

Опытная энергетическая установка БРГ-30 с газоохлаждаемым реактором на быстрых нейтронах и диссоциирующем теплоносителе

А. К. КРАСИН, В. Б. НЕСТЕРЕНКО, Л. И. КОЛЫХАН, Б. Е. ТВЕРКОВКИН, В. П. СЛИЗОВ, Ю. В. ШУФРОВ, Ж. Л. ГРЕБЕНЬКОВ, В. П. БУБНОВ, Б. И. ЛОМАШЕВ (СССР)

УДК 621.039.526

Широкое развитие ядерной энергетики возможно лишь на основе реакторов на быстрых нейтронах, которые позволяют вовлечь в топливный цикл все запасы ядерного горючего и организовать расширенное воспроизводство делящихся изотопов урана. Для обеспечения требуемых времен удвоения (6—8 лет), соответствующих темпам развития энергетики, необходимо увеличение энергонапряженности активной зоны до 400—800 *квт/л* и использование теплоносителей, не смягчающих спектр нейтронов в реакторе. Жидкометаллические теплоносители в целом удовлетворяют необходимым требованиям, но их применение в АЭС большой мощности приводит к усложнению схемы и увеличению капитальных затрат из-за несовместимости натрия с водой, наведенной активности, необходимости тщательной очистки от примесей, высокой температуры плавления и т. д. Поэтому в СССР и за рубежом [1, 2] ведутся интенсивные работы по созданию газоохлаждаемых реакторов на быстрых нейтронах с более простыми, чем натриевые, схемами преобразования тепла. Газовые теплоносители улучшают физические характеристики реактора и могут снизить стоимость оборудования и эксплуатации АЭС. Однако их применение требует решения сложных вопросов по обеспечению необходимого теплосъема с активной зоны, аварийного расхолаживания, герметичности контура при высоких давлениях.

Институт ядерной энергетики АН БССР совместно с некоторыми организациями и институтами работает над новым направлением в ядерной энергетике — применением диссоциирующих систем в качестве теплоносителей и рабочих тел АЭС. Выполненный комплекс исследований и проектные разработки показывают [3], что применение диссоциирующей четырехокиси азота (N_2O_4), обладающей положительными физико-химическими и теплофизическими свойствами: низкой температурой кипения и малой теплотой парообразования, большой плотностью в газовой фазе, радиационно-термической стойкостью, небольшой активацией и т. д. [4], позволяет создать АЭС по простой одноконтурной схеме с газожидкостным

циклом и газоохлаждаемым реактором на быстрых нейтронах.

