

Ж 53  
А99

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

# Атомная энергия

Ежемесячный журнал  
ГОД ИЗДАНИЯ ТРИНАДЦАТЫЙ

АТОМИЗДАТ ■ МОСКВА ■ 1968

Том 24 ■ Апрель ■ Вып. 4

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙБУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМИРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО

### СОДЕРЖАНИЕ

#### СТАТЬИ

- А. К. Красин, И. И. Саламатов, В. Б. Нестеренко, А. Н. Девойно. Развитие исследований в Институте ядерной энергетики АН БССР . . . . . 307
- С. Т. Конобецкий, Б. М. Левитский, Л. Д. Пантелеев. К вопросу о механизме радиационного роста урана при малых дозах облучения . . . . . 312
- В. И. Векслер, В. П. Саранцев, А. Г. Бонч-Осмоловский, Г. В. Долбляев, Г. А. Иванов, И. Н. Иванов, М. Л. Ионович, И. В. Кожухов, А. Б. Кузнецов, В. Г. Маханьков, Э. А. Перельштейн, В. П. Рашевский, К. А. Решетникова, Н. Б. Рубин, С. Б. Рубин, П. И. Рыльцев, О. И. Ярковой. Коллективное линейное ускорение ионов . . . . . 317
- В. П. Дзюленов, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолотчиков, В. В. Кольга. Кольцевой циклотрон с жесткой фокусирующей для многозарядных ионов 323
- В. В. Арсенин, В. А. Чуянов. О возможности подавления дрейфовой неустойчивости неоднородной плазмы с помощью системы обратных связей . . . . . 327
- В. М. Бондаренко, Г. Г. Викторов, А. Г. Тархов. Об использовании космического излучения для оценки эффективности биологических защит . . . . . 330
- С. Н. Барков. Многогрупповой аналитический метод расчета гетерогенного ядерного реактора . . . . . 335
- П. Т. Потапенко. Предельная оценка качества внутриреакторного контроля нейтронного потока . . . . . 340
- Д. М. Каминкер, К. А. Коноплев, Ю. П. Семенов, В. Д. Тренин. Поведение продуктов радиолиза при работе реактора ВВР-М без системы дегазации 343
- В. А. Жарков, В. П. Терентьев, Г. М. Фрадкин. Получение топлива изотопных электрогенераторов методами нейтронного облучения . . . . . 348
- Ю. В. Рябов, Со Дон Сик, Н. Чиков, Н. Янева. Измерение отношения сечений радиационного захвата и деления для  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  в резонансной области энергий нейтронов . . . . . 351

- В. А. Афанасьев, Б. В. Кебадзе, Г. А. Санковский, В. И. Грицков, И. Н. Соколов, Л. А. Адамовский, С. А. Маркин. Экспериментальное исследование устойчивости корпусного кипящего реактора ВК-50 363

#### АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

- Д. П. Осанов, В. П. Панова, Г. Б. Радзиевский. Измерение дозовых факторов накопления для точечных изотропных источников  $\gamma$ -излучения низкой энергии в воде 368
- В. А. Жарков, Т. П. Зорина, Г. М. Фрадкин. Самоэкранирование тепловых нейтронов в конечных цилиндрах и телах других геометрий . . . . . 369
- И. Н. Бриккер, В. П. Астафьев, А. Р. Мирзоян. Обращенное решение тепловых уравнений двухкомпонентного ядерного реактора . . . . . 370
- С. Ф. Дегтярев, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственные, угловые и энергетические распределения быстрых нейтронов в гидриде лития, воде, вольфраме и карбиде бора 370
- С. Ф. Дегтярев, В. Б. Староверов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Экспоненциальные угловые коэффициенты нейтронов для неводородсодержащих сред 372
- В. К. Даруга, С. Ф. Дегтярев, В. И. Кухтевич, А. Н. Николаев, В. П. Подиванский, Б. И. Синицын, А. П. Суворов, В. В. Тарасов, В. К. Тихонов, С. Г. Цыпин. Пространственно-энергетические и угловые распределения нейтронов в литии . . . . . 372
- С. М. Рубанов, В. И. Титов, Л. С. Шкорбатова. Расчет защиты контура с циркулирующим горючим . . . . . 373
- В. Д. Горяченко. Акустическая неустойчивость ядерного реактора . . . . . 374
- В. Д. Горяченко, Е. Ф. Сабаев. Акустические колебания в реакторе с циркулирующим газообразным горючим . . . . . 375
- В. Д. Горяченко, В. А. Денисов, Ю. Ф. Трунин. Влияние изменения плотности делящегося вещества на устойчивость реактора с циркулирующим горючим 376
- В. С. Шулепин. Применение асимптотического  $P_N$ -приближения для расчета ячейки . . . . . 376

