

5. Заключение

Диффузионные длины L_{\parallel} и L_{\perp} в диффузионном приближении получены также в работе [5]. Для L_{\parallel} результат работы [5] совпадает с формулой (18), а для L_{\perp} несколько отличается от формулы (19), однако при $Q - 1 \ll 1$ (когда только и справедливо диффузионное приближение) это отличие незначительно. Сравнение полученных формул с результатами [12], проведенное для реактора с газовым охлаждением [13], показало, что значения L_{\parallel}^2 практически совпадают, а значения L_{\perp}^2 , вычисленные по формулам настоящей работы с учетом P_2 -приближения, в среднем на 5% больше, чем значения, полученные по формулам Бенуа. Из наших формул следует, что $L_{\perp} > L_{\parallel}$, причем такой результат является следствием блок-эффекта, который в данном случае довольно велик. Применение приближения P_2 вместо P_1 для β и ω изменяет L_{\perp}^2 на $-1,5\%$, а L_{\parallel}^2 на $-2,5\%$.

Авторы выражают признательность Б. И. Ильичеву за обсуждение результатов.

Поступила в Редакцию 13/X 1962 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Фейнберг. Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). Т. 5. М., Изд-во АН СССР, 1957, стр. 578.
2. А. Д. Галанин. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1959.
3. А. Д. Галанин. «Атомная энергия», 9, 89 (1960).
4. С. Carter. J. Nucl. Energy, 15, 133 (1961).
5. D. Lestie. J. Nucl. Energy, A, B16, 1 (1962).
6. И. М. Рыжик, И. С. Градштейн. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Гостехтеориздат, 1951.
7. B. du Bois. Report CEA-740, 1957.
8. И. Е. Тамм. Основы теории электричества. М., Гостехтеориздат, 1954, стр. 132.
9. С. М. Фейнберг и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 411.
10. Г. Я. Румянцев. «Атомная энергия», 10, 26 (1961).
11. Г. И. Марчук. Методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
12. P. Benoist. J. Nucl. Energy, A13, 97 (1961).
13. П. А. Петров. Атомные электростанции. М., Госэнергоиздат, 1961, стр. 99.

УДК 621.039.55

К вопросу динамики ядерных энергетических установок

П. А. Гаврилов, Б. Н. Селиверстов

В статье сопоставлены результаты экспериментального и теоретического исследований динамических свойств технологического стенда строящейся в СССР Белоярской атомной электростанции с ядерным перегревом пара. Доказывается справедливость ряда упрощающих предположений, часто применяемых при рассмотрении динамики ядерно-энергетических установок.

Результаты исследований могут быть использованы для теоретического анализа динамических свойств некоторых типов ядерно-энергетических установок, а также для анализа и синтеза оптимальных систем управления.

Исследованию динамики ядерно-энергетических установок посвящены работы [1—4]. Однако почти во всех работах отсутствует необходимое обоснование используемых математических моделей, не приводятся оценки возможных погрешностей и пределов применимости теории. Поэтому большинство результа-

тов таких исследований можно считать верными лишь с качественной стороны. Авторам не известны работы, посвященные экспериментальной проверке системы дифференциальных уравнений, достаточно полно описывающие динамику ядерно-энергетических установок. Те немногие работы (например, [4, 5]), в которых имеются некоторые экспериментальные данные, оказываются явно недостаточными для обоснования теоретических предпосылок.

В данной статье проводится сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследований динамики технологического стенда, выполненного в соответствии с принципиальной схемой Белоярской атомной электростанции. Экспериментальные данные сравниваются с результатами исследования математической модели стенда на электронной аналоговой машине. Комплекс проведенных

исследований позволяет обосновать принятые допущения и определить границы, в пределах которых теоретические и экспериментальные результаты дают хорошее согласие.

