

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. ЛЕЙПУНСКИЙ, 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. Конобеевский, 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. Долбильов, Г. А. Иванов, И. Н. Иванов, М. Л. Иовнович, 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. Дзелепов, В. П. Дмитриевский, Б. И. Замолотчиков, В. В. Кольга. Кольцевой циклотрон с жесткой фокусировкой 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 внутри-реакторного 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. Сапковский, 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 γ -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

225304/м



РГ

данные по обратному выходу нейтронов из бетона и железа, взятые из работы [3], при падении на защиту нейтронов высокой энергии, вылетающих из бериллиевой мишени под углом 0° , при бомбардировке ее протонами с энергией 660 Мэв [11]. Провести корректное сравнение результатов расчета и эксперимента не представляется возможным ввиду отсутствия информации о минимальной энергии вылетающих каскадных нейтронов, а также из-за условности разделения по энергии испарительных и каскадных нейтронов. Завышение экспериментальных данных по обратному выходу быстрых нейтронов, по-видимому, объясняется тем, что в расчетах не учитывался фактор первоначального накопления быстрых нейтронов. По данным работы [10], этот фактор, например, для алюминия составляет 2,5.

Авторы выражают признательность Ю. М. Казаринову за ценные советы и замечания.

Поступило в Редакцию 18/X 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Прайс, К. Хортон, К. Спинни. Защита от ядерных излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1959.

2. G. Blazeg. Proceedings International Conference on Spector-focused Cyclotrons and Meson Factories, CERN 63-19, 29 May 1963, p. 157.
3. Л. Р. Кимель и др. В сб. «Вопросы дозиметрии и защиты от излучений». Вып. 6. М., Атомиздат, 1967, стр. 33.
4. Б. С. Сычев и др. «Атомная энергия», 20, 323 (1966).
5. Б. С. Сычев. Препринт ОИЯИ Р9-3269. Дубна, 1967.
6. S. Lindenbaum. Annual Rev. Sci., 11, 213 (1961).
7. Б. С. Сычев. В сб. «Вопросы дозиметрии и защиты от излучений». Вып. 8. М., Атомиздат, 1968.
8. В. И. Кочкин и др. Препринт Р-1713. Дубна, 1964.
9. N. Metropolis et al. Phys. Rev., 110, 185 (1958).
10. Бродер и др. Бетон в защите ядерных установок. М., Атомиздат, 1966.
11. М. М. Комочков. Препринт ОИЯИ Р-1349. Дубна, 1963.

Об устойчивости стационарного режима энергетического реактора

УДК 621.039.51.514

И. С. ПОСТНИКОВ

Одним из наиболее распространенных приближенных методов исследования устойчивости пространственного распределения нейтронов в энергетических реакторах является метод гармоник [1—3]. Существенный недостаток этого метода — отсутствие оценок погрешности. В этом отношении второй метод Ляпунова имеет преимущество даже при анализе устойчивости «в малом», поскольку критерии устойчивости, получаемые при его использовании, являются достаточными.

В работе [4] при помощи второго метода Ляпунова исследуется устойчивость стационарного режима энергетического реактора в одногрупповом диффузионном приближении. В этой работе при наличии местной обратной связи мощность — реактивность, описываемой системой линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, получен достаточный критерий устойчивости¹. В настоящей работе рассматривается аналогичная задача для малых отклонений зависимых переменных от их значений в стационарном режиме. При использовании метода матричных неравенств В. А. Якубовича [5] были уточнены результаты работы [4].

Рассмотрим энергетический реактор без отражателя с неподвижным горючим. Принимая коэффициент диффузии постоянным, для описания динамики такого реактора будем использовать уравнения одногруппового диффузионного приближения [1, 6]. Предположим, что в каждой точке реактора \mathbf{r} зависимость между Φ и δk описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений с коэффициентами, не зависящими от времени. Поскольку время жизни мгновенных ней-