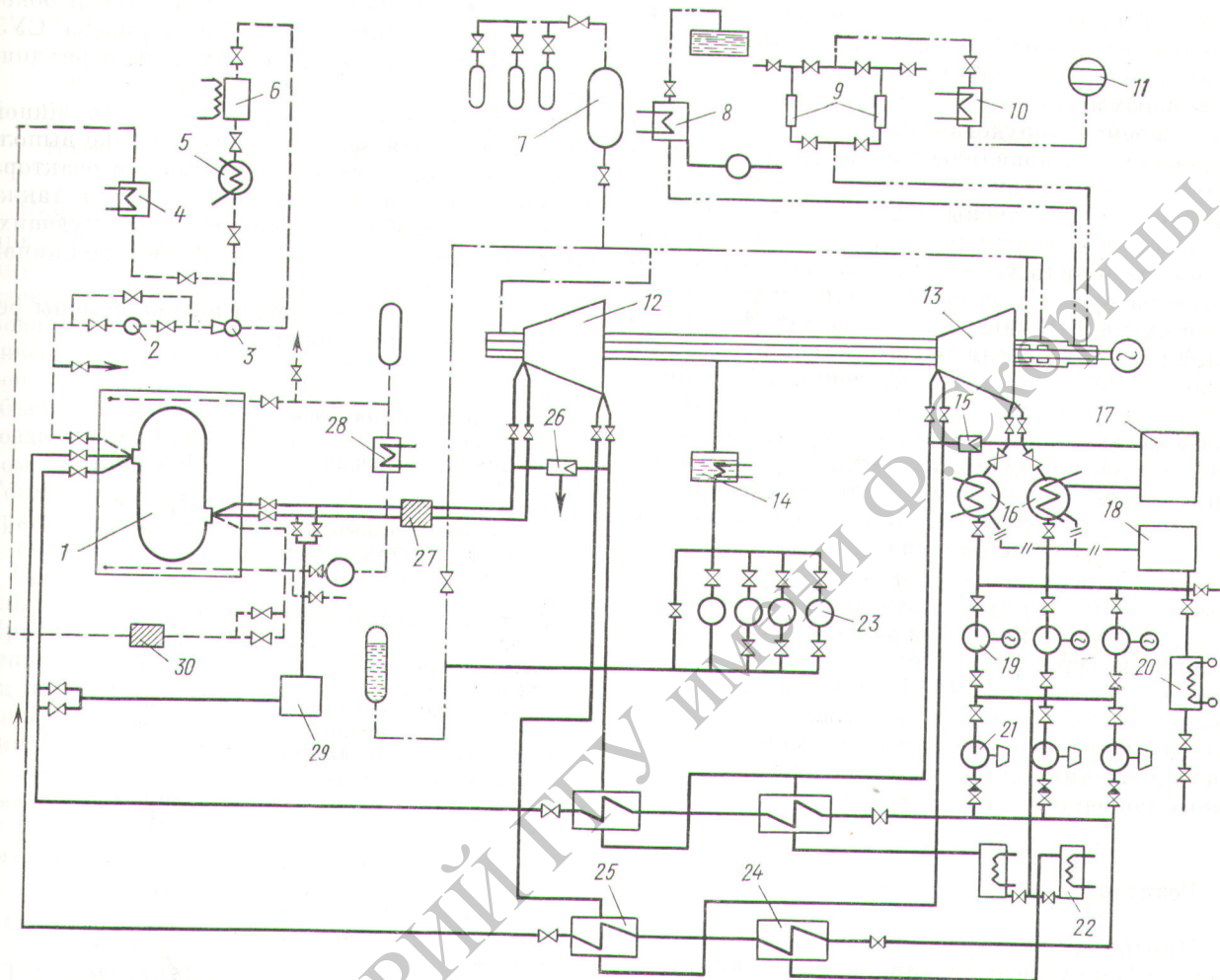
Увеличение коэффициентов теплопередачи благодаря высокой эффективной теплопроводности и теплоемкости, обусловленным теплотой химических реакций и концентрационным переносом тепла в неизотермической смеси, позволяет обеспечить при приемлемых давлениях (130—170 *ата*) и скоростях газа (30—50 *м/сек*) требуемый теплосъем с активной зоны и резко улучшить весо-габаритные показатели теплообменного оборудования. По сравнению с паровыми турбинами на N_2O_4 имеют в четыре — пять раз меньшую металлоемкость. При температурах 520—540°С и давлениях 130—170 *ата* к. п. д. цикла АЭС на N_2O_4 больше, чем в аналогичных простых циклах на CO_2 , H_2O , He и др.

Выполненные проработки показывают возможность существенного улучшения (на 20—30%) технико-экономических показателей АЭС с быстрыми газоохлаждаемыми реакторами на диссоциирующей четырехокиси азота по сравнению с АЭС на натриевом теплоносителе.

Опытная энергетическая установка с газоохлаждаемым реактором на быстрых нейтронах и диссоциирующем теплоносителе (БРГ-30) разрабатывается для ресурсных испытаний твэлов и систем реактора, отработки технологии нового теплоносителя, систем очистки и аварийного расхолаживания, накопления опыта эксплуатации основных узлов и агрегатов энергетического контура и решения вопросов, связанных с разработкой и уточнением рекомендаций по проектированию и эксплуатации АЭС большой мощности на данном теплоносителе.

При выборе физических и теплофизических параметров реактора и характеристик термодинамического цикла по температуре и давлению принималось, что установка БРГ-30 по энергонапряженности активной зоны (450—600 *квт*) при давлениях 130—150 *ата* и температурном режиме оболочек твэлов 720—740°С должна воспроизводить рабочие условия аналогичных реакторов большой мощности на 1000—2000 *Мвт* (эл.).