денсировался и отдавал свое тепло на испарение воды второго контура. Затем конденсат первого контура из испарителей и вода из сепаратора поступали в коллектор и далее в подогреватель

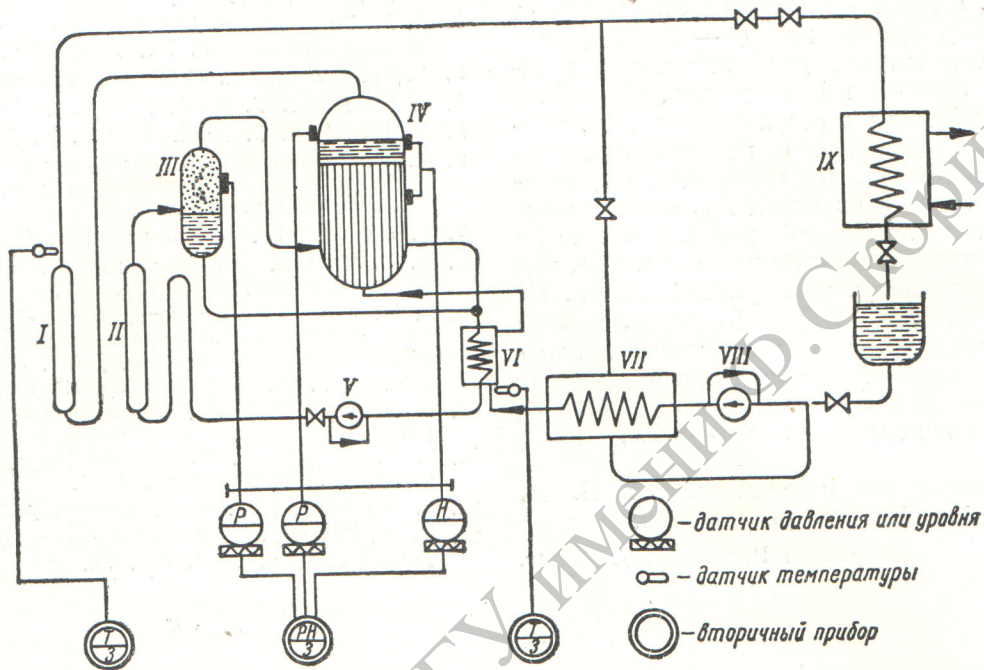


Рис. 1. Принципиальная схема технологического стенда атомной электростанции и регистрации параметров.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных показало, что предлагаемая математическая модель вполне удовлетворительна и может быть использована для анализа динамических характеристик строящейся станции, атомных энергетических установок подобного типа, а также для выбора оптимальной системы их управления. Принципиальная схема технологического стенда станции приведена на рис. 1.

В качестве теплоносителя в обоих контурах стенда использовалась химически обессоленная вода. В первый контур включены три испарительных канала (II), во второй — один перегревательный канал (I). Циркуляция теплоносителя в первом контуре осуществлялась насосом (V), который подавал воду в три параллельно включенных испарительных канала. В этих каналах происходил подогрев теплоносителя до температуры насыщения и частичное его испарение. Из каналов пароводяная смесь поступала в сепаратор (III), где осуществлялось разделение пара и воды. Пар из сепаратора поступал в межтрубное пространство испарителей (IV) парогенераторной установки, где кон-

(VI) парогенераторной установки, где отдавали часть своего тепла теплоносителю второго контура. После подогревателя вода первого контура поступала на всас циркуляционного насоса.

Во втором контуре питательная вода плунжерным насосом (VIII) направлялась в рекуператор (VII), где осуществлялся ее подогрев теплоносителем второго контура. Из рекуператора вода поступала в подогреватель (VI) парогенераторной установки, где догревалась до температуры насыщения и частично испарялась за счет тепла первого контура. Из подогревателя пароводяная смесь поступала в шесть параллельно включенных испарителей. Здесь вода полностью испарялась. Барботируя через зеркало испарения, насыщенный пар поступал в пароперегревательный канал (I). Затем перегретый пар направлялся через дроссельный вентиль в конденсатор (IX), где конденсировался и охлаждался. Часть пара перед конденсатором отбиралась в рекуператор для подогрева питательной воды. После конденсатора охлажденный конденсат поступал в сборный бак.

