

Russia Power 2009

Докладчик (Автор) Александр Цветков, Генеральный Директор ООО «ААЭМ»

Соавтор

Винсент Журден (Vincent Jourdain), Alstom,

Директор по обеспечению гарантийных показателей
оборудования АЭС

Название: Интеграция оборудования турбинного острова АЭС в России

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих странах наблюдается возрождение интереса к атомной энергетике, и Россия входит в группу лидеров, реализующих грандиозные планы по строительству современных атомных электростанций.

Программа развития атомной энергетике России предусматривает использование усовершенствованного типа ядерного реактора - ВВЭР-1200. В сравнении с предшествующими моделями, его отличают повышенная мощность и безопасность, и успех его серийного внедрения во многом зависит от грамотного выбора оборудования Машинного зала и технических решений по его интеграции.

Настоящий доклад посвящен техническим решениям в объеме оборудования Машинного зала для АЭС на базе ВВЭР-1200, предлагаемым компанией ALSTOM в сотрудничестве с ОАО «Атомэнергомаш» в рамках созданного совместного предприятия ООО «АЛЬСТОМ Атомэнергомаш» (ААЭМ). Программой АЭС-2006 предусматривается строительство новых атомных электростанций мощностью 1200 МВт с интеграцией всего оборудования неядерного острова в специализированных машинных залах.

Отличительные особенности оборудования и технологии ALSTOM на базе новых реакторов ВВЭР-1200 рассматриваются в разделе 2. ААЭМ разрабатывает высокоэффективные решения на основе технологии паровой турбины ARABELLE™, которая является самой крупной на сегодняшний день турбиной в мире с уникальной конструкцией комбинированного модуля высокого и среднего давления. В докладе рассматриваются особенности паро-водяного цикла, в частности влияние технологии циркуляционных насосов на к.п.д. станции в целом. На опыте эксплуатации референтных АЭС показано увеличение надежности и уменьшение продолжительности ремонта, возможность максимальной унификации парка машин и обеспечения высочайшей готовности оборудования.

В настоящее время на стадии реализации находится проект строительства уникальной производственной площадки ААЭМ в Подольске, предназначенной для выпуска тихоходных турбин большой мощности российского производства для участия в программе по развитию атомной энергетике в России. Инжиниринговая команда ААЭМ начала работы по интеграции всего оборудования неядерного острова, проектирование которого в целом лежит в ответственности АЭП. Эти вопросы рассматриваются в разделе 3.

В заключение, в разделе 4, рассматриваются ключевые элементы технических решений, предлагаемых ААЭМ для осуществления программы «АЭС-2006».

2. СТРОИТЕЛЬСТВО СОВРЕМЕННЫХ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РОССИИ

2.1. Последние достижения в Азии, Европе, США и России

С начала 80-х годов прошлого века и до начала нынешнего развитие атомных электростанций во многих странах значительно замедлилось, тем не менее, в течение последнего десятилетия наблюдается стремительный рост интереса к АЭС.

Первым признаком грядущих перемен стало значительное увеличение заказов на модернизацию атомных электростанций в ряде стран. Так, реализуемые и уже выполненные масштабные программы по обновлению оборудования действующих АЭС в США, Бельгии, Швеции, Корее, Испании и Финляндии направлены на увеличение полезной единичной мощности блоков в среднем на 10 – 20%.

Более 15 стран, определивших для себя стратегию развития атомной энергетики, приняли решение о строительстве новых атомных реакторов в дополнение к уже реализуемым проектам.

Масштабные программы строительства атомных реакторов реализуются в странах Азии, что обусловлено стремительными темпами экономического развития, сопровождаемого всё возрастающими потребностями в электроэнергии. В первую очередь это Китай, где ускоренными темпами идет создание парка АЭС с блоками увеличенной единичной мощности. Корея также стабильно развивает свой атомно-энергетический комплекс. В Японии продолжается строительство двух реакторов и намечено дальнейшее расширение парка. Индия планирует построить несколько энергоблоков собственного производства. Еще ряд азиатских стран занимаются разработкой стратегии строительства АЭС.

Активность на европейском континенте также высока. Финляндия ведёт строительство третьего блока АЭС «Олкилуото» (Olkiluoto-3) и готовит проект шестого энергоблока. Аналогичная картина наблюдается во Франции – там продолжается строительство АЭС Фламанвилль-3 с реактором типа EPR, и совсем недавно французское правительство утвердило планы на сооружение второго энергоблока (январь 2009 г.). Несколько проектов АЭС в Восточной Европе (Румыния, Болгария, Словакия) находятся на различных стадиях реализации, а Литва намерена произвести полную реорганизацию собственной атомной энергетики. Полномасштабная программа по замене устаревших ядерных реакторов на атомных электростанциях Великобритании станет одной из крупнейших европейских программ.

В США рассматриваются проекты строительства более 20 новых реакторов, и в Комиссию по регулированию ядерной энергетики уже поступили первые 17 заявок на получение объединённых лицензий на строительство и эксплуатацию. Канада, Бразилия, Мексика и Аргентина планируют и в дальнейшем развивать это направление электроэнергетики.

В России ведётся строительство шести крупных блоков, включая четвертый блок Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах. Речь идет о расширении имеющихся станций, либо о завершении строительства блоков, которые были спроектированы еще в 80-е годы, однако работы по их сооружению на протяжении

90-х либо велись замедленными темпами, или вовсе были приостановлены. Более подробно мы рассмотрим программу по развитию атомной энергетики АЭС-2006 в следующем разделе.

2.2. Проектирование атомных станций АЭС-2006 на базе ВВЭР-1200

Многолетний опыт создания атомных электростанций с реакторами типа ВВЭР, подтвержденный положительными референциями, как в России, так и за рубежом послужил основой для разработки реактора нового поколения ВВЭР-1200. На базе этого эволюционного проекта предусмотрено серийное строительство 29 энергоблоков на действующих и новых площадках десяти АЭС – Нововоронежской-2, Ленинградской-2, Ростовской, Тверской, Северской, Нижегородской, Южно-Уральской, Центральной, Кольской-2 и Приморской в период с 2009 -2015 гг.

Основные целевые показатели в техническом задании на ВВЭР-1200 следующие:

- Тепловая мощность реактора – 3200 МВт;
- Срок службы незаменимого оборудования – 60 лет;
- КИУМ, усреднённый за весь срок службы АЭС – 90%;
- Годовой коэффициент технического использования, усреднённый за весь срок службы – 92%.

Чтобы обеспечить высокие показатели эффективности и готовности, соответствующий специализированный машинный зал также должен быть рассчитан на высокую производительность и надёжность при соответствии времени техобслуживания программе перегрузки топлива и техобслуживания реактора.

