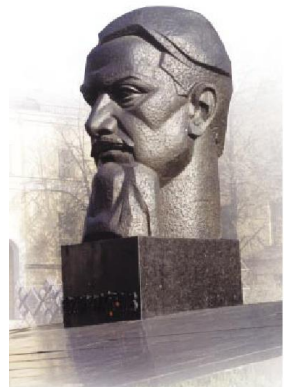




Критические сборки вчера и сегодня

А.Ю. Гагаринский
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»

17 сентября 2020 г.





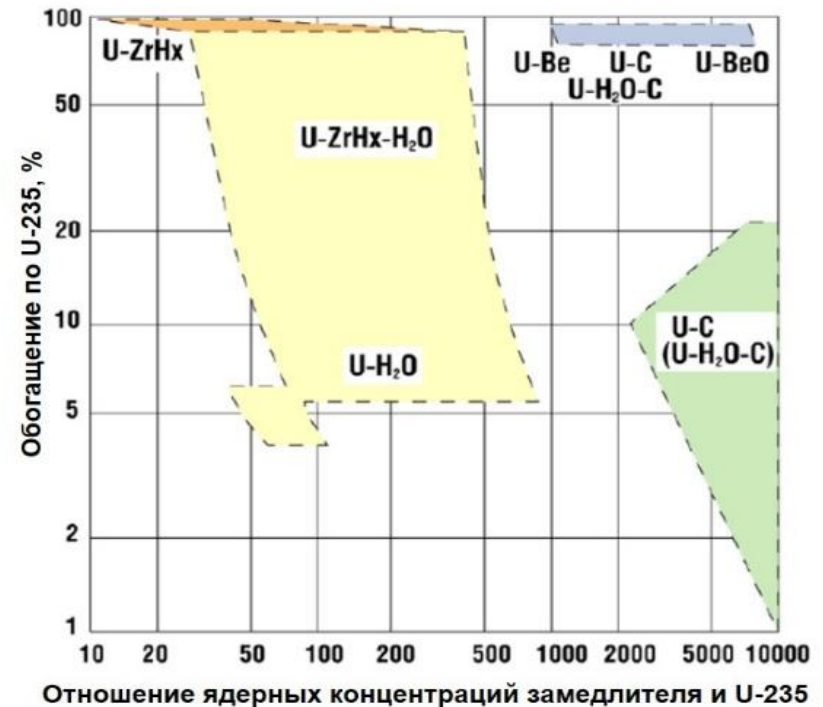
Из истории критических экспериментов



Уже первые критические эксперименты И.В. Курчатова в институте, сегодня носящем его имя, подтвердили уникальные достоинства реакторов нулевой мощности – критических сборок. Это исключительно удобный для практики диапазон параметров кинетического отклика на вариацию критических условий, а также инвариантность в широких пределах важнейших функционалов нейтронного потока к мощности реактора.

В 1953 г. Курчатовский институт запустил свою первую критическую сборку, моделирующую активную зону энергетического реактора, для определения таких параметров реакторов с водяными теплоносителем и замедлителем, как критическая масса, эффективность органов управления и температурные эффекты.

С того времени в Курчатовском институте были выполнены тысячи экспериментов с урановыми системами, использующими в качестве замедлителя воду, водородосодержащие вещества (гидрид циркония, полиэтилен и их комбинации), бериллий и графит, в широком диапазоне обогащений по урану-235 (до 96%) и отношений между ядерными концентрациями замедлителя и урана.





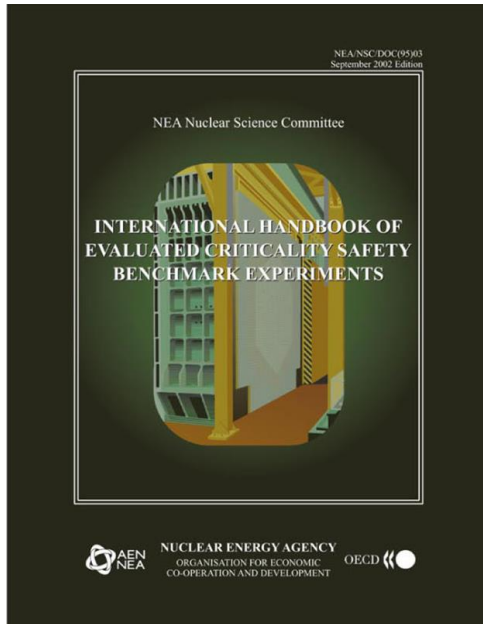
Эксперименты, когда по возможности точное моделирование активной зоны проектируемого объекта сводит к минимуму погрешность в предсказании интересующих характеристик реактора, надолго сохранили своё значение. В дальнейшем такие эксперименты, зачастую представляющие собой контроль качества изготовления активной зоны и подгонку её параметров под требования проекта, проводились не только в Курчатовском институте и других физических научных центрах, но и на стендах заводов и конструкторских организаций (МСЗ (Электросталь), ОКБМ «Африкантов» и др.).