Как испарительные, так и перегревательные технологические каналы по геометрии, входным и выходным термодинамическим параметрам полностью соответствовали каналам Белоярской атомной электростанции [6]. Косинусоидальное распределение тепловыделения по высоте каналов обеспечивалось специальным электронагревателем. При этом непрерывное распределение тепловыделения по высоте каналов заменялось ступенчатым распределением путем соответствующего подбора омического сопротивления на шести участках.

При выводе дифференциальных уравнений в частных производных учтена распределенность параметров при следующих допущениях:

1. Уравнение теплопроводности металла тепловыделяющих элементов заменялось уравнением теплового баланса, причем на границе вводилось эффективное термическое сопротивление, определенное в результате точного решения уравнения теплопроводности с определенными граничными условиями.

2. Непрерывный градиент давления по длине пароводяного и парового трактов заменялся ступенчатой кривой.

3. Аксиальные перетечки тепла в тепловыделяющих элементах не учитывались.

4. Предполагалось, что на участках подогрева теплоносителя до температуры насыщения теплоемкость среды не зависит от давления и температуры.

5. Распределение скорости теплоносителя по сечению канала принималось постоянным.

6. Соединительные трубопроводы необогреваемых участков с однофазным теплоносителем в динамике системы представлены как аккумуляторы тепла и звенья транспортного запаздывания.

7. Предполагалось, что на участках с двухфазным теплоносителем параметры среды i' , i'' , γ' и γ'' слабо зависят от давления.

8. Коэффициент проскальзывания фаз K не зависит от давления и паросодержания.

Для определения искомым функций составлялись дифференциальные уравнения, отражающие в рамках принятых допущений закон сохранения энергии и массы вещества на элементарном участке рассматриваемого теплообменника длиной dx :

для участков с однофазным теплоносителем [7]

$$q(\tau) f(x) = \alpha(\tau) [t_{т.э}(x, \tau) - t(x, \tau)] p + mC_m \frac{\partial t_{т.э}(x, \tau)}{\partial \tau} *;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial i(x, \tau)}{\partial \tau} + \omega(\tau) \frac{\partial i(x, \tau)}{\partial x} = \\ = \frac{p}{\gamma S} \alpha(\tau) [t_{т.э}(x, \tau) - t(x, \tau)]; \end{aligned}$$

для участков с двухфазным теплоносителем

$$\begin{aligned} \frac{\partial G(x, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial D(x, \tau)}{\partial x} + \\ + S \frac{\partial}{\partial \tau} \{ \gamma' [1 - \varphi(x, \tau)] + \gamma'' \varphi(x, \tau) \} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i' \frac{\partial G(x, \tau)}{\partial x} + i'' \frac{\partial D(x, \tau)}{\partial x} + S \frac{\partial}{\partial \tau} \times \\ \times \{ i' \gamma' [1 - \varphi(x, \tau)] + i'' \gamma'' \varphi(x, \tau) \} = \\ = \alpha(\tau) p [t_{т.э}(x, \tau) - t_s(\tau)]; \end{aligned}$$

$$q(\tau) f(x) = \alpha(\tau) p [t_{т.э}(x, \tau) - t_s(\tau)] + mC_m \frac{\partial t_{т.э}}{\partial \tau};$$

$$\frac{1 - \varphi(x, \tau)}{\varphi(x, \tau)} = \frac{K \gamma'' G(x, \tau)}{D(x, \tau)}.$$

Такие элементы схемы, как кипящий подогреватель типа «труба в трубе», описывались комбинацией аналогичных уравнений со своими граничными условиями.

