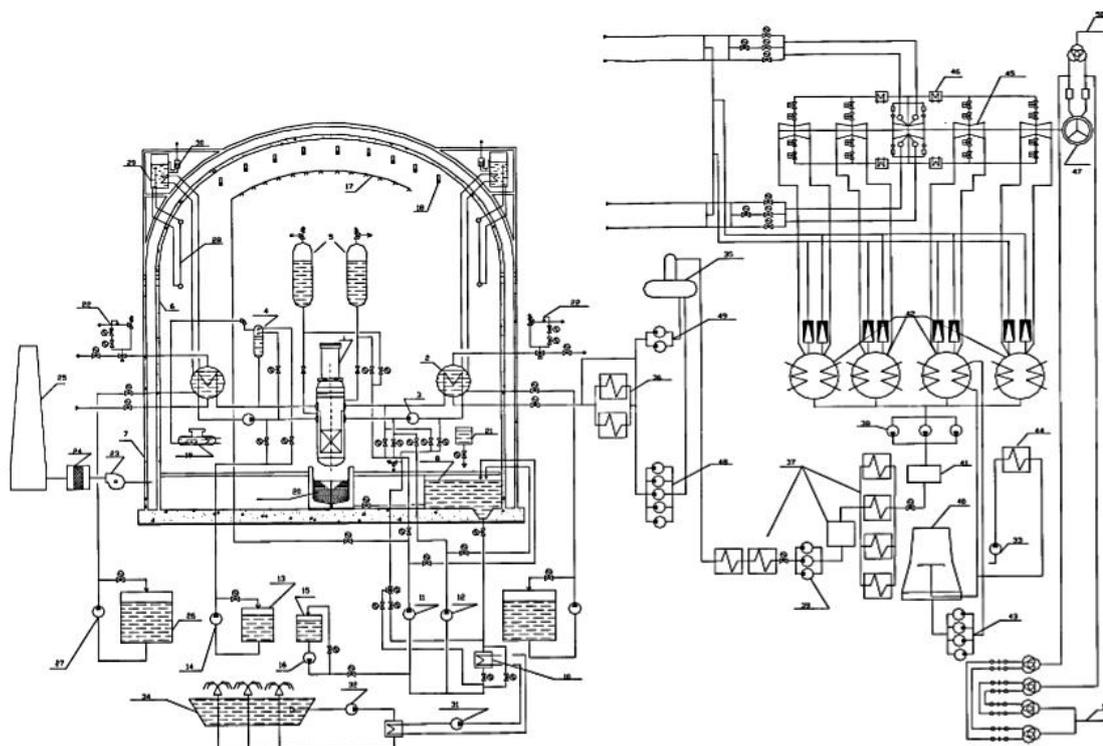


Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема энергоблока

На рисунке обозначено: 1 – реактор, 2 – парогенератор, 3 – ГЦН, 4 – компенсатор давления, 5 – ёмкости САОЗ, 6 – защитная оболочка, 7 – наружная защитная оболочка, 8 – бак-приёмник, 10 – теплообменники САОЗ, 11 – насос аварийного впрыска низкого давления, 12 – насос аварийного впрыска высокого давления, 13 – бак запаса борированной воды высокой концентрации, 14 – насос аварийного ввода бора, 15 – бак подачи химреагентов, 16 – насос подачи химреагентов, 17 – спринклерный коллектор, 18 – пассивные рекомбинаторы водорода, 19 – барботёр, 20 – устройство локализации расплава, 21 – бак аварийного запаса щёлочи, 22 – главный паровой арматурный блок, 23 – вентустановка аварийного создания разряжения в кольцевом зазоре, 24 – фильтр, 25 – вентиляционная труба, 26 – бак запаса обессоленной воды, 27 – аварийный питательный насос, 28 – конденсатор СПОТ ГО, 29 – бак СПОТ, 30 – гидрозатвор, 31 – насос промконтура, 32 – насос технической воды ответственных потребителей, 33 – насос технической воды неответственных потребителей, 34 – брызгальный бассейн, 35 – деаэратор 2-го контура, 36 – ПВД, 37 – ПНД, 38 – КЭН 1-й ступени, 39 – КЭН 2-й ступени, 40 – градирня, 41 – БОУ, 42 – конденсаторы, 43 – циркуляционные насосы, 44 – потребители машинного зала, 45 – ЦНД, 46 – ПП, 47 – турбогенератор, 48 – питательные электронасосы, 49 – вспомогательные питательные электронасосы, 50 – энергосистема.

