



РОСАТОМ

Международная конференция

ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС С УРАН-ГРАФИТОВЫМИ РЕАКТОРАМИ

Сосновый Бор, 17 октября 2020 года

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



ОБЩЕСТВЕННЫЙ
СОВЕТ

Госкорпорация
«Росатом»

ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОБЛУЧЕННЫМ ГРАФИТОМ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРОВ

Муратов О.Э., к.т.н.,

Общественный совет ГК «Росатом»

Вывод из эксплуатации



РОСАТОМ

- **ВЭ ЯРОО** – деятельность на завершающей стадии жизненного цикла ОИАЭ после его окончательного останова, направленная на достижение установленного проектом ВЭ конечного состояния объекта в целях его полного или частичного освобождения из-под контроля органов регулирования безопасности в соответствии с действующими НП;
 - Деятельность по ВЭ направлена на обеспечение безопасности персонала, населения и окружающей среды, вплоть до достижения обоснованного и определенного проектом ВЭ конечного безопасного состояния ОИАЭ;
 - **Особое место при ВЭ УГР** – выбор оптимальных способов и методов обращения с отработанным реакторным графитом
-

ЗАМЕДЛИТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ



Замедлитель	$K_{\text{замед.}}$	$\sigma_{\text{захв}}$, барн	Свойства
Тяжелая вода	3300	0,009	Редкая распространенность; Энергоемкая, дорогостоящая технология получения
Бериллий	200	0,1	Редкая распространенность; Высокая стоимость; Распухание под давлением гелия, образующегося при облучении быстрыми нейтронами
Графит	190	0,004	Легкость механической обработки; Высокая теплостойкость; Механическая прочность;

ГРАФИТ В РЕАКТОРАХ



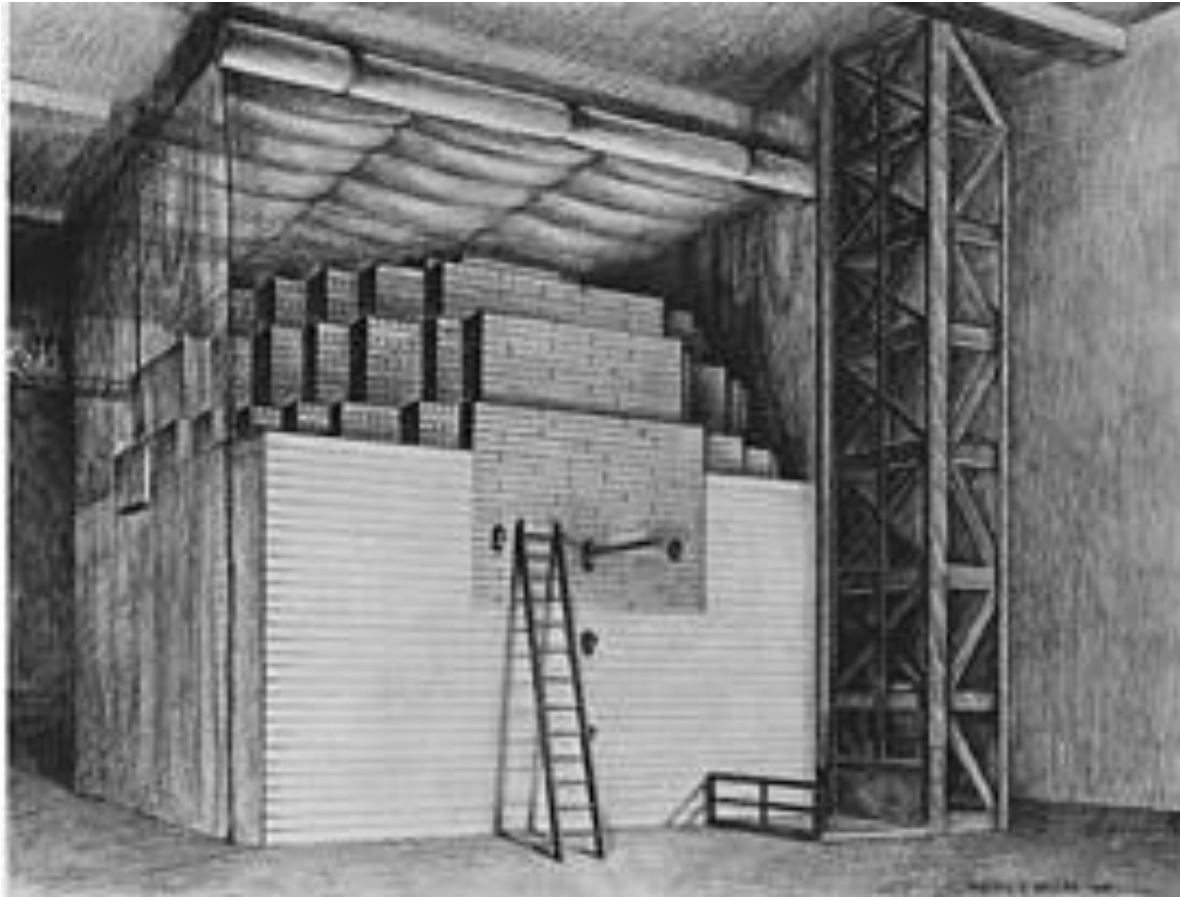
ПРЕИМУЩЕСТВА	НЕДОСТАТКИ
Плотность 2,09...2,23 г/см ³ ;	Высокая пожароопасность;
Температура плавления 3850...3890 °С;	Взрывоопасность графитовой пыли;
Низкий коэффициент температурного расширения;	Высокая удельная теплота сгорания ~8 ккал/г;
Эрозионная и коррозионная стойкость при облучении;	Высокая температура воспламенения ~700°С
Высокая химическая устойчивость;	Накопление запасенной энергии при облучении
Высокая тепло- и электропроводность;	
Высокая механическая прочность;	
Низкая анизотропия	

Главное требование – высокая степень очистки от нежелательных примесей (В, Сd, V, Hg и др.)