235607

225307/м



РГ

## Экспериментальное исследование устойчивости корпусного кипящего реактора ВК-50

В. А. АФАНАСЬЕВ, Б. В. КЕБАДЗЕ, Г. А. САНКОВСКИЙ, В. И. ГРИЦКОВ,  
И. Н. СОКОЛОВ, Л. А. АДАМОВСКИЙ, С. А. МАРКИН

УДК 621.039.514+621.039.524

Безопасность работы и предельно допустимые мощности ядерной энергетической установки в значительной степени определяются ее устойчивостью. Это особенно существенно для кипящих реакторов [1, 2]. Глубокая отрицательная обратная связь по паросодержанию обеспечивает саморегулирование мощности реактора в определенных диапазонах мощностей и давлений, но в то же время может стать причиной неустойчивости реактора при наличии соответствующих фазовых сдвигов в разомкнутой цепи. Явления неустойчивости, ограничивающие предельную мощность, наблюдались на кипящих реакторах [1, 3] и теоретически рассмотрены, например, в работах [4–6].

Исследование устойчивости реактора ВК-50 [7] проводилось с использованием метода периодических возмущений (осцилляция реактивности) и статистических методов; на некоторых режимах граница зоны стабильной работы реактора определялась непосредственно: мощность реактора поднималась до значений, при которых возникали автоколебания.

### Эксперименты по осцилляции реактивности

Передачная функция реактора от внешней реактивности к относительным изменениям мощности  $W$  является наиболее точным инструментом при изучении устойчивости реактора.

$$W = \frac{W_0}{1 + W_0 W_m},$$

где  $W_0$  — передачная функция реактора нулевой мощности;  $W_m$  — передачная функция цепи обратной связи, характеризующая мощностью коэффициент реактивности как функцию частоты.

В качестве осциллятора реактивности применялась центральная компенсирующая каскада со штатным приводом, что ограничивало верхний предел по частоте осцилляции 0,9 гц.

Применение анализатора передаточных функций позволило получить передаточную функцию реактора, несмотря на высокий уровень шумов; точность достигалась путем многократного анализа исследуемого параметра [8].

На рис. 1, а, б приведены амплитудно-частотные характеристики по каналу «реактивность — мощность» для различных режимов. Фазовые характеристики не приводятся ввиду значительных фазовых погрешностей в диапазоне высоких частот, что было выявлено при осцилляции реактивности на нулевой мощности.

Ход частотных характеристик качественно соответствует ожидаемому. Модуль передаточной функции растет с повышением частоты по мере ослабления «тепловых» обратных связей и образует резонансный пик в области частот

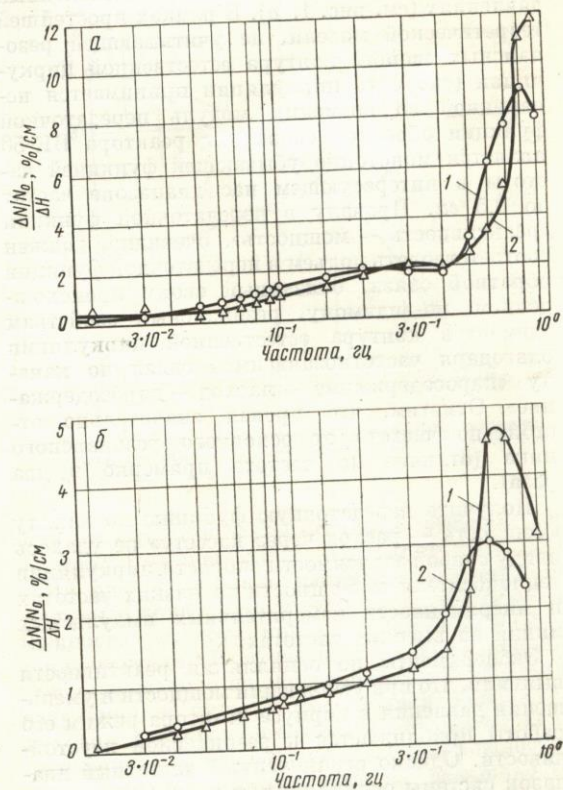


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика реактора ВК-50 по каналу «реактивность-относительная мощность» (осцилляция кассетой КК-3):  
а — давление  $P = 40$  ага (1 —  $N_{\text{тепл}} = 60$  Мвт; 2 —  $N_{\text{тепл}} = 80$  Мвт;  $H = 400$  мм); б — мощность  $N_{\text{тепл}} = 80$  Мвт (1 —  $P = 60$  ага; 2 —  $P = 80$  ага;  $H = 700$  мм).