Для БРГ-30 выбран газо-жидкостный цикл с промрегенерацией и промотбором после тур-



Р и с. 1. Принципиальная технологическая схема:

1 — реактор; 2 — газодувка системы расхолаживания; 3, 11 — эжекторы; 4, 8 — охладители; 5, 10, 16 — конденсаторы; 6 — емкость заполнения; 7 — емкости системы смазки турбины; 9 — адсорбер; 12, 13 — части турбины высокого и низкого давления соответственно; 14 — емкость-холодильник; 15, 26 — БРОВ; 17 — система очистки теплоносителя; 18 — система вакуумирования; 19, 21 — насосы главного контура низкого и высокого давления соответственно; 20 — бак системы подпитки; 22 — охладитель для частичных режимов; 23 — насос системы подшипников; 24 — подогреватель; 25 — парогенератор; 27, 30 — фильтры механической очистки; 28 — конденсатор системы охлаждения биологической защиты; 29 — котел с огневым нагревом.

бины высокого давления. Последнее вызвано небольшой тепловой мощностью реактора и соответственно невысокими объемными расходами теплоносителя. Поэтому для получения приемлемой высоты лопаток турбины высокого давления и одноходовой конструкции активной зоны реактора введен промотбор с конденсацией теплоносителя в конденсаторе-подогревателе. Ниже приведены основные характеристики БРГ-30:

Тепловая мощность реактора 30 Мвт
 Электрическая мощность генератора 11 Мвт

Расход теплоносителя:
 через реактор 62 кг/сек
 через турбину низкого давления и конденсатор 38,2 кг/сек
 Тепловая мощность:
 регенератора $6,02 \cdot 10^7$ ккал/ч
 конденсатора-подогревателя $0,84 \cdot 10^7$ ккал/ч
 конденсатора $1,75 \cdot 10^7$ ккал/ч

Учитывая задачи, для решения которых создается БРГ-30, полученная величина к. п. д. (более 30%) вполне удовлетворительна.

Ввиду большого различия в давлениях по контуру установки, а также для обеспечения

большей простоты изготовления оборудования, улучшения условий проведения профилактических и ремонтных работ и замены для испытаний отдельных агрегатов принят контурный вариант размещения оборудования. Теплообменное оборудование устанавливается на двух автономных петлях главного контура. Параллельно турбинам подключены БРОУ. Это обеспечит возможность работы реактора при отключении одной из петель установки или остановке турбогенератора. Принципиальная технологическая схема БРГ-30 показана на рис. 1. Циркуляция теплоносителя осуществляется насосами низкого 19 и высокого давления 21, работающими на жидкой четырехокиси азота. После насосов высокого давления теплоноситель подается в две параллельные петли, где нагревается в конденсаторах-подогревателях 24, перегревается в регенераторах 25 и при температуре 402° С в газообразном виде поступает в реактор 1. Из реактора газ, пройдя через турбину высокого давления 12, поступает в регенераторы, далее часть потока из каждой петли направляется в турбину низкого давления 13, а из нее в конденсаторы 16. Примерно 38% теплоносителя отбирается в подогреватели, где он конденсируется и поступает в коллектор среднего давления между насосами низкого и высокого давлений.

Реактор

Продольный разрез реактора показан на рис. 2. Корпус реактора цилиндрический, крышки и днище эллиптические из стали 48ТС с плакировкой внутренней поверхности сталью Х18Н9. Внутренний диаметр (по цилиндрической части) 1400 мм, толщина стенки 125 мм. В цилиндрической части расположены два входных и два выходных патрубка для теплоносителя (с внутренним диаметром 150 мм). Движение теплоносителя в реакторе — сверху вниз. В верхней части корпуса расположены большая и малая поворотные пробки (6, 2), которые совместно с системой перегрузки позволяют осуществлять перегрузку кассет из активной зоны в зону выдержки и из реактора. На крышке реактора 3 размещены приводы поворотных пробок и механизма перегрузки.

Активная зона и боковой отражатель состоят из шестигранных кассет, образующих плотную упаковку. Кассеты хвостовиками устанавливаются в коллекторе 9. К коллектору снизу крепится корзина нижнего экрана, сверху уста-

навливается обечайка с вытеснителями и боковая защита корпуса реактора. Привода СУЗ размещены под реактором и введены через днище корпуса.

