

АЭС AP1000 компании Westinghouse, обладающая повышенной экономичностью и безопасностью

Токмачев Г.В.

Введение

30 декабря 2005 года Комиссия по ядерному регулированию США (NRC) утвердила Сертификат на проект унифицированной АЭС AP1000, разработанный компанией Westinghouse Electric [1,2], головной офис которой находится в г.Питтсбурге (США), а собственником является британская компания BNFL (British Nuclear Fuels) [3]. Ранее, в декабре 1999 года аналогичный сертификат получил прототип AP1000 – проект AP600, оказавшийся недостаточно конкурентоспособными на американском рынке производства электроэнергии [4]. Трудозатраты на разработку и обоснование концептуального проекта AP600/1000 составили 1300 человеко-лет конструкторских и экспериментальных работ, в частности к моменту завершения около 60% работ по проекту было разработано свыше 12000 проектно-конструкторских документов [5].

Две эксплуатирующие организации США выбрали проект AP1000 для подготовки заявки в NRC на получение единой лицензии на строительство и эксплуатацию (Construction and Operation License – COL). Компания Duke Power планировала определиться в январе 2006 года с площадкой сооружения двух энергоблоков AP1000 и подготовить заявку в NRC в течение 24-30 месяцев [1]. Консорциум NuStart Energy Development, образованный электро-энергетическими компаниями для поддержки новых проектов, собирается подать аналогичную заявку (на 2 блока) в октябре 2007 года для площадки АЭС Bellefonte (штат Алабама), собственником которой является компания Tennessee Valley Authority [1, 2, 6].

Westinghouse начал экспансию и на другие рынки: например, проект AP1000, адаптированный к требованиям Европейских эксплуатирующих организаций (EUR) и названный EP-1000, был разработан Westinghouse совместно с итальянской Genesi для получения лицензии в Европе [7]. Одной из европейских стран, где может быть построена АЭС AP1000, является Великобритания, где в настоящее время расходуется на порядок больше ядерного топлива на АЭС с реакторами типа Magnox, чем это требуется на AP1000 для одинаковой выработки электроэнергии [5].

Другим перспективным сегментом мирового рынка является Китай, с руководителями которого в апреле 2004 года вел переговоры Вице-президент США Дик

Чейни о строительстве в КНР АЭС с реакторной установкой AP1000 [8]. В феврале 2005 года объявлено, что в случае принятия китайской стороной положительного решения Westinghouse получит 5-миллиардный заем от Экспортно-Импортного банка США на строительство 4-х энергоблоков AP1000 в Китае, стоимость каждого из которых оценивается в диапазоне 2,2-2,7 млрд. долларов США [9]. Два блока планируется построить в провинции Zhejiang, а еще два – в провинции Guangdong.

В июне 2005 года был образован консорциум для строительства АЭС в Китае в составе Westinghouse, Mitsubishi heavy Industries (Япония) – одного из мировых лидеров тяжелого машиностроения – и компании Shaw Group Inc., ответственной за проектные и строительные работы и частично за функции инжиниринга и поставщика оборудования. Shaw Group будет изготавливать трубопроводные модули на ее китайском заводе в Nanjing [10]. Это важный фактор, так как по требованию заказчика 70% элементов АЭС должны быть китайского производства [9].

Экономические показатели AP1000

Капитальные вложения на АЭС составляют примерно 45-75% от общей стоимости электроэнергии по сравнению с 25-60% для тепловых станций, работающих на угле, и 15-40% - на газе [7]. Это сдерживает развитие атомной энергетики США. Для поддержки проектов по разработке конкурентоспособных усовершенствованных АЭС к 2010 году Министерство энергетики США реализует инициативу «Атомная энергия 2010» [4,7]. Одним из основных требований является сокращение срока строительства АЭС, который должен составлять 5-6 лет с момента подписания контракта до ввода АЭС в промышленную эксплуатацию, из них собственно сооружение АЭС должно длиться 3-4 года, а 2 года отводится на операции по подготовке к пуску и пуску АЭС.

