

## Гамма-спектрометрия и металлография твэлов рабочей кассеты ИВВ-2

БЫЧЕНКОВ В. В., ЗЕЛЕНОВ В. И., КАРПЕЧКО С. Г., ПАНКОВ Е. Н., ТИМОХИН А. Н. УДК 621. 039.665:620.18

После четырехлетней эксплуатации произошла разгерметизация рабочей кассеты исследовательского реактора ИВВ-2, сопровождавшаяся постепенным в течение трех суток увеличением удельной  $\gamma$ -активности теплоносителя первого контура и газовой активности в системе спецвентиляции. Гамма-спектрометрия сухого остатка проб теплоносителя показала наличие осколочных изотопов  $^{140}\text{La}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{143}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ . Высокая удельная активность теплоносителя ( $2,7 \cdot 10^{-4}\text{Ки/л}$ ) при общем объеме воды в баке аппарата  $60 \text{ м}^3$  свидетельствовала о попадании в теплоноситель продуктов деления с суммарной активностью  $\sim 20 \text{ Ки}$ . Отсутствие урана в воде и нулевая  $\alpha$ -активность сухого остатка позволили предположить, что горючее не находилось в непосредственном контакте с теплоносителем. Разгерметизированная кассета была обнаружена с помощью специального канального устройства и удалена в бассейн выдержки. Некоторые характеристики реактора ИВВ-2 и условия эксплуатации разгерметизированной кассеты приведены в таблице, а также в работах [4, 2].

### Условия эксплуатации кассеты

Наименования	Характеристика
Тип топливной композиции	Дисперсия уран-алюминиевого сплава в алюминиевой матрице
Материал оболочки	Алюминиевый сплав САВ-1
Тип твэла	Стержневой с оребрением
Обогащение по $^{235}\text{U}$ , %	90
Число твэлов в кассете, шт.	42
Выгорание к моменту разгерметизации (среднее для кассеты, вес.%)	51,9
Интегральный поток тепловых нейтронов, нейтр./см <sup>2</sup>	$3,3 \cdot 10^{21}$
Максимальная и средняя температура оболочки в процессе эксплуатации, °С	98; 55
Средний водно-химический режим	pH = 5,5 ÷ 6,5; жесткость 3 мкг·экв/л; удельное сопротивление $3 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ; содержание хлоридов 0,03—0,36 мг/л

После трехлетней выдержки кассета была разобрана для исследования твэлов методами  $\gamma$ -спектрометрии и оптической металлографии.

### Экспериментальная установка для гамма-сканирования твэлов

Установка состоит из заполненного свинцом защитного цилиндрического контейнера, по оси которого расположен канал для перемещения захвата с твэлом относительно коллиматора (рис. 1). Контейнер устанавливается на люке горячей камеры в специальных гнездах, обеспечивающих жесткую ориентировку коллимированного пучка относительно заданной точки чувствительного объема детектора. Размеры центрального канала и захвата подобраны таким образом, чтобы при перемещениях максимальное отклонение оси твэла относительно оси щелевого коллиматора размером  $6 \times 0,8 \text{ мм}$  не превышало  $\pm 0,3 \text{ мм}$ . Захват снабжен шкалой для регистрации положения твэла по вертикали. Ge (Li)-детектор располагался на расстоянии 710 мм от коллиматора и имел свинцо-

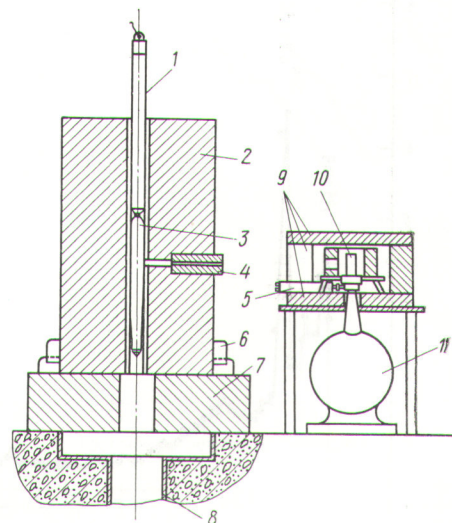


Рис. 1. Экспериментальная установка для  $\gamma$ -сканирования твэлов:

1 — захват для твэла; 2 — контейнер; 3 — твэл; 4 — коллиматор; 5 — предусилитель; 6 — центрирующие детали; 7 — подставка; 8 — люк горячей камеры; 9 — Pb-защита детектора; 10 — детектор; 11 — криостат



вую защиту толщиной до 200 мм для уменьшения фона. Общее разрешение спектрометра составляло 0,8 и 1,0% для линий 661,6 и 1330 кэВ соответственно. Использовался амплитудный анализатор АИ-4096-2-АВ-100 и пересчетный прибор ПП-12. Основное требование к экспериментальной установке — обеспечение высокой точности относительных измерений — достигалось за счет стабильной геометрии установки, высокого отношения пик-комpton для  $\gamma$ -линий спектра, выбором достаточной экспозиции, точной фиксацией положения твэла в контейнере.