Материал отражателя — сталь толщиной 400 мм. Боковая защита корпуса также выполнена из стали. Защитой под крышкой реактора служит слой стали толщиной 480 мм, а также поворотные пробки, состоящие из чередующихся слоев стали и графита общей толщиной 1300 мм.

Основные характеристики активной зоны реактора приведены ниже:

Диаметр твэла	6,9 мм
Диаметр топливного сердечника	6,0 мм
Толщина оболочки твэла	0,4 мм
Шаг твэлов в треугольной решетке	7,6 мм
Число твэлов в кассете	37
Размеры кассеты «под ключ»	50 мм
Шаг кассет	51 мм
Толщина оболочки кассет	1,0 мм
Высота активной зоны	450 мм
Число кассет:	
в начале кампании	56
в конце кампании	68
Объемный состав активной зоны:	
топливо	46,5%
сталь	21%
теплоноситель	31%
гелиевый подслои в твэлах	1,5%
Загрузка урана (90%-ного обогащения)	151 кг
Глубина выгорания	10%
Кампания	430 суток
Коэффициент неравномерности:	
в начале кампании	1,15/1,12
в конце кампании	1,14/1,10
Максимальный поток нейтронов	$2,4 \cdot 10^{15}$ нейтр/см ² ·сек
Максимальный поток быстрых нейтронов ($E > 0,5$ Мэв)	$1,2 \cdot 10^{15}$ нейтр/см ² ·сек
Число стержней регулирования (в отражателе)	2
Число комплектов стержней	5
Число стержней аварийной защиты	2
Удельная энергонапряженность в начале кампании	502 квт/л
Максимальная температура оболочки твэлов с учетом факторов перегрева	727° С
Максимальная температура в центре топлива	2300° С

Средняя скорость теплоносителя:

в центре активной зоны	27,1 м/сек
на периферии активной зоны	16,2 м/сек
Средняя тепловая нагрузка твэлов	$1,215 \cdot 10^6$ ккал/м ² ·ч

Конструкции твэлов и кассет аналогичны принятым в реакторе БОР-60. Твэлы герметичные, в оболочке из стали ЭИ-847. В каждой кассете размещено по 37 твэлов с дистанционированием при помощи спирально навитой эллиптической проволоки. Вверху к оболочке приварен стальной отражатель с компенсирующим объемом, в котором при изготовлении твэлов создается избыточное давление для частичной компенсации внешнего давления теплоносителя. Топливо в виде таблеток спеченной двуокиси урана, обогащенной U^{235} до 90%, размещено в активной части твэла высотой 450 мм.

Средняя энергонапряженность активной зоны опытного реактора принята равной 500 кВт/л. При интенсификации теплообмена путем нанесения искусственной шероховатости на оболочки твэлов и т. д. энергонапряженность активной зоны без существенного изменения параметров цикла может быть увеличена до 700—800 кВт/л. В этом случае коэффициент теплопередачи на выходе из центральных твэлов повышается от $6 \cdot 10^3$ до 17^3 ккал/м²·ч при умеренных потерях давления в канале (3,0—3,5 кг/см²).

Оборудование главного контура

Турбина — одновальная, осевая, в одном литом корпусе с горизонтальным разъемом, однопоточными частями высокого и низкого давления и противоположным направлением движения газа для уменьшения осевых усилий; часть высокого давления (ч. в. д.) имеет семь ступеней, часть низкого давления (ч. н. д.) — одиннадцать. Рабочая скорость турбины (3000 об/мин) позволяет непосредственно соединить ее выходной вал с серийным генератором на 12 Мвт. Упорный и опорные подшипники — гидростатические, работающие на жидкой четырехокиси азота. На выходном конце вала кроме лабиринтных уплотнений установлены контактное и стояночное уплотнения. Подача жидкой четырехокиси азота для смазки подшипников, ее очистка и охлаждение осуществляются специальной системой смазки (см. 7, 14, 23 на рис. 1). Для обеспечения работы концевое уплотнения специальная система (см. 8—11