Со своей стороны, Westinghouse оценил, что стоимость 1 кВт установленной мощности АЭС, конкурентоспособной на американском рынке, должна быть в диапазоне 1000-1200 долларов США. Однако, проект AP600, удовлетворяющий этому критерию, оказался экономически непривлекательным из-за высокой стоимости 1 кВт-часа (от 4,1 до 4,6 цента) вырабатываемой электроэнергии [4]. Поэтому был разработан проект АЭС большей мощности - AP1000, позволяющий снизить стоимость выработки электроэнергии до 3,0-3,5 центов за кВт-час. Увеличение стоимости самой АЭС удалось минимизировать путем жесткого подхода к сохранению проектных решений AP600 в максимально возможном объеме. Результаты аудитов, выполненных компаниями Bechtel (США) и Obayashi (Япония), показывают, что оценка общей капитальной стоимости AP1000, начиная с 3-го серийного энергоблока при условии, что на площадке уже

работает АЭС, не превысила 1200 долларов США за 1 кВт установленной мощности в ценах 2001 года. Это позволит энергетическим компаниям США иметь приблизительно 15% прибыль после выплаты налогов [11]. Предполагается, что коэффициент готовности АЭС будет не менее 93% [4].

Применительно к Великобритании было проведено несколько независимых экспертиз стоимости реализации проекта в этой стране, в т.ч. экспертизы EPRI и NNC [5]. Структура всех предполагаемых затрат приведена в таблице 1.

Снижение затрат было достигнуто за счет следующих мер:

1. *Внедрение пассивных систем безопасности*, которые значительно проще и дешевле, чем активные системы, выполняющие те же функции. В результате, по сравнению с обычной АЭС сходной мощности в проекте AP1000 сокращено число клапанов на 50%, трубопроводов – на 80-83%, кабелей – на 70-87%, насосов – на 35% (число насосов на энергоблоке AP1000 составляет 180 агрегатов), а объём сейсмостойких зданий – на 45-50% [3, 5, 12].

Кроме того, сокращено число элементов, относящихся к классам безопасности и изготавливаемых по более жестким нормам, например, это относится к системе технического водоснабжения и дизель-генераторам [4].

2. *Использование модульных конструкций при сооружении АЭС*. Стандартный блок AP1000 состоит из 50 больших и 250 малых модулей [3, 5]. Малые модули размером 3,7х3,7х24,4 м и весом 80 т могут перевозиться по железной дороге. Примером большого модуля являются стальные модули защитной оболочки, из них наиболее тяжелый кольцевой модуль диаметром 39,6 м весит 658 т [4]. Все эти модули серийно изготавливаются на заводе и транспортируются на площадку АЭС для монтажа. Использование заводских модулей при сооружении АЭС позволяет [3]:

уменьшить трудозатраты на площадке АЭС, которые дороже, чем заводские;

повысить качество контроля модулей АЭС, что легче обеспечить в заводских условиях;

позволить параллельное проведение многих работ, которые обычно выполняются последовательно;

повлиять на сокращение сроков сооружения АЭС.

Таблица 1

Структура затрат в случае строительства AP1000 в Великобритании [5]

Затраты	Объем затрат	Стоимость, фунты/МВт-час
Капитальное строительство	Все затраты на строительство, включая стоимость рабочей силы, оборудования и материалов Финансовые издержки Получение лицензии Инженерные работы на площадке	1-ый блок в серии – 18,2 4-ый блок в серии – 11,1
Эксплуатация и техническое обслуживание	Все затраты на эксплуатацию, включая стоимость рабочей силы, материалов и обслуживания, трудозатраты при остановках блока и перегрузках топлива Захоронение низко- и средне-активных отходов Страхование Плата за подключение к энергосистеме	6,9
Топливо	Добыча урана, его обогащение и изготовление топливных кассет	3,0
Обработка отработанного ядерного топлива	Хранение на площадке АЭС Транспортирование в промежуточное хранилище Доведение топлива до состояния, необходимого для переработки Захоронение высоко-активных и других отходов	0,8
Снятие с эксплуатации	Эксплуатация и техническое обслуживание оборудования и сооружений Прямые инженерно-строительные затраты Захоронение отходов	0,6
Всего		1-ый блок в серии – 30 4-ый блок в серии – 22

3. *Сокращение сроков сооружения АЭС* как из-за факторов, рассмотренных выше, так и путем внедрения компьютеризированных технологий проектирования и планирования строительства, нацеленных на координацию различных видов деятельности при сооружении энергоблока AP1000.