Стенд «СФ-1» в Курчатовском институте



Стенд «СТ-1125» в ОКБМ

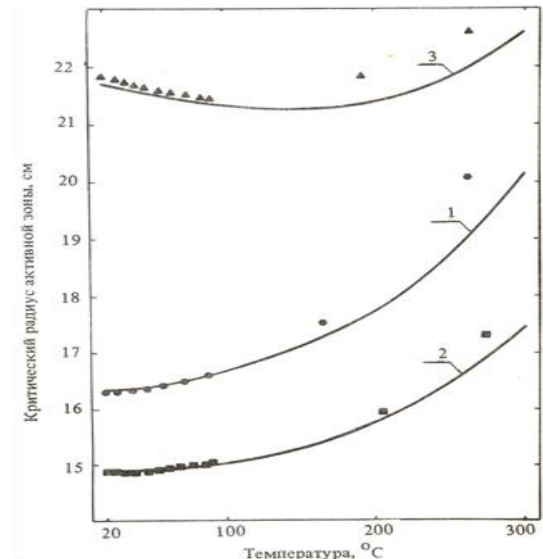


В 1992 году, по инициативе Министерства энергетики США, в Национальной лаборатории Айдахо был предложен и реализован новый подход к отбору данных – проект оценки бенчмарк-экспериментов по критической безопасности (CSBEP). Его главная идея – сбор, представление в стандартизованном формате и независимая экспертная оценка всех доступных и удовлетворяющих определенным требованиям экспериментальных данных о критичности размножающих систем.

Сборник оценок критических (в том числе уже и некоторых подкритических) экспериментов включает несколько тысяч конфигураций размножающих систем, представленных экспериментаторами двадцати стран. При этом данные, представленные российскими ядерными центрами (НИЦ «Курчатowski институт», ФЭИ, ВНИИЭФ и ВНИИТФ), которые присоединились к проекту в 1994 году, составляют более 15% от общего числа, т.е., второе место после США (53%). Следует заметить, что существует более десятка совместных российско-американских оценок.

В издании 2018 года (9 томов, более 70 000 страниц) содержатся оцененные бенчмарк-данные по 4 913 критическим, околочитическим и подкритическим конфигурациям и 215 конфигурациям, отнесённым к фундаментальным физическим измерениям, важным для критической безопасности.

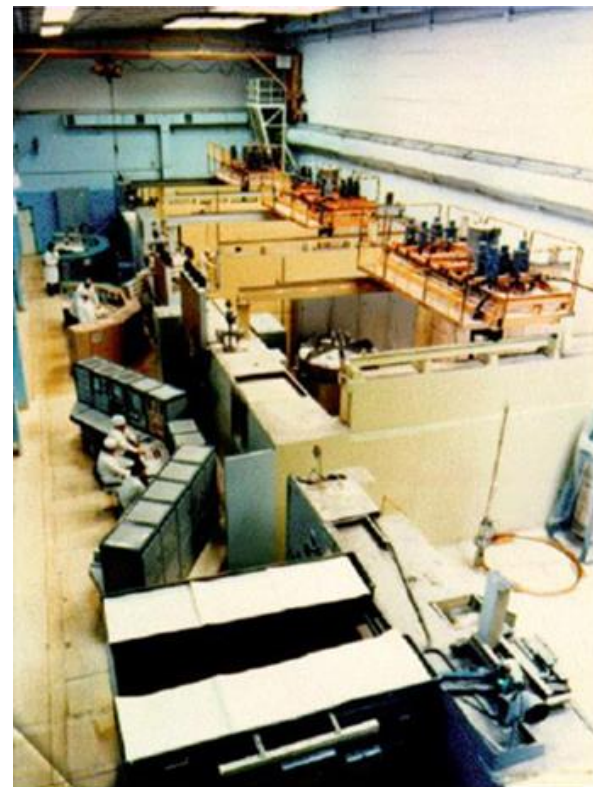
Этот класс экспериментов иллюстрируют выполненные в диапазоне температур от 20 до 280°C измерения критических параметров однородных уран-водных пучков твэлов из диоксида урана. Данные измерения, предложенные автором и выполненные в Курчатовском институте возглавляемой им группой сотрудников в конце 1970-х годов, как выяснилось позже, оказались уникальными в мировой практике.