Потери давления, связанные с изменением расхода пароводяной смеси на участках с двухфазным теплоносителем и пара на участках пароперегревательного тракта, находились из уравнения

$$P_i - P_{i-1} = \gamma l + k_1 \frac{\omega_i^2(\tau) \gamma}{2g} + k_2 \frac{d\omega_i(\tau)}{d\tau}.$$

Сжимаемость пара на пароперегревательном тракте учитывалась системой уравнений:

$$D_i - D_{i+1} = V_i \frac{\partial \gamma}{\partial p} \cdot \frac{dP_i(\tau)}{d\tau} + V_i \frac{\partial \gamma}{\partial t} \cdot \frac{d\bar{t}_i(\tau)}{d\tau};$$

$$P_i - P_{i+1} = k_3 \frac{D_i^2(\tau) \gamma}{2g} + k_4 \frac{dD_i(\tau)}{d\tau}.$$

При аналитическом исследовании использовалось решение линеаризованных уравнений в частных производных методом преобразования Лапласа с последующим разложением в ряд полученных параметрических трансцендентных решений [8]. Данная методика проверялась сравнением с точными решениями, полученными методом частотных характеристик и методом численного счета (метод характеристик для дифференциальных уравнений гиперболического типа) [9, 10]. Замкнутая система аппроксимированных дифференциальных уравнений исследовалась на математической машине. Впоследствии в систему уравнений были введены наиболее «сильные» нелинейности,

* Обозначения см. в конце статьи.

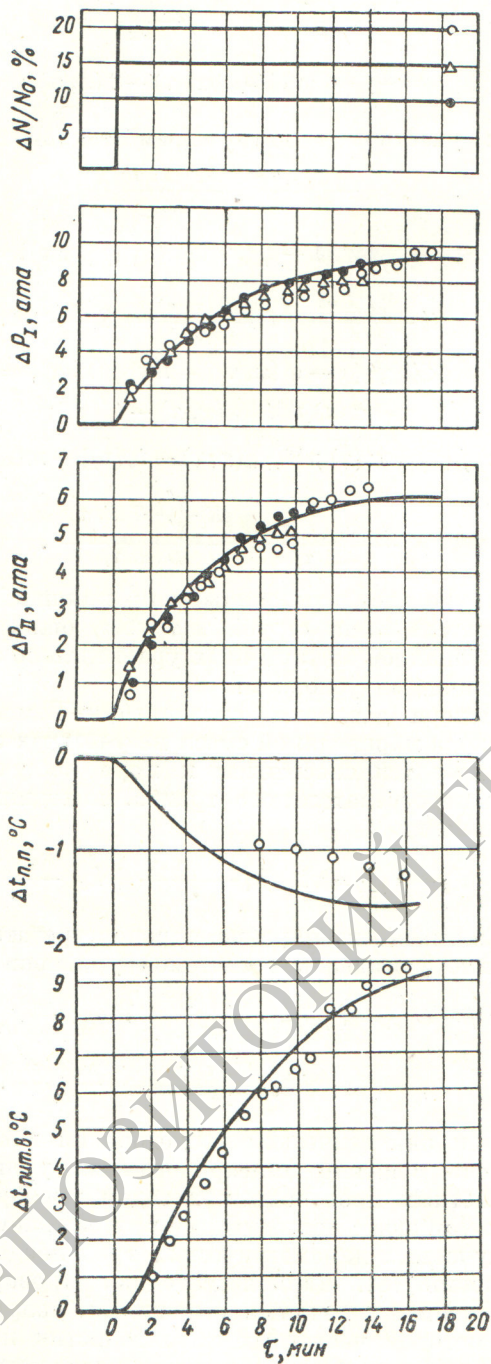


Рис. 2. Изменение теплотехнических параметров стенда при возмущении мощности испарительных каналов. (Отклонения теплотехнических параметров приведены к 10%-му возмущению.)

