



**РОС  
ЭНЕРГО  
АТОМ**  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
ДИВИЗИОН РОСАТОМА



РОСЭНЕРГОАТОМ  
**БЕЛОЯРСКАЯ  
АЭС**

# ***Решение научно-технических задач эксплуатации быстрых реакторов - от БН-600 к БН-800***

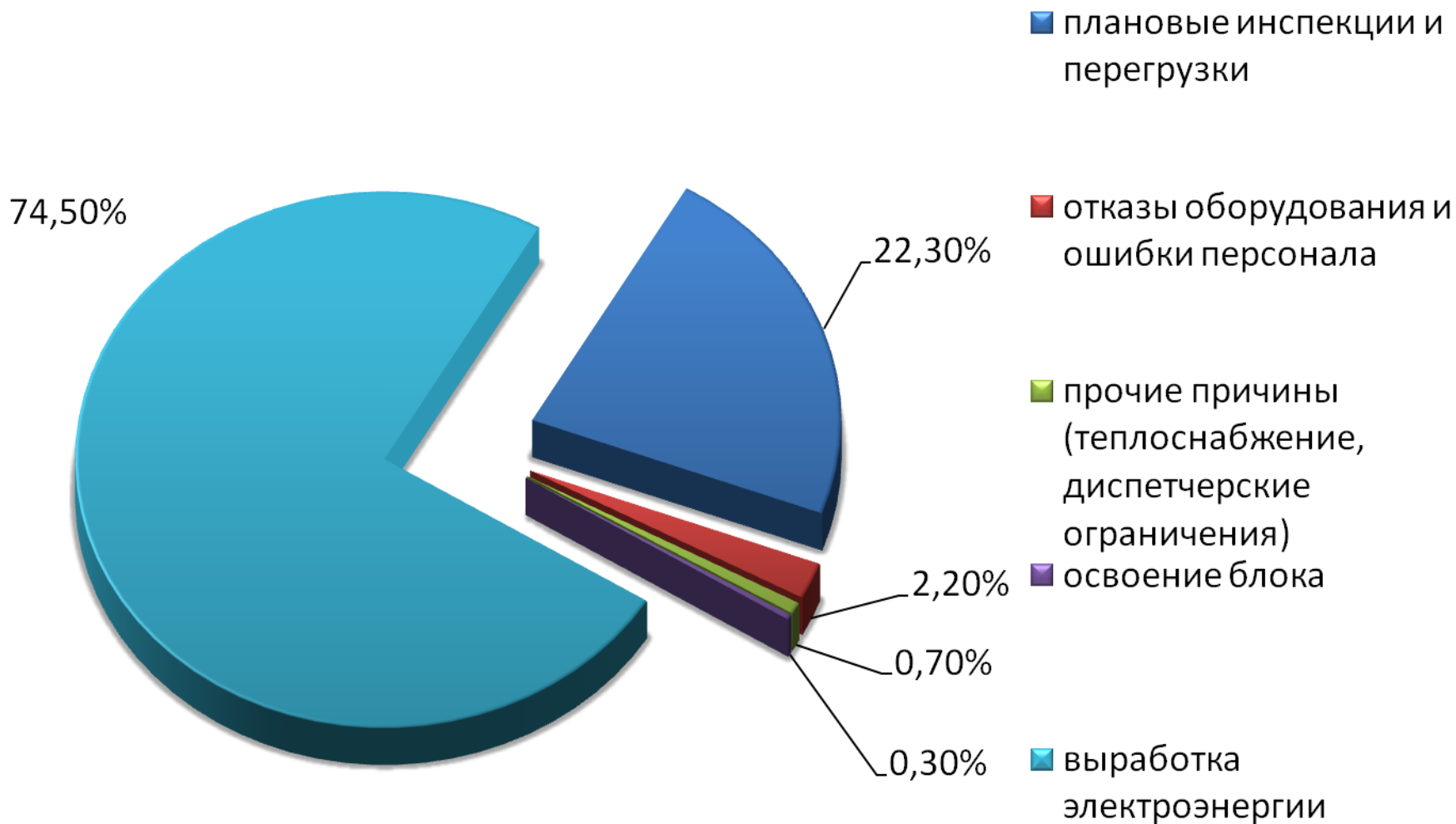
Директор Белоярской АЭС  
М.В. Баканов

# Энергоблок БН-600: ТЭП

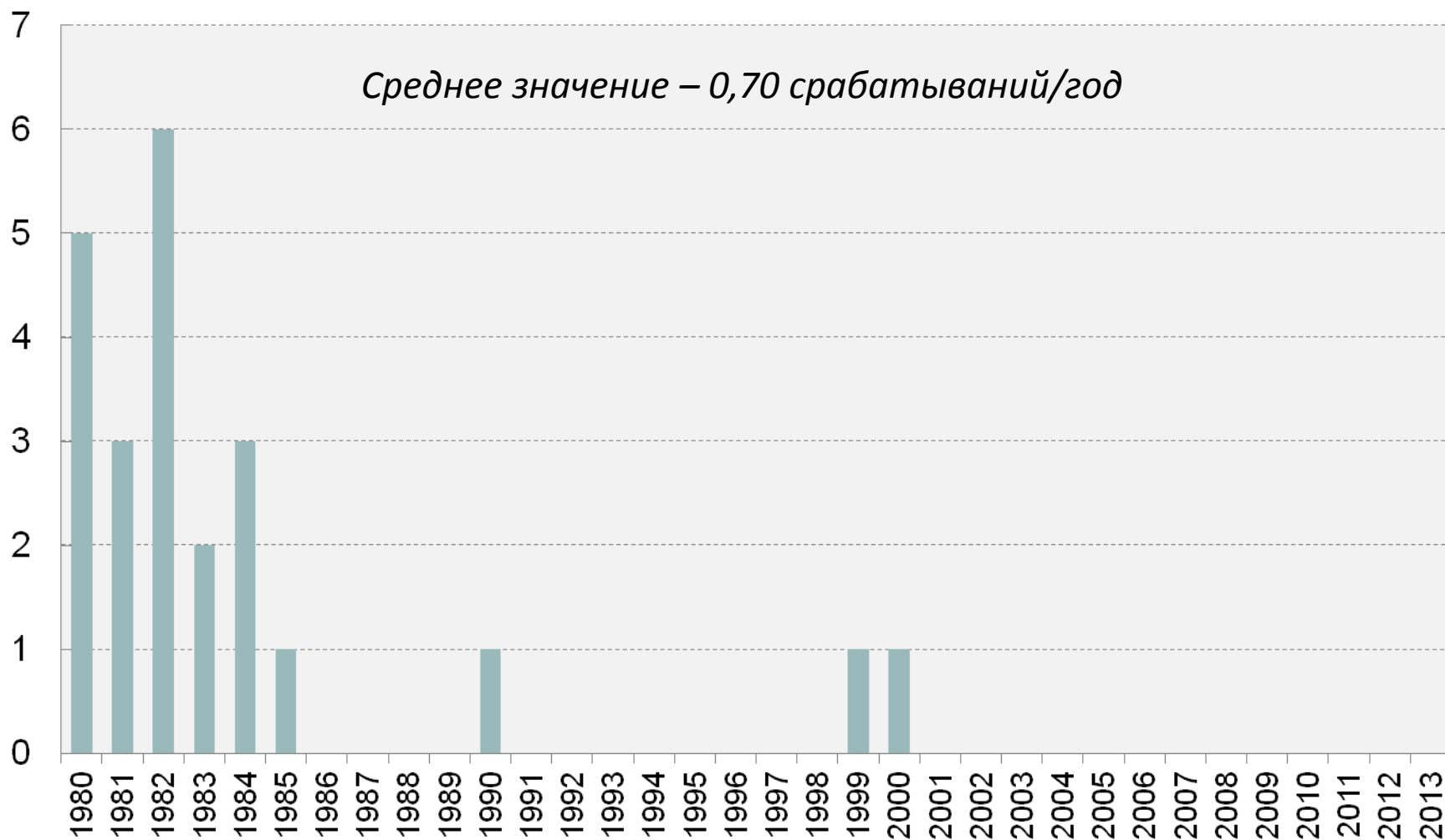


Показатели	Ед. изм.	2013 год	За период эксплуатации	Лучшее значение
Электрическая мощность	МВт	600	600	625*
Число часов работы	час	7376	241037	7449
Количество неплановых остановов (АЗ)	шт	0	23	0
Выработка электроэнергии	Млн.кВт.ч	4120,3	1245934,83	4401,96
КИУМ	%	78,4	74,5	83,52
Годовая коллективная доза облучения	Чел*Зв	0,48	21,76	0,08
Выход ИРГ	Ки/год	103,2	40684	60
КПД	%	42,60	40,8 (по проекту)	

