ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЫСТРОГО РЕАКТОРА БН-600
и
ПРОЕКТ РЕАКТОРА БН-800.

Н.Н. Ошканов, В.М. Поплавский

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что одной из первой ядерной энергетической установкой был быстрый реактор EBR-1, развитие атомной энергетики пошло по пути тепловых реакторов. Быстрым реакторам была отведена другая роль, которую не могут играть тепловые реакторы, – расширенная наработка плутония. Достижение этой цели вызвано желанием увеличить степень использования природного урана с 1 до 60% и получить практическую независимость от природных энергетических ресурсов.

Однако, многие специалисты не предполагали, насколько быстрые реакторы безопасны и надежны по сравнению с реакторами других типов. По этому поводу и в настоящее время высказываются противоречивые суждения: одни считают быстрые реакторы наработчиками плутония с попутной выработкой электроэнергии, другие – атомными электростанциями с попутной наработкой плутония, третьи – пожароопасными установками из-за применения натрия и источником распространения ядерных материалов.

Представляется трудным определить консолидированное отношение к приемлемой концепции развития быстрых реакторов, однако лишь практика может служить основой для формирования объективного отношения к реакторам на быстрых нейтронах. И наша задача – показать на примере БН-600 их возможности.

ЭНЕРГОБЛОК БН-600

Необходимо отметить, что сооружение БН-600 явилось результатом последовательной технической политики создания замкнутого топливного цикла и воспроизводства ядерного топлива. Для этого в бывшем СССР сооружены экспериментальные быстрые реакторы БР-5/10 (Обнинск, 1959г) и БОР-60 (Димитровград, 1969г), а также крупные прототипы БН-350 (Актау, 1973г) и БН-600 (Заречный, 1980).

Энергоблок № 3 Белоярской АЭС с натриевым реактором на быстрых нейтронах БН-600 и секционно-модульными парогенераторами “натрий-вода” введен в эксплуатацию в апреле 1980 года. В течение 1,5 лет осуществлялся поэтапный набор мощности и освоение режимов работы оборудования, и в конце 1981 была достигнута номинальная мощность.

С этого времени БН-600 работает в режиме коммерческой выработки электрической и тепловой энергии. Одновременно решаются задачи по испытанию и проверке нового оборудования и новых научно-технических решений.

.