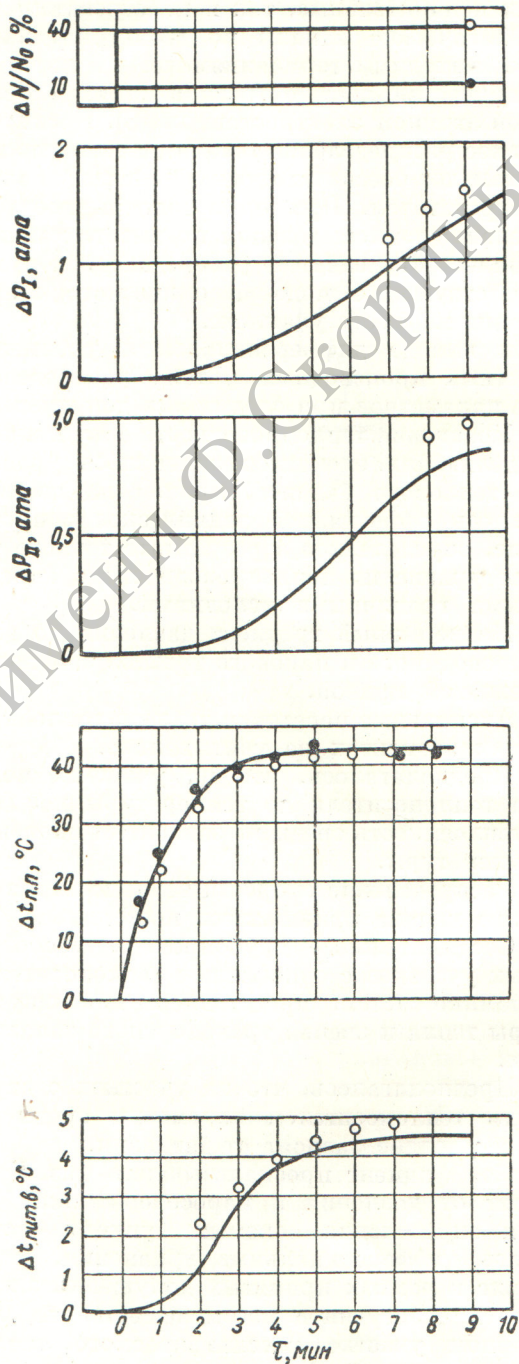


Рис. 3. Изменение теплотехнических параметров стенда при возмущении мощности пароперегревательных каналов. (Отклонения теплотехнических параметров приведены к 40%-му возмущению.)

ности, которые не учитывались при предварительной линеаризации.

В эксперименте определялись разгонные характеристики установки при малых отклонениях параметров от стационарных значений, а также при некоторых глубоких возмущениях, которые допускались условиями безопасной эксплуатации стенда.

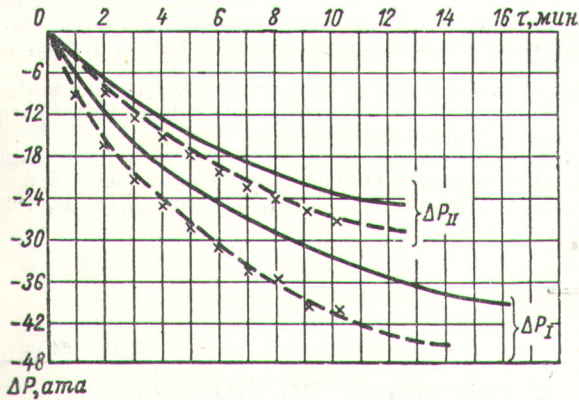


Рис. 4. Изменение давления в первом и втором контурах стенда при возмущении мощности испарительных каналов 60%:

— — линейная модель; - - - - - нелинейная модель;
 x — эксперимент.