Расчётные (1, 2, 3) и экспериментальные (●, ■, ▲) зависимости от температуры критического радиуса и материального параметра гексагональных решёток стержневых твэлов для $\rho_H/\rho_5 = 49, 331, 614$, соответственно

Критические сборки Курчатовского института

Название стенда	Тип критсборки	Тепловая мощность, кВт	Год физпуска	Примечание
СФ-7	U – H ₂ O	0,1	1975	Модернизирован с продлением срока эксплуатации до 2029 г.
Макет	U – D ₂ O	0,1	1977	Реконструирован в 1983 г.
Астра	U – C	0,1	1981	Планируется модернизация с обеспечением электронагрева
РБМК	U – C	0,025	1982	Модернизирован с продлением срока эксплуатации до 2035 г
ПИК (физмодель)	U – H ₂ O	0,1	1983	
Дельта	U – H ₂ O	0,1	1985	Модернизирован с продлением срока эксплуатации до 2029 г.
В-1000	U – H ₂ O	0,2	1986	Срок эксплуатации продлен до 2029 г.
П	U – H ₂ O	0,2	1987	Модернизирован с продлением срока эксплуатации до 2029 г.
Квант	U – H ₂ O	1,0	1990	
СК-физ	U – H ₂ O	0,6	1997	
РП-50 Аксамит	U – H ₂ O – ZrH _x	0,1	2013	



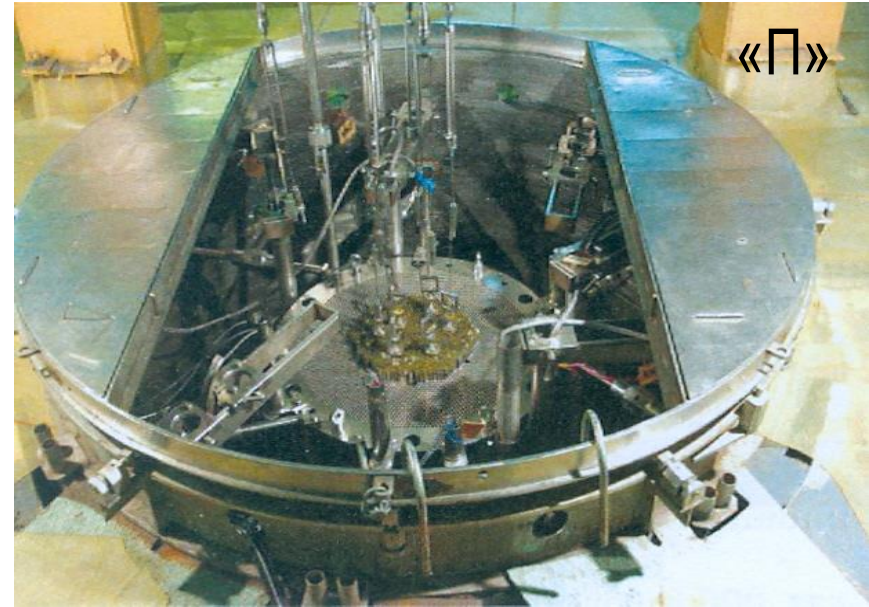
Зал критстендов в Курчатовском институте (1960-е годы)



