Федеральное Государственное Унитарное Предприятие

ГИДРОПРЕСС

ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО

2006

Реакторная установка ВВЭР для проекта АЭС-2006, развитие легководных корпусных ВВЭР

16-ая Конференция Ядерного общества России

Драгунов Ю.Г.

Преимущества внутренней пассивной безопасности АЭС с ВВЭР

Отличительными особенностями реакторных установок ВВЭР являются высокие показатели использования принципа самозащищенности РУ, заложенные в проектные основы систем и оборудования во всех проектах РУ ВВЭР.

Это выражается в способности РУ ВВЭР в аварийных ситуациях длительное время ограничивать развитие исходных событий и их последствий в границах проектных критериев безопасности в первую очередь за счет свойств пассивной безопасности реакторов ВВЭР и обеспечивается следующими конструктивными и проектными особенностями:

- увеличенный объем теплоносителя над активной зоной;
- увеличенный объем теплоносителя в первом контуре по отношению к массе топлива и тепловой мощности активной зоны;
- увеличенный объем компенсатора давления;
- значительный объем воды в горизонтальных парогенераторах по второму контуру.

Преимущества внутренней пассивной безопасности АЭС с ВВЭР

Свойства внутренней самозащищенности РУ также обеспечиваются за счет:

- срабатывания органов регулирования в режиме аварийной защиты на основе гравитационных сил;
- свойств самоограничения энерговыделений активной зоны за счет отрицательных коэффициентов реактивности по температуре топлива, теплоносителя, по мощности;
- отсутствия врезок и отверстий ниже главных патрубков корпуса реактора и, соответственно, ниже верхней отметки активной зоны;
- применения пассивных элементов, отсечных, ограничительных и сбросных устройств;
- использования инерционного выбега специальных маховых масс ГЦНА для обеспечения необходимого спада расхода через активную зону при обесточивании.

Преимущества внутренней пассивной безопасности АЭС с ВВЭР

Поведение реакторов ВВЭР в аварийных ситуациях характеризуется большей устойчивостью теплогидравлических процессов, чем поведение реакторов PWR в аналогичных ситуациях, что обеспечивает:

- сохранение условий безопасной эксплуатации реакторов ВВЭР более длительное время, чем PWR;
- в реакторах ВВЭР более длительное время не происходит осушение активной зоны;
- в реакторах ВВЭР более длительное время возможно отсутствие вмешательства операторов по сравнению с такими же авариями в PWR.

Указанные качества подтверждаются значительным опытом эксплуатации АЭС с ВВЭР.

Развитие легководных корпусных ВВЭР

Эволюционный путь развития АЭС с ВВЭР / НВАЭС блок 1, АЭС с РУ В-179, 230, 270

- Проекты АЭС с ВВЭР первого поколения разрабатывались в 50 – 60-ых годах в условиях отсутствия отечественных НТД по безопасности.
- Постулировалась невозможность крупных течей из 1-го контура (разрыв ГЦТ полным сечением).
- Принцип обеспечения безопасности опирался на предотвращение возникновения опасных аварий с помощью технических и организационных мер без развитых систем безопасности.

Развитие легководных корпусных ВВЭР

Эволюционный путь развития АЭС с ВВЭР / АЭС с РУ В-213, 187, 302, 338, 320 1/3

- Проекты АЭС с ВВЭР следующего поколения разрабатывались в 70-ых годах, когда для системного определения проектных основ были сформулированы требования к безопасности АЭС в виде ОПБ-73.
- Было определено, что принцип обеспечения безопасности основывается на широком использовании активных и пассивных систем безопасности. Это позволило в качестве максимальной проектной аварии рассматривать разрыв ГЦТ полным сечением.
- Значительно вырос объем расчетно-экспериментальных обоснований проектов.

Развитие легководных корпусных ВВЭР

Эволюционный путь развития АЭС с ВВЭР / АЭС с РУ В-213, 187, 302, 338, 320 2/3

- Была заложена концепция глубоко эшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду и системы технических и организационных мер по защите барьеров и сохранению их эффективности, а также по защите персонала, населения и окружающей среды.
- Промышленность начала ориентироваться в направлении соответствия западным нормам в части программ качества.