Возмущения задавались в пределах 10—20% от стационарных значений по следующим параметрам: 1) по тепловыделению (отдельно испарительных и перегревателей каналов); 2) по расходу питательной воды второго контура; 3) по расходу циркуляционной воды первого контура; 4) по температуре питательной воды второго контура; 5) по степени открытия клапана перед холодильником, имитирующим турбину. Регистрация экспериментальных данных проводилась непрерывно с помощью самописцев ЭПП-09.

При проведении исследования на аналоговой вычислительной машине учитывалась инерционность терморезисторов, постоянная времени которых определялась в лабораторных условиях.

Полученные на стенде переходные характеристики некоторых процессов и результаты теоретического исследования приведены на рис. 2, 3. Как видно из этого сопоставления, линейная математическая модель при сделанных допущениях достаточно хорошо описывает динамическое поведение стенда при возмущающих воздействиях по амплитуде до 20% от стационарных значений, что позволяет распростра-

нить примененную в данной работе методику на другие ядерно-энергетические установки подобного типа.

Были сделаны также оценки применимости линейной математической модели стенда для описания переходных процессов, вызванных сильными возмущениями и протекающих при глубоких изменениях некоторых параметров. На рис. 4 приведено изменение во времени давления теплоносителя в первом и во втором контурах при скачкообразном изменении мощности испарительных каналов на 60%.

Исследования показали, что линейная модель может быть также использована для описания процессов с глубокими изменениями параметров. При этом максимальное расхождение результатов, полученных на основе линейной и нелинейной моделей, может достигать 20%.

Поступила в Редакцию 29/IX 1962 г.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $q(\tau)$ — удельная тепловая нагрузка, отнесенная к длине участка, $\text{ккал/ч}\cdot\text{м}$;
- $f(x)$ — функция распределения удельной тепловой нагрузки по длине участка;
- $\alpha(\tau)$ — коэффициент теплоотдачи, учитывающий термическое сопротивление тепловыделяющего элемента, $\text{ккал/м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{град}$;
- $t_{т.э}(x, \tau)$ — усредненное по сечению текущее значение температуры тепловыделяющего элемента, $^{\circ}\text{C}$;
- $t(x, \tau)$ — текущее значение температуры теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$;
- p — периметр тепловыделяющего элемента, омываемый теплоносителем, м ;
- m — вес металла тепловыделяющего элемента на единицу длины, кг/м ;
- C_m — теплоемкость металла тепловыделяющего элемента, $\text{ккал/кг}\cdot\text{град}$;
- $i(x, \tau)$ — текущее значение теплосодержания теплоносителя, ккал/кг ;
- γ — удельный вес теплоносителя, кг/м^3 ;
- S — живое сечение тепловыделяющего элемента, м^2 ;
- $D(x, \tau)$ — текущее значение расхода паровой фазы, кг/ч ;
- $G(x, \tau)$ — текущее значение расхода водяной фазы, кг/ч ;
- $\varphi(x, \tau)$ — текущее значение доли сечения, занятой паром;
- γ', γ'' — удельный вес воды и пара при температуре насыщения, кг/м^3 ;
- i', i'' — теплосодержание воды и пара при температуре насыщения, ккал/кг ;
- $t_s(\tau)$ — температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$;
- $P_i(\tau)$ — давление на i -м участке, кг/м^2 ;
- l — высота, определяющая нивелированный напор между участками, м ;
- g — ускорение свободного падения, м/ч^2 ;
- $w_i(\tau)$ — скорость теплоносителя на i -м участке, м/ч ;
- $D_i(\tau)$ — расход пара на i -м участке пароперегревательного тракта, кг/ч ;