Westinghouse с участием субконтракторов из различных стран разработал детальную 3-х мерную модель AP600, затратив на это более 8 лет [4]. Не сообщается, переработана ли эта модель или использована непосредственно, учитывая большое сходство компоновки блоков AP600 и AP1000. Параллельно был подготовлен план строительства, используя программу Primavera, длительность которого оценивается в 36 месяцев с момента закладки первого бетона до начала загрузки ядерного топлива, предполагая 5-ти дневную 50-часовую рабочую неделю. Затем обе программы были объединены, что позволило создать 4-хмерный график сооружения АЭС (изменение 3-хмерного изображения во времени).

Кроме того, разработаны средства визуализации 4-хмерной модели строительства [13]. Это виртуальная модель CAVE представляет из себя комнату размером 3х3х2,8 м, где пол и стены являются экранами, изображение на которых координируется сетью компьютеров. Находящийся внутри человек видит стереоскопическое изображение, которое создается с помощью специальных очков, синхронизированных с остальной системой (см. рис. 1). Изображение может создавать иллюзию перемещения по станции и быть как реальных размеров, так и уменьшено или увеличено. Используя CAVE, которая позволяет наблюдать сооружение АЭС в реальном масштабе в любой выбранный момент времени с эффектом присутствия, предполагается сократить срок строительства, по крайней мере, на 4 месяца. CAVE позволяет также выявлять нестыковки проекта, например, был обнаружен трубный шов, для варки которого нет достаточного пространства, поэтому место трубного соединения было перенесено. CAVE будет использоваться и при эксплуатации энергоблока: встроенный в систему имитатор дозиметра в реальном масштабе времени, который виртуально можно будет помещать на перчатки или одежду, позволит оптимизировать «грязные» работы для минимизации дозовых нагрузок на персонал.



Рис. 1. Человек внутри виртуальной АЭС

Основные характеристики проекта AP1000

Проект AP1000 в значительной степени подобен своему предшественнику AP600, например, горизонтальные проекции этих энергоблоков полностью идентичны. Минимальные изменения обусловлены только требованиями повышения мощности, которые выразились в увеличении:

длины твэлов (и соответственно высоты корпуса реактора) и числа топливных кассет,

диаметров трубопроводов для повышения расхода,

длины теплообменных трубок для увеличения теплообменной поверхности парогенераторов и теплообменника пассивного отвода тепла,

объёмов компенсатора давления (путем увеличения его высоты) и различных емкостей и резервуаров систем безопасности,

высоты стальной оболочки на один кольцевой модуль

и некоторых других конструктивных изменениях [4].

Энергоблок AP1000 является двухпетлевым PWR с одной горячей и двумя холодными нитками на каждой петле (см. рис. 2). Реактор AP1000 аналогичен реактору стандартного трехпетлевого PWR фирмы Westinghouse с измененным расположением патрубков, улучшенными характеристиками активной зоны (решетки из цирколия, повышенное выгорание), отсутствием Inconel600 в сварных швах корпуса реактора.