РЕАКТОР СР-1



РОСАТОМ



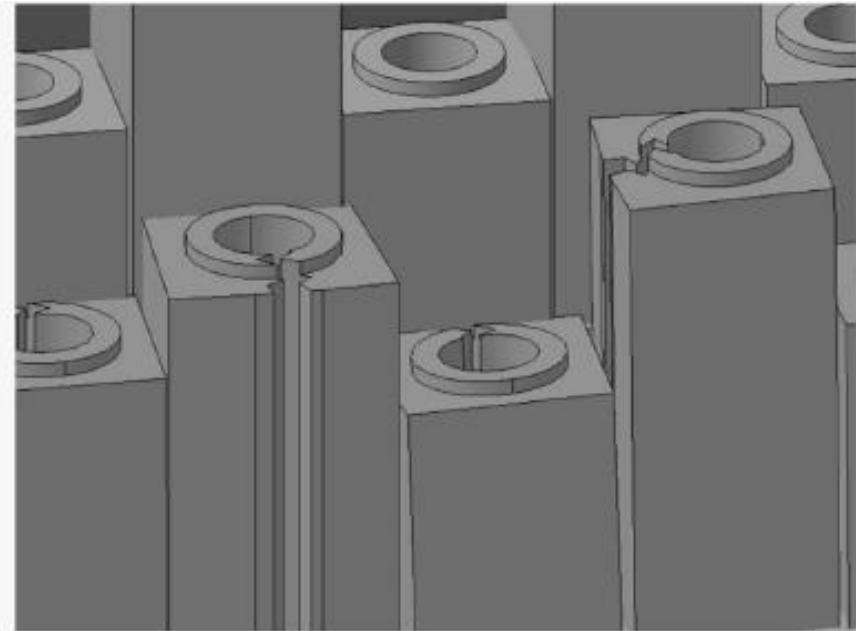
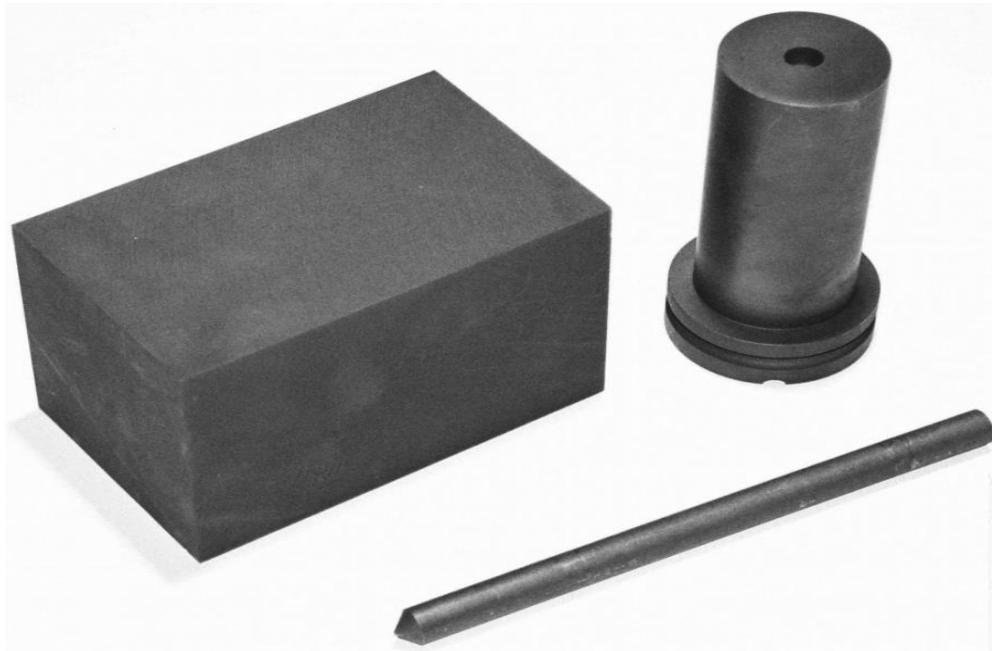
- Топливо – 33 т UO_2 , 3,7 т U_3O_8 , 5,6 т металлических слитков U
- Замедлитель – 350 т графита

УГР В МИРЕ



Страна	Кол-во УГР	Тип реактора	Годы эксплуатации	Масса графита, т
Франция	9	UNGG, Air cooled	1959-1994	23000
Германия	2	HTGR	1967-1989	2000
Бельгия	1	Air cooled	1956-н.в.	2500
Италия	1	Magnox	1963-1987	3000
Япония	2	Magnox, HTGR	1966-н.в.*	1600
Северная Корея	1	Magnox	1986 - ?	3500**
Литва	2	LWGR	1983-2009	4000
Россия	31	LWGR	1954-н.в.	60000
Испания	1	UNGG	1972-1990	3700
Великобритания	46	Magnox, AGR, HTGR	1947-н.в.	86000
Украина	4	LWGR	1977-2000	5700***
США	19	HTGR, LWGR, Air cooled	1942-1989	55000
Казахстан	1	HTGR	1961-н.в.	5900
Китай	4	HTR, Air cooled, LWGR	1963-н.в.	1600
ИТОГО	124			~260000

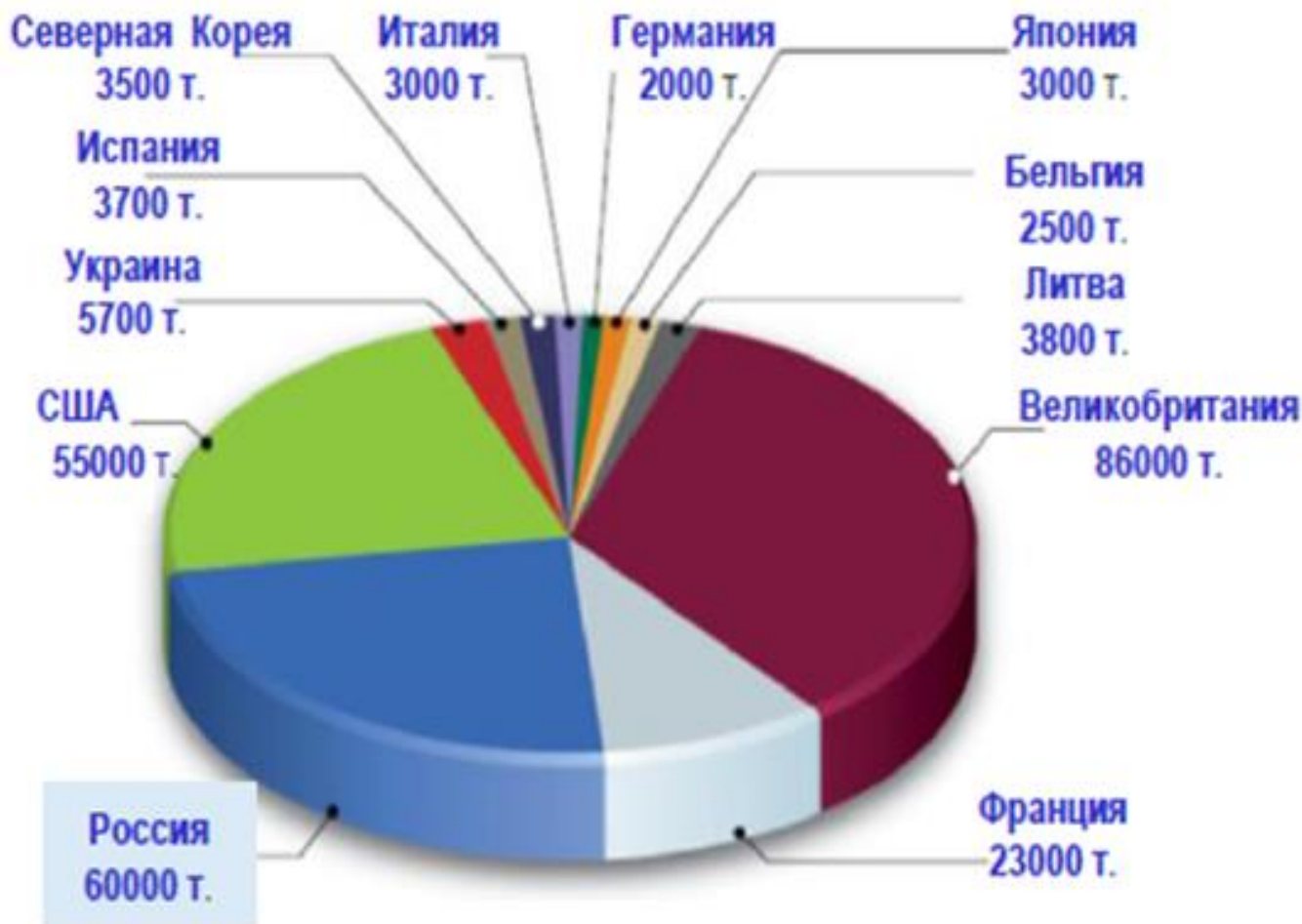
РЕАКТОРНЫЙ ГРАФИТ





- из кристаллической решетки выбиваются или сдвигаются атомы;
- сложные молекулы распадаются на более простые с выделением газов;
- ухудшаются важные технические характеристики: механическая прочность, теплопроводность, электропроводность;
- появляются поверхностные эрозии, отслоения, внутренние пустоты, общие деформации (растрескивание, набухание);
- активируются процессы окисления (радиолитическая коррозия)