Исходя из рис.2, запишем схему системы регенерации, которая представлена семью ступенями: 4ПНД1 + ПНД2 + ПНД3 + ПНД4 + Д + 2ПВД5 + 2ПВД6.

На рис.3 представлена принципиальная тепловая схема турбины К-1200-6,8/50.

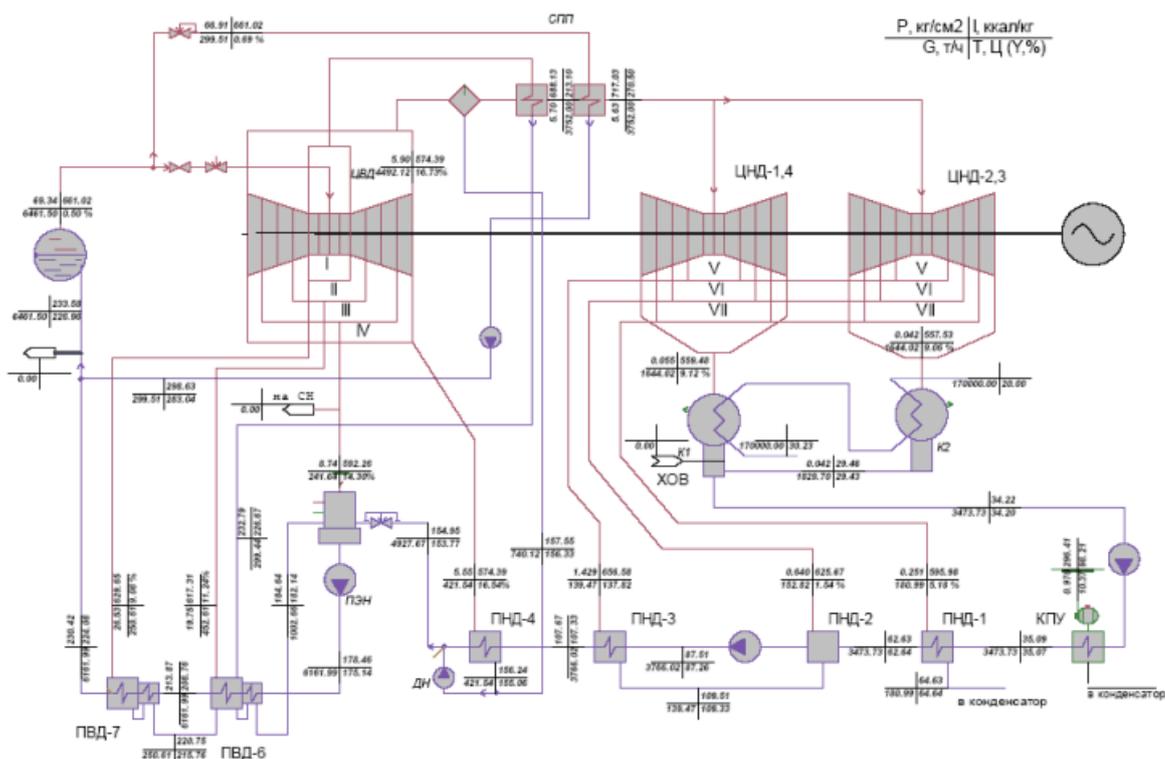


Рисунок 3 – Принципиальная тепловая схема турбины К-1200-6,8/50

Закачка основного конденсата из конденсатора в деаэратор осуществляется конденсатными насосами в два подъема (рис. 2, 3). Подача питательной воды из деаэратора через ПВД в парогенератор осуществляется питательными насосами с электроприводами (4 рабочих + 1 резервный). Закачка конденсата греющего пара второй ступени пароперегревателя СПП осуществляется в основную линию питательной воды высокотемпературным насосом с гидроприводом, слив конденсата греющего пара первой ступени пароперегревателя СПП – в ПВД-5. Подогреватели НД-1, 3 и 4 – поверхностного типа, ПНД-2 – смешивающего типа. ПНД-1 выполнен в 4 корпусах, включенных параллельно друг другу, ПНД-2, 3 и 4 – в одну, а ПВД-5 и 6 в две группы. Все подогреватели НД выполнены без охладителя дренажа, подогреватели ВД – с охладителем. Конденсат греющего пара ПНД-3 сливается в ПНД-2, далее вместе с основным конденсатом откачивается конденсатными насосами второй ступени в тракт основного конденсата. Дренаж ПВД-6 сливается самотеком в ПВД-5 и далее в деаэратор. Конденсат греющего пара ПНД-4 смешивается с сепаратором СПП, и смесь закачивается сливными насосами в линию основного конденсата перед деаэратором.