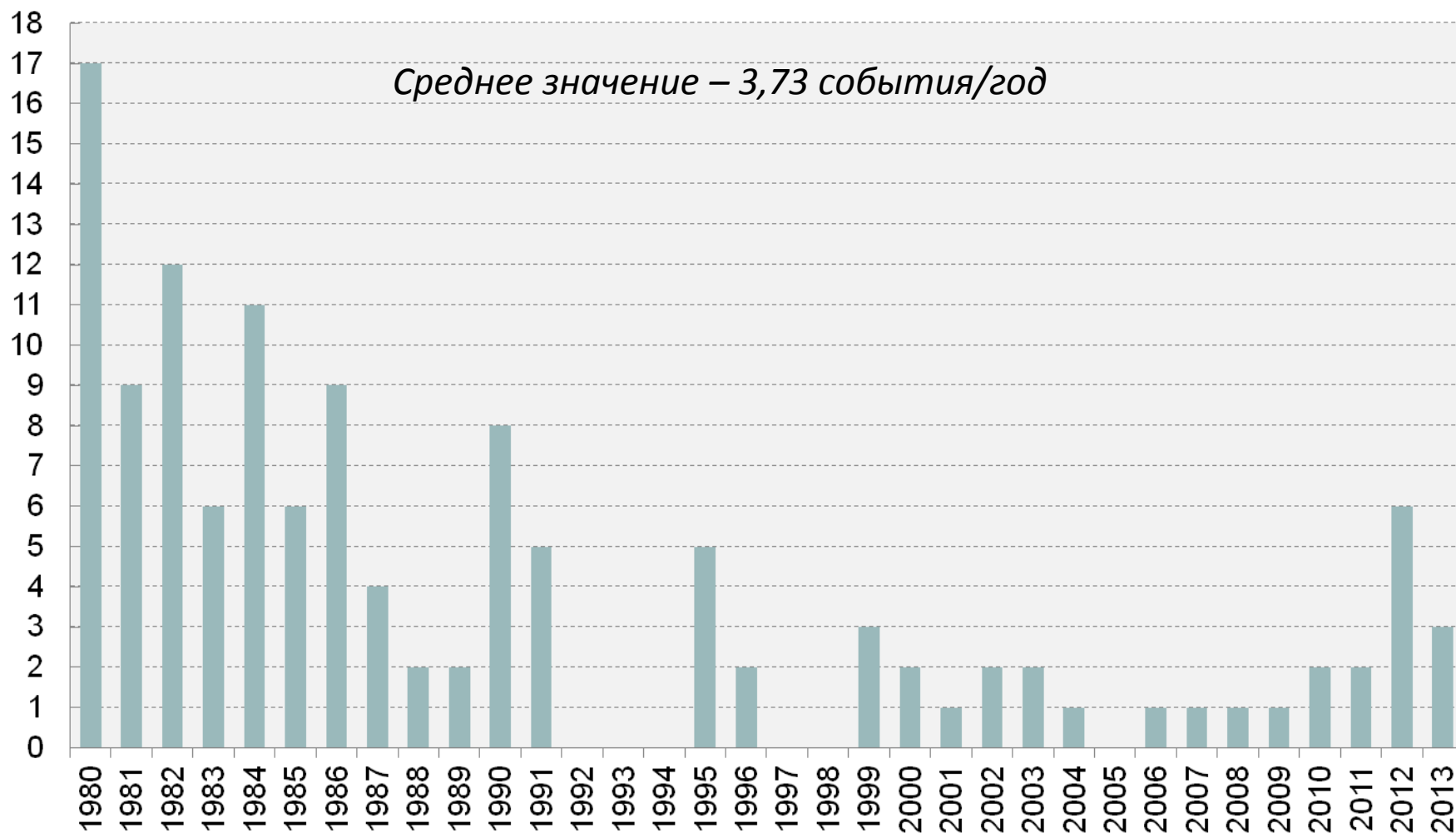
# Энергоблок БН-600: КИУМ



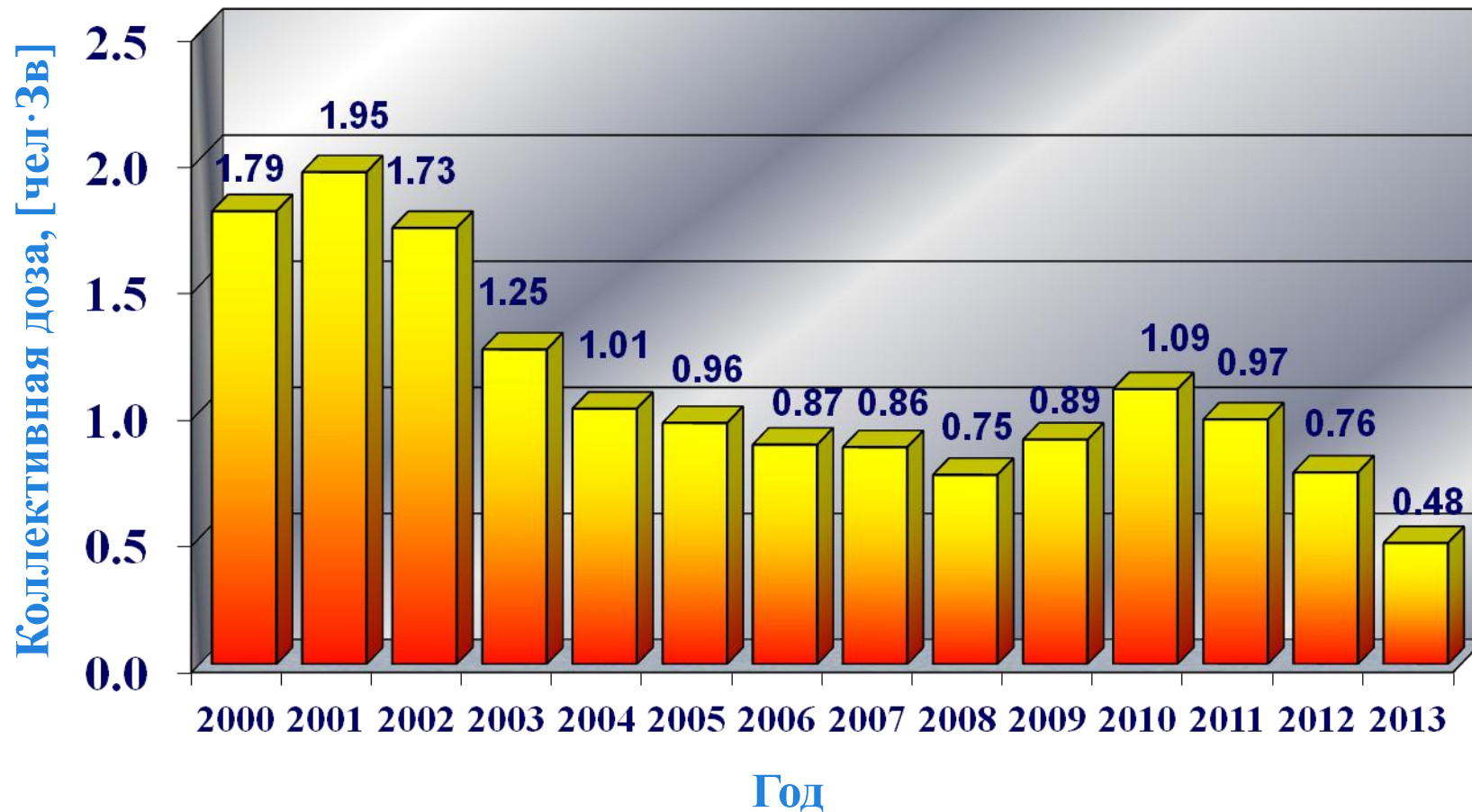
# Количество срабатывания АЗ



# Число нарушений со снижением мощности



# Дозозатраты персонала



2010 г. – зачехловка кассет К-17у на 1-ой очереди

Длительная эксплуатация энергоблока БН-600 и результаты научно-исследовательских работ, проведенных в условиях эксплуатации, имеют первостепенное значение как для повышения безопасности и совершенствования эксплуатации действующей АЭС, так и для выбора и обоснования конструктивных и схемных решений при проектировании энергоблоков следующих поколений.

В условиях эксплуатации проверяется не только соответствие реальных и проектных характеристик, режимов работы оборудования, но также могут быть обнаружены новые эффекты натурального объекта, которые не выявляются при испытаниях на стендах и установках меньшего масштаба, и возможности использования резервов оборудования.

Энергоблок с реактором БН-600 успешно эксплуатируется с 1980 года.

За период эксплуатации были решены поставленные при его создании задачи:

- демонстрация длительной, безопасной и надежной работы;
- длительные ресурсные испытания крупногабаритного оборудования, работающего в натрии;
- освоение натриевой технологии;