V_i — объем i -го участка пароперегревательного тракта, m^3 ;
 $\bar{t}_i(\tau)$ — средняя температура пара на i -м участке пароперегревательного тракта, $^{\circ}C$;
 k_1, k_2, k_3, k_4 — постоянные коэффициенты;
 $\Delta N/N_0$ — относительное изменение мощности испарительных каналов, %;
 $\Delta P_I, \Delta P_{II}$ — изменение давления в первом и втором контурах, $атм$;
 $\Delta t_{II-п}, \Delta t_{пит.в}$ — изменение температуры перегретого пара и питательной воды соответственно, $^{\circ}C$.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Н. Шульц. Регулирование ядерно-энергетических установок. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
2. Т. Бамп, Х. Монсон. В кн. «Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. иностр. ученых. Т. 3. М., Атомиздат, 1958, стр. 621.
3. А. В. Бондаренко и др. «Инж.-физ. ж.», № 8, 54 (1961).
4. Дж. Харрер и др. См. [2]. Т. 4, стр. 177.
5. Дж. Тай. Там же. Т. 3, стр. 575.
6. Н. А. Доллежал и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. сов. ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1958, стр. 36.
7. А. А. Арманд. В сб. «Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях». М.—Л., Госэнергоиздат, 1959, стр. 113.
8. М. П. Симою. «Автом. и телемех.», XVIII, 514 (1957).
9. В. В. Солодовников, Ю. И. Топчиев. Частотный метод построения переходных процессов. М., Гостехтеориздат, 1955.
10. А. И. Жуков. Применение метода характеристик к численному решению одномерных задач газовой динамики. Т. LVIII, М., Изд-во АН СССР, 1960.



УДК 621.039.7

Сечения захвата нейтронов с энергией до 50 $kэв$ некоторыми конструкционными материалами

С. П. Канчигашев, Ю. П. Попов

На спектрометре нейтронов по времени замедления в свинце измерены эффективные сечения захвата нейтронов с энергией до 50 $kэв$ в никеле, меди, молибдене, вольфраме. Обнаружены неизвестные ранее резонансы никеля (2,3 $kэв$), Si^{63} (—100 $эв$), Mo^{98} (12 $эв$) и оценены их параметры. Радиационные ширины резонансов меди при энергиях 227 и 580 $эв$ оказались равными $\sim 0,6 эв$. Приводятся резонансные интегралы поглощения для изученных веществ.

Введение

При строительстве реакторов на быстрых и промежуточных нейтронах необходимо знать сечения захвата нейтронов в области от тепловых энергий до нескольких сот килоэлектронвольт. Это одна из причин, стимулировавших исследования энергетической зависимости сечений захвата нейтронов с энергией в указанном диапазоне [1—6] и измерения сечений захвата в отдельных энергетических точках (24, 30, 65 $kэв$ и т. д.) [7—10]. Были также рассчитаны сечения захвата нейтронов с энергией несколько килоэлектронвольт для ряда изотопов с использованием экстраполированных параметров нижних уровней. Однако в некоторых случаях расчеты расходились с результатами экспериментов, проведенных позднее, в пять — десять раз [11, 12]. Расхождения между результатами измерений, проведенных в раз-

личных лабораториях, часто также выходят далеко за пределы указанных ошибок. Чаще всего ошибки связаны с абсолютной нормировкой сечений захвата.

В связи с этим интересно измерить сечения захвата на спектрометре по времени замедления нейтронов в свинце. Принцип действия спектрометра, а также методика измерений сечений радиационного захвата нейтронов подробно описаны в работах [6, 13, 14]. Такие измерения позволяют не только расширить исследуемый энергетический диапазон, но и дают возможность получить абсолютную нормировку сечений по параметрам нижних уровней, известных по измерениям полных нейтронных сечений [15]. Плохое разрешение спектрометра по времени замедления ($\sim 30\%$ при $E \leq 1 kэв$ и 70% при $E = 15 kэв$) не снижает ценности полученных результатов для реакторостроения при расчетах защиты от излучения, а также при получении усредненных параметров резонансов [16].

Результаты измерений

Никель. Измерения проводились с образцами металлического никеля разных марок и окиси никеля марки «чистый». Результаты измере-