2.3. Планирование и развертывание производства на площадке ААЭМ

Программой АЭС-2006 предусматривается установка турбин и генераторов класса 1200 МВт в комплекте со вспомогательным оборудованием. Для решения поставленной задачи и организации 100 % российского производства таких крупных машин ААЭМ строит в Подольске современный завод.

В масштабном проекте по подготовке производства в Подольске наряду с ААЭМ задействованы крупнейшие российские и зарубежные компании: ОАО Атомэнергопром, ОАО Атомэнергомаш, ОАО «Гипротяжмаш», крупнейшие европейские производители станочного оборудования PIETRO CARNAGHI и INNSE BERARDI (Италия), GEORG (Германия), SKODA (Чехия), POLYSOUDE (Германия), LLC «ESAB»(Швеция) и другие. Производственные площади СП, на которых будет установлено оборудование с использованием новейших разработок, составляют 53 тыс. кв. метров. Согласно календарному графику реализации проекта оснащение цехов будет производиться поэтапно, с началом закупки оборудования с 1 по 4 квартал 2009 года и вводом в эксплуатацию всех необходимых станков в 2011 году. Офисные площади, составляющие 15 тыс.кв. метров разместят 800 специалистов различных направлений.

2.4. Технические решения для оборудования турбинного острова Российских АЭС

Предлагаемые ALSTOM решения основываются на технологии ARABELLE™ тихоходной паровой турбины.

Уверенному продвижению ALSTOM на рынке атомной энергетики способствовал успех создания и опыта эксплуатации во Франции, начиная с 2000 г., четырёх турбин ARABELLE™ рекордной единичной мощностью 1550 МВт (э), не превзойдённой по сей день. Разработка технологии ARABELLE™ пришлось на то время, когда большинство предприятий в турбостроительной отрасли уже не связывали особых надежд с атомной энергетикой, коммерческие перспективы которой становились все более неопределёнными. Сегодня, когда мирный атом переживает второе рождение, апробированная, передовая технология ARABELLE™ способна гарантировать Заказчикам станций с реакторами последнего поколения рекордную, доказанную на практике надёжность и высокие эксплуатационные характеристики.

Начиная с появления первых четырёх турбоустановок ARABELLE™, данная технология получает стабильно высокие оценки мирового атомного энергетического сообщества, и в настоящее время ALSTOM начаты работы по проектированию двадцатой турбины ARABELLE™, при этом создание наиболее крупного парка машин этого типа ведётся в Китае.

Причины, определяющие выбор тихоходной турбины и генераторов с частотой вращения 1500 об/мин для блоков большого типоразмера в соответствии с требованиями атомных реакторов нового поколения, изложены в докладе [1]. Там же подробно описаны некоторые из технических решений, применение которых в турбинах типа ARABELLE™ позволило достичь максимального теплового КПД, включая, в частности, использование высокоэффективного однопоточного расширения в комбинированном модуле ЦВСД и улучшение аэродинамических характеристик турбины по сравнению с турбинами предыдущего поколения.

В результате, сочетание самых современных технологий гарантирует заметно более высокий показатель надёжности и готовности турбоустановки.

Одним из основных требований программы «АЭС-2006», предусматривающей строительство блоков с турбогенераторными установками класса 1200 МВт(э), является полная интеграция вспомогательного оборудования неядерного острова в специальном машзале, чтобы добиться наивысшей надёжности и готовности при сохранении высокого КПД турбоустановки. Таким требованиям полностью удовлетворяет турбоустановка, разработанная по технологии ARABELLE™.

2.5. Совместная деятельность с проектными институтами АЭП по адаптации конструкции к требованиям российских норм и стандартов

Внедрение тихоходной технологии ARABELLE™ на современных российских атомных электростанциях предполагает тесное взаимодействие генеральных проектировщиков с поставщиками оборудования машинного зала.

Данная работа ААЭМ уже начата при подготовке предпроектной документации по турбинной установке, турбогенератору и оборудованию машинного зала для разработки Обоснования инвестиций сооружения Северной АЭС с двумя

блоками по 1200 МВт. Предложенные ААЭМ технические решения позволят генеральному проектировщику выполнить оптимальную компоновку оборудования атомной электростанции с использованием компактной технологии ARABELLE™.

В целом проектная деятельность ААЭМ в области проектирования и поставки комплектного оборудования машинного зала охватывает следующие направления:

- адаптация технической и проектно-конструкторской документации по турбоустановке ARABELLE™ к условиям производства оборудования в России;
- разработка технического проекта и рабочей документации машинного зала АЭС с использованием 3D моделирования при выполнении компоновки оборудования, трубопроводов, кабельных трасс, строительных конструкций;
- определение и согласование границ проектирования с генеральным проектировщиком АЭС;
- подтверждение в Российских надзорных органах соответствия импортного оборудования требованиям Российских норм и правил.

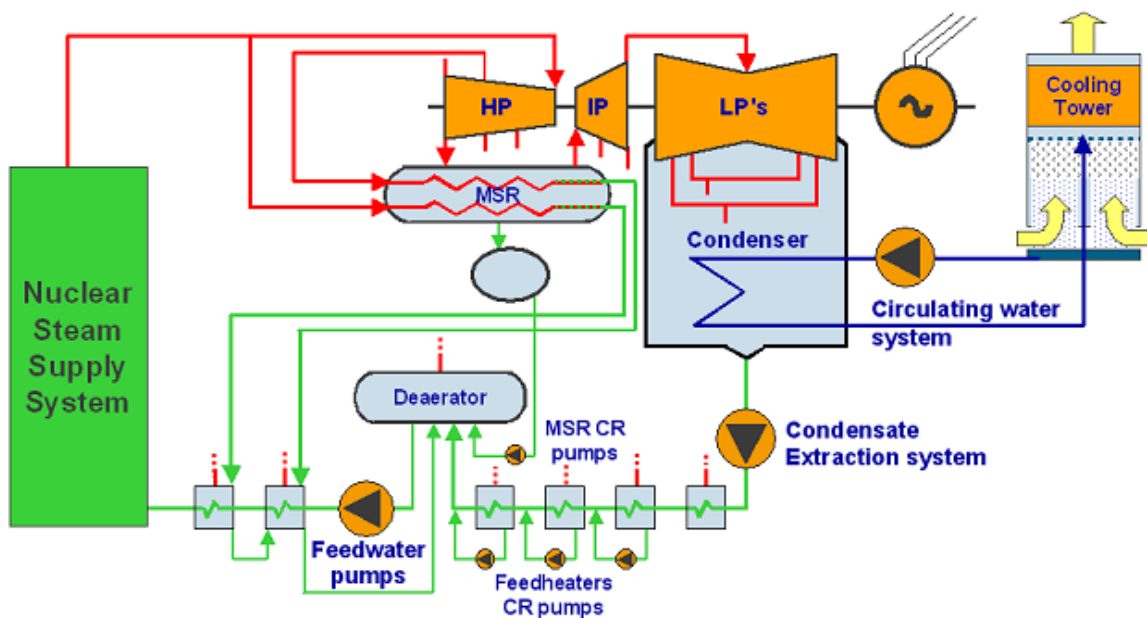
3. ДИАПАЗОН ПРИМЕНЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТУРБИННОГО ОСТРОВА В РОССИИ