0,7—0,8 *гц*, предшествующий переходу к передаточной функции реактора нулевой мощности при  $|W_0 W_m| \ll 1$ .

Крутизна и высота резонансного пика в области частот 0,7—0,8 *гц* возрастают с увеличением мощности при постоянном давлении в связи с увеличением коэффициента передачи по цепи обратной связи (см. рис. 1, а). Аналогичную тенденцию проявляют частотные характеристики при постоянной мощности и уменьшении давления, что указывает на приближение к границе неустойчивости при снижении давления (см. рис. 1, б). При этом резонансный пик с уменьшением давления смещается в область больших частот, что связано с уменьшением времени нахождения пара в активной зоне.

Интересной особенностью частотной характеристики является «провал» на частоте примерно 0,4 *гц*, проявляющийся при пониженных давлениях (см. рис. 1, а). В рамках простейшей теоретической модели, не учитывающей резонансных свойств контура естественной циркуляции (скорость циркуляции принимается неизменной во времени), модуль передаточной функции обратной связи для реактора ВК-50 является монотонно убывающей функцией частоты в интересующем нас диапазоне частот до 0,5 *гц*. Провалу в передаточной функции «реактивность — мощность», очевидно, должен соответствовать подъем в передаточной функции обратной связи, обязанный своим происхождением, по-видимому, резонансным свойствам элементов контура естественной циркуляции благодаря частотнозависимой связи по каналу «паросодержание — расход — паросодержание». Отметим, что провал значительно отстоит по частоте от основного резонансного пика (отличие по частоте примерно в два раза).

Получить передаточную функцию по каналу «мощность — расход через кассету» не удалось ввиду слабой зависимости скорости циркуляции теплоносителя от мощности на низких частотах и инерционности измерительных импульсных линий на высоких частотах.

Эксперименты по осцилляции реактивности выявили, что при увеличении мощности и уменьшении давления в корпусе реактора режим его работы приближается к резонансной неустойчивости. Однако ограниченный частотный диапазон системы осцилляции, а также отсутствие данных по дифференциальной эффективности регулирующих стержней не позволили получить количественной оценки запаса устойчивости реактора.

364

Как уже отмечалось, большое по модулю значение отрицательного мощностного коэффициента реактивности и фазовые сдвиги, обусловленные многозвенностью цепи обратной связи, могут привести к возникновению незатухающих колебаний мощности. Граница устойчивости по мощности, очевидно, снижается, если постоянные времени, характеризующие отвод тепла из твэла, смещение точки закипания и распространение возмущения в испарительном участке — суть величины, близкие друг к другу [1, 2]. Постоянные времени твэла реактора ВК-50 заметно превышает остальные постоянные времени, что должно способствовать повышению устойчивости. С другой стороны, высокое объемное паросодержание в активной зоне реактора ВК-50, связанное с низкой скоростью циркуляции, приводит к большому значению парового, а следовательно, мощностного коэффициента реактивности, что снижает порог устойчивости.

На основе экспериментальных данных по статическим режимам были сделаны некоторые оценки, при проведении которых авторы следовали в основном теоретической модели, описанной в работе [4]. По этим оценкам, при давлении теплоносителя 30 *ата* реактор оказался неустойчивым на мощности около 100 *Мвт* при частоте резонанса примерно 1 *гц*; коэффициент передачи по цепи обратной связи, определяемой в основном паровым коэффициентом реактивности, составил примерно —0,2% на процент изменения мощности при нулевой частоте. Очевидно, для меньших давлений теплоносителя граница устойчивости по мощности должна лежать ниже вследствие увеличения коэффициента передачи по цепи обратной связи (по паросодержанию), что подтверждается экспериментами.

#### Определение порога устойчивости

Предварительные данные показали, что граничная с точки зрения устойчивости мощность реактора лежит ниже уровня критических тепловых нагрузок. Это позволило определить порог стабильной работы реактора путем увеличения его мощности до возникновения незатухающих колебаний. Контроль за динамическим поведением реактора осуществлялся благодаря непрерывному наблюдению за флуктуациями основных параметров.