- отработка и совершенствование режимов эксплуатации, систем контроля и управления энергоблока.

# От БН-600 к БН-800

Основные цели проекта БН-800:

1. Восстановление опыта разработки и изготовления крупногабаритного оборудования (реактор, парогенератор).
2. Отработка технологий замкнутого топливного цикла, в первую очередь - освоение смешанного уран-плутониевого топлива.

Усовершенствования в проекте БН-800:

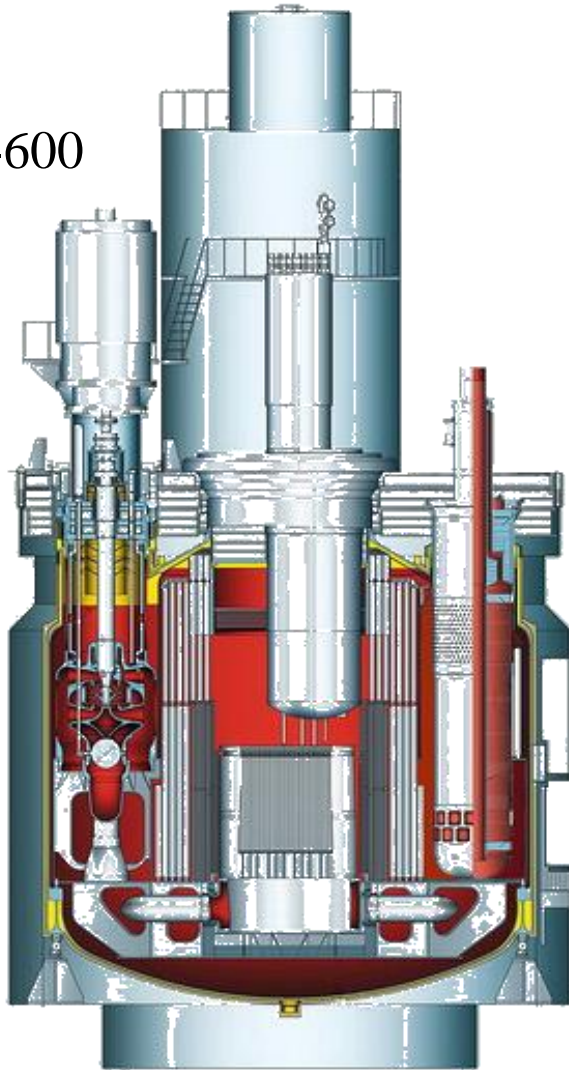


1 Оборудование	Модернизировано для обеспечения увеличения мощности реактора при сохранении диаметра его корпуса
2 Безопасность	<ul style="list-style-type: none"><li>- Введена система аварийного отвода тепла с воздушными теплообменниками, подключенными ко второму контуру;</li><li>- Разработана активная зона с натриевым пустотным эффектом реактивности, близким к нулевому значению;</li><li>- Предусмотрены пассивные гидравлически взвешенные стержни аварийной защиты;</li><li>- Встроен поддон под напорной камерой для улавливания кориума при плавлении активной зоны в случае тяжелой аварии.</li></ul>
3 Обращение с топливом	В системе перегрузки исключены ручные операции со свежими ТВС (с учётом МОКС – топлива)
4 Выгорание топлива	Планируется последовательное увеличение с $\sim 70$ МВт*сут/кг до 100 МВт*сут/кг и выше по мере освоения новых конструкционных материалов