Развитие легководных корпусных ВВЭР

Эволюционный путь развития АЭС с ВВЭР / Современные АЭС с РУ В-412, 428, 446 (ВВЭР-1000) 1/3

- Аварии на АЭС “Три Майл Айленд” в США (28 марта 1979 г.) и в Чернобыле (26 апреля 1986 г.), причиной которых явились недостатки отдельных типов реакторов и ошибки персонала, привели к пересмотру нормативно-технической документации в сторону ужесточения требований.
- Появились новые требования:
  - снизить вероятность тяжелых аварий с плавлением активной зоны в 10 раз по сравнению с уровнем требований для действующих АЭС (до 10^{-5} 1/реактор-год);
  - вероятность недопустимого выброса радиоактивности, приводящего к необходимости эвакуации населения, д.б. снижена в 10-100 раз (до 10^{-6}-10^{-7} 1/реактор-год);

Развитие легководных корпусных ВВЭР

Эволюционный путь развития АЭС с ВВЭР / Современные АЭС с РУ В-412, 428, 446 (ВВЭР-1000) 2/3

- Проекты новых АЭС должны учитывать возможность возникновения запроектных аварий, и предусматривать меры (технические и организационные) для управления ими с целью уменьшения или предотвращения их последствий.
- Проекты АЭС-92 и АЭС-91/99 являются головными при воплощении перечисленных целей. Прототипом этих проектов является проект серийной реакторной установки ВВЭР-1000 (В-320).
- Концепция проектов АЭС-92 и АЭС-91/99 является основой разработанных проектов РУ В-412 и РУ В-428 соответственно.

Развитие легководных корпусных ВВЭР

Эволюционный путь развития АЭС с ВВЭР / Современные АЭС с РУ В-412, 428, 446 (ВВЭР-1000) 3/3

- Проекты современных РУ охватывают широкий диапазон конструкторских разработок: от эволюционного на базе В-320 до новых конструкций основного оборудования с более широким использованием передовых технологий

Индия
АЭС “Куданкулам”

Китай
АЭС “Тяньвань”

Иран
АЭС “Бушер”

Направления усовершенствования АЭС с ВВЭР

В процессе многолетней эксплуатации АЭС с ВВЭР выявился ряд актуальных вопросов, требующих решения во вновь разрабатываемых проектах:

- увеличение срока службы основного незаменяемого оборудования РУ;
- повышение надежности оборудования РУ (в первую очередь – парогенератора);
- повышение КПД АЭС в целом, в том числе за счет повышения рабочих параметров РУ;
- повышение КИУМ, в том числе за счет увеличения межперегрузочного периода, уменьшения длительности перегрузки, технического обслуживания, длительности средних и капитальных ремонтов.

Развитие легководных корпусных ВВЭР

Улучшение эксплуатационных показателей РУ и АЭС в целом

- В настоящее время развитие проектов РУ идет по пути улучшения эксплуатационных свойств, увеличения срока службы оборудования, повышения его надежности. Это проводится с целью улучшения экономических показателей блока в целом и повышения безопасности.
- В современных проектах РУ ВВЭР используется многолетний опыт разработчика, накопленный при создании и эксплуатации реакторных установок ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.
- Обеспечивается выполнение требований действующих в атомной энергетике России НТД, анализируются рекомендации МАГАТЭ, требования EUR.

Основные цели при разработке новых проектов РУ

Реакторная установка ВВЭР для АЭС-2006 1/2

- Повышение единичной мощности реактора.
- Повышение рабочих параметров РУ с целью повышения КПД АЭС в целом.
- Увеличения срока службы основного оборудования РУ.
- Повышение КИУМ.
- Дальнейшее совершенствование систем безопасности с целью ограничения доз облучения персонала и выхода радиоактивных веществ в окружающую среду в условиях НЭ, ПА, ЗПА.
- Уменьшение объема радиоактивных отходов.
- Исключение возможности внезапных больших разрывов трубопроводов 1-го контура за счет внедрения концепции ТПР и усовершенствования систем диагностики.

Пути достижения поставленных целей

Реакторная установка ВВЭР для АЭС-2006 2/2

- Обоснование повышения рабочих параметров РУ с их одновременной технико-экономической оптимизацией.
- Увеличение внутреннего диаметра корпусов реактора и парогенератора (с обеспечением преемственности технологии изготовления).
- Максимальное использование результатов НИОКР, проведенных для ВВЭР.
- Учет многолетнего опыта эксплуатации РУ ВВЭР.