Эксперименты по определению граничной мощности были проведены для давлений в аппарате 25, 30, 35 и 40 *ата*. Мощность реактора посте-

ленно повышалась путем извлечения регулирующих стержней с шагом 5 мм. На некоторых промежуточных значениях мощности проводилась тщательная стабилизация режима работы реактора для снятия статических данных и записи флуктуаций основных параметров.

Флуктуации параметров, зарегистрированные на лентах быстродействующих самописцев или при помощи цифрового вольтметра с печатающей приставкой, обрабатывались на машине БЭСМ-3М.

На рис. 2 показаны спектральные плотности сигналов ионизационных камер при давлении в аппарате 30 атм и мощностях 60 и 74 Мвт. Спектральные плотности получены фурье-преобразованием автокорреляционных функций с последующим сглаживанием с помощью «треугольной» весовой функции:

$$S(f_i) = \frac{1}{9} S'(f_{i-2}) + \frac{2}{9} S'(f_{i-1}) + \frac{1}{3} S'(f_i) + \frac{2}{9} S'(f_{i+1}) + \frac{1}{9} S'(f_{i+2}).$$

Характерный пик спектральной плотности при частоте резонанса 0,7 гц растет с повышением мощности, что отражает свойства передаточной функции реактора. Для выявления степени близости реактора к границе неустойчивости велись наблюдения за сигналом ионизационной камеры в диапазоне частот 0,3—2 гц. Более низкие и высокие частоты подавлялись с помощью фильтров. При этом автокорреляционная функция флуктуаций нейтронной мощности реактора, близкого к области резонансной неустойчивости, хорошо описывается экспоненциально-косинусоидальной функцией вида

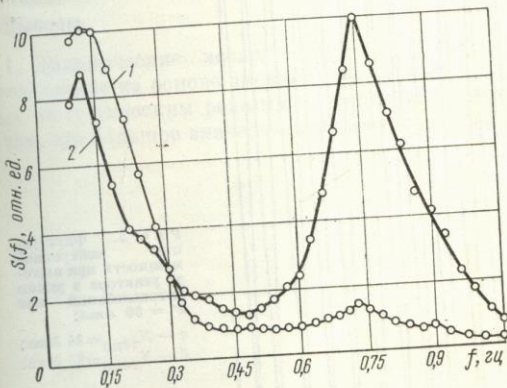


Рис. 2. Спектральные плотности  $S(f)$  флуктуаций нейтронной мощности при  $P = 30$  атм:  
1 —  $N_{\text{тепл}} = 60$  Мвт, стандартное отклонение 1,8%; 2 —  $N_{\text{тепл}} = 74$  Мвт, стандартное отклонение 2,3%.

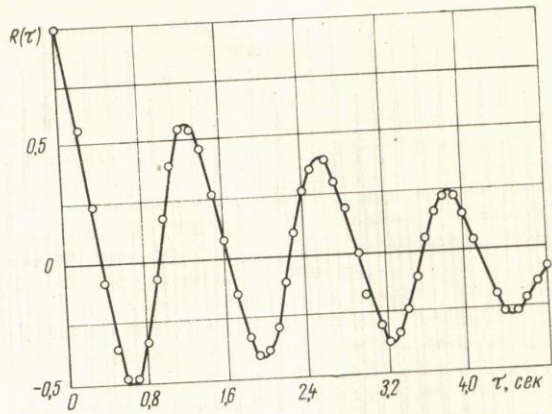


Рис. 3. Автокорреляционная функция  $R(\tau)$  флуктуаций нейтронной мощности при  $N_{\text{тепл}} = 55$  Мвт,  $P = 25$  атм.