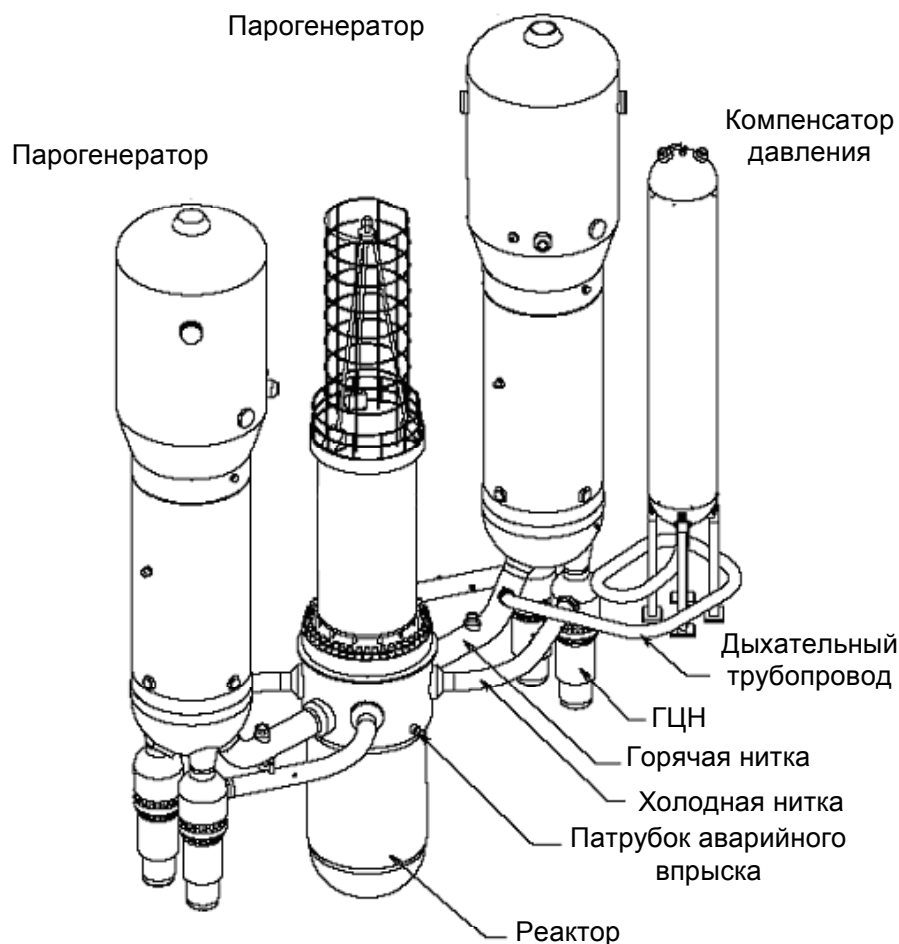


Рис. 2. Ядерная паро-производящая установка AP1000

В проекте AP1000 предусмотрено два парогенератора Delta-125, подобных недавно установленным на АЭС Arkansas, и 4 главных циркуляционных насоса бессальникового типа, подключенных непосредственно к днищу парогенератора. Конструкция и место установки насосов исключают возможность течи через их уплотнения, снижают потери давления и предотвращают оголение активной при малых течах теплоносителя 1-го контура [4].

Ядерная паро-производящая установка, основные параметры которой приведены в таблице 2, размещена в защитной оболочке. Все системы важные для безопасности расположены там же или во вспомогательном здании, которое сооружается на общем с защитной оболочкой сейсмически квалифицированном фундаменте. Стальная защитная оболочка диаметром 39,6 м и толщиной стен 4,44 см рассчитана на давление 4,07 бар [4].

Таблица 2

Основные параметры AP1000 [3,4]

Электрическая мощность	1117 МВт (эл.)
Мощность реактора	3400 МВт (тепл.)
Срок службы	60 лет
Тип топлива	4,95% обогащенный UO_2
Длительность кампании	18 месяцев
Процент топлива, заменяемого при перегрузке	43%
Кпд АЭС с учетом градиен	32,7%
Температура теплоносителя в горячей нитке петли	321 °C
Активная длина топлива	4,3 м
Расход через реактор	$6,81 \times 10^4$ м ³ /час
Теплообменная поверхность парогенератора	11600 м ²
Ежегодно генерируемые радиоактивные отходы	35 т

Обеспечение безопасности AP1000

Обеспечение безопасности AP1000 полностью повторяет подход, реализованный в проекте AP600, и основано на использовании пассивных принципов (естественной циркуляции воды, водяного пара и воздуха, действия силы тяжести или использования энергии сжатого газа, пружины или аккумуляторной батареи). Небольшие изменения в проекте AP1000 позволили использовать результаты затратного объема исследований, проведенного для AP600, и значительно упростить процесс лицензирования. Достаточно сказать, что приблизительно 80% стандартного отчета по анализу безопасности AP600 не претерпели никаких изменений при подаче документов в NRC [4]. Проект AP1000 удовлетворяет всем требованиям NRC, начиная от принципа единичного отказа и заканчивая новыми требованиями к пассивным АЭС, в т.ч. необходимости обеспечения пассивного охлаждения при наиболее неблагоприятной аварии в течение не менее 3 суток без использования внешних источников энергии и действий оператора [14].

Результаты проведенных теплогидравлических анализов показывают, что при гильотинном разрыве трубопровода 1-го контура температура оболочек твэлов, оцененная с учетом неопределенностей, не превышает 1162 °С. При потере расхода обеспечивается 19%-ный запас до кризиса теплообмена, а при разрыве трубопровода питательной воды запас до переохлаждения составляет 78 °С [4].