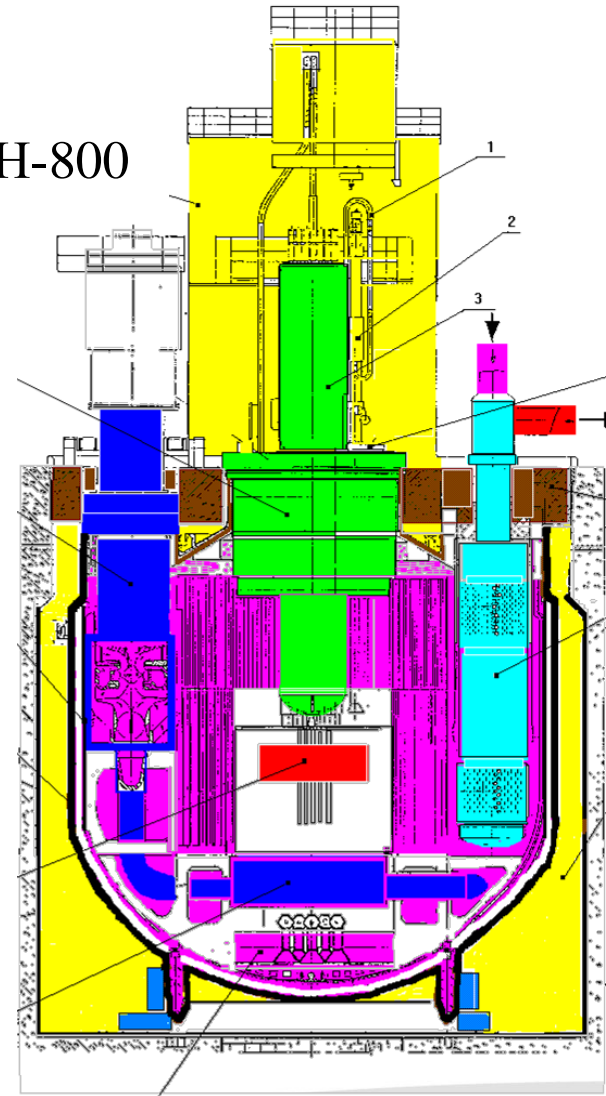


# Компоновки реакторов

БН-600

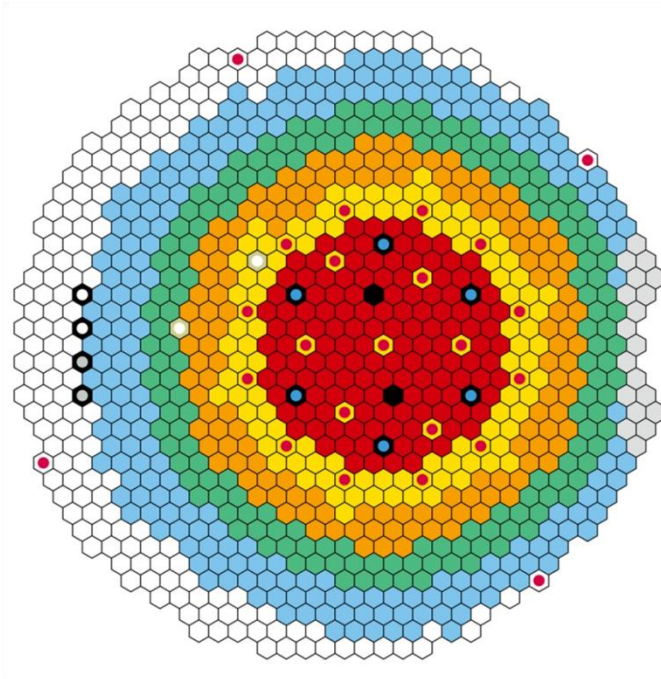


БН-800

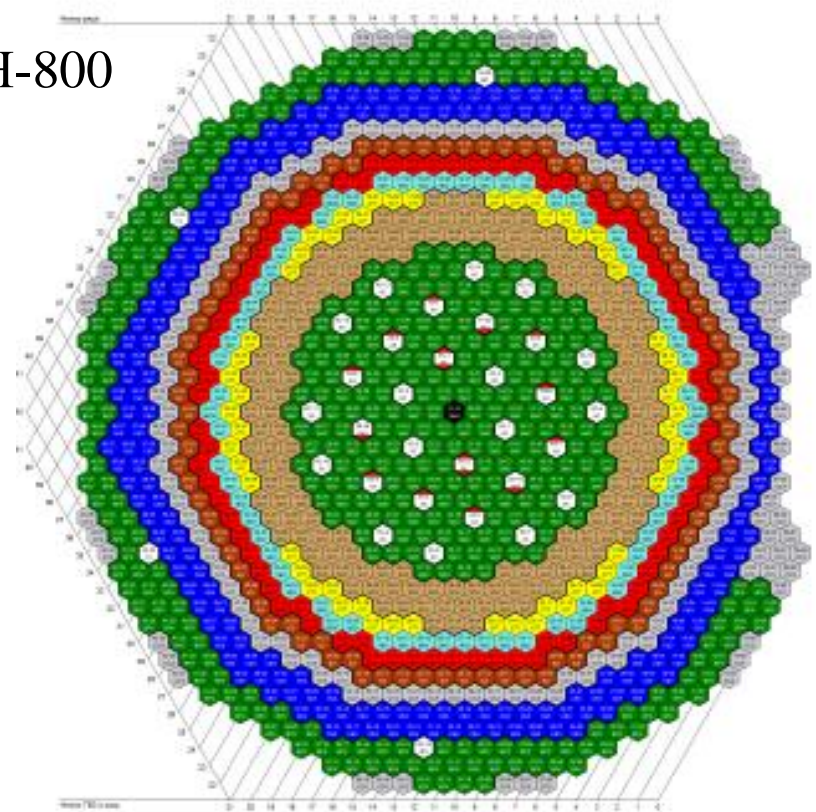


# АКТИВНЫЕ ЗОНЫ

БН-600



БН-800



# Модернизация активной зоны БН-600



БН-600 – изначально 2 зоны обогащения, затем переход на три зоны.  
БН-800 – изначально три зоны обогащения.