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Основа для разработки проекта РУ ВВЭР-1200 (В-466П)

- Опыт проектирования, расчетного и экспериментального обоснования проектов-предшественников РУ В-320, В-392, В-428, В-446, В-412.
- Многолетний опыт эксплуатации РУ ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.
- Технические задания на РУ и АЭС.*
- Программа НИОКР.*
- Прогнозируемые дополнительные требования потенциальных Заказчиков за пределами РФ.
- Требования современных НТД, действующих в атомной энергетике России, рекомендации МАГАТЭ, требования EUR.

* - находятся в завершающей стадии разработки

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Основные целевые показатели проекта РУ ВВЭР-1200 (В-466П)

- Номинальная тепловая мощность реактора 3200 МВт (соответствует 1160 МВт электрических на клеммах генератора).
- Проектный срок службы основного оборудования РУ без необходимости его замены – 60 лет.
- Коэффициент технического использования, усредненный за весь срок службы АЭС – 92%.
- Годовой коэффициент использования установленной мощности, усредненный за весь срок службы АЭС – 90%.
- Максимальное выгорание топлива по ТВС – до 70 МВт·сут/кгU.
- Длительность межперегрузочного периода – до 24 месяцев.

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Референтность технических решений в проекте РУ ВВЭР-1200 (В-466П)

- Обеспечена референтность оборудования РУ по отношению к эксплуатируемым АЭС с ВВЭР-1000, а также вводимым в эксплуатацию и строящимся АЭС в Китае и Индии.
- При принятом в проекте увеличении внутреннего диаметра корпуса реактора и парогенератора обеспечивается референтность по технологии изготовления.
- Вводимые в проект РУ конструктивные усовершенствования носят эволюционный характер и не требуют значительных НИОКР.

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Основные характеристики и параметры в проекте РУ ВВЭР-1200 (В-466П) 1/2

Параметр	В-466П	В-428	В-412 / В-392Б	В - 320
Мощность тепловая (ном.), МВт	3200	3000	3000	3000
Давление в реакторе (номинальное) на выходе из активной зоны, МПа	16,2	15,7	15,7	15,7
Давление генерируемого пара при номинальной нагрузке на выходе из коллектора пара ПГ, МПа	7,00	6,27	6,27	6,27
Температура теплоносителя на выходе из активной зоны, °С	329,7	321	321	320

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

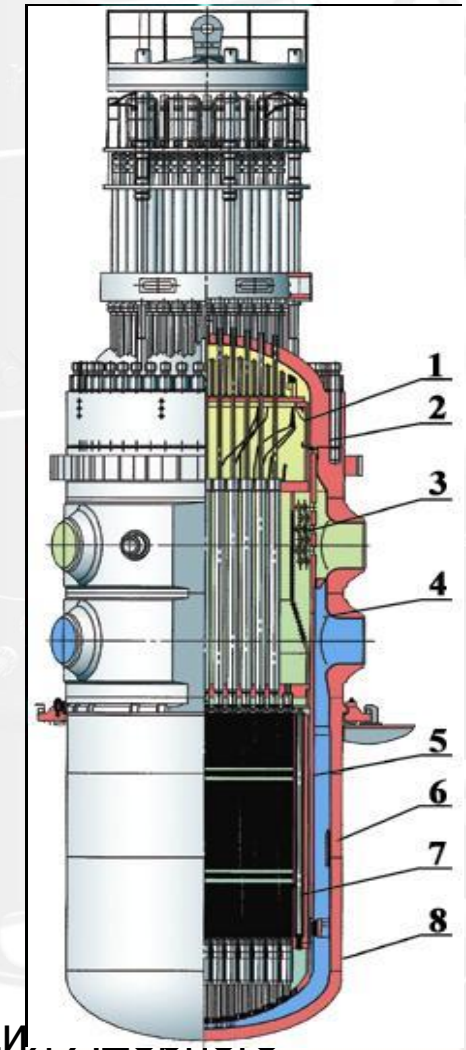
Основные характеристики и параметры в проекте РУ ВВЭР-1200 (В-466П) 2/2