Необходимо отметить, что масса наиболее тяжёлого монтажного блока (блок трубной системы с трубами) составляет 50600 кг.

В соответствии с [5] конденсационная турбина типа К-1200-6,8/50 является приводом трёхфазного неявнополюсного генератора типа ТЗВ-1200-2АУХЛЗ производства филиала ОАО «Силловые Машины» «Электросила», который является основным источником электрической энергии на АЭС и предназначен для выдачи электрической энергии потребителям энергетической системы по линиям электропередач. Турбогенератор типа ТЗВ-1200-2АУХЛЗ установлен на отметке плюс 15 м машинного зала и представляет собой синхронную машину переменного тока с полным водяным охлаждением. Конструктивное исполнение генератора - закрытое герметичное. Возбуждение генератора осуществляется от бесщеточного возбудителя, сочлененного с валом генератора. Основные характеристики генератора: номинальная мощность – 1200 МВт, напряжение статора – 24 кВ, частота переменного тока – 50 Гц, число фаз обмотки статора – 6. КПД турбоустановки составляет 33 %.

Что касается тихоходной турбины «Arabelle» российско-французского совместного предприятия ООО «Альстом Атомэнергомаш», то также как и К-1200-6,8/50, она представляет

собой паровую, одновальную турбину с промежуточной сепарацией и двухступенчатым перегревом пара [6]. Частота вращения тихоходной турбины «Arabelle» меньше частоты вращения быстроходной турбины К-1200-6,8/50 и составляет 1500 об/мин. Длина последней лопатки ЦНД больше на 230 мм. КПД турбоустановки составляет 37,3 %.

На рис. 4 представлен продольный разрез турбины «Arabelle».