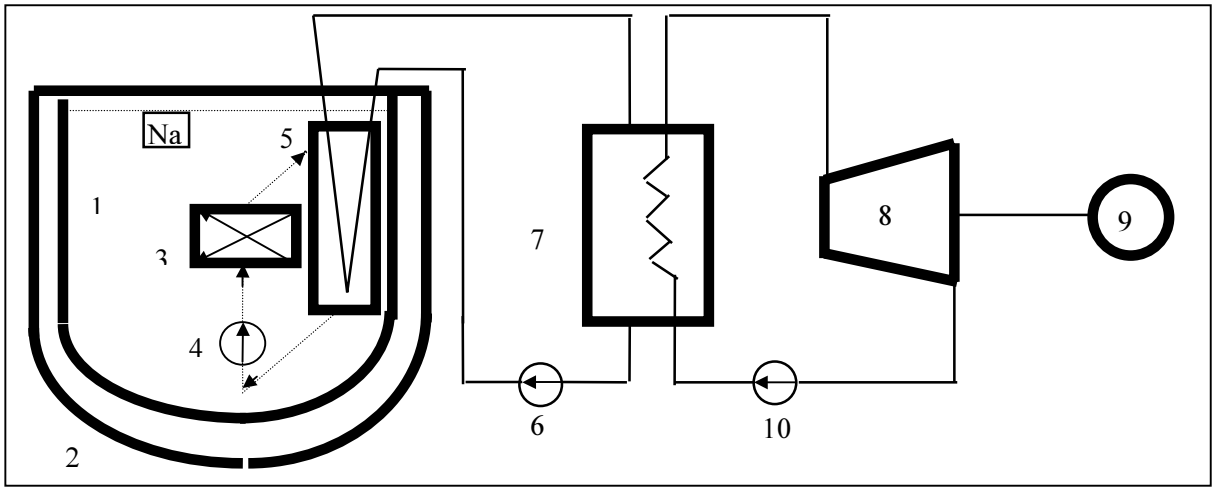

Рис.1. Схема энергоблока БН-600

1-основной бак 2-страховочный бак 3-активная зона 4-насос 1 контура

5-теплообменник "натрий 1контура-натрий 2 контура" 6-насос 2 контура

7-парогенератор 8-турбина 9-генератор 10-насос 3 контура.

Напомним основные особенности энергоблока бн-600. Основное оборудование радиоактивного 1 контура (активная зона, насосы, теплообменники) расположено в корпусе реактора, который, в свою очередь размещен в страховочном баке (рис.1). Основной бак находится под гидростатическим давлением натрия и небольшим давлением (0,4кГс/см^2) защитного газа. Второй натриевый контур является нерадиоактивным, давление в нем не превышает 2кГс/см^2. Он выполнен для предотвращения попадания воды в реактор в случае неплотности парогенератора. Третий, нерадиоактивный, пароводяной контур полностью аналогичен пароводяному контуру электростанции, работающей на органическом топливе при давлении пара 130 кГс/см^2 и перегреве до 505^{0}С. Термический КПД энергоблока является высоким (42%), что почти на 30% превышает КПД энергоблоков с тепловыми реакторами. В БН-600 реализована важная концепция безопасности – давление теплоносителя направлено от последнего контура к реактору, что является препятствием распространению радиоактивности из реактора.

Парогенератор энергоблока БН-600 состоит из 8 одинаковых секций (мини-парогенераторов), включенных параллельно. Каждая секция, в свою очередь, состоит из 3 модулей – испарителя И, основного пароперегревателя ОП и промежуточного пароперегревателя ПП. Натрий 2 контура поступает одновременно на вход перегревателей, а затем объединяясь проходит через испаритель. Питательная вода поступает в испаритель, превращается в слабоперегретый пар, который поступает в основной пароперегреватель. В пароперегревателе пар нагревается до 505^{0}С и направляется в турбину. После цилиндра высокого давления отработанный пар нагревается в промежуточном пароперегревателе до 505^{0}С и снова направляется в турбину.

БЕЗОПАСНОСТЬ БН-600

Реакторы на быстрых нейтронах, и БН-600 в частности, имеют существенные различия от реакторов других типов. Основные различия связаны с конфигурацией активной зоны,

.

используемым теплоносителем, низким давлением в 1-м и 2-м контурах, высокой теплоемкостью 1-го контура и отсутствием фазовых переходов жидкого натрия в диапазоне температур до 900^0C . Коэффициенты реактивности БН-600 являются отрицательными во всем диапазоне температур и мощности реактора. При увеличении уровня мощности происходит значительное тепловое расширение конструкций реактора и твэлов, что эффективно увеличивает размеры активной зоны, тем самым, уменьшая ее реактивность. Важным преимуществом быстрого реактора в сравнении с тепловым реактором является то, что натрий активно связывает такие опасные радионуклиды, как йод и цезий, что значительно существенно снижает радиационные последствия аварий.

При запроектной аварии на БН-600, связанной с потерей электроснабжения (кроме дизельгенераторов) и сопутствующим несрабатыванием аварийной защиты не происходит повреждения оболочек твэлов и обеспечивается отвод остаточных тепловыделений.

При полной потере электроснабжения, т.е. потере аварийного расхолаживания, повреждение твэлов и достижение допустимой температуры корпуса реактора наступит примерно через 40 час – т.е. имеется значительный запас времени для восстановления функции расхолаживания. Даже для этой максимальной аварий эвакуации населения не требуется. Эти обстоятельства дополняются вследствие применения страховочного корпуса реактора существенным (по сравнению с тепловыми реакторами) снижением риска аварии с потерей теплоносителя и возможностью тяжелого повреждения активной зоны.