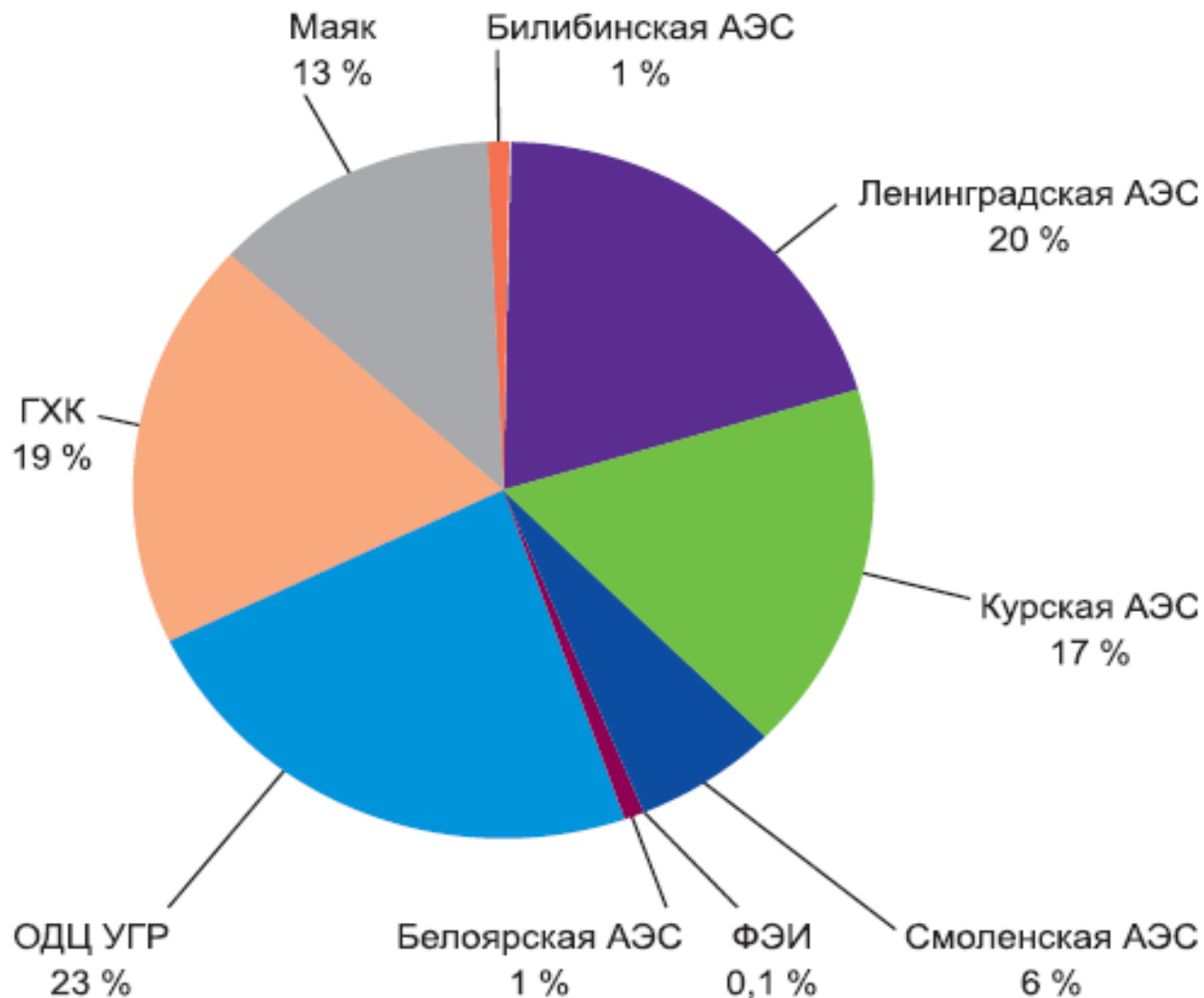
В мире накоплено ~260 тыс. т облученного графита



ОБЛУЧЕННЫЙ ГРАФИТ В РОССИИ



РОСАТОМ

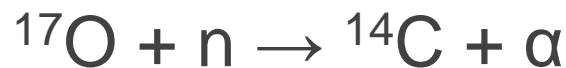


- Уникальная кристаллическая структура и пористость определяют его физические свойства и поведение после нейтронного облучения;
- Незаменимость графитовой кладки в течение всего срока эксплуатации УГР обладает наибольшим из всех РАО набранным флюенсом нейтронов;
- Неравномерностью как по величине, так и изотопному составу загрязнения кладки и отдельных графитовых деталей;
- Загрязненность кладки долгоживущими биологически значимыми радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs , которые могут замещать в живых организмах стабильные изотопы ^{40}Ca , ^{39}K , создавая внутреннее облучение;
- Дополнительным вклад в активность кладки осколки деления и актиниды в результате аварий и попадания в нее фрагментов ядерного топлива;
- Пожароопасность графита и взрывоопасностью графитовой пыли;
- Высокая удельной теплота сгорания (~ 8 ккал/г) и температурой воспламенения $\sim 700^\circ\text{C}$;
- Наличием «энергии Вигнера», образующейся при облучении графита нейтронами, который приобретает высокую потенциальную энергию



Содержание долгоживущих радионуклидов с высокой миграционной способностью в природных системах:

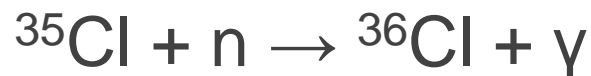
- ^{14}C , $T_{1/2} = 5\,730$ лет – 95 % активности, удельная активность 10^8 - 10^9 Бк/кг:



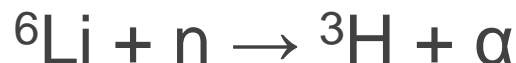
Концентрация материнских изотопов:



- ^{36}C , $T_{1/2} = 301\,000$ лет:



- ^3H , $T_{1/2} = 12,3$ года:



- В результате атмосферных ядерных испытаний суммарной мощностью ~200 Мт в атмосферу поступило ^{14}C :