3.1. Технические возможности для интеграции

3.1.1. Максимизация экономичности теплового цикла

Стоимость топлива АЭС составляет незначительную долю общей стоимости электрической энергии. Тем не менее, реальное преимущество улучшения КПД состоит в повышении полезной мощности электростанции при установленной (разрешенной) тепловой нагрузке реактора, что в результате ведёт к сокращению удельных капитальных затрат.

Максимальный КПД цикла преобразования энергии достигается увеличением разницы температур между источником тепла и теплоотводом. Источником тепла является расщепление ядра в активной зоне реактора, которая затем в реакторе типа ВВЭР передаётся вторичному контуру при температуре насыщения, соответствующей рабочему давлению парогенератора. При этом основной переменной характеристикой является температура теплоотвода. В связи с этим, наиболее эффективным способом повышения КПД является снижение температуры конденсации пара. К этому же следует добавить оптимальную конфигурацию регенеративной системы турбоустановки с подогревателями, конструктивный профиль которых позволяет достигать минимальных «недогревов». Ниже показана схема новейшей конфигурации, которая будет использована в проектах АЭС-2006.



В России в существующих блоках греющий пар для СПП отбирается из линии острого пара, а перегрев пара осуществляется в одноступенчатом перегревателе. Однако, в современных блоках термодинамический цикл оптимизирован путём добавления в СПП дополнительной ступени подогрева, запитанной от точки отбора пара из проточной части ЦВД. Конечная температура перегрева сохраняется на одном уровне, используя только половину расхода острого пара, необходимого для одноступенчатого перегревателя. Такая замена острого пара на частично расширенный пар из отбора ЦВД обеспечивает повышение КПД цикла (0.3% - 0.6% в зависимости от условий цикла). Как всегда, разница конечных температур и падения давления в СПП имеют непосредственное влияние на КПД блока. Поскольку АЭС работают в базовом режиме, для них обычно выбираются СПП с наиболее высокими характеристиками по величине недогрева и потерям давления пара в СПП.

Согласно задаче повышения эффективности передовых атомных станций, конструкция подогревателей питательной воды была оптимизирована по сравнению с предыдущим поколением.

Конечная температура питательной воды для реактора ВВЭР 1200 является важным параметром, поскольку она прямо или косвенно влияет на среднюю температуру активной зоны.

Для обеспечения температуры питательной воды заданного уровня рекомендуется конфигурация системы регенерации из семи отборов пара, включая четыре ПНД, один деаэратор и два ПВД. Дополнительно, для повышения мощности электростанции, используется возврат конденсата греющего пара ПНД насосами в систему регенерации.

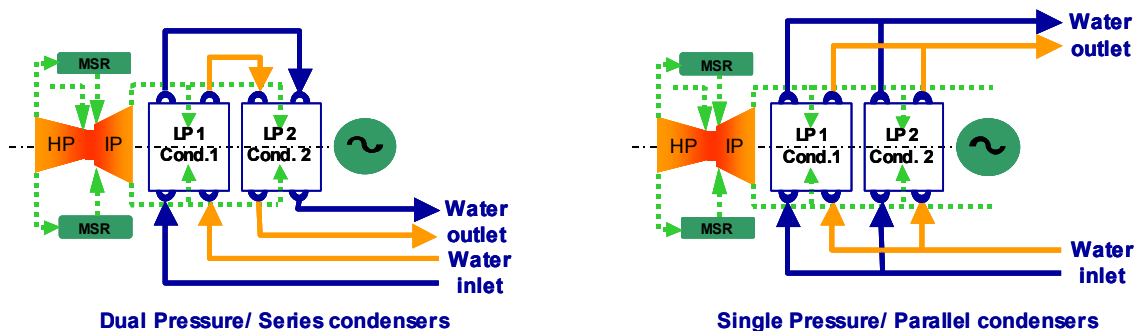
3.1.2. Высокотехнологичные конденсаторы с последовательной/параллельной конденсацией пара

Одним из направлений оптимизации оборудования АЭС является адаптация системы охлаждения в соответствии с метеорологическими условиями и различными ограничениями, действующими на площадке.

В зависимости от условий площадки на станциях АЭС-2006 применяется как прямоточное охлаждение, так и обратное с использованием градирен. Теоретически, наиболее эффективным и экономичным решением является прямоточное охлаждение. На практике же, на многих площадках программы АЭС-2006 запланировано использование градирен либо по причине отсутствия достаточного количества источников охлаждающей воды, либо в результате негативного влияния на относительно небольшие реки, из которых предполагается забирать воду для охлаждения конденсаторов.

При использовании градирен, рекомендуется ограничить расход охлаждающей воды по сравнению с прямоточной схемой по причине сильного влияния расхода воды на стоимость градирни, что довольно существенно, принимая во внимание размеры строящихся станций.

Могут быть использованы две схемы циркуляционной воды: с последовательной или параллельной компоновкой конденсатора (последовательной или параллельной конденсацией пара).



Со стороны турбины параллельная компоновка конденсаторов соответствует условию, когда все выхлопы ЦНД работают при одинаковом давлении, а последовательная компоновка соответствует разным уровням давления в каждом выхлопе ЦНД.

При последовательной компоновке температура циркуляционной воды, выходящей из конденсатора № 1 намного ниже, чем в случае с параллельной компоновкой, и для данной температуры воды на входе можно получить более низкое давление. Благодаря оптимизации, при последовательной компоновке конденсатора в нем можно получить то же самое среднее давление, поэтому мощность турбины в обоих вариантах практически такая же, как и при параллельной компоновке, однако расход циркуляционной воды при этом будет меньше. С другой стороны, при одинаковом расходе циркуляционной воды, можно получить более низкое среднее давление и более высокую мощность турбины. Можно рассмотреть все промежуточные сценарии, поскольку одной из важнейших задач проектировщика машзала является оптимизация затрат относительно расчетных параметров теплоотвода.