Параметр	В-466П	В-428	В-412 / В-392Б	В - 320
Температура генерируемого пара при номинальной нагрузке, °С	287,0	278,5	278,5	278,5
Паропроизводительность в номинальном режиме, т/ч	1600 х4	1470 х4	1470 х4	1470 х4
Глубина выгорания топлива средняя (в стационарном топливном цикле), МВт·сут/кгU	Более 50	43	43/46	40,2
Срок службы РУ, лет	60	40	30/40	30

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Усовершенствованный реактор ВВЭР-1200 (В-466П) 1/2

Условные обозначения Symbols	
Сборка внутриреакторных детекторов In-core instrumentation detectors	1
Блок верхний Upper unit	2
Блок защитных труб Protective tube unit	3
Шахта внутрикорпусная Core barrel	4
Выгородка Core baffle	5
Образцы-свидетели Surveillance specimens	6
Зона активная Core	7
Корпус ядерного реактора Nuclear reactor vessel	8



РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Усовершенствованный реактор ВВЭР-1200 (В-466П) 2/2

Параметр	В-466П	В-428	В-412 / В-392Б	В - 320
Корпус реактора				
Диаметр внутренний (цилиндрическая часть), мм	4250	4150	4150	4150
Количество ОР СУЗ, шт.	85 -121	85 -121	85 -121	61

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Особенности реактора ВВЭР-1200 (В-466П) 1/2

- Увеличен внутренний диаметр корпуса реактора с целью уменьшения потока нейтронов на корпус реактора.
- Предусмотрена новая программа образцов-свидетелей (размещение облучаемых ОС непосредственно на стенке корпуса реактора).
- Содержание никеля в сварных швах ограничено.
- Снижение $T_{ко}$.
- Предусмотрено использование отработанной технологии изготовления.
- Улучшены условия охлаждения активной зоны в аварийных ситуациях с потерей теплоносителя (за счет увеличения объема теплоносителя в реакторе).

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

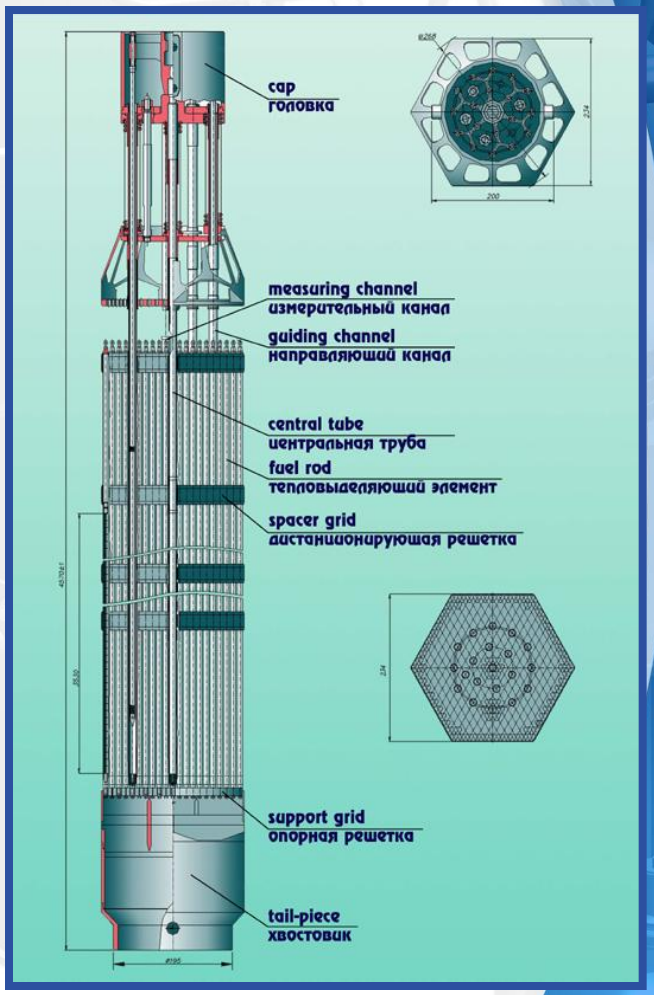
Особенности реактора ВВЭР-1200 (В-466П) 2/2

- Снижение дозовых нагрузок на персонал, обслуживающий ГЦНА и парогенераторы.
- Реализовано увеличенное количество органов СУЗ.
- Предусмотрено повышение достоверности контроля флюенса на корпус реактора.