$1,72 \cdot 10^{17}$ Бк

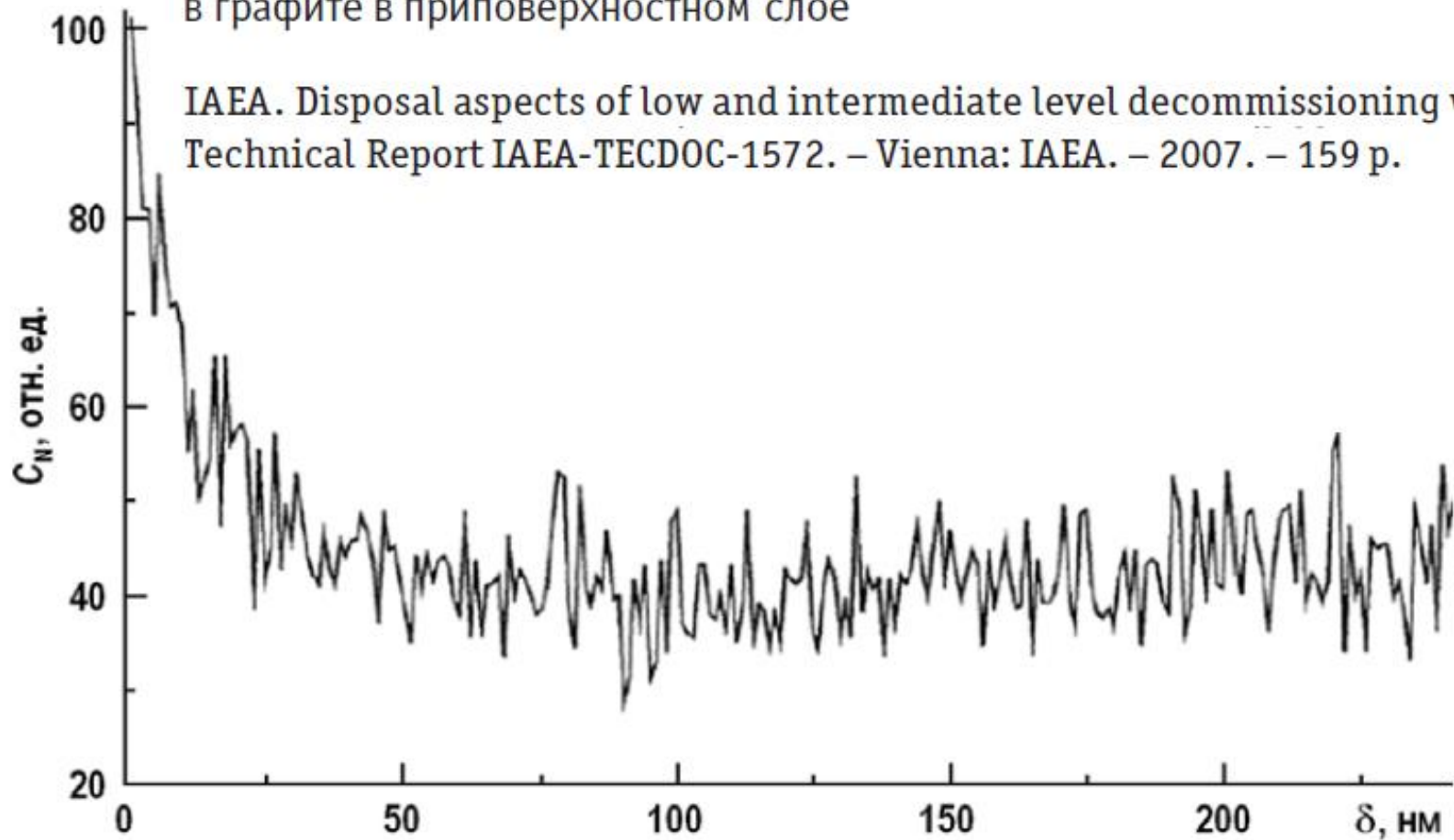
- В результате эксплуатации УГР накоплено ^{14}C :

$\sim 2,6 \cdot 10^{17}$ Бк

- В результате инцидентов с топливом было попадание делящихся материалов и продуктов деления в кладку:
 - продукты деления - ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{154}Eu , ^{90}Sr , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{113}Cd , ^{121}Sn , ^{129}I , ^{133}Ba , ^{147}Pm , ^{151}Sm
 - актиноиды - ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{243}Am , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm
- Доля в поверхностном слое графита на 2-3 порядка выше, чем в объеме блока;
- В ПУГР ~ 30% объема кладок загрязнены, накоплено несколько десятков кг урана

Характерная форма распределения примесного азота
в графите в приповерхностном слое

IAEA. Disposal aspects of low and intermediate level decommissioning waste
Technical Report IAEA-TECDOC-1572. – Vienna: IAEA. – 2007. – 159 p.

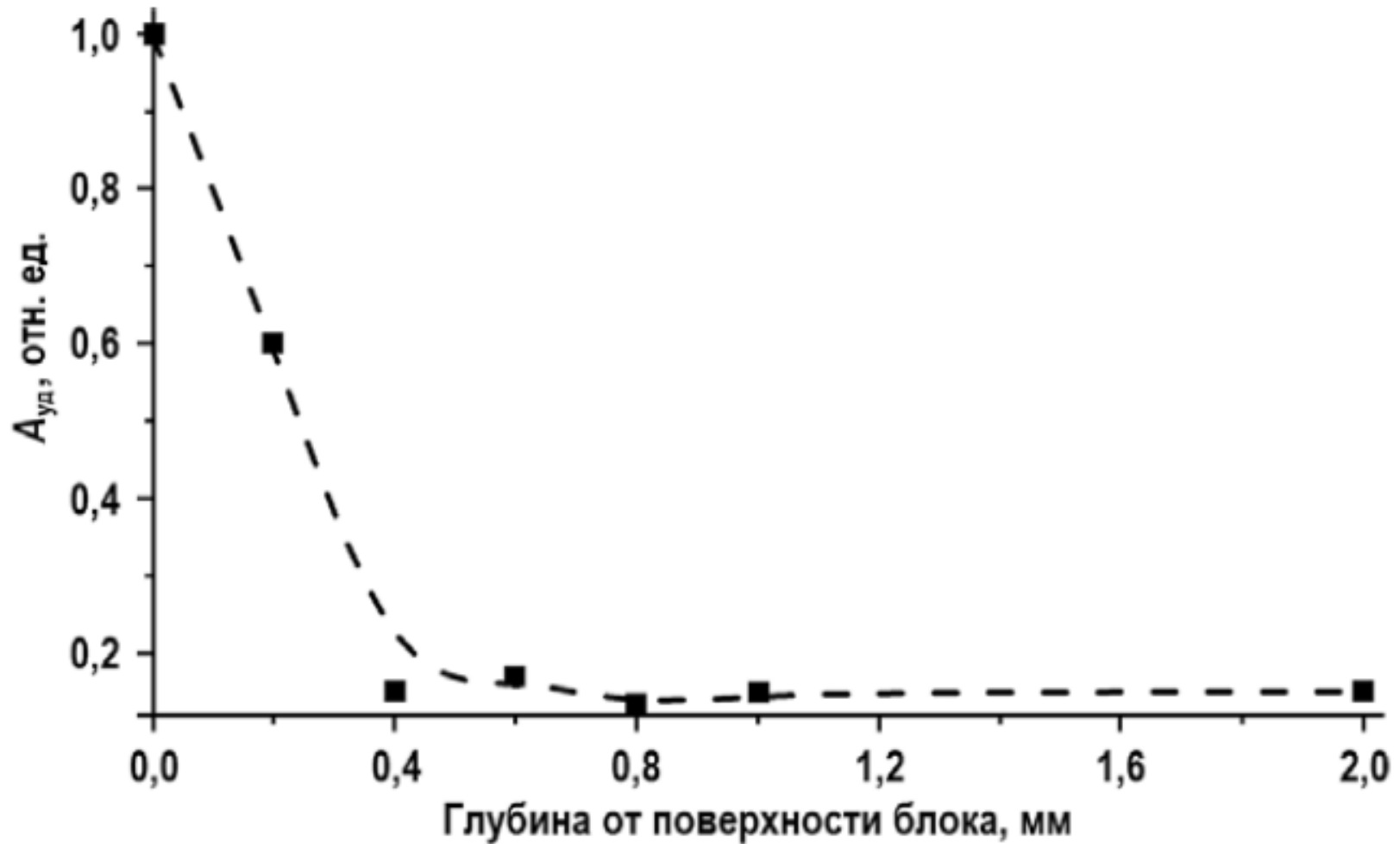


Относительное распределение примеси азота в графитовом образце в приповерхностном слое

ПОВЕРХНОСТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГРАФИТА



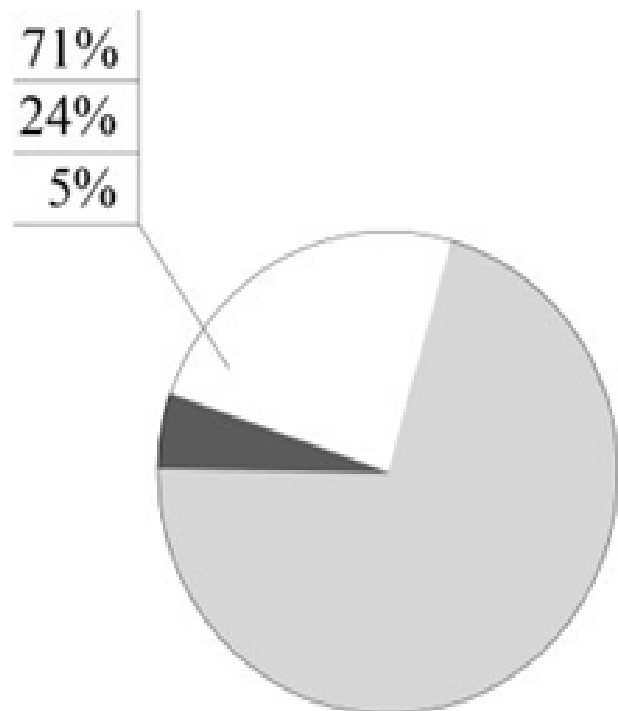
РОСАТОМ



Характерное распределение активности ^{14}C в приповерхностном слое графитовых блоков реактора РБМК-1000 блока №2 Ленинградской АЭС

- Энергия Вигнера (" накопленная " энергия) возникает в графите при облучении нейтронами, поскольку атомы смещаются из своих нормальных положений решетки в конфигурации с более высокой потенциальной энергией;
- Количество накопленной энергии зависит от потока нейтронов, времени облучения и температуры. Чем выше температура облучения, тем меньше количество "накопленной" энергии;
- Максимальное количество накопленной энергии, найденное в образце графита, составляет ~ 2700 Дж/г, что при одновременном высвобождении может привести к повышению температуры на ~ 1500 °С;
- Наиболее опасно спонтанное повышение температуры вплоть до температуры возгорания после нагревания внешним источником тепла графита, который облучался длительное время при температуре ниже ~ 80 °С;
- Выделение запасенной энергии после внешнего нагрева до $150-200$ °С может привести к спонтанному росту температуры графита до температуры воспламенения и его возгоранию и последующему горению графитовых блоков;
- УГР эксплуатировались при температурах, существенно выше критической, что исключает спонтанное выделение энергии Вигнера и рост температуры до температуры воспламенения графита.

После длительного облучения в реакторе графит не приобретает никаких свойств, которые могли бы ему создать область полезного применения. Учитывая высокую удельную активность облученного графита (~1 ГБк/кг), он относится к категории твёрдых РАО среднего или высокого уровня активности



Класс 1 - аварийный графит (5%)

Класс 2 - кладочный графит (71%)

Класс 3 - сменяемый графит (24%)



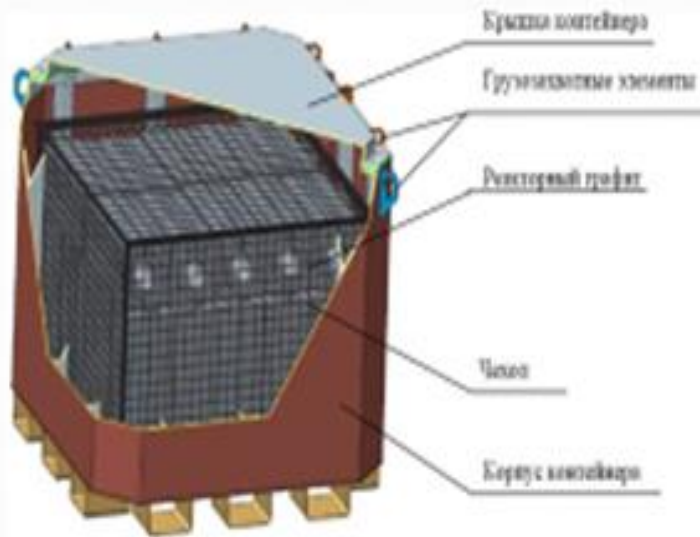
Рассмотрены три основных варианта окончательной утилизации отработавшего графита:

- прямое захоронение после соответствующей упаковки;
- утилизация после сжигания с последующим кондиционированием золы;
- утилизация после химической обработки (жидкая и/или газообразная экстракция) и кондиционирование (пропитка, капсулирование и т.д.) и надлежащая упаковка

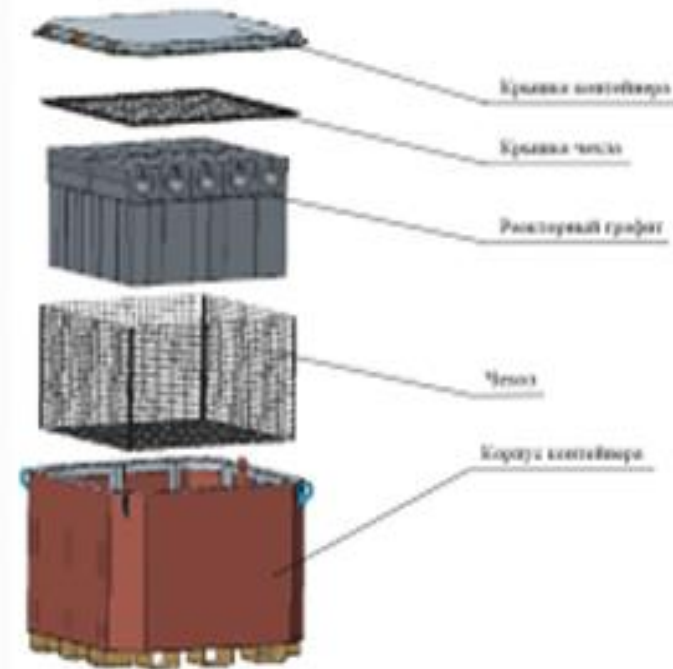


- Франция – концепция захоронения предполагает окончательную изоляцию графитовые РАО в глинах на глубине от 100 до 200 м при мощности глинистого пласта не менее 50 м;
- Германия – изучается перспектива захоронения графитсодержащих отходов в пункте глубинного захоронения KONRAD. Предельная суммарная активность по ^{14}C в отходах, которые могут быть безопасно захоронены, оценивается в $4 \cdot 10^{14}$ Бк с учетом общего полезного объема могильника $303\,000\text{ м}^3$ средняя удельная активность размещаемых отходов составит $1,32 \cdot 10^9$ Бк/м³;
- Великобритания - пункт захоронения предлагается разместить на глубине не менее 30 м от поверхности. Концепция включает шахту, облицованную бетоном. Цементированные отходы в контейнерах планируется разместить в шахте, оставшиеся зазоры залить цементным раствором до получения единого монолита. Надшахтная камера подлежит закладке, на поверхности будет сформирован курган

Для вариантов приповерхностного и глубинного захоронения были разработаны контейнеры