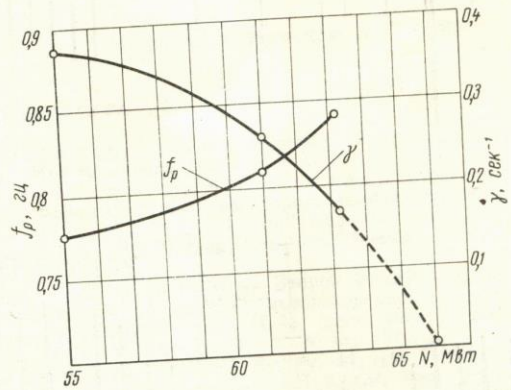
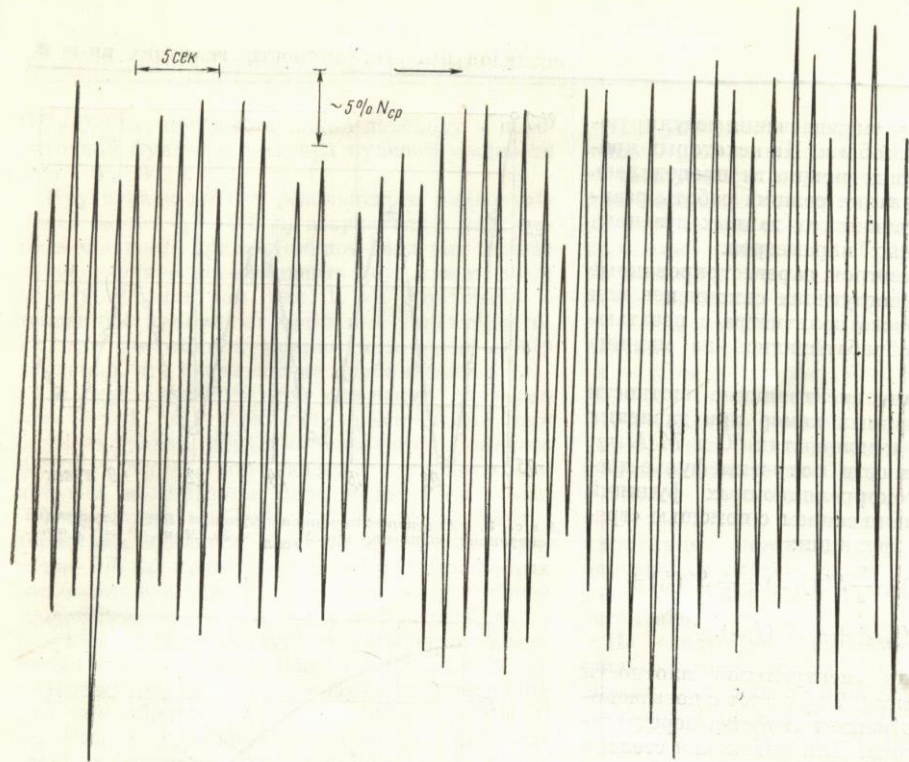


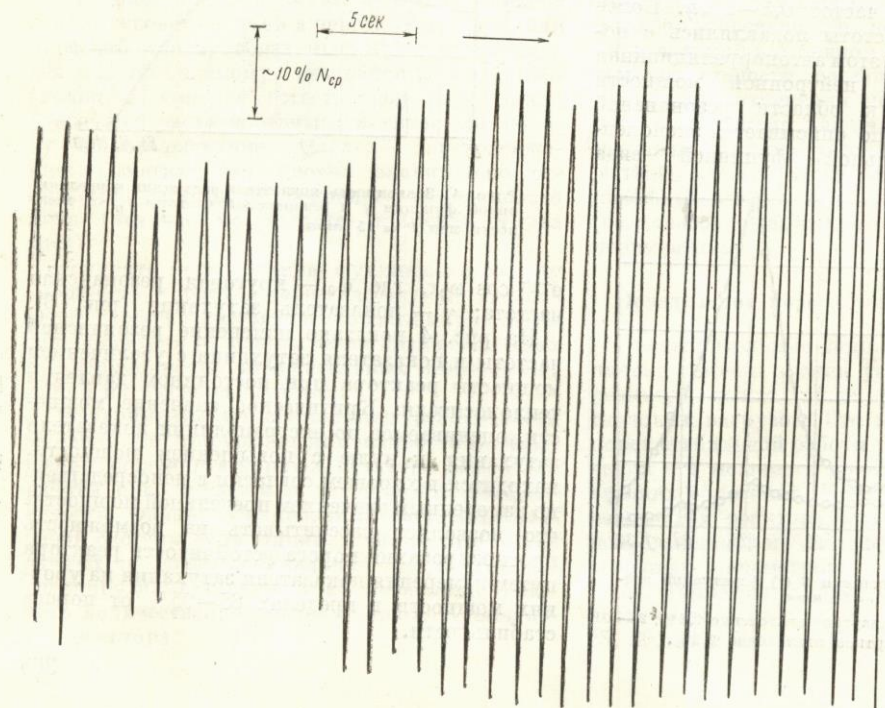
Рис. 4. Зависимость показателя затухания корреляционной функции  $\gamma$  и резонансной частоты  $f_p$  от мощности при  $P = 25$  атм.