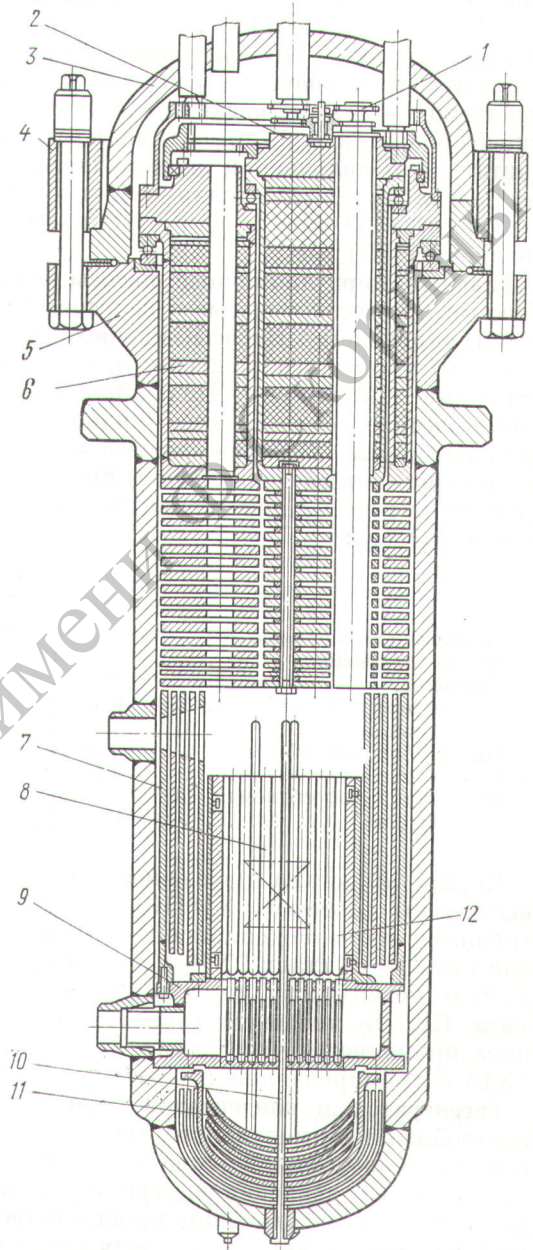


Рис. 2. Продольный разрез реактора БРГ-30:

1 — механизм перегрузки; 2 — малая поворотная пробка; 3 — крышка реактора; 4 — нажимной фланец; 5 — корпус реактора; 6 — большая поворотная пробка; 7 — боковая защита корпуса; 8 — кассета; 9 — коллектор; 10 — кассета регулирования; 11 — нижний экран; 12 — кассета экрана.

на рис. 1) производит сжатие, очистку и осушение воздуха.

Для корпуса турбины используется сталь X18H10TЛ, для ротора, рабочих и сопловых

лопаток — сталь ЭИ-612, для деталей уплотнений — сталь Х18Н10Т, сталь 3Х13 с хромовым покрытием и углеграфит АГ-1500.

Учитывая назначение опытной установки, небольшие объемные расходы газа и сниженное число оборотов против оптимальных, можно считать, что полученная экономичность турбины достаточно высока: для ч. в. д.—0,81 при мощности 6430 *квт* и для ч. н. д.—0,83 при мощности 4500 *квт*.

Главные циркуляционные насосы — центробежные, многоступенчатые с непосредственным электроприводом. Насосы низкого давления (н. н. д.) и высокого давления (н. в. д.) по конструкции аналогичны. Подшипники — гидродинамические, смазываются жидкой четырехокисью азота. Рабочие колеса — закрытые, с фрезерованными лопатками и приварным передним диском. Ниже приведены характеристики насосов:

	Н. н. д.	Н. в. д.
Производительность, <i>кг/сек</i>	19,1	31
Число ступеней	5	7
Давление:		
на входе, <i>кгс/см²</i>	1,4	60
на выходе, <i>кгс/см²</i>	60,5	147
Число оборотов, <i>об/мин</i>	2950	2950
К. п. д. насоса, %	52	53
Мощность, потребляемая насосом, <i>квт</i>	150	386

Корпус и детали проточной части насосов выполнены из сталей Х18Н10Т и Х18Н10ТЛ, трущиеся пары подшипников ротора и упорной пяты — из стали 9Х18 с повышенной твердостью поверхности и силицированного графита СГ. В концевом торцевом уплотнении пара применяется углеграфит АГ-1500 и сталь 3Х13 с хромированной рабочей поверхностью.