тронов намного меньше постоянных времени любых других процессов в реакторе, при исследовании устойчивости временем жизни мгновенных нейтронов можно пренебречь [1]. С учетом сделанных выше предположений задача об устойчивости «в малом» стационарного режима работы реактора на саморегулировании сводится к исследованию устойчивости нулевого решения системы уравнений¹:

$$A\varphi + \sigma = 0, \quad \mathbf{r} \in \Omega; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = P\mathbf{x} + q\varphi, \quad \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n); \quad (2)$$

$$\sigma = \tilde{b}\mathbf{x}$$

с краевым условием

$$\varphi + a(\mathbf{r})(\nabla\varphi, \mathbf{n}) = 0 \quad \text{при } \mathbf{r} \in \Gamma. \quad (3)$$

Здесь A — симметрический оператор:

$$A\varphi = -M^2\nabla^2\varphi + M^2\frac{\nabla^2\Phi^*}{\Phi^*}\varphi + \beta\varphi;$$

$\Phi = \Phi - \Phi^*$; Φ — поток нейтронов; \mathbf{r} — радиус-вектор; Ω — область активной зоны реактора; Γ — граница области Ω ; \mathbf{n} — внешняя нормаль к поверхности Γ ; β — доля запаздывающих нейтронов; звездочкой отмечены значения зависимых переменных в стационарном режиме. Элементами вектора \mathbf{x} являются величины $C_i - C_i^*$ (C_i — концентрация источников запаздывающих нейтронов) и зависимые переменные местной обратной связи мощность — реактивность. В общем

¹ Здесь и ниже $P = \nu \times \nu$ — матрица; $q, b, \mathbf{x} = -\nu \times \mathbf{1}$ — вектор-столбцы; \tilde{P} — транспонированная матрица; φ — скаляр; I — единичная матрица.

случае элементы матрицы P , а также векторов q и b могут зависеть от r .

Устойчивость нулевого решения краевой задачи (1) — (3) будем рассматривать по норме

$$\rho(t) = \left\{ \int_{\Omega} \left[\sum_{j=1}^{\nu} x_j^2 \right] d\Omega \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

Преобразуем систему (2) по Лапласу при нулевых начальных условиях и найдем коэффициент передачи

$$K(p, r) = -\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varphi}} = \tilde{b}(pI - P)^{-1}q, \quad (5)$$

где p — параметр преобразования Лапласа; $\bar{\sigma}$ и $\bar{\varphi}$ — изображения по Лапласу переменных σ и φ . Введем функцию

$$\chi(r, \vartheta) = -\inf_{\omega \in [0, \infty)} \operatorname{Re} K(j\omega, r) \left(1 + \frac{j\omega}{\vartheta}\right) + \varepsilon(r), \quad (6)$$

где $\vartheta(r)$ — некоторая функция r ; $\varepsilon(r) > 0$ при всех $r \in \Omega$ и $\|\varepsilon(r)\|$ сколь угодно мала. Решение задачи об устойчивости нулевого решения краевой задачи (1) — (3) определяет следующая теорема.

Теорема. Пусть система (2) такова, что при всех $r \in \Omega$ матрица P является гурвицевой (уравнение $\det \|pI - P\| = 0$ имеет все корни в открытой левой полуплоскости). Тогда для асимптотической устойчивости по норме (4) нулевого решения краевой задачи (1) — (3) достаточно, чтобы существовала такая функция $\vartheta(r)$, не меняющая знак при $r \in \Omega$, при которой функционал

$$W[\varphi] = \int_{\Omega} |\vartheta(r)| \{A\varphi - \chi(r, \vartheta)\varphi\} \varphi d\Omega \quad (7)$$

был определенно положительным.

Доказательство. Заменяем уравнения (1) выражением

$$A\varphi + h\sigma = 0, \quad h = \operatorname{const} > 0, \quad (8)$$

которое совпадает с уравнением (1) при $h=1$. Рассмотрим функционал

$$V = \int_{\Omega} h \left\{ \tilde{x}Hx - \frac{1}{2} (\operatorname{sign} \vartheta) \varphi \sigma \right\} d\Omega, \quad (9)$$

где $\tilde{x}Hx$ — некоторая положительно определенная квадратичная форма ($H = \nu \times \nu$ — матрица, $H = \tilde{H}^T > 0$). Производную функционала (9) по времени, вычисленную в силу системы (2) и (8), запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & - \int_{\Omega} |\vartheta| \{A\varphi - h\chi(r, \vartheta)\varphi\} \varphi d\Omega - \\ & - \int_{\Omega} h(x, \varphi) F(x, \varphi) d\Omega, \end{aligned}$$