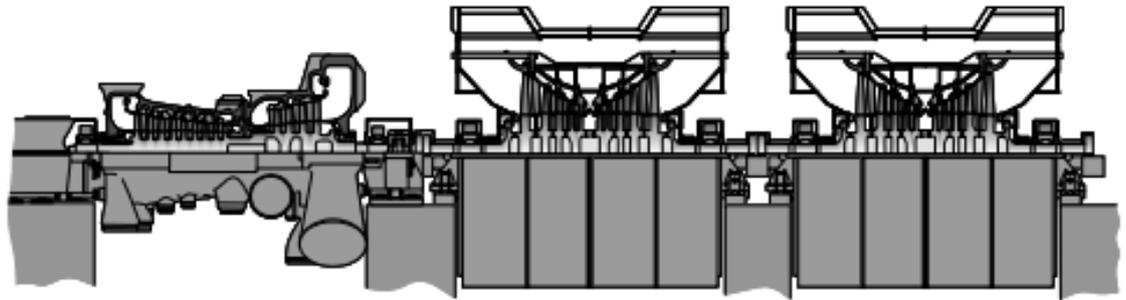
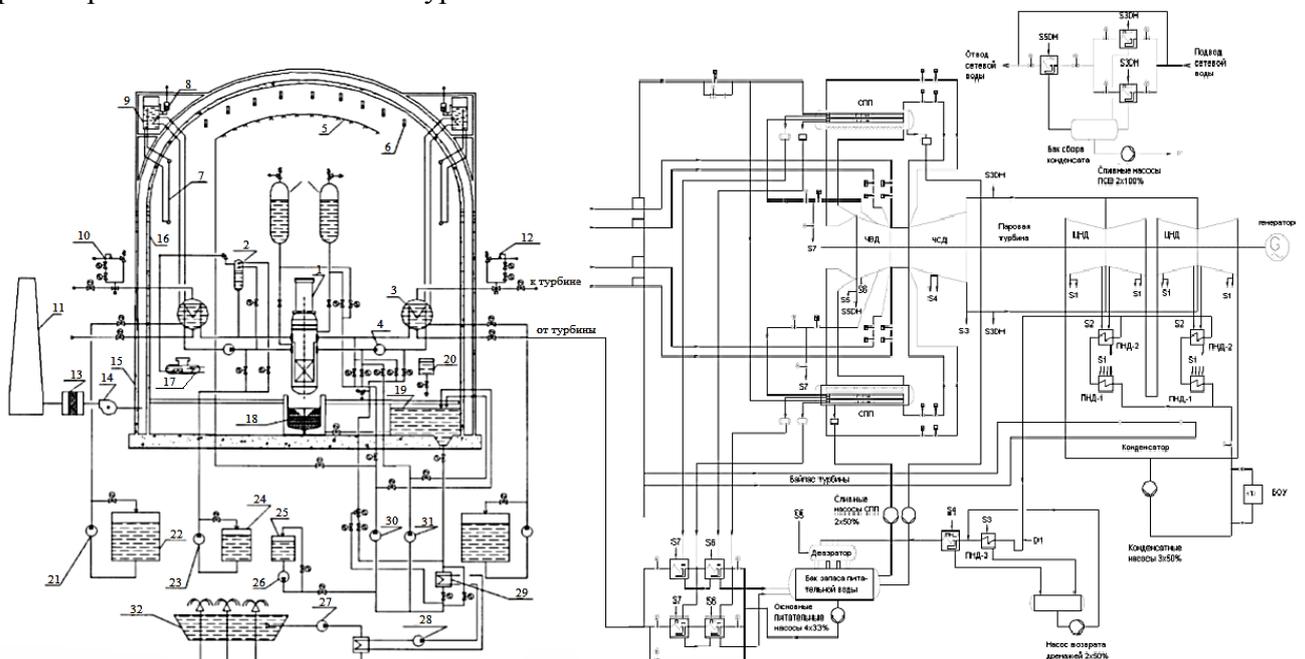


Рисунок 4 – Продольный разрез турбины «Arabelle»

По своему конструктивному исполнению «Arabelle» кардинально отличается от К-1200-6,8/50. Турбина «Arabelle» состоит из одного комбинированного модуля ВСД, содержащего проточные части высокого и среднего давления, установленные в противоположных потоках в одном корпусе, и 2-х двухпоточных модулей ЦНД. Структурную схему можно записать следующим образом: ЦВСД + 2ЦНД. Благодаря совмещенному ЦВСД возможна реализация наиболее эффективной однопоточной схемы расширения пара. Примерно 55% всего располагаемого теплоперепада турбины срабатывается в однопоточной конструкции при максимальном КПД.

На рис. 5 представлена принципиальная технологическая схема энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1200 и турбиной «Arabelle».



1 – реактор, 2 – компенсатор давления, 3 – парогенератор, 4 – ГЦН, 5 – спринклерный коллектор, 6 – пассивные рекомбинаторы водорода, 7 – конденсатор СПОТ ГО, 8 – гидрозатвор, 9 – бак СПОТ, 10 – главный паровой арматурный блок, 11 – вентиляционная труба, 12 – главный паровой арматурный блок, 13 – фильтр, 14 – вентустановка аварийного создания разряжения, 15 – наружная защитная оболочка, 16 – защитная оболочка, 17 – бак-

барботёр, 18 – устройство локализации расплава, 19 – бак приямок (бак запаса борированной воды низкой концентрации), 20 – бак аварийного запаса щёлочи, 21 – аварийный питательный насос, 22 – бак запаса обессоленной воды, 23 – насос аварийного ввода бора, 24 – бак запаса борированной воды высокой концентрации, 25 – бак подачи химреагентов, 26 – насос ввода химреагентов, 27 – насос технической воды ответственных потребителей, 28 – насос промконтура, 29 – теплообменники САОЗ, 30 – насос аварийного впрыска низкого давления, 31 – насос впрыска высокого давления, 32 – брызгальный бассейн.