Вероятностный анализ безопасности AP600 был начат в 1985 году, использовался интерактивно как часть процесса проектирования и включал 7 основных ревизий. В восьмой раз анализ был выполнен уже для AP1000. Оценки частот повреждения активной зоны и большого радиоактивного выброса составляют $4,2 \times 10^{-7}$ в год и $3,7 \times 10^{-8}$ в год, соответственно. Объем анализа включал не только внутренние иницирующие события при работе блока на мощности (их вклад в частоту повреждения активной зоны – $2,4 \times 10^{-7}$ в год), но и режимы с остановленным реактором, а также внешние воздействия [4].

Анализ тяжелых аварий показал, что хорошо резервированные (с использованием принципа разнообразия) системы сброса давления препятствуют плавлению активной зоны при высоком давлении, что могло бы создать угрозу целостности защитной оболочки за счет ее прямого нагрева или из-за парового взрыва [4]. Взаимодействие расплава активной зоны с бетоном исключается путем его удержания в корпусе реактора, для чего реактор снаружи полностью заливается водой, обеспечивающей охлаждение его корпуса [4,15]. Для предотвращения взрыва водорода используются дожигатели водорода и пассивные аутокаталитические рекомбинаторы [4].

Проблемы физической защиты AP1000 также затронуты в материалах, представленных на лицензирование, но должны быть рассмотрены более детально в документах, которые будут поданы на получение заявок на строительство и эксплуатацию, так как зависят от места сооружения АЭС [16].

Пассивные системы безопасности AP1000

В системах безопасности не используются насосы, вентиляторы, а также дизель-генераторы и другие источники переменного тока. Для запуска ряда пассивных процессов применяются клапаны, причем для срабатывания некоторых из них требуется поступление аварийного сигнала и запасенная энергия (сжатый газ, аккумуляторная батарея или пружина). В конструкции большинства электроприводных клапанов реализован принцип безопасного отказа, т.е. при нормальной эксплуатации они находятся под напряжением и удерживаются в закрытом положении, а при обесточивании привода - срабатывают [4].

Пассивная система аварийного охлаждения [3, 4, 13, 17] обеспечивает аварийный впрыск, сброс давления и отвод остаточных тепловыделений в течение длительного периода времени. Для аварийного впрыска используются три источника воды, трубопроводы которых непосредственно подсоединены к патрубкам корпуса реактора (см. рис.3):

два гидроаккумулятора сферической формы, подобные установленным на действующих АЭС с PWR, которые содержат борированную воду под давлением сжатого азота и отделены от реактора парой обратных клапанов;

два бака аварийной подпитки большого объема с холодной борированной водой, изготовленные из нержавеющей стали и выполняющие те же функции, что и высоконапорная система аварийного охлаждения активной зоны на обычных PWR. Верхняя часть баков соединена с холодной ниткой петли 1-го контура, поэтому баки находятся под давлением 1-го контура. Запуск механизма впрыска, основанного на естественной циркуляции (ЕЦ), осуществляется путем открытия клапана на линии, соединяющей бак с реактором;

бассейн перегрузки, который выполнен из бетона, расположен на более высоких отметках, чем реакторная установка, находится под атмосферным давлением и содержит большой запас холодной борированной воды, достаточный для затопления помещений защитной оболочки до уровня выше крышки реактора. При нормальной эксплуатации бассейн перегрузки отключен от реакторной установки взрывными и обратными клапанами.

Для срабатывания ряда подсистем системы аварийного охлаждения необходим контролируемый, относительно медленный сброс давления в 1-ом контуре до атмосферного, для чего предусмотрены четыре подсистемы клапанов, на каждом из которых последовательно установлено по 2 нормально закрытых клапана. Три подсистемы обеспечивают сброс среды из парового пространства компенсатора давления в бассейн перегрузки, первая из которых открывается по сигналу о низком уровне в баке аварийной подпитки, а остальные две – с задержкой времени. Открытие клапанов четвертой подсистемы соединяет горячие нитки петель 1-го контура с атмосферой защитной оболочки и обеспечивает снижение давления в них до низких параметров. После этого возможен залив активной зоны реактора из бассейна перегрузки под действием силы тяжести.