Что касается течей и горения натрия, то в 1-м контуре течь исключается размещением оборудования в баке реактора, имеющего страховочный бак. Так как во втором контуре страховочное оборудование отсутствует, решение проблемы течей натрия, на наш взгляд, следует искать не столько в обеспечение абсолютной надежности оборудования, сколько в создании максимальных условий для пассивного самотушения натрия и в исключении горючих материалов в этих помещениях. Опыт эксплуатации энергоблока БН-600 подтверждает эту концепцию. Для ограничения последствий течи натрия помещения, где расположено оборудование 2-го контура, облицованы стальными листами и оборудованы ловушками, при попадании в которые натрий не способен гореть. Поэтому при имевших место течах натрия не возникло серьезных последствий.

Озабоченность также вызывается возможностью образования течи в парогенераторе с попаданием воды в натрий. Это может привести к развитию течи, быстрому росту давления и сильной реакции. Для уменьшения вероятности этих последствий парогенераторы БН-600 спроектированы таким образом, чтобы они могли выдержать возникающий при реакции вода-натрий скачок давления и предотвратить быстрое развитие течи. Для сохранения работоспособности парогенератор имеет секционную конструкции, т.е. состоит из 8 параллельно подключенных мини-парогенераторов. При возникновении течи в одной из секций она отключается, и парогенератор продолжает функционировать без снижения мощности. Такая конструкция позволила при имевших место 12 течах воды в натрий потерять только 0,3% суммарного за годы эксплуатации коэффициента использования мощности.

В целом реакторы на быстрых нейтронах, и БН-600 в частности, потенциально создают меньший риск вне площадки АЭС по сравнению с реакторными установками других типов.

ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БН-600

.

Проект БН-600 осуществлялся в т.ч. и для проверки эффективности интегральной компоновки 1 контура, отработки натриевой технологии, а также достижения приемлемых показателей эксплуатации.

В течение 24 лет БН-600 работает с использованием рабочего времени, показанным на рис.2. Суммарный за все годы эксплуатации коэффициент использования мощности (КИУМ) составил 70%, а средний (медиана) – 74%. Средние неплановые потери КИУМ составляют 1,5%. Это характерно и для последних 5 лет эксплуатации, для которых средний КИУМ находится на уровне 77%, а средние потери – 1,1%.

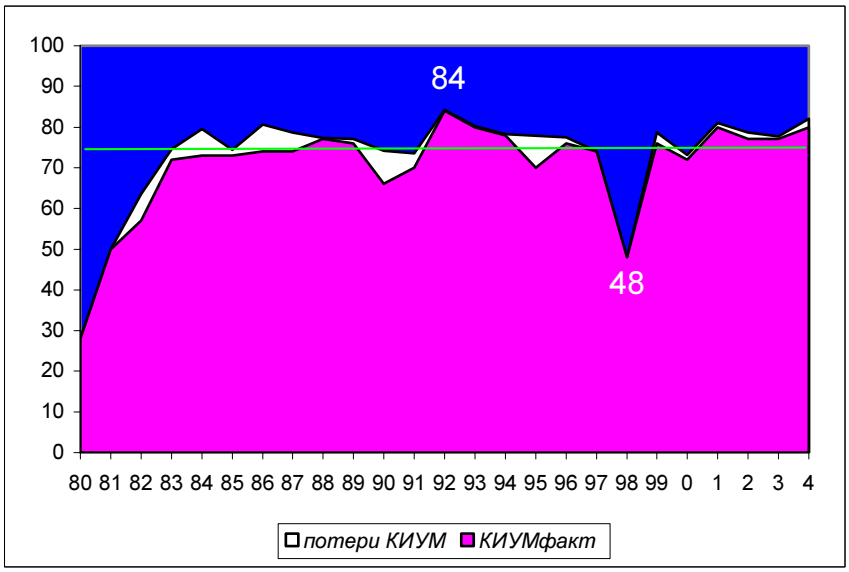

Рис.2.Характеристики надежности работы энергоблока БН-600.