В сборе



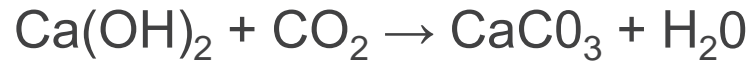
В разобранном состоянии



- перемещение графитовых блоков в измерительную камеру, для радиационных измерений с целью определения удельной активности, дозообразующих радионуклидов, наличия ядерных материалов и мощности дозы гамма-излучения;
- сортировка графитовых блоков по активности и по наличию ядерных материалов (для оптимизации размещения графита в контейнере);
- плотная упаковка графитовых блоков в контейнере;
- подготовка и размещение в контейнере графитовых колец, втулок, технологических каналов и др., ранее извлеченных из активной зоны;
- засыпка графитовой пыли в свободные полости контейнера и омоноличивание его содержимого;
- герметизация крышки контейнера;
- дезактивация контейнера (при наличии снимаемых загрязнений);
- контроль параметров и паспортизация контейнера

- Для горения графита требуется предварительный разогрев всей его массы до температуры не ниже 300 °С, а интенсификация горения наступает при 1200-1300 °С.
- Перспектива сжигания графитовых отходов для окончательной утилизации вызывает следующие проблемы:
 - трудность сжигания реакторного графита в связи с его качеством;
 - выделение радиоактивных газов, в частности, ^{14}C , ^{36}Cl и остаточного ^3H ;
 - переработка и иммобилизация золы, содержащей радионуклиды;
- необходимость измельчения графита на достаточно мелкие фрагменты перед сжиганием и при этом исключить выход пыли в окружающую среду

- $^{14}\text{CO}_2$ может быть уловлен методом щелочной промывки в оросительной колонне с применением водной суспензии $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Образуется нерастворимый устойчивый радиоактивный карбонат кальция CaCO_3 :



При улавливании 3,67 т суммарного $^{14}\text{CO}_2$, образующегося при сжигании 1 т графита, расходуется 6,17 т безводного $\text{Ca}(\text{OH})_2$, и в качестве конечного продукта образуется 8,34 т безводного радиоактивного CaCO_3 , который является твердыми РАО. При плотности графита 1,6 г/см³ объем 1 т его составит ~0,625 м³, а при плотности CaCO_3 2,3 г/см³ его объем составит 3,63 м³, что в ~6 раз превышает исходный объем облученного графита

- При загрязнении ^{36}Cl система должна быть оборудована мокрым скруббером для нейтрализации образующейся HCl и для снижения выделения хлора в отходящих газах. Для удержания других газообразных загрязнителей (NO_x) необходимо создание дополнительной системы фильтрации и решить проблему удержания трития.



РОСАТОМ

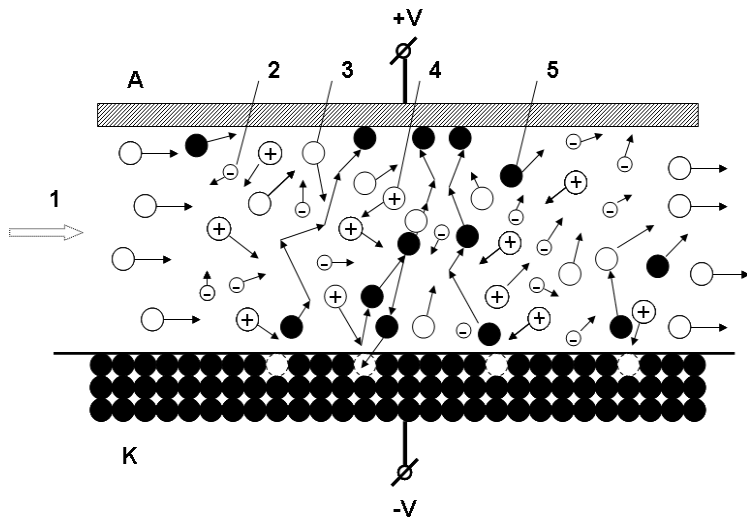
ПЛАЗМЕННАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ ГРАФИТА

Микро-плазменный разряд зажигается между поверхностями:

- обрабатываемая поверхность графит (катод - **К**)
- электрод - коллектор (анод - **А**).

Давление ($10^4 - 10^5$)Па, напряжение (500-1000)V, ток (0.1-1)A/cm²

Расстояние между К - А (0.1-1)mm, толщина обрабатываемого графита (250-600)mm, толщина электрода коллектора 1mm, толщина керамической изоляции 10mm



- 1 – направление потока газа,
- 2 – электроны, 3 – атомы Ar,
- 4 – ионы Ar⁺,
- 5 – распыленные атомы С

ПРОГРАММА ПО ОБРАЩЕНИЮ С ГРАФИТОМ УГР



Цель программы:

Создание отраслевой системы обращения с облученным реакторным графитом, обеспечивающей его окончательное радиационно-безопасное захоронение.

Задачи программы:

- Обследование кладок УГР и пунктов хранения ТРО, содержащих облученный графит.
- Обоснование и выбор вариантов обращения с облученным графитом.
- Создание защитных барьеров безопасности.
- Технологическое обеспечение процессов обращения с удаляемыми РАО, содержащими облученный графит.
- Паспортизация ТУК с РАО, содержащих облученный графит.
- Обоснование безопасности и управления долговременными рисками при обращении с облученным графитом.

Сроки реализации: 2015 – 2021 гг.