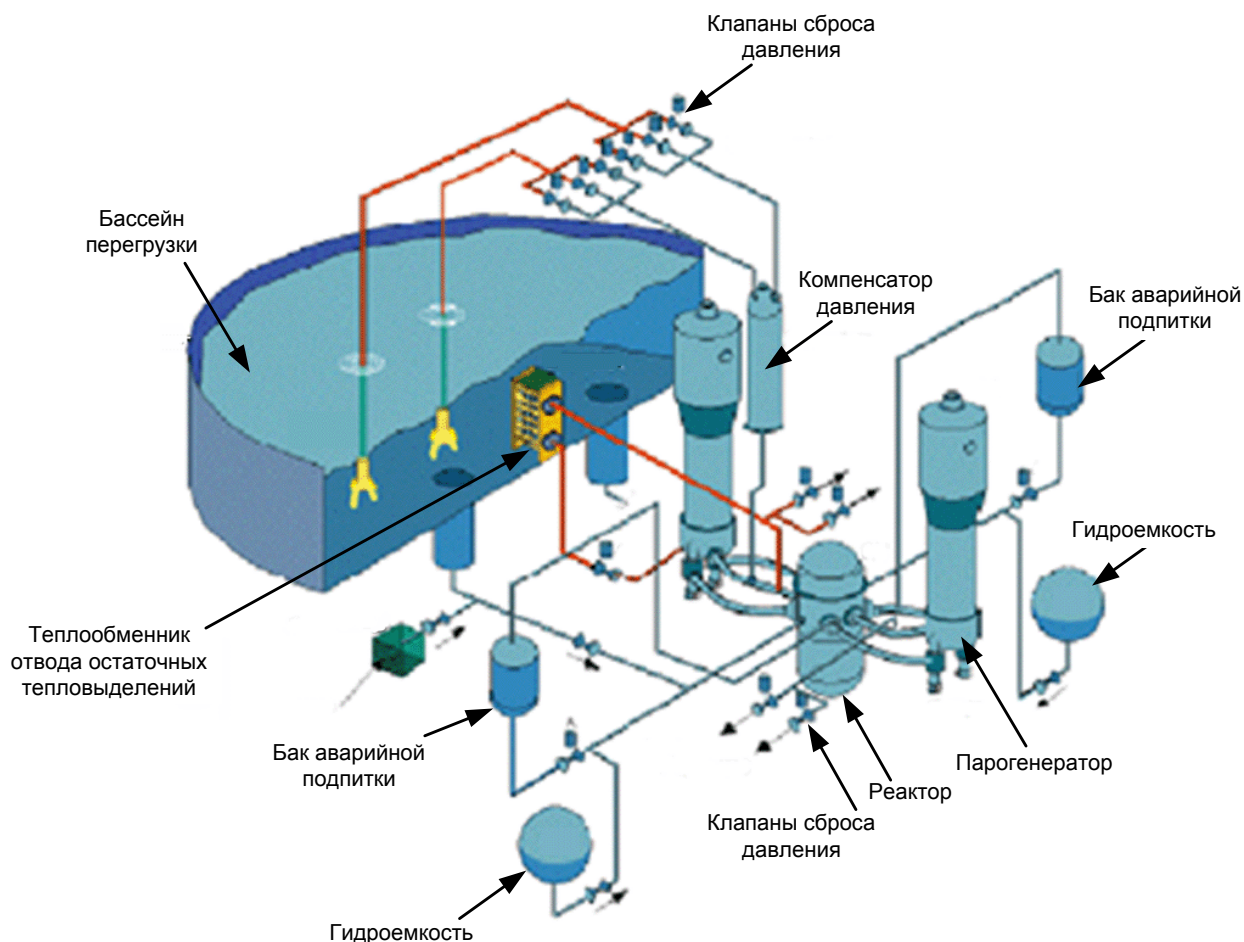


Рис. 3. Пассивные системы безопасности AP1000

В общей сложности для отвода остаточных тепловыделений от активной зоны реактора используется 5 процессов ЕЦ:

- 1) ЕЦ в петлях 1-го контура;
- 2) ЕЦ через рассмотренные выше баки аварийной подпитки;
- 3) ЕЦ через пассивную подсистему теплообменника отвода остаточных тепловыделений, который подключен к холодной и горячей ниткам петли 1-го контура и погружен в бассейн перегрузки. Теплообменник обеспечивает отвод тепла от 1-го контура при переходных процессах, связанных с потерей теплоотвода через 2-ой контур или разрывах трубопроводов питательной воды и паропроводов острого пара. Более 1 часа тепло отводится за счет нагрева воды в бассейне перегрузки, а затем – ее кипения с выходом пара в объем защитной оболочки;
- 4) ЕЦ в защитной оболочке, когда пар конденсируется на стенках стальной защитной оболочки и возвращается в бассейн перегрузки;