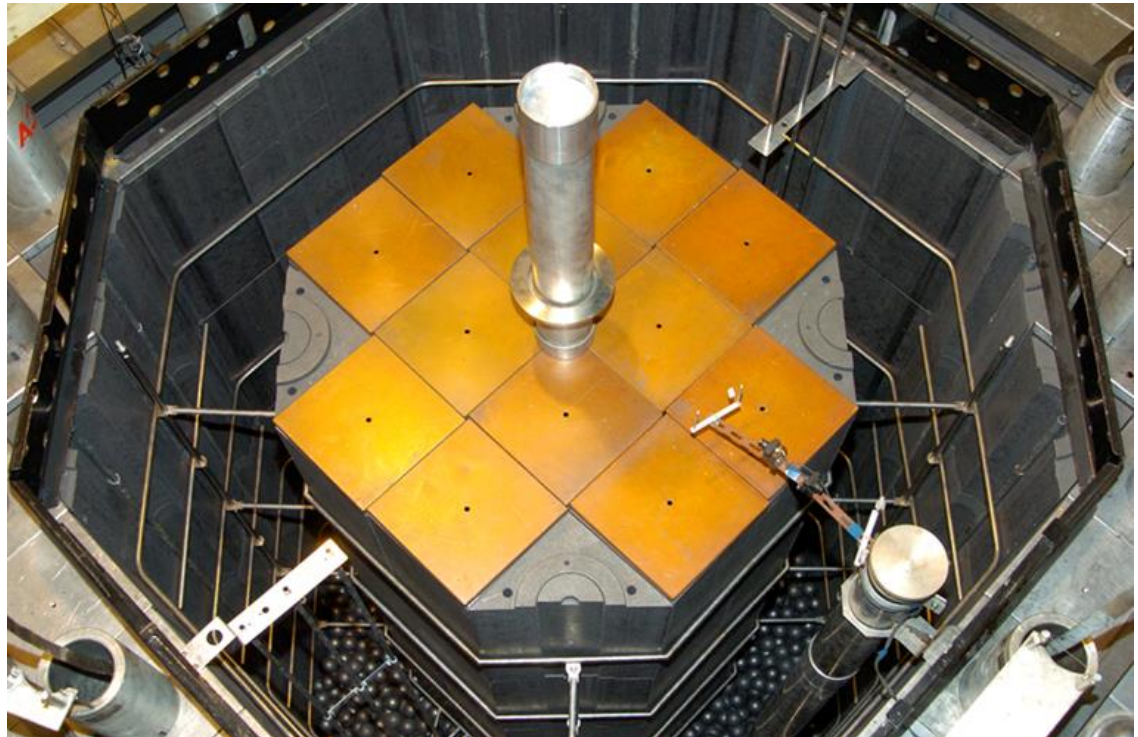
Критические сборки для реакторов АЭС

В настоящее время в распоряжении экспериментаторов по направлению реакторов ВВЭР имеется три критических стенда (стенды «П», «СК-физ» и «В-1000») с широким диапазоном возможностей, позволяющим решать задачи, возникающие при эволюции направления, в том числе развитии нового поколения этих реакторов, получившего название «СУПЕР-ВВЭР».

Стенд «РБМК» продолжает эксплуатироваться для решения задач научного сопровождения действующих ядерных реакторов, обеспечивающих половину ядерной генерации страны, повышения их безопасности и экономичности (исследования прототипов новых стержней аварийной защиты, определение подкритичности без выхода в критическое состояние, исследование профилированных ТВС и др.).



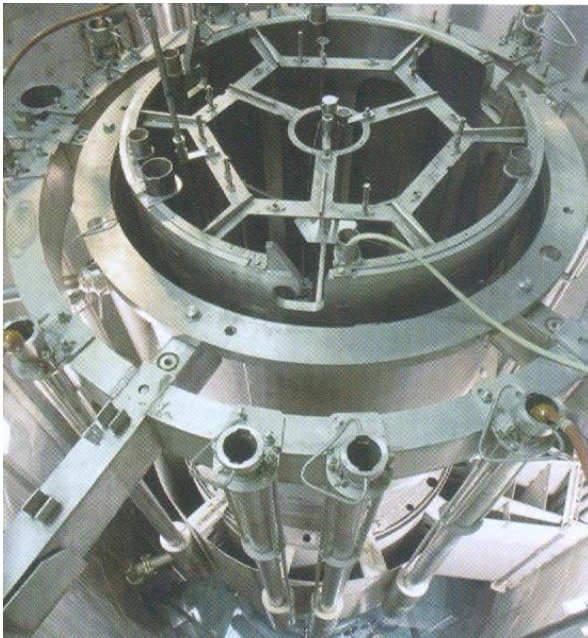
Стенд «АСТРА» в настоящее время является единственной в мире действующей экспериментальной установкой для исследований нейтронно-физических особенностей современных проектов ВТГР, разрабатываемых в нашей стране и за рубежом. В последнее время на стенде проводились эксперименты на критических сборках, моделирующих физические особенности реакторов с кольцевой активной зоной, таких как RBMR (разработка ЮАР) и ГТ-МГР (международный проект).