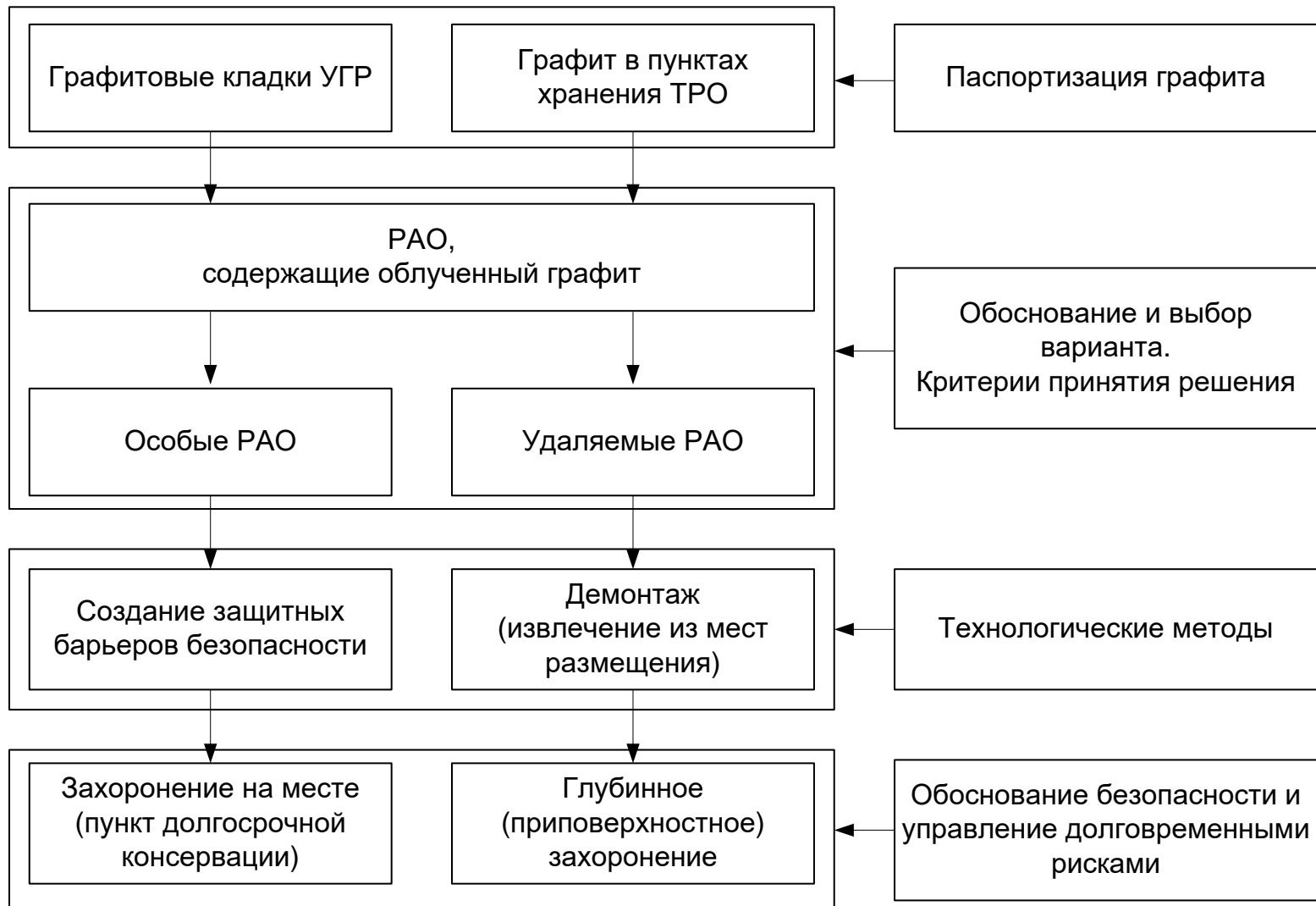




ОБРАЩЕНИЕ С ОБЛУЧЕННЫМ ГРАФИТОМ



РОСАТОМ



ОБРАЩЕНИЕ С ОБЛУЧЕННЫМ ГРАФИТОМ



КОНЦЕПЦИЯ ВЭ ПУГР ЭИ-2



РОСАТОМ

Окончательный
останов,
приведение в
ЯБ состояние
1990-1993гг.

Разработка
концепции и
программы
ВЭ
2011г.

Проведение
КИРО,
НИОКР
2011-2012гг.

Разработка
проекта,
получение
лицензии
2011-2012гг.

Реализация
проекта
2012-2015гг.



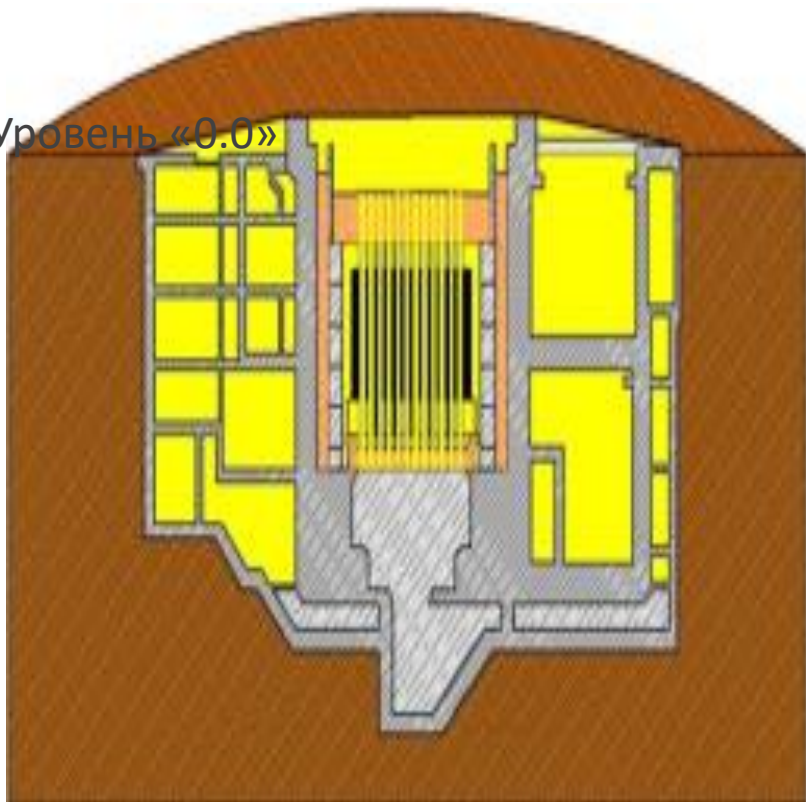
Внешний вид здания ПУГР ЭИ-2
до начала работ по ВЭ
2012 г.



Пункт консервация особых РАО
2015 г.

- Полный демонтаж обеспечивающих систем и оборудования;
- Бетонирование низа реактора гидроизоляционным бетоном и обеспечение подкрепление основных несущих конструкций;
- Боковые металлоконструкции заполнены бетоном;
- Загерметизированы все проемы в бетонной шахте реактора;
- Полости реакторного пространства заполнены смесями на основе бентонитовых глин;
- Верх реактора загерметизирован с помощью железобетонного перекрытия, обеспечивающего защиту от пожара, воздействия взрывной волны и др.