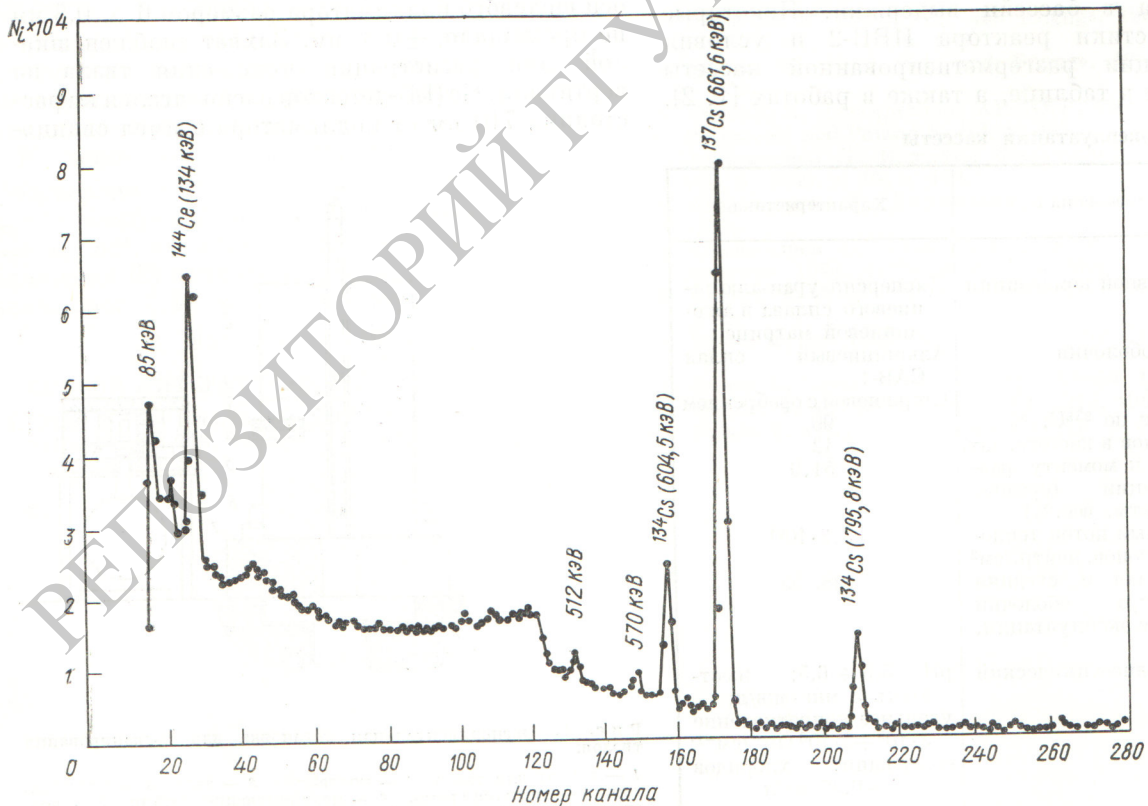
### Относительное распределение долгоживущих продуктов деления по длине твэлов

В  $\gamma$ -спектре твэлов после трехлетней выдержки идентифицированы линии  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  и  $^{144}\text{Pr}$  (рис. 2). Получены относительные распределения долгоживущих продуктов деления по длине всех 42 твэлов. Обсчет фотопиков про-

веден методом Ковелла по линиям 661,6 ( $^{137}\text{Cs}$ ); 604,5 ( $^{134}\text{Cs}$ ); 795,8 ( $^{134}\text{Cs}$ ) и 134 кэВ ( $^{144}\text{Ce}$ ).