Рисунок 5 – Принципиальная технологическая схема энергоблока с турбиной «Arabelle»

Исходя из рис. 5, запишем схему системы регенерации, которая также как и К-1200-6,8/50 представлена семью ступенями: 2ПНД1 + 2ПНД2 + ПНД3 + ПНД4 + Д + 2ПВД5+ 2ПВД6. Необходимо отметить, что ПНД-1 и ПНД-2 образуют дуплексный подогреватель, т.е. подогреватели объединены в один корпус. Дуплексные ПНД-1, 2, ПНД-3 и ПНД-4 являются горизонтальными подогревателями поверхностного типа. Дуплексные подогреватели ПНД-1, 2 выполнены в 2 корпусах, включенных параллельно друг другу и установленных на горловине конденсатора, ПНД-3 и ПНД-4 – в одну группу, а ПВД-5 и 6 в две. Все поверхностные подогреватели низкого давления выполнены без охладителей дренажа, кроме ПНД-4, ПВД – с охладителями дренажа. Применена одноступенчатая подача конденсата.

На рис.6 представлена принципиальная тепловая схема турбины «Arabelle».

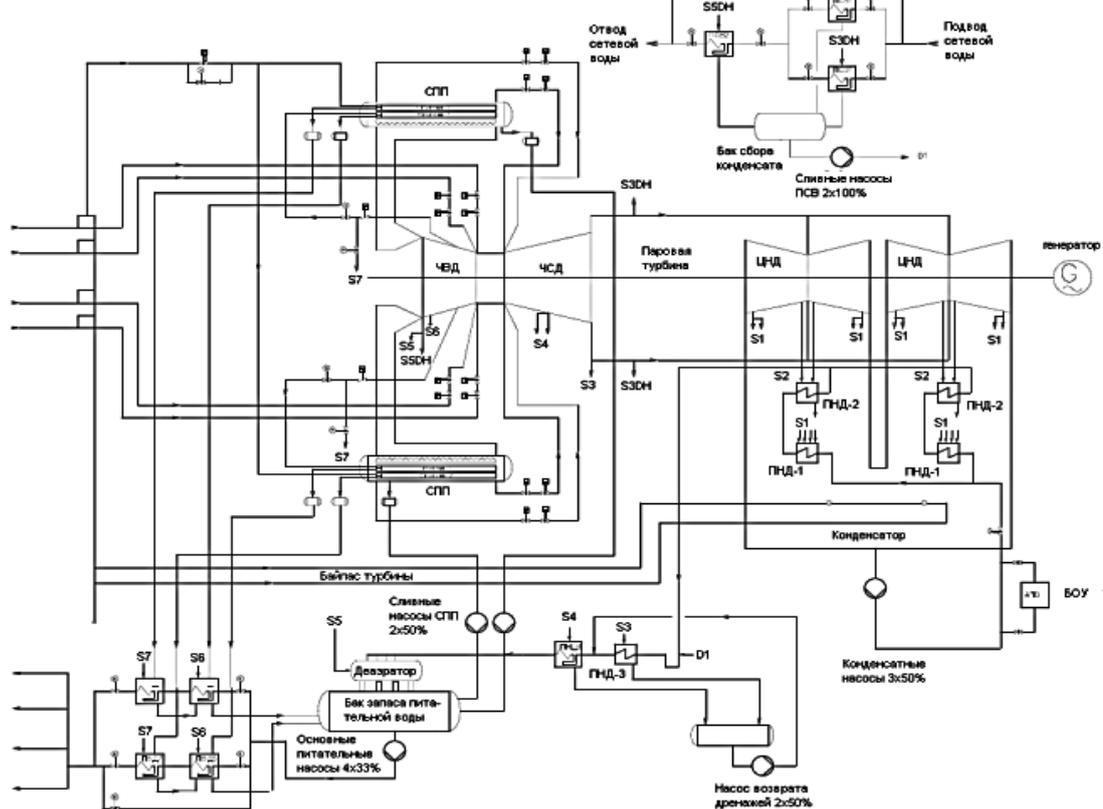


Рисунок 6 – Принципиальная тепловая схема турбоустановки «Arabelle»