За 24 года эксплуатации произошло 15 срабатываний аварийной защиты, из них 50% - в первые 1,5 года освоения эксплуатации. 15 лет из 24 срабатываний не было (рис.3). Соответственно, среднестатистическая оценка (медиана) имеет значение 0. Это относится и к последним 5 годам эксплуатации, хотя в 1999г и в 2000г было по 1 срабатыванию аварийной защиты (они были вызваны внешними причинами, т.ч. и отключений линий электропередачи).

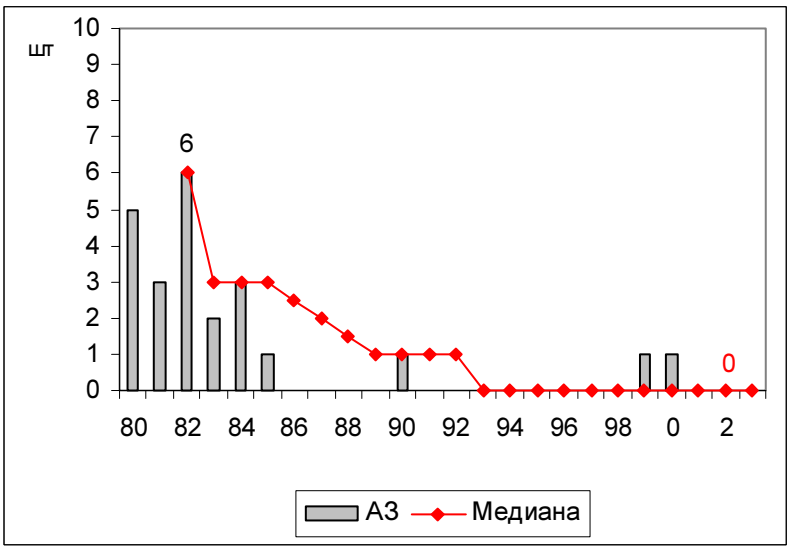

Рис.3. Срабатывания аварийной защиты.

Всего за 24 года эксплуатации произошло 102 снижения мощности (рис.4), из них 26 – в первый 1,5-летний период эксплуатации. Среднее число составляет 2 снижения в год. Это

.

характерно и для последних 5 лет эксплуатации, в которые снижения определяется дефектами металла дренажей пароводяного контура.