5) ЕЦ воздуха, обеспечивающая наружное охлаждение стальной защитной оболочки (см. рис.4). Для этого во внешней бетонной оболочке сделаны вентиляционные каналы, которые предназначены для доступа воздуха из окружающей среды к стальной защитной оболочке. В начале аварии с течью теплоносителя 1-го контура процесс охлаждения стальной защитной оболочки интенсифицируется путем ее орошения водой из большого бака, расположенного в верхней части бетонной защитной оболочки.

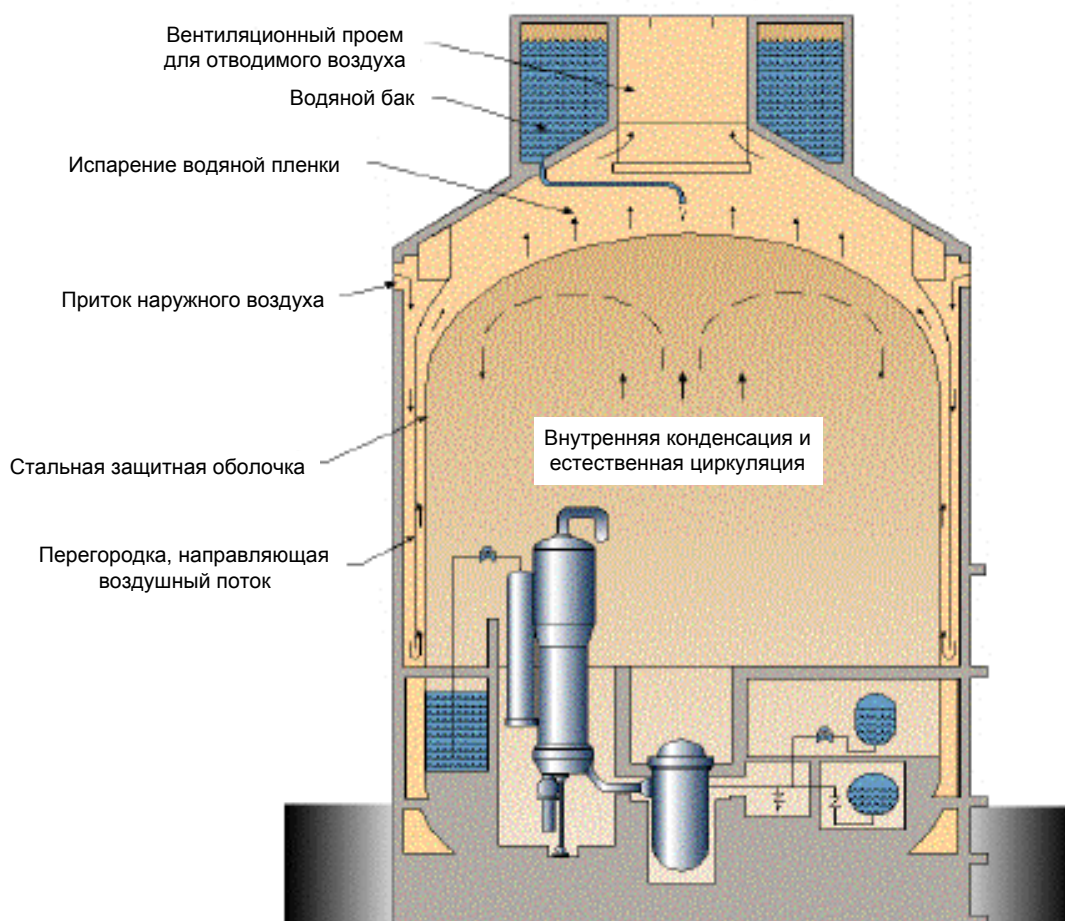


Рис. 4. Пассивное охлаждение защитной оболочки

Список литературы

1. LCG Consulting (торговая марка EnergyOnline). NRC Approves Westinghouse Electric's AP1000 Nuclear Plant Design. January 4, 2006. Представлено на Интернет-сайте <http://www.energyonline.com/news/articles/Articlefor010406.asp>
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission. NRC Approves Certification of Westinghouse's AP1000 Advanced Reactor Design. NRC NEWS No. 05-168, December 30, 2005. Представлено NRC на Интернет-сайте <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/2005/05-168.html>