Подача питательной воды из деаэратора через ПВД в парогенератор осуществляется насосными агрегатами (3 рабочих + 1 резервный). Каждый насосный агрегат состоит из комплекта насосов: главного питательного насоса и бустерного, создающего подпор питательной воды перед главным насосом. Слив конденсата греющего пара I и II ступени СПП осуществляется в ПВД. При нормальном режиме эксплуатации дренаж ПВД-7 сливается самотеком в ПВД-6, далее в деаэратор. В аварийном режиме – из ПВД-7 и из ПВД-6 в конденсатор. Конденсат греющего пара ПНД-3 и ПНД-4 сливается в бак возврата дренажей,

откуда насосом возврата дренажей закачивается в тракт основного конденсата после ЦНД-3. Из ПНД-1 и ПНД-2 слив конденсата осуществляется напрямую в конденсатор. Каждая ветка слива сепарата СПП имеет отдельный сепаратосборник и сливной насос. Закачка сепарата осуществляется напрямую в деаэратор.

Согласно [6] тихоходная турбина «Arabelle» является приводом четырёхполюсного турбогенератора «GIGATOP» разработки фирмы ALSTOM с диапазоном мощностей от 1200 до 1700 МВт, с водородно-водяным охлаждением (аксиально-радиальная схема вентиляции) и бесщеточной системой возбуждения (бесщеточный возбудитель с вращающимися диодами расположен на конце вала генератора, без дополнительных подшипников), имеющего КПД 99 %. Для предотвращения утечек водорода из корпуса генератора по валу ротора применена система маслоснабжения уплотнения вала.

Основные отличительные особенности турбоустановок сведём в таблицы 1, 2.

Таблица 1 – Требования к габаритам здания турбины

Характеристика	К-1200-6,8/50	«Arabelle»
Ширина здания, м	51,0	60,0
Длина здания, м	121,0	102,0
Отметка пола подвала здания, м	-6,0	-5,0
Отметка нижнего пояса ферм кровли здания, м	+37,0	+41,5

Таблица 2 – Основные отличительные особенности турбоустановок К-1200-6,8/50 и «Arabelle»

Характеристика	К-1200-6,8/50	«Arabelle»
Предприятие-изготовитель	ОАО «Силовые Машины» «ЛМЗ»	ООО «Альстом Атомэнергомаш»
Длина турбины, м	53,0	37,5
Вес турбины, т	2540,0	1655,0
Длина лопатки последней ступени ЦНД, мм	1200,0	1430,0
Тип паровой турбины	быстроходная	тихоходная
Рабочее тело	насыщенный пар	насыщенный пар
Электрическая мощность, МВт	1194,0	1197,0
Давление пара перед турбиной, МПа	6,8	6,7
Частота вращения, об/мин	3000,0	1500,0
Начальная температура пара, °С	283,8	283,9
Длительный срок службы, г.	60	60
Сейсмостойкость, баллы по шкале MSK-64	6	6
Классификация по безопасности	4 (по НП-001-97)	4/3
Конструктивная схема турбины	2ЦНД+ЦВД+2ЦНД	ЦВСД+2ЦНД
Система регенерации	4ПНД1 + ПНД2 + ПНД3 + ПНД4 + Д + 2ПВД5+ 2ПВД6	2ПНД1 + 2ПНД2+ ПНД3 + ПНД4 + Д + 2ПВД5+ 2ПВД6
ПНД1	горизонтальный	дуплексный
ПНД2	смешивающий	
ПНД3	вертикальные	
ПНД4		
ПВД	вертикальные; расположены на одной отметке	горизонтальные; ПВД-7 расположен над ПВД-6
ПЭН	без бустерного насоса 4 рабочих, 1 резервный;	с бустерным насосом; 3 рабочих, 1 резервный
Насосы основного конденсата	2-х ступенчатая подача конденсата	Одноступенчатая подача
СПП	вертикальные; количество – 4; на отм. -6.000;	горизонтальные; количество – 2; на отм. +16.600