Всегда нужно оценивать мощность станции нетто, поскольку полученный прирост полной мощности может быть сведен к нулю из-за увеличения мощности собственных нужд, вызванной, например, изменениями расхода или напора воды.

Последние данные с действующих электростанций, где используется охлаждение с градирней, показывают, что последовательная компоновка конденсаторов экономичнее, чем параллельная в широком диапазоне стоимости электроэнергии. На очень крупных электростанциях экономия по системе градирни и циркуляционной воды, и в частности сокращение расхода циркуляционной воды при последовательной компоновке конденсаторов, значительно улучшает экономические показатели проекта.

Конденсаторы с одинаковым давлением в корпусах (параллельная компоновка) являются в основном простым и экономичным решением для площадок с прямоточным охлаждением, где так или иначе повышение температуры циркуляционной воды при последовательной компоновке повлечёт затруднения, связанные с вопросами экологии.

Последовательная компоновка конденсаторов оказывает минимальное влияние на турбину. В турбине ARABELLE™ внутренний корпус ЦНД является независимой конструкцией, связанным с наружным корпусом ЦНД с помощью гибких, резиновых сильфонных компенсаторов [1]. Подобная независимая конструкция позволяет избежать передачи нагрузки от вакуума на фундаментную плиту турбины и очень хорошо адаптируется к перепадам давления и температуры, которые происходят при последовательной компоновке конденсаторов.

3.1.3. Компоновка насосной циркуляционной воды и конструкция насосов

3.1.3.1. Характеристики системы циркуляционной воды для крупных АЭС

Для конденсаторов крупных АЭС требуется большой расход охлаждающей воды. Для блока мощностью 1200 МВт, в зависимости от температуры охлаждающей воды и результатов оптимизации циркуляционной системы может потребоваться расход воды от 30-70 м³/с. Чтобы наглядно представить порядок величины, для электростанции АЭС-2006 с двумя реакторами при прямоточном охлаждении потребуются полный летний расход реки Сена, протекающей перед офисом ALSTOM в Париже.

Огромный расход должен быть обеспечен параллельно работающими насосами. В зависимости от выбранной конструкции насосов и их максимальной мощности, потребуется 2, 4 или более насосов, таким образом, конфигурация контура циркуляционной воды будет значительно варьироваться.

Электроэнергия, потребляемая насосами циркуляционной воды на АЭС, значительно меняется в зависимости от компоновки площадки и решений, принятых на стадии проектирования. Диапазон доли потребляемой электроэнергии составляет 0.5 % - 1.5% полной мощности станции. Этот диапазон зависит от изменения подачи насоса и общего напора насоса. Таким образом, это является важным аспектом, который необходимо учитывать при проектировании

машзала, чтобы минимизировать потери электроэнергии на собственные нужды путем оптимальной компоновки.

Для площадок, на которых используется градирня, наиболее эффективным будет решение с расположением градирни вплотную к машинному залу. Следует избегать сложных контуров с коллекторами, клапанами, крутоизогнутыми отводами и другими особенностями, которые вызывают значительные потери давления.

В реальных условиях качество циркуляционной воды варьируется, начиная от пресной воды, морской воды и воды закрытого контура до воды с содержанием песка и других примесей. В испарительных градирнях при испарении воды общая концентрация растворённых солей быстро поднимается до уровня, определяемого величиной продувки. Это особенно важно для градирен, где потери воды компенсируются подпиткой морской водой. Материал контуров циркуляционной воды и насосов должен быть выбран с учетом химического состава воды. Аналогичным образом, подготовка воды во время эксплуатации установки оказывает важное влияние на продолжительность и безопасность эксплуатации градирни, поэтому её следует определить ещё в начале процесса разработки.

3.1.3.2. Вертикальные центробежные насосы или насосы с бетонной спиральной камерой?

Традиционно, в контурах циркуляционной воды электростанции используются два вида насосов: вертикальные центробежные насосы (ВЦН) и насосы с бетонной спиральной камерой (НБСК).



450 МВт ЭСКЦ
6 м³/с 15 м_{вс} ВЦН



900 МВт АЭС Tricastin Франция
23 м³/с 7 м_{вс} НБСК

ВЦН – полностью металлические погружаемые в приямок насосы со средней скоростью вращения, которые поставляются полностью в сборе, готовые к установке в насосной станции. Они могут быть рассчитаны на большие напоры - до 90 м вод. ст. с несколькими ступенями и подачей 2 - 13 м³/с.

НБСК – насосы без приямка, с низкой скоростью вращения. Бетонная спиральная камера отливается на месте в начальной стадии монтажа. Это требует тесной интеграции общестроительных работ. НБСК могут иметь напор до 30 м вод. ст.. Подача таких насосов очень велика – 30 м³/с и выше.

Основным преимуществом НБСК при их применении в контурах циркуляционной воды АЭС является их способность перекачивать большие объемы воды при конкурентной стоимости. Можно спроектировать и изготовить насос из материала, подходящего для данного химического состава воды, с диаметром рабочего колеса 4 м, подача которого будет 30 м³/с и выше.



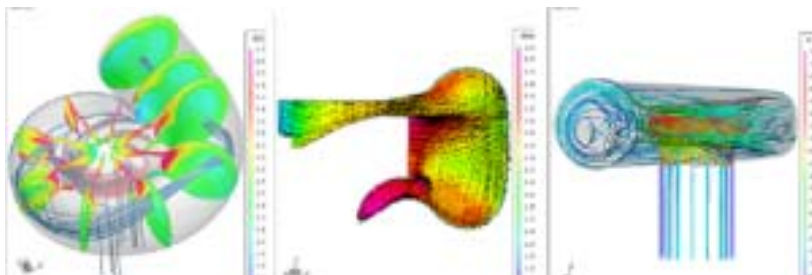
НБСК рабочее колесо 4м
пресная вода
АЭС St Alban 1300 МВт, Франция

Большое рабочее колесо и спиральная бетонная камера создают необходимый напор при максимальном КПД и минимальных затратах. При неблагоприятном химическом составе воды специальным материалом покрываются только рабочее колесо, закладные детали и корпус, что сводит дополнительные затраты к минимуму.

В противовес этому полностью металлический насос той же мощности с большой спиральной камерой будет стоить значительно дороже.