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

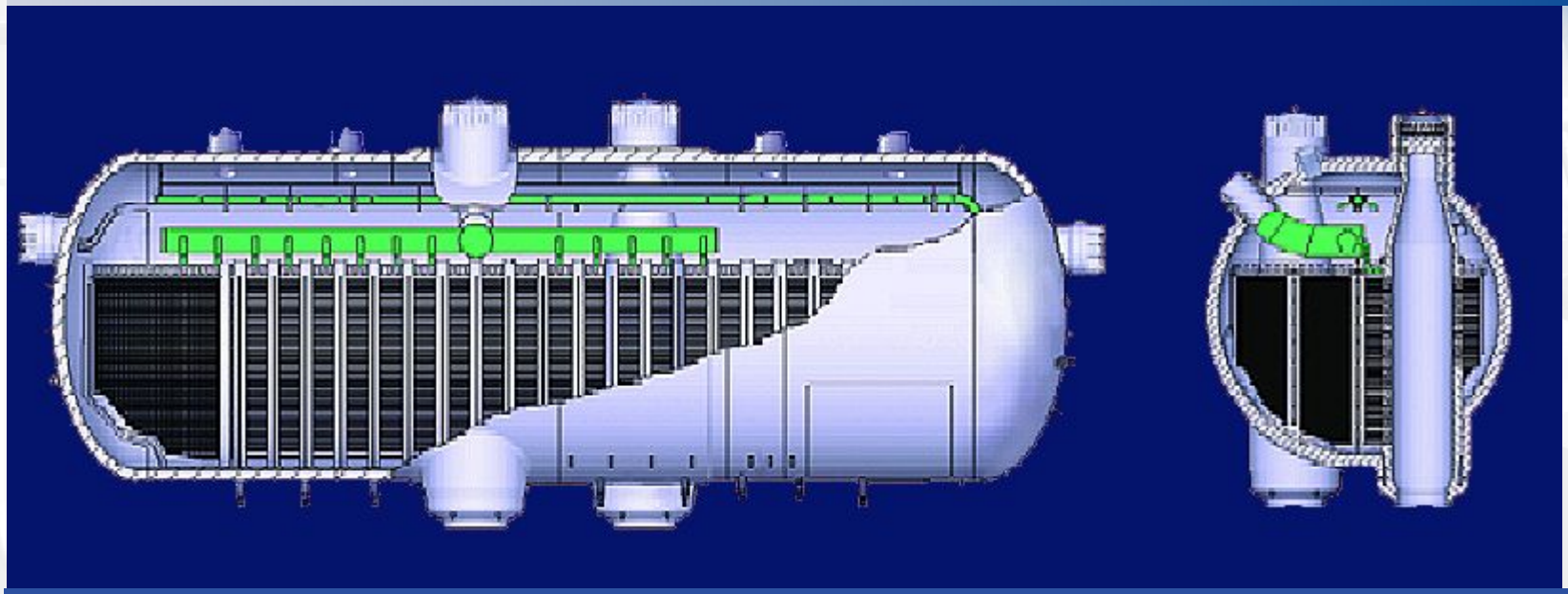
Особенности топливного цикла реактора ВВЭР-1200 (В-466П)

- Применение уран-гадолиниевого топлива.
- Максимальная средняя величина выгорания ТВС более 50 МВт·сут/кг U.
- Длительность межперегрузочного периода 18 месяцев.
- Увеличение длительности кампании за счет работы на мощностном и температурном эффектах реактивности на 60 суток.
- Температура повторной критичности менее 100 °С.
- Увеличение массы загружаемого в реактор топлива за счет увеличения длины топливного столба и изменения размеров топливной таблетки.



РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Особенности парогенератора в проекте РУ ВВЭР-1200 (В-466П) 1/3



Параметр	В-466П	В-428	В-412 / В-392Б	В-320
Парогенератор	ПГВ-1000МК	ПГВ-1000М	ПГВ-1000М / ПГВ-1000МК	ПГВ-1000М
Внутренний диаметр корпуса парогенератора, м	4,2	4,0	4,0 / 4,2	4,0

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Особенности парогенератора в проекте РУ ВВЭР-1200 (В-466П) 2/3

- Применена разреженная коридорная компоновка труб в теплообменном пучке.
- Увеличен диаметр корпуса парогенератора.
- Увеличен запас воды по второму контуру с 52 до 63 м^3.
- Увеличена интенсивность и повышен расход непрерывной и периодической продувки.
- Введены смывные устройства (разъемные штуцеры на нижней образующей корпуса и переходных кольцах коллекторов теплоносителя) для удаления шлама с нижних рядов теплообменных труб и корпуса ПГ в период ППР.

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

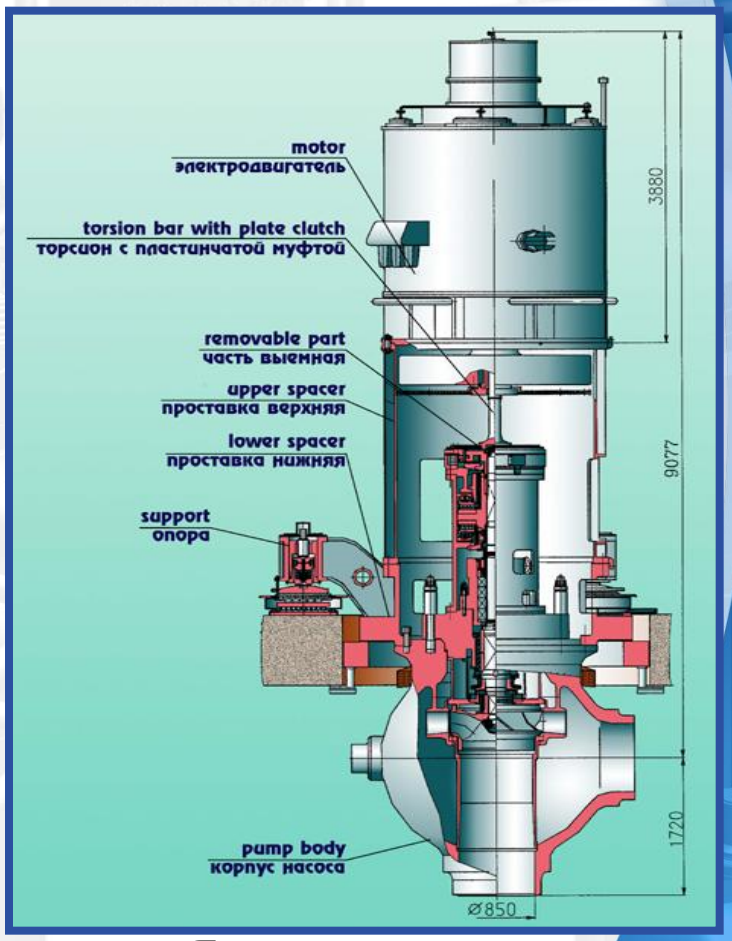
Преимущества разреженной коридорной компоновки труб в парогенераторе в проекте РУ ВВЭР-1200 (В-466П) 3/3

- Увеличена скорость циркуляции в трубном пучке.
- Снижена возможность забивания межтрубного пространства отслоившимся шламом.
- Облегчен доступ в межтрубное пространство для инспекции.
- Увеличен запас воды в парогенераторе.
- Увеличено пространство под трубным пучком для облегчения удаления шлама.
- Улучшено напряженное состояние коллектора теплоносителя.

РУ ВВЭР для проекта АЭС-2006

Главный циркуляционный насосный агрегат в проекте РУ ВВЭР-1200 (В-466П)

- Применен торсион с пластинчатой муфтой вместо зубчатой муфты.
- Использован главный радиально-осевой подшипник с водяной смазкой.
- В режиме стоянки теплоотвод от нижнего радиального подшипника осуществляется естественной циркуляцией.
- Применена сферическая форма сварно-штампованного корпуса.
- Двигатель ДВДАЗ 173/109-6-8-2АМ05 имеет следующие преимущества:
  - индивидуальная система смазки;
  - пуск двигателя осуществляется вначале до 750 об/мин, а затем производится переход на номинальную скорость вращения 1000 об/мин.