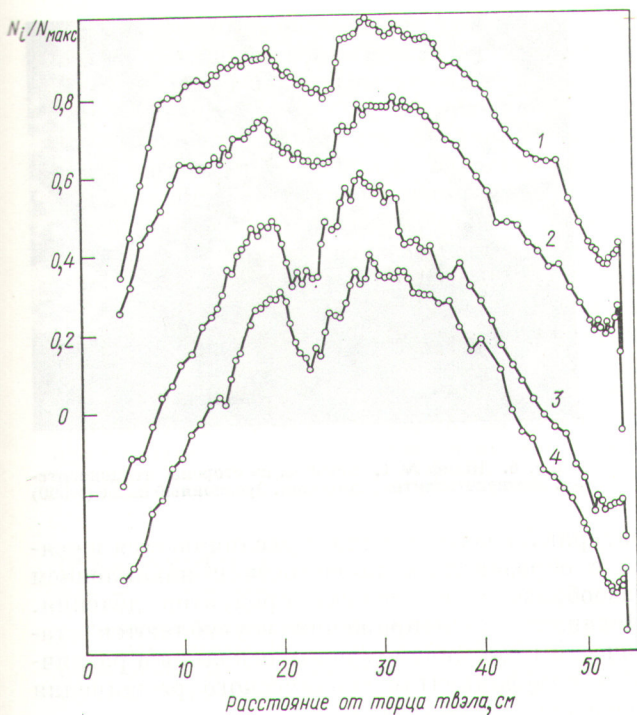
Статистическую точность результатов измерения определяли экспериментально путем многократного повторения измерений с одинаковой экспозицией для одного и того же участка твэла, причем после каждого измерения твэл смещали и снова возвращали в прежнее положение. Определенная таким образом среднеквадратическая ошибка включает неточность воспроизведения геометрии при перемещениях твэла, статистическую погрешность аппаратуры при регистрации  $\gamma$ -квантов, вероятность самого процесса распада, ошибку в определении площади фотопика. При пятидесятикратном измерении с экспозицией 5,45 мин среднеквадратическая ошибка равна  $\pm 0,7\%$  для линии 661,6 кэВ. При экспозиции 21,8 мин статистическая точность увеличивается до  $\pm 0,4\%$ , при измерении линий 134; 604,5 и 795,8 кэВ она несколько хуже, но ошибка не превышает  $\pm 1,5\%$ .

У большинства исследованных твэлов (рис. 3 и 4) выявлены особенности в распределениях



Р и с. 2. Спектр продуктов деления в твэлах кассеты





Р и с. 3. Относительное распределение долгоживущих продуктов деления по длине твэла № 31. Коллиматор щелевой. Экспозиция 655,4 с:

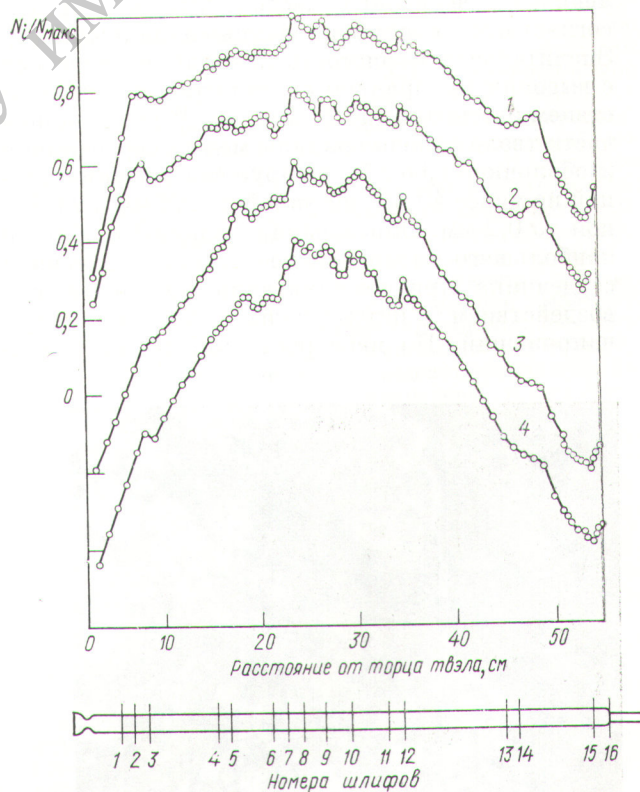
1 —  $^{137}\text{Cs}$  (661,6 кэВ); 2 —  $^{144}\text{Ce}$  (134 кэВ); 3 и 4 —  $^{134}\text{Cs}$  (604,5 и 795,8 кэВ соответственно)