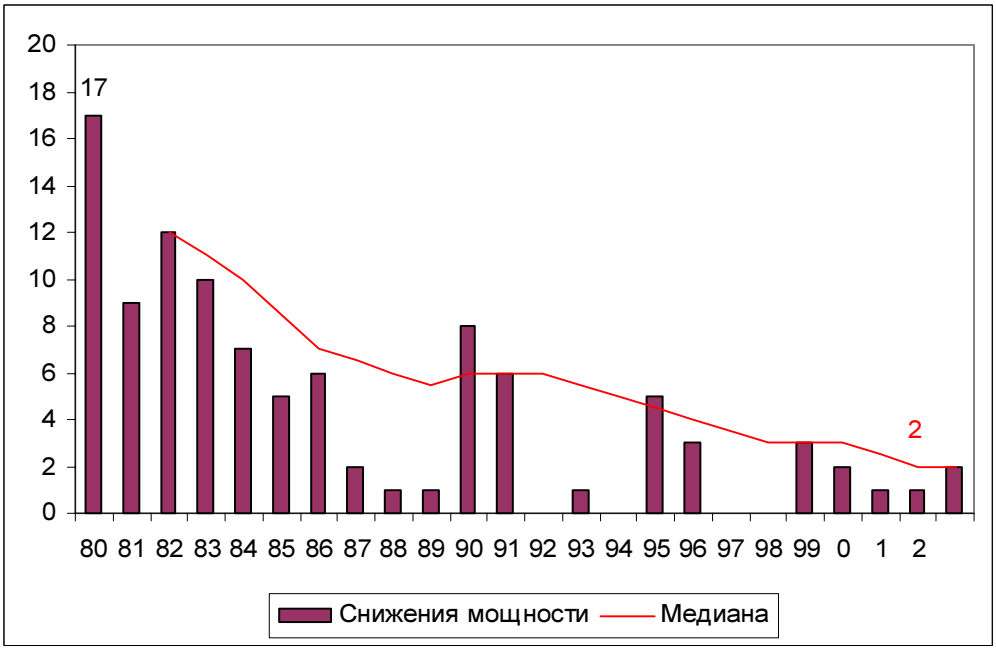

Рис.4. Снижения мощности.

Выход радиоактивности незначителен и определяется в основном инертными радиоактивными газами при технологических сдувках и при исследовании экспериментального топлива в горячей камере (рис.5). Это характерно и для последних 5 лет эксплуатации, средний выход в которые составляет 0,5Ки/сут. Выход трития находится на таком низком уровне, что позволяет исключить его мониторинг. Тем не менее, такой мониторинг продолжается как для газообразной, так и для водяной формы трития.

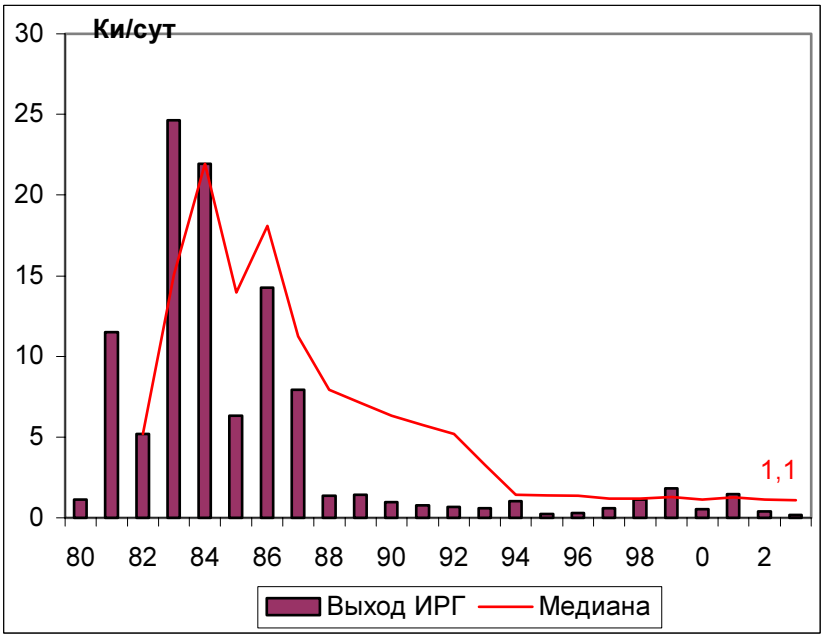

Рис.5. Выход инертных радиоактивных газов (ИРГ)

Коллективная доза облучения собственного и привлекаемого персонала (рис.6) находится на достаточно низком уровне и определяется, в основном, работами по отправке отработавшего топлива и модернизациями оборудования 1 контура. Коллективная доза за 24 года

.

эксплуатации составляет 18 чел-Зв. Средний уровень составляет 0,67 чел-Зв/год. Это характеризуется и в последние 5 лет, для которых средний уровень составляет 0,55 чел-Зв/год.