Дальнейшее развитие корпусных ВВЭР

Направления усовершенствования проекта РУ ВВЭР-1200

- Повышение тепловой мощности РУ с 3200 до 3300 МВт с учетом внедрения турбулизаторов в ТВС за счет снижения консерватизма расчетных кодов и методик, оптимизации топливного цикла на основе комплекса НИОКР.
- Увеличение максимального выгорания топлива до 70 МВт·сут/кг U.
- Увеличение длительности межперегрузочного периода – до 24 месяцев.
- Обеспечение требований к маневренным характеристикам энергоблока в целом – в соответствии с требованиями EUR.
- Возможность увеличения давления до 7,35 МПа во втором контуре с целью повышения КПД АЭС в целом.

Дальнейшее развитие корпусных ВВЭР

Развитие проекта РУ ВВЭР-1500 (В-448) 1/5

- Дальнейшее развитие корпусных ВВЭР реализовано в проекте РУ ВВЭР-1500 (В-448) для энергоблоков АЭС мощностью 1500 МВт(эл).
- Выполнены следующие работы:
  - ✔ разработана конструкторская документация на основное оборудование реакторной установки;
  - ✔ выполнено обоснование безопасности для базового проекта АЭС с ВВЭР-1500;
  - ✔ изготовлена на ОАО «Ижорские заводы» опытная обечайка корпуса реактора Двн=4960 мм, чем подтверждена возможность изготовления корпуса на существующем оборудовании завода.

Дальнейшее развитие корпусных ВВЭР

Развитие проекта РУ ВВЭР-1500 (В-448) 2/5

- Проект АЭС с ВВЭР-1500 базируется на основных технических решениях ВВЭР-1000 и PWR нового поколения.
- Ряд характеристик ВВЭР-1500 улучшен по сравнению с ВВЭР- 1000

Параметр	ВВЭР-1000	ВВЭР-1500
Энергонапряженность активной зоны, кВт/л	**110**	**87**
Максимальный линейный тепловой поток на твэле, Вт/см	**448**	**340**
Флюенс нейтронов, н/см^2	**$6{,}0*10^{19}$**	**$1{,}0*10^{19}$**

Дальнейшее развитие корпусных ВВЭР

Развитие проекта РУ ВВЭР-1500 (В-448)/ Основные направления дальнейшего развития 4/5

По рекомендациям семинара в Колонтаево (декабрь 2005 г.) ОКБ «Гидропресс» разработаны мероприятия по повышению ряда характеристик РУ ВВЭР-1500:

- повышение тепловой мощности реактора до 4350 МВт (1600 МВт (эл));
- повышение давления пара на выходе из парогенератора до 7,8 МПа (увеличение КПД блока).

Эти мероприятия реализуются за счет изменения параметров I и II контуров:

- давление P_I = 16,2 МПа (было 15,7 МПа);
- давление P_{II} = 7,8 МПа (было 7,34 МПа).

Заключение

1/2

- С целью повышения КПД энергоблока выполнены предпроектные работы по обоснованию повышения параметров РУ.
- Предусмотрено увеличение проектного срока службы основного оборудования РУ без необходимости его замены – 60 лет.
- Предусмотрена дальнейшая форсировка тепловой мощности реактора до 3300 МВт по результатам выполнения НИОКР по интенсификации теплообмена в активной зоне.
- Обеспечена референтность по технологии изготовления оборудования и систем по отношению к эксплуатируемым АЭС с ВВЭР-1000, а также вводимым в эксплуатацию и строящимся АЭС в Китае и Индии.
- Вводимые усовершенствования носят эволюционный характер и не требуют значительных НИОКР.

Заключение

2/2

- Изготовление оборудования может быть осуществлено промышленностью по отработанным технологиям.
- Проект АЭС с ВВЭР-1500 базируется на основных технических решениях ВВЭР-1000 и PWR нового поколения и развивает мощностной ряд ВВЭР -

  440 МВт - 640 МВт –1000 МВт – 1200 МВт – 1600 МВт,

  что обеспечит конкурентоспособность российских энергоблоков с ВВЭР по отношению с лучшими зарубежными проектами.