	Активная зона			
	01 (2 зоны)	01М (3 зоны)	01М1 (3 зоны)	01М2 (3 зоны)
Период	1980-1987	1988-1991	1991-2004	С 2005
Максимальное выгорание топлива, % т.а	7.2	8.3	10.0	11.1
Длительность МКК, эфф.сут	100	165	160	120/ 160
Длительность кампании топлива, эфф.сут.	200 (ЗМО) 300 (ЗБО)	330	480	560 (585*)
Высота а.з., мм	750	1000	1030	1030
Материал оболочки ТВЭЛ	ЭИ-847	ЭИ-847х.д.	ЧС-68 х.д.	ЧС-68 х.д.
Материал чехла ТВС	08Х16Н11М3	08Х16Н11М3Т х.д.	ЭП-450 х.д.	ЭП-450 х.д.

Дальнейшее повышение эффективности и экономичности использования ядерного топлива в реакторе БН-600 связано с разработкой новых перспективных активных зон и доведением максимальной глубины выгорания топлива в ТВС до 15 % т.а.

Для осуществления этой задачи потребуется решить ряд научно-технических проблем, основной из которых является разработка новых конструкционных материалов для оболочек ТВЭЛ.

# Наработка изотопов в БН-600



В 2001÷2004 годах в рамках международного проекта на Белоярской АЭС проводились работы по наработке аргона-37.

Аргон-37 ( $T_{1/2} \sim 35$  суток) является наиболее перспективным радионуклидом для изготовления источника, необходимого при калибровке детекторов солнечных нейтрино.

Наработка аргона-37 производилась в боковой зоне воспроизводства (БЗВ) реактора БН-600 в специально разработанных экспериментальных сборках для наработки аргона-37 (ЭСА).

# Системы аварийного расхолаживания с ВТО



БН-600 – система реализована в рамках ПСЭ. Расхолаживание реактора осуществляется при естественной циркуляции натрия по 1 контуру, принудительной циркуляции натрия по части 2 контура (с использованием ЭМН) и принудительном охлаждении ВТО воздухом с помощью газодувки.

БН-800 – предусмотрена в проекте. Расхолаживание реактора осуществляется при естественной циркуляции натрия по 1 контуру, принудительной циркуляции натрия по 2 контуру (с использованием ЭМН) и естественном охлаждении ВТО воздухом.

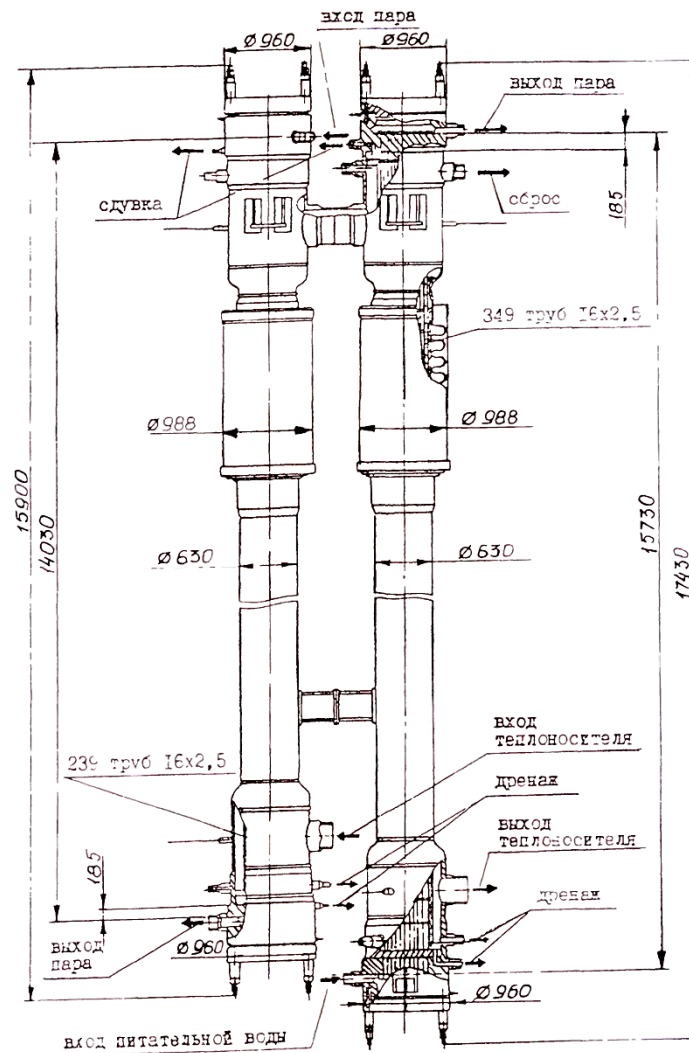
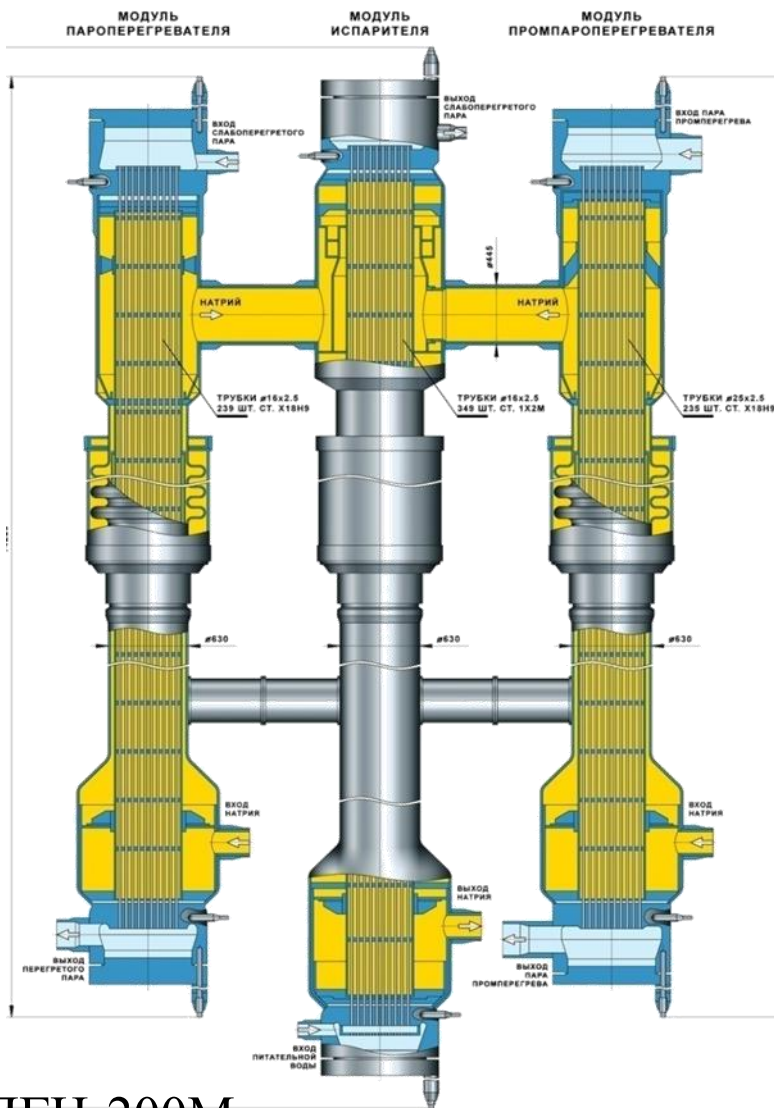
# Компоновки парогенераторов