Регенератор и конденсатор-подогреватель — теплообменники модульного типа, противоточные, гладкотрубные, с движением теплоносителя высокого давления внутри труб, низкого давления — в межтрубном пространстве. Теплообменники различаются между собой числом параллельно включенных секций и длиной модулей. Корпус модуля U-образный, изготовлен из трубы размером 83 × 4 *мм*. В нем по треугольной решетке с шагом 15 *мм* расположены 19 труб размером 10 × 1 *мм*.

Суммарная площадь поверхности теплообмена двух регенераторов составляет 2500 *м²*, двух подогревателей — 604 *м²*. Каждый регенератор состоит из 57 секций, подогреватель — из 27 секций. В каждой секции последовательно со-

единены два одинаковых модуля. Одинаковая конструкция модулей подогревателя и регенератора и использование гладких труб упрощают технологию изготовления, однако это приводит к увеличению суммарных поверхностей нагрева. Применение модулей оптимальных типоразмеров с оребренными трубами при увеличении скорости газа позволяет в несколько раз сократить вес и размеры теплообменников.

Конденсаторы — обычной конструкции с горизонтальным пучком круглых гладких труб, с четырьмя ходами охлаждающей воды. Вода охлаждается в градирнях до расчетной температуры +20° С. На каждой петле установлен один конденсатор. Трубный пучок состоит из 4864 труб размером 21 × 1 *мм*, расположенных с треугольным шагом 32 *мм*. Общая площадь поверхности теплообмена конденсатора 1481 *м²*.

Для теплообменных аппаратов и трубопроводов применена сталь Х18Н10Т.

Положительные качества диссоциирующей N₂O₄ позволили сравнительно просто решить задачу аварийного расхолаживания реактора, которое проводится в три этапа. После отсечки главного контура производится кратковременная продувка реактора газом из баллона при помощи эжектора 3 с последующей конденсацией газа в конденсаторе 4. После пуска газодувки 2 осуществляется принудительная циркуляция газа с охлаждением в охладителе 4. После снижения остаточного тепловыделения и температуры оборудования реактора по заданной программе система переводится в режим длительного расхолаживания с естественной циркуляцией жидкой четырехокиси азота.

На рис. 1 (17) представлена одна из возможных схем очистки теплоносителя от жидких и твердых примесей, а также газообразных продуктов термического и радиационного разложения теплоносителя и продуктов деления. Очистка от жидких примесей основана на принципе массообмена, для очистки от газообразных примесей используется принцип деаэрации и вымораживания. Продукты коррозии и другие твердые частицы улавливаются в механических фильтрах. Отбор теплоносителя для очистки производится из конденсаторов в количестве примерно 1% от общего расхода.

Кроме указанных систем для обеспечения нормальной работы реактора предусмотрены системы вакуумирования 18, подпитки 20, водоснабжения и др.

Для сокращения сроков отладки технологического оборудования главного контура и вспомогательных систем, облегчения эксплуатации в предпусковой период, а также обеспечения работы одной из петель на неактивном теплоносителе параллельно реактору подключен котел с огневым нагревом 29. Котел мощностью 15 Мвт (т.) обеспечивает работу одной из петель при нормальных параметрах теплоносителя и неполной нагрузке турбины.

Перечень докладов, представленных на I секцию

Физические характеристики реактора В-3М.

Г. Я. Андрианов и др. (СССР)
Описываются эксперименты по определению физических характеристик уран-водных решеток, выполненные на стенде в ИАЭ им. И. В. Курчатова и на Ново-Воронежской АЭС при пуске второго блока.

Приводятся результаты измерения зависимости геометрического параметра V_0^2 и эффективности органов регулирования от концентрации борной кислоты в замедлителе при $t = 20^\circ \text{C}$. Измерены эффективности органов регулирования для трех модификаций полномасштабной активной зоны. Приводятся результаты экспериментов по безопасности активной зоны.