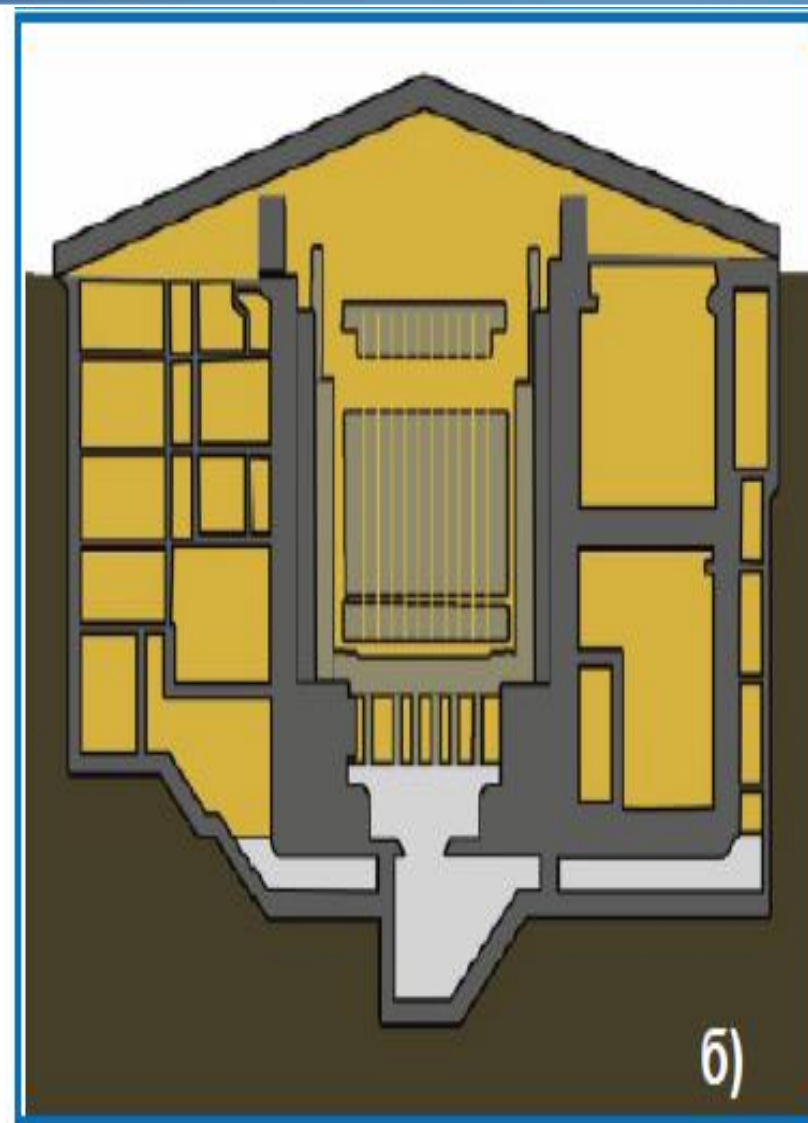
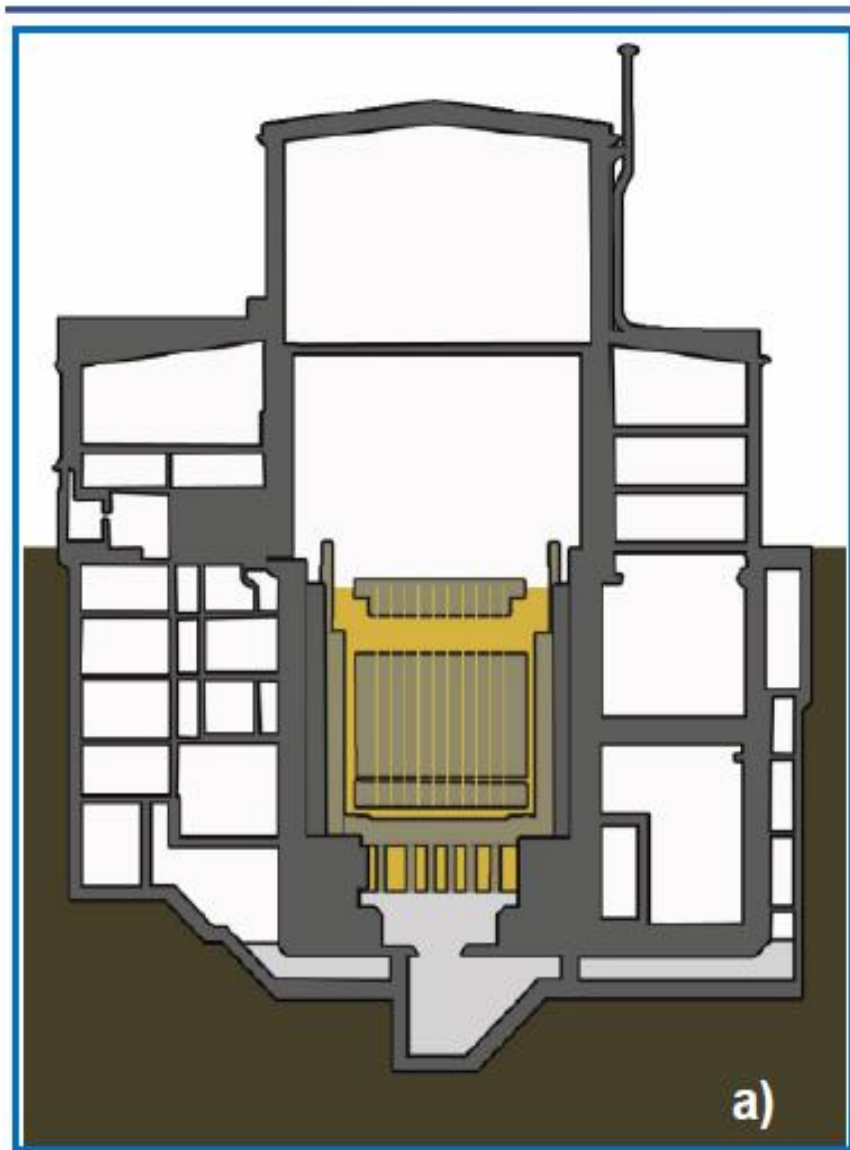
Уровень «0.0»



Преобразование ПУГР в ПКОРО



РОСАТОМ



ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУГР ЭИ-2



РОСАТОМ



Уровень «0.0»

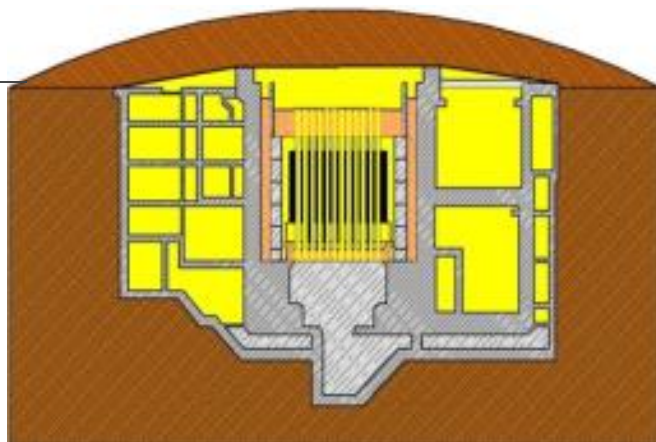


Схема объекта после завершения работ



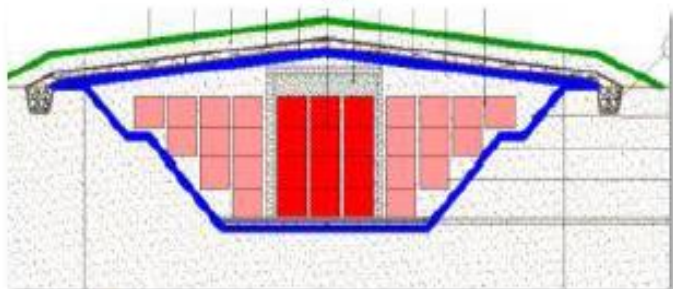
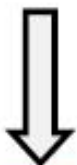
РАО размещены в ПХ

Облученный графит
энергетических реакторов
(РБМК, АМБ, АМ и др.)



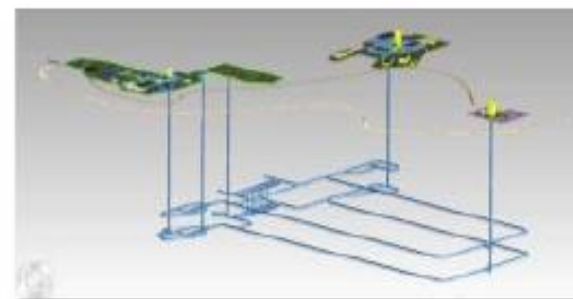
Классификация РАО для
захоронения
(ППРФ от 19.10.2012 № 1069)

3 и 4 класс РАО



Пункты приповерхностного
захоронения радиоактивных отходов
(ППЗРО)

1 и 2 класс РАО



Пункт глубинного захоронения
радиоактивных отходов
(ПГЗРО)



ВЭ БЛОКОВ 1-4 ЛАЭС



Открытое акционерное общество
«Российский концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях»


(ОАО «Концерн Росэнергоатом»)

СОГЛАСОВАНО

Директор по государственной
политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ
ЯРОО Госкорпорации «Росатом»


О.В. Крюков
« » 2015 г.

Директор по управлению
жизненным циклом ЯТЦ и АЭС


В.И. Корогодин
« » 2015 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ОАО «Концерн Росэнергоатом»


А.Ю. Петров
« » 2015 г.

КОНЦЕПЦИЯ

**ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ
ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС С РБМК-1000**

- Концепция определяет основные положения по ВЭ блоков ЛАЭС с РБМК – 1000 (№1,2,3,4), включая промплощадку со всеми зданиями и сооружениями, размещенными на ней;
- Вариант ВЭ – немедленная ликвидация;
- В 2020 г. создан ОДИЦ по ВЭ канальных реакторов

Москва
2015



**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**