Представляется возможным спроектировать циркуляционную систему с двумя контурами 2х50% и питанием каждого контура от одного большого НБСК. Обычно такие независимые контуры могут выполняться без запорной арматуры, что приводит к значительному сокращению потерь давления, тогда как использование ВЦН меньшей мощности предполагает коллекторы и запорную арматуру. НБСК легко запускаются и останавливаются, при этом не требуется закрытие клапана на напоре насоса и выпуск воздуха из системы. Необходимая высота столба жидкости на всасывании насоса небольшая. Насосы не испытывают кавитации, даже если длина впускных трубопроводов составляет 300 м. Во многих случаях это позволяет устанавливать насосы в машзале, обеспечивая очень компактную компоновку станции.

НБСК – насосы с низкой скоростью вращения 120 - 250 об/мин, в которых используется планетарный редуктор или тихоходный двигатель. Они имеют очень низкий уровень вибрации и шума. Низкая частота вращения рабочего колеса способствует сокращению вторичных потерь, а тщательно спроектированная опалубка, позволяет создать спиральную камеру, которая обеспечит эффективное восстановление давления. Эти факторы дают НБСК как минимум 2% преимущество по КПД перед ВЦН.



Благодаря более высокому гидравлическому КПД и сокращению гидравлических потерь напора воды при использовании независимых трубопроводов без клапанов в циркуляционных контурах 2х50%, полезная мощность электростанции повышается на 1-2 МВт по сравнению с вариантом использования многоступенчатых металлических ВЦН.

Доказано, что НБСК имеют очень хорошую устойчивость при эксплуатации. Железобетон не подвержен коррозии, даже при сложном химическом составе воды. Кроме того, при рассматриваемых скоростях потока, не возникнет проблем



с истиранием песком. Слева на картинке показана внутренняя часть бетонной спиральной камеры насоса, работающего на морской воде на АЭС с блоком 1000 МВт в г.Улчин, Корея, когда его первый раз открыли после 16 лет эксплуатации. Неудивительно, что затраты на техобслуживание подобного типа насосов очень низкие.

**НБСК, морская вода, АЭС 1000 МВт, Корея
Отличное состояние после 16 лет
эксплуатации**

3.1.3.3. Насосы с бетонной спиральной камерой для повышения надёжности и готовности

Данные по надёжности имеют важное значение для оценки разных технологий. Наиболее детальной и доступной базой данных по надёжности в электроэнергетике располагает Североамериканский совет по надёжности в электротехнике (NERC). Системы циркуляционной воды занесены NERC в TOP 25 систем, оказывающих важное влияние на работу электростанции, и вызывающих вынужденные остановки или снижение номинальных значений. Это доказывает важность правильного подбора технологии системы охлаждения для производительности электростанции и выгоды Заказчику. Определяющим критерием при выборе конструкции системы циркуляционной воды является её надёжность и готовность.

Низкая частота вращения НБСК, устойчивость бетонной спиральной камеры к эрозии и коррозии, концепция сухого приямка с автоматической подачей воды на подшипники в качестве смазки, контур без запорной арматуры с простым запуском и остановом способствует повышению готовности. Изучение надёжности, готовности, ремонтпригодности 167 установок НБСК (атомных и тепловых электростанций Франции), которые имеют опыт правильной и продолжительной эксплуатации с момента запуска, показало следующие результаты. Данные результаты очень впечатляют в плане наработки на отказ:

Тип воды	Продолжительность эксплуатации	Измеренная наработка на отказ	Среднее время восстановления после отказа
Пресная вода	7,000,000 часов	518,000 часов	20 часов
Морская вода	4,700,000 часов	350,000 часов	20 часов

В среднем, охлаждаемая морской водой электростанция, рассчитанная на 60 лет работы с двумя НБСК в конфигурации 2 x 50%, возможно только дважды за все время работы подвергнется отклонению от нормальной работы вследствие отказа насоса, а на пресной воде - только один раз. Небольшое среднее время

восстановления после отказа объясняется простой выдвижной конструкцией НБСК, где вращающуюся часть можно легко демонтировать для осмотра компенсационного кольца или подшипников.



На всех АЭС EDF, работающих во Франции, используются НБСК конфигурации 2x50% производства ALSTOM. В настоящее время ALSTOM производит НБСК конфигурации 2x50% на морской воде со схемой без запорной арматуры для блока мощностью 1750 МВт строящейся электростанции Flamanville 3.

3.1.3.4. НБСК для контуров циркуляционной воды АЭС

Приведенные факты говорят о том, что НБСК являются хорошим решением для контуров циркуляционной воды АЭС. Высокая надёжность и минимальные затраты на техобслуживание, низкие эксплуатационные затраты в связи с небольшим энергопотреблением являются значительными факторами, позволяющими полномасштабно использовать данную технологию в программе АЭС-2006.

В стандартной компоновке ALSTOM насосы системы охлаждения могут находиться в машзале (предпочтительнее вариант с градирней) или в отдельной насосной станции (прямое охлаждение). В случае, если насосы находятся в машзале, их можно обслуживать с использованием мостового крана машзала. Этот вариант наиболее эффективен и экономичен, особенно на площадках с очень ограниченной площадью.

3.2. Надёжность и экономические преимущества для Заказчика

3.2.1. Готовность и техобслуживание

Готовность (коэффициент готовности) оборудования и систем является ключевым моментом, определяющим рентабельность любой электростанции, особенно для электростанций, несущих базовую нагрузку, каковыми и являются АЭС. Ремонтопригодность оборудования оказывает непосредственное влияние на готовность станции.

Доведённая до совершенства технология ARABELLE™, рассчитанная на длительную эксплуатацию, позволяет сократить до минимума требования по техобслуживанию. Например, конструкция сварных роторов производства ALSTOM обладают высокой устойчивостью к коррозионному растрескиванию под напряжением, в связи с этим объём неразрушающего контроля сокращается.

- Благодаря использованию высококлассных технологий изготовления компонентов и оборудования, ALSTOM предлагает длительные интервалы между проверками. Таким образом, цилиндр турбины должен вскрываться только каждые 10-12 лет согласно соответствующему техническому требованию. Рассмотрение результатов текущего техобслуживания резервного оборудования позволяет выделить число задач, необходимых для выполнения во время проведения плановых остановов.
- Плановые остановки электростанции в основном бывают трех типов: малый, средний и длительный, также связанный с циклом перегрузки топлива в

реакторе. В зависимости от действующих правил, вскрытие цилиндров можно осуществлять поочередно, чтобы соблюсти требование по полному циклу профилактического осмотра без вскрытия всех цилиндров одновременно во время длительного останова, таким образом сократив его продолжительность. Такая схема позволяет снять ограничивающий фактор для узкого места - мостового крана, а также уменьшить количество людей, находящихся в машзале во время длительного останова на капитальный ремонт.