Описаны эксперименты по определению эффективности органов регулирования (дифференциальной и интегральной) в зависимости от температуры замедлителя и концентрации борной кислоты в замедлителе, выполненные непосредственно при пуске второго блока Ново-Воронежской АЭС.

Полученные экспериментальные результаты представляются весьма ценными для корректировки методик расчета при проектировании подобных реакторов.

О новых результатах исследовательских работ Центрального института ядерных исследований в Росендорфе в области физики реакторов (ГДР).

Работы, проводимые в Центральном институте ядерных исследований в области физики реакторов, направлены в основном на решение методических проблем. Из них следует отметить: 1) теоретические: расширение возможностей использования метода Монте-Карло для расчета ядерных реакторов; разработка программы для вычисления функций корреляции; проведение вычислений доплер-эффекта на основе функций пропускания; 2) экспериментальные: построение реакторного осциллятора с чувствительностью по реактивности $\Delta\rho \leq 10^{-8}$; опробование статистических методов измерения отрицательных реактивностей; рассмотрение возможностей улучшения контроля работы энергетических реакторов АЭС в процессе эксплуатации с использованием динамических методов; исследования зависящих от места кинетических эффектов в кольцевой активной зоне Росендорфского реактора типа РРР.

Основные эксплуатационные характеристики реактора второго блока Ново-Воронежской АЭС. Л. М. Воронин, Ф. Я. Овчинников, С. Н. Самойлов, Ю. В. Малков, В. К. Семенов, Ю. В. Марков, А. С. Духовенский, А. И. Беляев (СССР)

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник докладов Симпозиума СЭВ «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Т. 1, 2. Обнинск, 1967.
2. П. Фортескье. Доклад, представленный США на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. А. К. Красин и др. См. [1]. Т. 1, стр. 639.
4. А. К. Красин и др. Термодинамические и переносные свойства химически реагирующих газовых систем. Минск, «Наука и техника», 1967.

Опыт эксплуатации АЭС в Райнсберге. З. Менцель (ГДР)

Исследование радиационной обстановки — на первом и втором блоках Ново-Воронежской АЭС. В. Н. Миронов, Г. В. Мацкевич, П. В. Теплов, В. А. Казаков, Ю. А. Аккуратнов, С. Н. Самойлов, Ю. К. Гладков, В. Б. Добрынин (СССР)

Приведены результаты экспериментальных исследований. Дается теоретический анализ процессов, определяющих формирование радиационной обстановки на АЭС, в разных режимах эксплуатации.

Доклад охватывает следующие вопросы: биологическую защиту и создание специального контейнера для проведения профилактического осмотра корпуса реактора первого блока Ново-Воронежской АЭС; исследование процессов накопления продуктов деления ядерного топлива в первом контуре ВВЭР и разработку математической модели этих процессов; влияние очистки теплоносителя на образование радиоактивных отложений по первому контуру и аналитические зависимости, определяющие характер накопления радиоактивных отложений Co^{60} в системе первого контура.

На основании выполненных исследований и расчетов рекомендуется комплекс мероприятий по улучшению радиационной обстановки в режимах нормальной эксплуатации АЭС, а также при выполнении профилактических осмотров оборудования и проведения ремонтных работ.

Перспективы развития корпусных кипящих реакторов с естественной циркуляцией теплоносителя. И. Н. Соколов, В. И. Барыбкин, И. А. Филатьев, В. П. Евстигнеев (СССР)

Рассматриваются вопросы гидродинамики контура естественной циркуляции реактора корпусного типа. Показано, что применение искусственных мер по выравниванию энерговыделения позволяет достичь средних удельных напряженностей до $60-70 \text{ кат/л}$. Показано также, что при высоких средних паросодержаниях ограничивающим фактором является запас до кризиса теплообмена, а не резонансная неустойчивость активной зоны.

Использование внутренних ресурсов кипящего реактора (подача в различные части активной зоны воды с различным недогревом, перестановка кассет, самовыравнивание поля энерговыделения по мере выгорания, применение искусственных мер снижения объемного паросодержания) позволяет заметно увеличить глубину выгорания топлива.