РОС  
ЭНЕРГО  
АТОМ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
ДИВИЗИОН РОСАТОМА



РОСЭНЕРГОАТОМ  
БЕЛОРЯСКАЯ  
АЭС



H-272

ПГН-200М

Продемонстрирована высокая работоспособность основного конструкционного материала оборудования РУ БН – стали X18Н9.

Обосновано применение стали X16Н11М3 для высокотемпературных узлов оборудования РУ БН.

Показана достаточная (до ~ 25 лет) работоспособность стали 1Х2М в условиях ПГ РУ БН.

Для реактора БН-800 принято решение использовать эти марки сталей.

В 1987 году было принято решение об использовании для реакторов БН-350, БН-600 в качестве штатных материалов оболочки ТВЭЛОВ и чехлов ТВС сталей ЧС68 и ЭП450 соответственно.

Для реактора БН-800 приняты для оболочек ТВЭЛОВ – сталь ЧС68 х.д. и чехлов ТВС - сталь ЭП450.



# Естественная циркуляция в натриевых контурах



С целью оценки возможностей использования естественной циркуляции (ЕЦ) в натриевых контурах БН-600 для организации теплоотвода от реактора при авариях с потерей надежного электроснабжения ГЦН был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований по определению необходимых параметров для возникновения и поддержания ЕЦ.

Серия экспериментов по изучению режимов ЕЦ в натриевых контурах позволила откорректировать методику расчета гидравлики контуров и оценить возможности и условия использования таких режимов как при эксплуатации и запроектных авариях, так и в проектах энергоблоков с быстрыми натриевыми реакторами нового поколения.

# Исследования резервов повышения мощности модулей ПГН-200М



Установлено, что мощность секций, в т.ч. и модулей, может быть увеличена до 126% номинальной, что обеспечивает работу ПГ на номинальной мощности при отключении одной из восьми работающих секций. Мощность парогенератора и ПТО может быть увеличена до 105% номинальной без нарушения пределов безопасной эксплуатации энергоблока. Предложенные рекомендации по увеличению предельно допустимых значений мощностей модулей, секций, парогенераторов и промтеплообменников внедрены в эксплуатацию энергоблока и отражены в технологической документации, что обеспечило устойчивую работу энергоблока на номинальной мощности в течение всех лет его эксплуатации.

Рост мощности секций парогенераторов свыше номинальной приводит к уменьшению максимального теплового потока, что вызывает снижение скорости коррозии под напряжением по водной стороне трубок ПГ. Этот фактор способствовал наряду с другими увеличению ресурса испарительных модулей от проектных 50000 часов до нынешних 105000 часов.