Таблица 3 – Основные отличительные особенности генераторов ТЗВ-1200-2АУХЛЗ и «Gigator»

Характеристика	К-1200-6,8/50	«Arabelle»
Предприятие-изготовитель	ОАО «Силовые Машины» «Электросила»	ООО «Альстом Атомэнергомаш»
Привод турбогенератора	К-1200-6,8/50	«Arabelle»
Охлаждение генератора	водяное	водородно-водяное
Система возбуждения	бесщеточная	бесщеточная

Таблица 4 – Вес основного оборудования турбины К-1200-6,8/50 и «Arabelle»

Оборудование	К-1200-6,8/50		«Arabelle»	
	Вес 1 ед., т	Кол.	Вес 1 ед., т	Кол.
Турбина	2540,0	1	1655,0	1
Генератор	600,0	1	819,0	1
Конденсатор	1910,0	1	1420,0	1
СПП	208,0	4	285,0	2
ПНД1	21,6	4	60,0	2
ПНД2	40,0	1	60,0	2
ПВД	104,0	2	58,0	2
Деаэрактор	213,5	1	240,0	1

Исходя из проведенного сравнительного анализа турбоустановок К-1200-6,8/50 и «Arabelle», генераторов электрического тока ТЗВ-1200-2АУХЛЗ и «Gigator» для АЭС с реакторами типа ВВЭР-1200, можно сделать следующие выводы:

1. Тихоходная технология занимает доминирующее положение при уровне мощности более 1000 МВт, что связано, в первую очередь, с более высоким КПД – 37,3% против 33,7% у быстроходной технологии [3].

2. Преимуществами тихоходной технологии над быстроходной являются: способность эффективно работать с достаточно большим объемом низкопотенциального пара, производимого мощными атомными реакторами (более 1000 МВт); сравнительно низкий уровень механических напряжений, что гарантирует надежность эксплуатации и долговечность оборудования.

3. Площадь выхлопа в тихоходной технологии, больше относительно быстроходной за счет применения более длинных лопаток (лопатка последней ступени ЦНД «Arabelle» на 230 мм больше), что ведет к улучшению эксплуатационных показателей тихоходной технологии.

4. Также необходимо отметить уникальность конфигурации турбины «Arabelle», что позволяет реализовать наиболее эффективную однопоточную схему расширения пара.

Кроме того использование турбины «Arabelle» может являться примером диверсификации поставок энергооборудования, что снижает зависимость от поставок такого оборудования из одного источника.

Таким образом, для вновь строящихся АЭС данного типа предлагается использовать турбину «Arabelle», генератор «Gigator» и соответствующее вспомогательное оборудование машинного зала в связи с их более высокой надежностью, безопасностью, долговечностью и энергоэффективностью.

### Литература

1. Белорусское телеграфное агентство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://atom.belta.by/ru/dosie\\_ru/view/stroitelstvo-belorusskoj-aes-xronologija-sobytij-41/](https://atom.belta.by/ru/dosie_ru/view/stroitelstvo-belorusskoj-aes-xronologija-sobytij-41/). – Дата доступа: 10.10.2018.
2. Атомный эксперт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://atomicexpert.com/page254083.html>. – Дата доступа: 11.10.2018.
3. Белорусская атомная электростанция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://belaes.by/ru/novosti/item/1353-Parovaja-turbina-dlja-pervogo-energobloka-Belorusskoj-AES-izgotovlena-na-Leningradskom-metallicheskom-zavode.html>. – Дата доступа: 20.10.2018.
4. Форум Россия, США, Европа, Азия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atominform.ru/news9/i0998.htm>. – Дата доступа: 15.10.2018.
5. Тевлин С.А. Атомные электрические станции с реактором ВВЭР-1000 / С.А. Тевлин. – Москва, 2002. – 358 с.
6. Цветков А.М. Разработка турбоустановки 1200 МВт фирмы Alstom для АЭС в России / А.М. Цветков. – Power Russia, 2008 (Москва, Россия). – С. 12–16.