- Программа техобслуживания АЭС устанавливается в соответствии с основной программой осмотра реактора. Согласно опыту ALSTOM, план техобслуживания машзала можно разработать в пределах программы осмотра реактора, таким образом, готовность станции не сократится.
- Важными факторами, обеспечивающими максимальную надёжность при минимальном техобслуживании являются сокращение количества узлов и элементов и жесткие технические требования. Технология ARABELLE™, предлагаемая для станций проекта АЭС-2006, имеет значительные преимущества по сравнению с существующими решениями в России. Например, предлагается сократить количество СПП с 4 до 2, а также сократить количество корпусов ЦНД и конденсаторов.
- Технология ARABELLE™ была разработана с целью минимизировать продолжительность техобслуживания. Для этой цели предусматриваются большие площадки для раскладки оборудования, независимая конструкция наружного корпуса ЦНД, которая уменьшает нагрузку на верхнюю фундаментную плиту, минимизирует риск возникновения вибраций от просадки фундамента и сокращает время на устранение неисправностей, простая повторная затяжка креплений лобовых частей обмотки генератора, использование в стержнях статора труб охлаждения из нержавеющей стали, которые меньше подвержены засорению.
- Общие характеристики, такие как низкий уровень напряжений, более низкий риск эрозии лопаток последней ступени, подходящий подбор высоколегированной стали и покрытия предотвращающие возникновение эрозии/коррозии, основаны на длительном опыте эксплуатации и способствуют сокращению времени технического обслуживания, поскольку они сокращают количество дефектов, обнаруживаемых во время планово-предупредительного ремонта и уменьшают объём необходимых ремонтов.

3.2.2. Применение типовых решений и адаптация под условия эксплуатации в России

Унификация, направленная на разработку полностью адаптированного под российские условия проекта машзала с максимальным приближением к компоновочным и схемным референтным решениям ALSTOM, поможет существенно увеличить надёжность оборудования машинного зала.

Типовые технические решения тихоходной технологии ARABELLE™ адаптируются и оптимизируются применительно к специфическим местным российским условиям эксплуатации.

Так например, четыре находящиеся в настоящее время в эксплуатации тихоходные паровые турбины, изготовленные по технологии ARABELLE™, имеют мощность 1550 МВт и установлены на двух двухблочных АЭС - Chooz B1&B2 и Civaux 1&2 во Франции.

Эти турбины представляют собой четырехцилиндровые агрегаты (ЦВСД + 3 двухпоточных ЦНД) с рабочей лопаткой последней ступени длиной 1430 мм и суммарной площадью выхлопа 110 м².

Для сооружаемого в настоящее время также во Франции третьего блока АЭС Flamanville (Flamanville 3) ALSTOM изготавливает по технологии ARABELLE™ тихоходную паровую турбину мощностью 1750 МВт, имеющую аналогичную конструктивную схему, но с рабочей лопаткой последней ступенью 1730 мм и суммарной площадью выхлопа 150 м².

Еще две тихоходные паровые турбины, изготавливаемые ALSTOM по технологии ARABELLE™, будут установлены на второй очереди АЭС Ling Ao II (Ling Ao II 3 и 4) в Китае и представляют собой трехцилиндровые агрегаты (ЦВСД + 2 двухпоточных ЦНД) мощностью 1090 МВт с рабочей лопаткой последней ступени длиной 1430 мм и суммарной площадью выхлопа 75 м².

Таким образом, в тихоходных паровых турбинах ALSTOM технологии ARABELLE™ в зависимости от местных условий и единичной мощности могут применяться различные конструктивные схемы и различные типоразмеры выхлопов.

В этой связи следует обратить внимание на следующие, например, особенности условий эксплуатации АЭС в России:

- в отличие от Франции и от Китая среднегодовая температура охлаждающей воды конденсатора как для проектов с прямоточным охлаждением, так и для проектов с градирней, имеет на АЭС в России более низкие значения вследствие климатических особенностей;
- в отличие от Франции, в которой доля выработки электроэнергии, приходящаяся на АЭС, превышает 75 %, в России этот показатель составляет в настоящее время 15 % с перспективой повышения к 2020 г. до 20 %. Естественно, что применительно только к Европейской части России, в которой расположено подавляющее количество российских АЭС, этот показатель оказывается заметно выше (порядка 25 %), чем для России в целом. Относительно низкий показатель подтверждает практически базовую загрузку российских АЭС в годовом разрезе.

В результате, можно утверждать, что при прочих равных условиях среднегодовое значение объемного пропуска пара в конденсатор применительно к российским АЭС будет выше, чем для других упомянутых здесь примеров.

Поэтому для данных специфических российских условий в каждом конкретном случае требуется некоторая комплексная оптимизация таких, например, схемно-конструктивных решений по турбине типа ARABELLE™, как:

- количество выхлопов, т.е. количество ЦНД;
- типоразмер выхлопа;

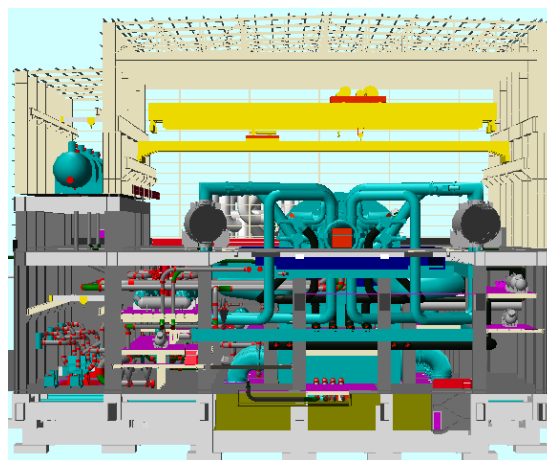
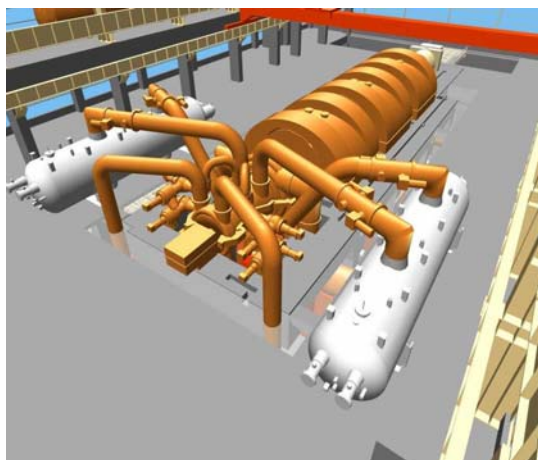
- целесообразность использования ступенчатой конденсации.