«АСТРА»

Критические сборки для корабельных реакторов

В настоящее время «в строю» остаются три критических стенда морского направления. Стенды «СФ-7» и «Дельта», введённые в эксплуатацию в 1975 году, являются идентичными многоцелевыми установками для проведения «холодных» экспериментов по физике транспортных реакторов. Стенд «Квант» - наиболее востребованный в настоящее время эталонный источник тепловых нейтронов ($10^6 \div 10^9$ нейтронов на см^2 в секунду).



Стенд «Квант»



Конгрессмены США и специалисты INEEL на стенде «Дельта»
в Курчатовском институте



Критические сборки для космических реакторов

Развитие работ космического направления потребовало запуска новой критсборки – единственной, построенной в Курчатовском институте в этом веке. Критическая сборка для исследования характеристик термоэмиссионного реактора-преобразователя «РП-50» была запущена в 2013 году и интенсивно эксплуатируется.

«РП-50»





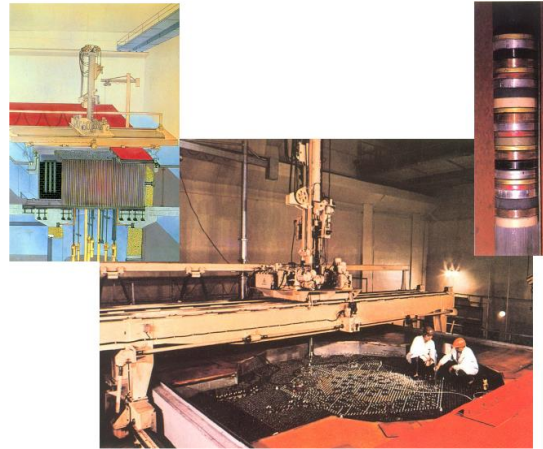
Российские критические сборки (кроме Курчатовского института)

Название стенда	Организация	Местонахождение	Год физпуска	Состояние
БФС-1	ФЭИ	Обнинск	1962	Модернизирован в 2016 г. с продлением срока эксплуатации до 2030 г.
БФС-2	ФЭИ	Обнинск	1969	Модернизирован в 2016 г. с продлением срока эксплуатации до 2035 г.
МАТР-2	ФЭИ	Обнинск	1963	Выведен из эксплуатации
АМБФ-2-1600	ФЭИ	Обнинск	1984	
ИКАР-С	ВНИИЭФ	Саров	2004	
ФКБН	ВНИИЭФ	Саров	1971 (2001)	Многократно модернизировался
ФКБН-2	ВНИИТФ	Снежинск	1958 (2000)	Многократно модернизировался
№ 4	МСЗ	Электросталь	1967	
№ 5	МСЗ	Электросталь	1967	
СТ-659	ОКБМ	Нижний Новгород	1963	
СТ-1125	ОКБМ	Нижний Новгород	1975	
МИР	НИИАР	Димитровград	1966	
СМ	НИИАР	Димитровград	1970	



Критические эксперименты в российских ядерных центрах

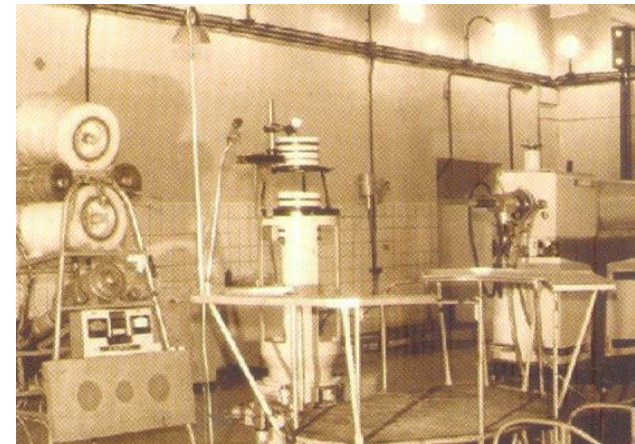
Практически все относительно простые по геометрии и составу российские критические эксперименты были выполнены в четырёх ядерных центрах: Институте атомной энергии им. Курчатова (ныне НИЦ «Курчатовский институт»), Физико-энергетическом институте (ФЭИ), Институте технической физики (ВНИИТФ) и Институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ). Значительное число этих экспериментов было переведено в класс эталонных и составляет существенную часть всемирного банка данных.