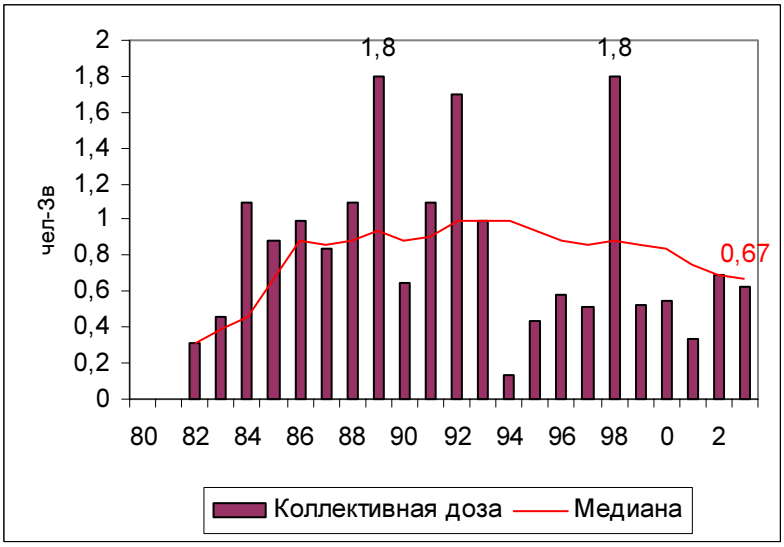

Рис.6. Коллективная доза персонала.

На энергоблоке практически отсутствую жидкие радиоактивные отходы. Они возникают в незначительном объеме при отмывке сборок от натрия. Средняя величина твердых низкоактивных отходов составляет 28м^3 в год (рис.7). Это характерно и для последних 5 лет эксплуатации, для которых средний уровень составляет 22м^3/год. Суммарные отходы за 24 года равны 625м^3. Высокоактивные отходы образуются только при исследовании сборок в горячей камере.

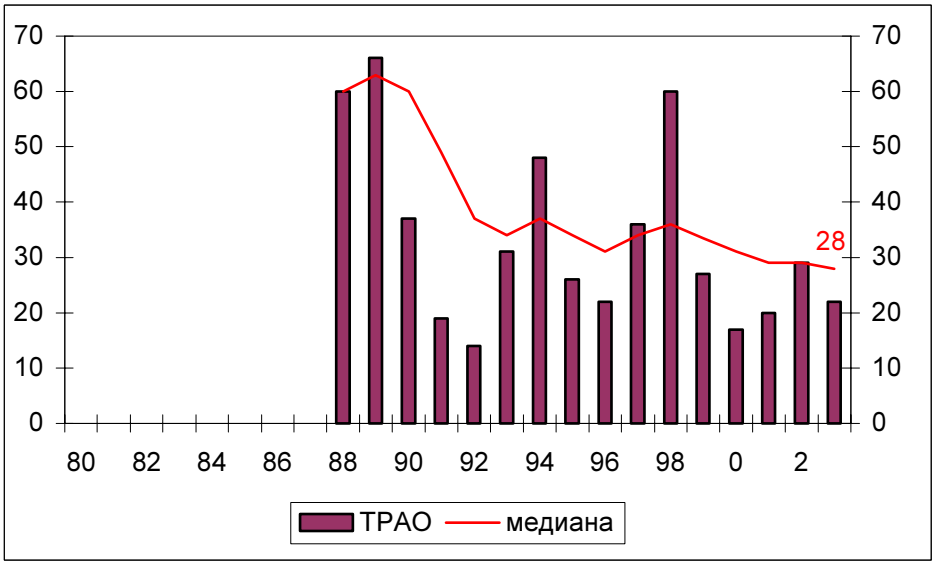

Рис.7. Твердые низкоактивные радиоактивные отходы (РАО).

За время эксплуатации проведено 2 модернизации активной зоны для исключения недопустимой деформации чехлов тепловыделяющих сборок и повреждения твэлов. В этом году начата 3 модернизация активной зоны. Ее особенностью является переход от 3-кратной к 4-кратной перегрузке топлива с повышением выгорания до 11%. Это позволит на 25% снизить затраты на топливо и организовать оптимальные длительности зимних и летних циклов между перегрузками.

Ближайшей перспективой энергоблока БН-600 является окончание перехода на новую активную зону с выгоранием 11% т.а. и 4-кратной перегрузкой, исследование возможности

.