Модульная конструкция технологии ARABELLE™ обеспечивает гибкость с ограниченным количеством модулей, что идеально подходит для российских проектов. В частности, технология ARABELLE™ предусматривает для 1500 об/мин два типа ЦНД с лопатками последней ступени 1430 мм и 1730 мм для каждого типа. Таким образом, представлен полный диапазон, который, скорее всего, потребуется Заказчикам и Проектировщикам проектов АЭС – 2006.

Применение лопатки последней ступени ЦНД 1430 мм является отработанным решением, но для площадок с более глубоким вакуумом применение лопатки 1730 мм может быть эффективнее, несмотря на более высокие капитальные вложения.

Аналогичные подходы используются и при разработке и адаптации типовых компоновочных решений по машзалу АЭС с паровой турбиной типа ARABELLE™

Поперечный разрез машинного зала с примыкающей деаэрационной этажеркой наглядно показывает эффективность компоновки с горизонтальными СПП, горизонтальными ПНД, ПВД и деаэратором, наличие проходов, проездов, ремонтных зон, обслуживание оборудования мостовыми кранами.



Рациональная компоновка турбоустановки ARABELLE™ мощностью 1200 МВт с применением СПП горизонтального типа, установленных на оперативной отметке 16,60м, позволяет увеличить пространство для размещения другого вспомогательного оборудования турбоустановки и обеспечить беспрепятственный доступ ко всему оборудованию при обслуживании и ремонтах.

Блоки клапанов высокого давления располагаются на оперативной отметке 16,600м в пределах фундамента турбины рядом с ЦВСД. Сервомоторы стопорных и регулирующих клапанов расположены горизонтально и имеют удобный доступ для обслуживания с оперативной отметки 16.60м. Все клапаны и сервомоторы при ремонтах обслуживаются мостовым краном.

Обслуживание и ремонт четырех блоков клапанов СД, расположенных над СПП, выполняются с металлических площадок, которые комплектно поставляются ААЭМ вместе с оборудованием.

Перепускные паропроводы к ЦНД заглублены под полом турбины, что позволяет быстро и легко открывать внешний корпус ЦНД для проведения осмотра.

Независимая конструкция ЦНД обеспечивает его работоспособность в течение всего срока эксплуатации.

Оптимизированные конструктивные и компоновочные решения по турбоустановке вместе с виброизолированным фундаментом турбоагрегата обеспечивают минимальное время простоя при текущих и капитальных ремонтах, например, для перецентровки машины после просадки фундамента, и сокращают продолжительность и стоимость ремонтных работ.

По типовым решениям ALSTOM раскладка узлов оборудования при ремонте турбоустановки на оперативной отметке +16.60 м не требует дополнительных ремонтных площадей и не приводит к увеличению размеров машинного зала.

3.3. Производственные возможности

3.3.1. Развертывание инжиниринга и производства СП-ААЭМ

Подготовка производства в Подольске и организация комплектной поставки оборудования машинного зала АЭС осуществляется высококвалифицированными специалистами на двух площадках совместного предприятия в Подольске и Санкт-Петербурге. Возможность обмена опытом между компанией ALSTOM и ААЭМ, наряду с использованием современных методов управления и информационной поддержки бизнес-процессов предприятия позволяет выстраивать эффективную работу по следующим основным направлениям:

1. подготовка технической документации для производства оборудования по тихоходной технологии ARABELLE™;
2. получение лицензии на конструирование и организация оценки соответствия импортного оборудования в надзорных органах;
3. реконструкция производственной площадки ААЭМ на базе новейших разработок ALSTOM в области компоновки технологического оборудования, способов транспортировки готовых изделий, обеспечении требований экологического контроля и других важных аспектов организации производства
4. внедрение современных информационных систем управления информацией по проектам;
5. руководство и управление проектами;
6. подготовка ответов Заказчикам на запросы по ценовым предложениям;
7. закупка оборудования и транспортировка до площадки АЭС;
8. адаптация базовых проектов к специфическим местным условиям площадок;
9. организация детального проектирования (рабочей документации);
10. организация шеф-монтажных и шеф-наладочных работ;
11. организация проведения гарантийных испытаний и послегарантийного сервисного обслуживания.

3.3.2. Российские поставщики и комплектация

Возрождение атомной энергетики после длительного застоя, и в частности быстро растущая потребность в строительстве АЭС на базе ВВЭР-1200, вызывает значительные сложности с обеспечением своевременной комплектной поставки оборудования. Это требует тщательного планирования и организации процессов производства, проектирования, проектного менеджмента, сертификации поставщиков и других аспектов, если понадобится.

В планы ААЭМ входит полная локализация производства тихоходной турбины в России к 2013 году и организация комплектной поставки оборудования для машинных залов АЭС при тесном сотрудничестве с российскими генеральными проектировщиками (АЭП Москва, СПБАЭП Санкт-Петербург, НиАЭП Нижний Новгород).

Совместная деятельность ААЭМ и ALSTOM за последний период позволила подготовить оптимальный список потенциальных поставщиков оборудования машинного зала в границах предполагаемого объема поставки, обеспечивающий высокое качество и надежность поставляемого оборудования, соблюдение сроков поставки.

ААЭМ активно перенимает опыт ALSTOM в области сертификации поставщиков. Это очень важный и достаточно длительный процесс, требующий тщательного аудита производственной деятельности изготовителя и охватывающий следующие аспекты:

- производственные возможности изготовителя;
- наличие положительных референций;
- система менеджмента качества;
- система менеджмента в области окружающей среды, здоровья и охраны труда;
- финансовая деятельность и стабильность;
- возможности привлечения сторонних ресурсов;
- возможности проектирования и др.

3.3.3. Решения по интеграции под заданные проектным институтом условия проектирования

Для достижения наивысшей эффективности машинного зала необходимо рассматривать не только паровую турбину, но и все оборудование пароводяного цикла в целом, сводя к минимуму потери во всех его элементах при сохранении разумных капитальных затрат на оборудование, а также низких эксплуатационных затрат и расходов по техническому обслуживанию.

В связи с этим, одним из основных направлений работы ААЭМ является «интеграция оборудования турбинного острова». То есть, не только производство основного оборудования пароводяного цикла, но и комплектация машинного зала АЭС всем вспомогательным оборудованием в оптимальной его тепловой, схемной и конструктивно-компоновочной увязке с характеристиками и размещением основного оборудования в целях максимизации КПД теплового цикла.

Это относится к системе регенерации, системе конденсации, системе сепарации и паро-парового промперегрева, системе подогрева сетевой воды и т.д. (трассировка основных и вспомогательных паропроводов и трубопроводов воды и дренажей, типоразмеры и конструктивный профиль теплообменников, их расположение относительно турбины, количество и типоразмеры запорно-регулирующей арматуры и т.д.).