3. Westinghouse – AP1000. Technology Fact Sheet. Представлено на Интернет-сайте <http://www.energetics.com/pdfs/nuclear/ap1000.pdf>
4. W.E.Cummins, M.M.Corletti, and T.L.Schulz, “Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant”, In.: Proceedings of ICAPP’03, Cordoba, Spain, May 4-7, 2003, Paper 3235
5. BNFL/Westinghouse AP1000... the reactor technology ready now. Представлено министерством труда и промышленности Великобритании на Интернет-сайте www.dti.gov.uk/energy/developpe/energy_consultation_ap1000_summary.pdf
6. Latest news. NuStart Energy taps Enercon. American City Business Journals Inc., January 11, 2006. Представлено на Интернет-сайте <http://atlanta.bizjournals.com/atlanta/stories/2006/01/09/daily25.html>
7. J.Cleveland. Overview of Global Development of Advanced Nuclear Power Plants. In.: Natural circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1474, November 2005, ANNEX 12, pp.357-382
8. People's Daily Online. Nuclear giants eye up China. Представлено на Интернет-сайте http://english.people.com.cn/200405/27/eng20040527_144553.html
9. Vincent Lara-Cinisomo. Latest news. Westinghouse gets preliminary OK for \$5B loan for China nukes, American City Business Journals Inc. February 18, 2005. Представлено на Интернет-сайте <http://www.bizjournals.com/pittsburgh/stories/2005/02/14/daily46.html>
10. Shaw Joins Westinghouse and Mitsubishi “AP1000 Consortium” as Architect Engineer. BATON ROUGE, La.- (BUSINESS WIRE), June 10, 2005. Представлено на Интернет-сайте <http://ir.shawgrp.com/phoenix.zhtml?c=61066&p=irol-newsArticle&ID=719360&highlight=>
11. C. K. Paulson Westinghouse AP1000 Electrical Generation Costs - Meeting Marketplace Requirements, Westinghouse Electric Company, Представлено на Интернет-сайте www3.inspi.ufl.edu/icapp/program/abstracts/1146.pdf
12. AP1000. Представлено Westinghouse Electric Company LLC, a BNFL Group company на Интернет-сайте www.ap1000.westinghousenuclear.com
13. Intergraph. Visual Construction: The Next Step – Insights, Vol.5, Issue 1, Quarter 1 2004. Представлено компанией Intergraph на Интернет-сайте ppm.intergraph.com/library/reprints/rp-5-1cave-us.pdf
14. International Atomic Energy Agency. Natural circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1474, November 2005

15. J.H.Scobel, T.G.Theofanous. In-Vessel Retention of Molten Core Debris in the Westinghouse AP1000 Advanced Passive PWR – International Congress on Advanced Nuclear Power Plants, Hollywood, FL, June 9-13,2002
16. L.Long, W.Cummins. AP1000 Design for Security. Представлено на Интернет-сайте www3.inspi.ufl.edu/icapp06/program/abstracts/6273.pdf
17. J.N.Reyes, Jr. AP600 and AP1000 passive safety system design and testing in APEX. In.: Natural circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1474, November 2005, ANNEX 1, pp.41-73.

АННОТАЦИЯ

УДК 621.039.58

Токмачев Г.В. АЭС AP1000 компании Westinghouse, обладающая повышенной экономичностью и безопасностью. – Атомная техника за рубежом

В обзоре рассмотрен проект АЭС AP1000, разработанный фирмой Westinghouse и получивший сертификат NRC. Приведена информация об улучшенных экономических показателях АЭС, которая является конкурентоспособной с тепловыми станциями, и способах, которыми это достигнуто. Даны основные технические характеристики AP1000. Обсуждены вопросы обеспечения повышенной безопасности АЭС с широким использованием пассивных принципов. Описаны системы безопасности АЭС.

Список лит. 17 назв.

Ключевые слова

Атомные станции, проект AP1000, Westinghouse, экономичность, безопасность, пассивные системы