Стенды «БФС-1» (слева)
и «БФС-2» (справа), ФЭИ

Стенды «ФКБН-2М»,
ВНИИЭФ, г. Саров (слева)

и «ФКБН-2»,
ВНИИТФ, г. Снежинск (справа)

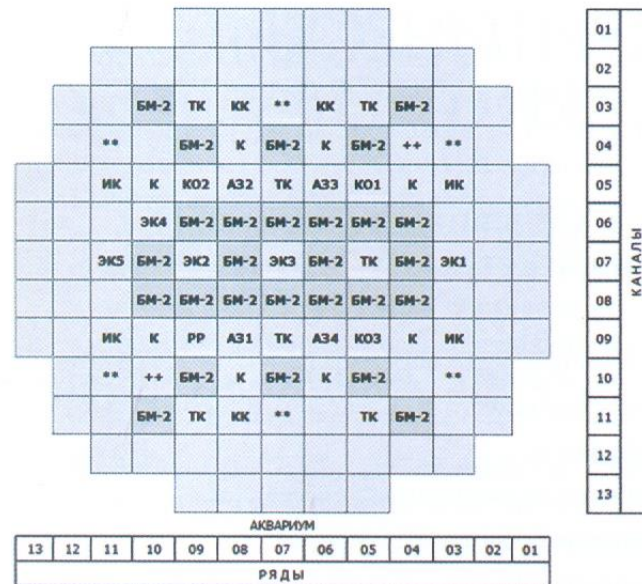


Критические сборки предприятий «Росатома»

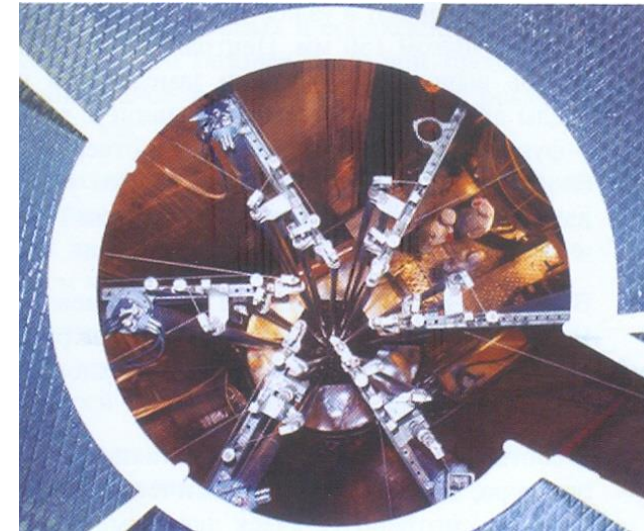
Критические сборки Машиностроительного завода (Электросталь) и ОКБМ «Африкантов» (Нижний Новгород) предназначены для проверки физических характеристик активных зон (или их фрагментов) энергетических или других ядерных реакторов. Это уран-графитовые реакторы и реакторы ВВЭР для АЭС, водо-водяные морские реакторы в холодном состоянии и при разогреве активной зоны до рабочей температуры внешним источником тепла. Критические сборки НИИАР представляют собой физические модели исследовательских реакторов МИР и СМ.



«СТ-659» (1963 г.)
ОКБМ «Африкантов»



Первый пуск критсборки в 1960 г.
Машиностроительный завод



Критсборка «МИР»
НИИАР

В нашей стране сохраняются все необходимые возможности для проведения критических экспериментов: сборки, ядерное топливо, контрольно-измерительное оборудование и высококвалифицированный персонал. Спрос на такие эксперименты – немногочисленные, но высокоточные и тщательно документированные – сохраняется благодаря продолжающимся разработкам новых реакторных установок, а также необходимости обеспечения безопасной эксплуатации уже существующих.