Габаритные размеры машинного зала с турбоустановкой ARABELLE™ для АЭС на базе ВВЭР-1200 соответствуют требованиям АЭП для проекта по строительству Северской АЭС.

Оборудование полностью удовлетворяет требованиям Технического задания АЭС-2006 по высокому уровню безопасности, надежности, экономичности и компактной компоновке вспомогательного оборудования турбинного отделения.

Решения ААЭМ - это эффективная ответственность Поставщика за комплект поставляемого основного оборудования и вспомогательных систем турбоустановки блочного исполнения, которые обеспечивают безусловные преимущества при компоновке машинного зала и уменьшают сроки выполнения рабочих чертежей при проектировании.

Объем ответственности ААЭМ включает в себя не только проектирование, но и поставку оборудования и трубопроводов вспомогательных систем в блочном исполнении.

Характерной особенностью является компактное расположение оборудования.

В случае необходимости отпуска от АЭС теплоты в горячей воде по требованию АЭП турбина дополнительно комплектуется двумя сетевыми подогревателями, баком сбора конденсата и насосами возврата конденсата.

Верхний сетевой подогреватель питается паром из отбора после модуля ВД, а нижний – с выхлопа ЧСД. Температура прямой сетевой воды регулируется байпасом подогревателей по сетевой воде и регулирующим клапаном на отборе на верхний подогреватель.

Возможность отбора значительной доли пара без потерь из выхлопа модуля СД делает конструкцию ARABELLE™ идеально гибкой для больших теплофикационных отборов.

3.3.4. Управление проектом как средство обеспечения своевременной поставки

Одной из наиболее сильных сторон ALSTOM является уникальный, подтвержденный многими авторитетными международными экспертными организациями опыт своевременной сдачи ЕРС – проектов Заказчику с соблюдением всех необходимых требований по качеству поставляемого оборудования и услуг.

Своевременное и качественное исполнение проектов базируется на разработанной ALSTOM технологии, в которую заложена идеология единого информационного пространства, связующего инженерные центры, производственные площадки, а также партнёров ААЭМ, выполняющих поставки вспомогательного оборудования и строительство объектов.

В рамках вышеизложенного соглашения указанная информационно-управляющая технология передаётся ААЭМ при полной технической поддержке ALSTOM. Дальнейшая локализация и разработка технической документации выполняется ААЭМ.

В полном соответствии с идеологией ALSTOM для обеспечения тесного взаимодействия с Заказчиком, в ААЭМ организована команда проекта при всемерной поддержке специально созданной для этой цели проектной группы ALSTOM. Именно эта постоянно действующая организационная структура обеспечивает непрерывное и своевременное исполнение проекта.

Руководство проектом и координация его исполнения со стороны ААЭМ включает в себя при этом:

- организацию разработки базового и детального проектов машинного зала АЭС с использованием 3D моделирования при выполнении компоновки оборудования, трубопроводов, кабельных трасс, строительных конструкций;
- координацию проектных работ с генеральными проектировщиками АЭС;
- планирование и организацию долгосрочной работы с российскими поставщиками, выбор и сертификация поставщиков, разработка логистических цепочек поставок;
- перевод и адаптацию технической и проектно-конструкторской документации по турбоустановке, полученной от ALSTOM, к условиям производства оборудования в России;
- подтверждение в Российских надзорных органах соответствия импортного оборудования требованиям Российских норм и правил.

Такой комплексный подход к исполнению проектов, наряду с предоставляемой ALSTOM практикой современной организации работ, позволяет Заказчикам своевременно завершать проекты АЭС под полным контролем и при полной поддержке ALSTOM в части своего объема поставки оборудования и услуг. Иллюстрацией своевременного строительства АЭС служат данные МАГАТЭ, приведённые ниже в таблице, где указано время строительства четырех референтных блоков с машзалами ALSTOM в Китае. Начало коммерческой эксплуатации было объявлено до наступления планового срока по контракту.

Проекты	Дайа Бей Блок 1	Дайа Бей Блок 2	Линг Ао Блок 1	Линг Ао Блок 2
Начало строительства	1987/08/07	1988/04/07	1997/05/15	1997/11/28
Подключение к сети	1993/08/31	1994/02/07	2002/02/26	2002/12/15
Коммерческая эксплуатация	1994/02/01	1994/05/07	2002/05/28	2003/01/08
Продолжительность	78 мес	73 мес	60 мес	62 мес

4. ВЫВОДЫ

Тихоходные турбины с блоками мощностью выше 1000 МВт полностью доминируют на мировом энергетическом рынке АЭС и гарантируют наивысший уровень безопасности и надежности на длительный период эксплуатации.

ALSTOM завоевал мировое лидерство в области атомной энергетики благодаря разработке концепции ARABELLE™, которая обеспечивает максимальные преимущества в экономичности, надёжности, монтаже, ремонтпригодности и эксплуатации.

Созданное в России Совместное Предприятие ООО «АЛЬСТОМ Атомэнергомаш» по производству тихоходных турбоустановок мощностью 1200-1800 МВт обладает технологией ARABELLE™, не имеющей аналогов в России, и нацелено на обеспечение разработки, изготовления, поставки, шеф-монтажа, шеф-пусконаладки и сервисного обслуживания машинного зала АЭС в кратчайшие сроки и с соблюдением требуемых стандартов качества.

Для достижения наивысшего КПД теплового цикла АЭС при разработке проектов ААЭМ рассматривает не только паровую турбину, но и пароводяной цикл в целом, схемные и компоновочные решения, сводя к минимуму потери во всех элементах при сохранении разумной цены оборудования, а также затрат на его обслуживание и эксплуатацию.

Одним из основных направлений работы ААЭМ является интеграция оборудования турбинного острова, то есть, не только производство и поставка основного оборудования пароводяного цикла, разработка проектной документации, но и комплектная поставка всего вспомогательного оборудования машзала.

5. ССЫЛКИ

- [1] **Разработка турбоустановки 1200 МВт фирмы Alstom для АЭС в России**
А. Цветков, V. Jourdain, Power Russia 2008 (Москва, Россия)
- [2] Несколько статей Всемирной атомной ассоциации (World Nuclear Association) об историческом развитии и современных тенденциях в атомной энергетике: (Nuclear Power facts & Country Briefing на сайте <http://www.world-nuclear.org>.)
- [3] Alstom technology solutions for the 1200-1700 MW range Nuclear Turbine Island developments for the USA
V. Jourdain, Electrical Power 2008 (Балтимор, США)