где $(x, \varphi) F(x, \varphi)$ — квадратичная форма переменных x_j ; $(x, \varphi) = (\nu + 1) \times 1$ — вектор-столбец;

$$F = \begin{pmatrix} G & g \\ g & \alpha \end{pmatrix}; \quad g = -Hq + \frac{1}{2} \{\tilde{P} \operatorname{sign} \vartheta + |\vartheta| I\} b;$$

$$G = -(\tilde{P}H + HP); \quad \alpha = \tilde{b}q \operatorname{sign} \vartheta + |\vartheta| \chi(r, \vartheta).$$

На основании работы [5] можно заключить, что при ограничениях теоремы выбор χ из выражения (6)

является необходимым и достаточным условием для существования матрицы $H > 0$, удовлетворяющей неравенству $F > 0$. Теперь нетрудно показать, что при $h \leq 1$ и выполнении условий теоремы функционал dV/dt — является отрицательно определенным. Поскольку матрица P — гурвицева, а dV/dt — отрицательно определенный функционал при $h \leq 1$, то на основании работы [7] можно заключить, что существуют такие достаточно малые значения $h > 0$, при которых функционал (9) является положительно определенным. Так как условия положительной определенности функционала (9) не зависят от величины h , можно сделать вывод, что для существования у системы (1), (2) функционала Ляпунова вида (9) достаточно положительной определенности функционала $W[\varphi]$, что и требовалось доказать.

Если наложить на функцию $\vartheta(r)$ следующие дополнительные ограничения: 1) $|\vartheta(r)|$ — непрерывна вместе со своей первой производной по r ; 2) $(\nabla \vartheta, n) = 0$ при $r \in \Gamma$, то можно показать, что условием положительной определенности функционала $W[\varphi]$ будет положительность наименьшего собственного значения μ_0 краевой задачи

$$A\varphi - \chi(r, \vartheta)\varphi - \frac{M^2}{\vartheta^2} (\nabla \vartheta)^2 \varphi = \mu \varphi;$$

$$\varphi + a(r) (\nabla \varphi, n) = 0 \quad \text{при } r \in \Gamma.$$

Приведенный выше достаточный критерий устойчивости «в малом» отличается от критерия, полученного в работе [4], наличием произвольной функции $\vartheta(r)$, причем при $\vartheta = \operatorname{const}$ и $\vartheta \rightarrow \infty$ эти критерии эквивалентны. Следует отметить, что произвольная функция $\vartheta(r)$, присутствующая в доказанном выше критерии устойчивости, аналогична параметру q в критерии абсолютной устойчивости В. М. Попова [8]. Отсюда и из выражения для $\chi(r, \vartheta)$ следует, что при специальном выборе функции $\vartheta(r)$ условие устойчивости ослабляется тем заметнее, чем больше отличается $\min \operatorname{Re} K(j\omega, r)$ при $\omega \in [0, \infty)$ от наименьшего из значений $\operatorname{Re} K(j\omega, r)$ при $\operatorname{Im} K(j\omega, r) = 0$.

Автор благодарит Е. Ф. Сабаяева за постановку задачи и Н. А. Железцова за критические замечания.

Поступило в Редакцию 18/X 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Хитчкок. Устойчивость ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1963.
2. S. Kaplan et al. Доклад № 271, представленный США на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. И. С. Постников, Е. Ф. Сабаяев. «Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук», № 3, 46 (1967).
4. И. С. Постников, Е. Ф. Сабаяев. «Атомная энергия», 24, 38 (1968).
5. В. А. Якубович. «Автоматика и телемеханика», 26, 577 (1965).
6. А. Д. Галанин. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1957.
7. Т. К. Сиразетдинов. «Труды Казанского авиационного института», вып. 83, 16 (1964).
8. М. А. Айзерман, Ф. Р. Гантмахер. Абсолютная устойчивость регулируемых систем. М., Изд-во АН СССР, 1963.