продления ресурса на 10-15лет, повышение электрической мощности на 15-20МВт за счет модернизации турбин, переход на работу со смешанным топливом из оружейного плутония, исследования перспективных конструкционных материалов и композиций топлива, наработка уникальных изотопов для использования в фундаментальной науке.

ПЕРСПЕКТИВЫ СООРУЖЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА БН-800.

Сооружение энергоблока БН-800 на Белоярской АЭС было начато в 1984г. Однако, как и для энергоблоков других типов, после аварии на Чернобыльской АЭС было приостановлено, а при экономическом спаде, связанном с распадом СССР, полностью прекращено. В 2002г строительств было возобновлено и в этом году планируется ввод в работу первого пускового объекта – комплекса теплоснабжения. Его первоочередный ввод определяется отсутствием теплоснабжения на площадке строительства, а также необходимостью резервирования энергоблока БН-600 в период его останова, т.к. он является основным источником теплоснабжения для населения, проживающего в районе расположения станции.

Представляется, что Россия с ее опытом эксплуатации технологии быстрых реакторов (почти 125 реакторо-лет из 270 реакторо-лет во всем мире) в настоящее время имеет достаточно оснований продолжить строительство исходя из следующих обстоятельств:

- Наличие опыта успешной 24-летней эксплуатации БН-600 с высоким коэффициентом пользования календарного времени и всего лишь с одним событием 1-го уровня по шкале INES.
- Подтвержденная практикой убежденность в правильном выборе составляющих технологии, основного оборудования и систем.
- Учет в проекте БН-800 недостатков и слабых мест в оборудовании и технологии БН-600, а так же известных недостатков принципиального характера у других подобных установок.

- Признание регулирующими органами соответствия проекта БН-800 требованиям обеспечения безопасности, выразившееся в выдаче лицензии на строительство энергоблока 26 декабря 1997 года и безупречного выполнения ее условий.
- Конкурентоспособность производства электроэнергии на БН-800 на энергетическом рынке Уральского региона, подтвержденная практикой БН-600 и прогнозом.
- Необходимость решения государственной задачи утилизации ружейного и энергетического плутония.
- Убежденность в том, что БН-800 обеспечит минимальное в сравнении с реакторами других типов воздействие на человека и окружающую среду
- Расчеты, показывающие, что сопоставимые затраты на строительство серии из 3-х БН-800 не будут превышать затрат на строительство в этом же регионе энергоблоков типа ВВЭР такой же суммарной мощности более, чем на 10%, что хорошо компенсируется достижением целей сооружения БН-800.

Основными отличительными особенностями БН-800 от БН-600 являются:

- Применение смешанного уран-плутониевого топлива.
- Обеспечение отрицательного натриевого пустотного эффекта реактивности за счет натриевой полости в верхней части тепловыделяющих сборок.
- Дополнительная система аварийной защиты на пассивных принципах срабатывания.
- Наличие конструктивных средств, исключающих образование локальных критмасс.
- Наличие системы аварийного расхолаживания с теплообменниками “натрий-воздух”.

- Обеспечение естественной циркуляции теплоносителя в 1-м и 2-м контурах.

.

- Наличие комплекса конструктивных мер по предотвращению, детектированию, локализации и подавлению протечек натрия.
- Сниженная удельная металлоемкость.
- Увеличенная по сравнению с нормативной на 1 балл сейсмостойкость.

Необходимо отметить, что проводимые корректировки проекта БН-800, вызванные как требованиями изменяющихся правил, так и научными достижениями, позволяют говорить, что мощность энергоблока будет не 800МВт.эл, а почти 900МВт.эл. Согласитесь, что еще более повышает конкурентоспособность быстрого реактора.

Сооружение энергоблока с быстрым реактором БН-800 является продолжением последовательной технической политики создания замкнутого топливного цикла и воспроизводства ядерного топлива, которая позволит решить проблему мирового энергообеспечения.

И весьма символично, что Научным руководителем этой проблемы является Физико-Энергетический Институт, в котором 50 лет назад началась эра атомной энергетики.

.