# Модернизация регулирующих органов СУЗ реактора БН-600



Переход от двухзвенного РО СУЗ к однозвенному был опробован в опытном РО АЗ РНАТ.506325.007, реакторные испытания которого были проведены в 2000-2001 годах. Исключение нижнего шарнира на длине поглощающей части стержня позволило решить две задачи: увеличить загрузку карбида бора в стержне и исключить нижний шарнир, находящийся в зоне высокого флюенса нейтронов и высоких энерговыделений.

Для увеличения радиационной безопасности Белоярской АЭС на реакторе БН-600 был проведен комплекс работ по замене в РО СУЗ поглотителя из окиси европия на поглотитель из карбида бора. Процесс замены РО КС с поглотителем из карбида бора был завершен еще в 19 МК (1987 год). Замена окиси европия на карбид бора в РО РС была осуществлена в рамках разработки новых РО СУЗ проекта 2631 с назначенным ресурсом 560 эф.с. Последний РО РС с поглотителем из окиси европия был выгружен из активной зоны после завершения 48 МК (2005 год) .

# Модернизация ССКГО реактора БН-600



Для обеспечения постоянного оперативного контроля за состоянием ТВЭЛов реактора БН-600 энергоблок № 3 Белоярской АЭС согласно проекта оснащен секторной системой контроля герметичности ТВЭЛов (ССКГО), использующей показания 12 каналов измерений со счетчиками нейтронов СНМ-14.

В ближайшее время предполагается замена нейтронных датчиков СНМ-14 и регистрирующей аппаратуры ССКГО на модернизированные. Проводимая модернизация ССКГО вызвана недостатками существующей системы, включая детекторы и вторичную аппаратуру, которые не отвечают современным требованиям. В течение 2009-2013 годов на реакторе БН-600 проведены сравнительные испытания одного модернизированного измерительного канала на основе камеры деления. По результатам сравнительных испытаний сделан вывод, что по сравнению со счетчиками СНМ-14 канал измерения на основе камеры деления имеет существенные преимущества по стабильности и устойчивости к электромагнитным помехам и обладает повышенной (примерно в 1,5 раза) чувствительностью регистрации плотности потока запаздывающих нейтронов.

Следует отметить, что по результатам опытной эксплуатации на реакторе БН-600, принято решение установить камеры деления в секторную систему контроля герметичности ТВЭЛов на новый энергоблок БН-800.

За 34 года эксплуатации БН-600 выполнена главная задача – освоена эксплуатация мощного энергоблока с быстрым натриевым реактором и натриевыми парогенераторами. Достигнутый уровень эксплуатационной надежности характеризуется средним годовым КИУМ, который за последние годы работы был на уровне ~ 80 %. За годы эксплуатации успешно решены и другие важные задачи:

- Проведены испытания 421 экспериментальных ТВС для исследований конструкционных материалов и конструкций различного типа;
- Выгорание топлива увеличено с 7 % до 12 % т.а.;
- Внедрен дополнительный способ регулирования распределения тепловой мощности реактора между петлями;
- Была реализована секторная система КГО (ССКГО), предназначенная для идентификации ТВС с негерметичными твэлами по обнаружению продуктов деления (источников запаздывающих нейтронов) в теплоносителе первого контура;
- Исследованы особенности теплогидравлики натриевых контуров, натриевой технологии, совершенствования и оптимизации теплогидравлических процессов и режимов.

Решены проблемы эксплуатации:

- Течи натрия на оборудовании первого и второго контуров – проблема практически решена, не было случаев с 1993 года.
- Межконтурные протечки в парогенераторах, с взаимодействием вода-натрий – отсутствуют с 1991 года.
- Отключения главных циркуляционных насосов из-за повреждения щеточных аппаратов электродвигателей и повышенной вибрации – задача решена в 80-е годы.
- Нарушения герметичности оболочек ТВЭЛОВ - остановки из-за разгерметизации «штатного» топлива отсутствуют с 1999 года.
- Отключения генераторов из-за поступления водорода в дистиллатный контур – проблема практически решена в 90-е годы.

В процессе эксплуатации энергоблока БН-600 был увеличен ресурс основного оборудования:

- Составные части активной зоны – в 1,5 раза.
- Испарительный модуль ПГ – в 2,5 раза (с 50 тыс. часов до 125 тыс. часов).
- ГЦН-1 – в 2,9 раза (с 20 тыс. до 57 тыс. часов).
- ГЦН-2 – в 2,5 раза (с 50 тыс. до 125 тыс. часов).
- ПТО – в 2,25 раза (с 20 до 45 лет).

В результате модернизаций активной зоны в т.ч. для исключения нарушений герметичности оболочек ТВЭЛОВ:

- Снижена максимальная линейная нагрузка с 540 до 480 Вт/см за счет увеличения высоты а.з. с 750 до 1000 мм.
- Применены новые конструкционные материалы для чехла ТВС (ферритно-мартенситная сталь ЭП-450 х.д.) и ЧС-68 х.д. – для оболочек ТВЭЛОВ.

Результаты проведенных научно-исследовательских работ направлены как на повышение безопасности действующего энергоблока, так и на выбор и обоснование конструктивных и схемных решений при проектировании и эксплуатации быстрых натриевых реакторов следующих поколений.

Освоены технологии ремонта и замены крупногабаритного реакторного и парогенераторного оборудования (72 модуля ПГ, 3 ЦНД, 6 ПЭН, 1 АПЭН).

Проведены длительные ресурсные испытания крупногабаритного оборудования, работающего в натрии.

Важнейший итог эксплуатации – обоснование сооружения новых энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах (БН-800, БН-К).