$e^{-\gamma/\tau} \cos \omega_0 \tau$ , где  $\omega_0$  — круговая резонансная частота;  $\gamma$  — показатель затухания (рис. 3).

На рис. 4 показано изменение резонансной частоты и показателя затухания с увеличением мощности реактора при постоянном давлении теплоносителя. Критическое значение мощности, оцениваемое по экстраполяции показателя затухания к нулю с повышением мощности, находится в хорошем согласии с непосредственно измеренным значением предельной мощности, что позволяет рассчитывать на возможность прогнозирования порога устойчивости реактора путем измерения показателя затухания на уровнях мощности в пределах 85—95% от порога стабильности.



a



б

Р и с. 5. Флуктуации нейтронной мощности при выходе реактора в режим автоколебаний при  $P = 30 \text{ ата}$ :  
 а —  $N_{\text{тепл}} = 84 \text{ Мвт}$ ;  
 б —  $N_{\text{тепл}} = 85 \text{ Мвт}$ .

Представленные на рис. 5 записи флуктуаций мощности реактора иллюстрируют приближение режима его работы к порогу устойчивости и выход в режим автоколебаний. Амплитуда незатухающих колебаний составляет 25—30% от среднего уровня мощности. При введении реактивности, достаточной для превышения предельного значения мощности, амплитуда колебаний экспоненциально растет.

Выход из автоколебательного режима осуществлялся путем снижения мощности с помощью поглотителей и одновременным подъемом давления дроссельными клапанами на паропроводах.

Основные параметры активной зоны реактора при граничных значениях мощности приведены в таблице.

Основные параметры реактора ВК-50 при граничных значениях мощности

Номер опыта	Дата проведения опыта	Давление теплоносителя, ата	Мощность, Мвт	Положение поглотителей, мм	
				АР-1	КК-3
1	14/II 1967 г.	25	65,5	620	650
2	16/I 1967 г.	30	85	905	0
3	10/II 1967 г.	35	95	810	530
4	15/II 1967 г.	41	105	793	650

Примечание.  
1. В опытах 1, 2, 4 мощность повышали путем перемещения стержня АР-1, в опыте 3 — стержня КК-3.  
2. Значения остальных параметров оставались примерно постоянными: среднее объемное паросодержание  $\varphi=50\%$ ; средняя скорость циркуляции теплоносителя  $w=0,48+0,52$  м/сек; соответствующие ей расходы теплоносителя  $G=2000$  м/ч.  
3. Высота активной зоны  $L=2000$  мм.

#### Выводы

1. Динамические исследования и расчеты, проведенные на основе экспериментальных данных по статическим режимам, свидетельствуют о том, что большое значение мощностного коэф-

фициента реактивности, связанное с высоким объемным паросодержанием, представляет собой основную причину возникновения неустойчивости в работе реактора ВК-50. Резонансные свойства контура естественной циркуляции или отдельных его элементов играют второстепенную роль.

2. Показатель затухания корреляционной функции флуктуаций нейтронной мощности может быть эффективно использован для прогнозирования границы устойчивости.

3. Экспериментально полученные граничные значения мощности дали важную информацию для корректировки теоретической модели неустойчивости, что позволяет экстраполировать полученные данные на область более высоких давлений.

Авторы выражают признательность В. И. Плотинскому, В. В. Даненбергу и И. П. Сергееву за полезные обсуждения результатов экспериментов.

Поступила в Редакцию 5/IX 1967 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Крамер. Ядерные реакторы с кипящей водой. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. А. Я. Крамеров, Я. В. Шевелев. Инженерные расчеты ядерных реакторов. Атомиздат, 1965.
3. E. Wilmunc et al. Conference on Operating experience with power Reactors. Vienna, IAEA, 1963, CN-15/3.
4. Дж. Тай. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Избр. докл. иностр. ученых. Т. 3. М., Атомиздат, 1959, стр. 575.
5. J. Fleck. J. of Nucl. Energy, 11, 114 (1960).
6. И. П. Сергеев. «Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн.», № 2, 1965.
7. И. Н. Соколов и др. Доклад № 306, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
8. В. Г. Атаманико. «Приборостроение», № 5, 13 (1962).

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скорины