продуктов деления и обнаружены аномалии, соответствующие центральному участку твэлов, т. е. области максимального выгорания. Число аномалий, их форма и глубина индивидуальны для каждого твэла. Аномалии, как правило, локализованы на участках размером от 0,8 до 3,0 см и достигают 18—20 % относительно максимума кривой распределения. Особенности кривых распределения связаны с технологическими и радиационными факторами. Весовое содержание  $^{235}\text{U}$  в сердечнике составляет  $35 \pm 1,5\%$ , т. е. возможна локальная неравномерность энерговыделения в указанных пределах. Толщина сердечника изменяется монотонно и при рассмотрении локализованных аномалий на кривых распределения не учитывается. Технологические факторы приводят к неравномерности распределения  $\pm 4,5\%$  относительно максимума. Появление аномалий также может быть вызвано выходом продуктов деления в месте разгерметизации оболочки твэла. Для выхода осколков деления не обязателен прямой контакт горючего с теплоносителем, достаточно присутствия ослабленных участков из-за межкристаллитной коррозии, технологических де-

фектов или радиационного повреждения матрицы и оболочки. Можно предполагать, что аномалии, превышающие 4,5%, вызваны выходом продуктов деления в теплоноситель в месте разгерметизации оболочки. Таким образом, метод  $\gamma$ -спектрометрии можно использовать для идентификации места повреждения оболочки твэла. Эффективность метода будет выше для твэлов с меньшей неравномерностью распределения  $^{235}\text{U}$ . Интерпретация аномалий распределения продуктов деления в высокотемпературном окисном горючем, облученном до больших выгораний, становится затруднительной в результате влияния трещин и других дефектов структуры. Работы по использованию  $\gamma$ -спектрометрического метода для оценки состояния других типов твэлов будут продолжены.

### Металлографическое исследование твэла

Для металлографического исследования был выбран твэл № 25. Резка осуществлялась в го-

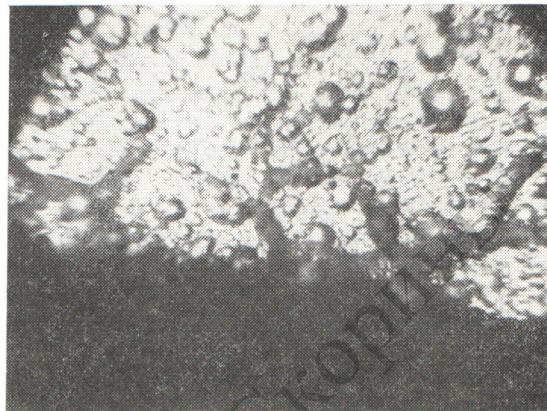


Р и с. 4. Схема разделки и относительное распределение продуктов деления по длине твэла № 25. Коллиматор щелевой. Экспозиция 1310,7 с. (Обозначения кривых те же, что на рис. 3.)



рячей камере алмазным кругом с интенсивным охлаждением водой. Относительные распределения продуктов деления и схема разделки приведены на рис. 4. Образцы после шлифовки и полировки обрабатывали раствором Келлера (1% HF; 1,5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 2,5% HNO<sub>3</sub>; 95% H<sub>2</sub>O) в течение 2—10 с и просматривали на микроскопе с увеличением в 100—500 раз. При визуальном осмотре повреждений оболочки не обнаружено. Замечены значительная потеря пластичности и увеличение модуля упругости [3].

Сравнение шлифов центральной и периферийной части твэла показало, что с ростом выгорания увеличиваются пустоты, образующиеся на границах между диспергированными частицами горючего и матрицей в результате бомбардировки осколками деления. Выявлена зависимость степени радиационного повреждения матрицы от размера частиц горючего и объемного содержания делящегося изотопа. Размер частиц горючего, имеющих разную форму, от 0,04 до 0,25 мм. Анализ структуры показал, что при одинаковом выгорании увеличенная пористость матрицы наблюдается в местах скопления более мелких частиц. Эти результаты согласуются с опубликованными данными [4]. Значительная пористость матрицы на участках с высоким выгоранием связана также с присутствием эвтектики (до 11 вес.%). В центральной части твэла вблизи границы между сердечником и оболочкой (рис. 5) обнаружена трещина длиной не менее 40 мкм, шириной до 2,5 мкм и глубиной до 0,2 мкм. Образование трещины в области наибольшего выгорания не случайно. Материал сердечника при эксплуатации находится под воздействием циклических температурных напряжений. По мере роста выгорания темпе-

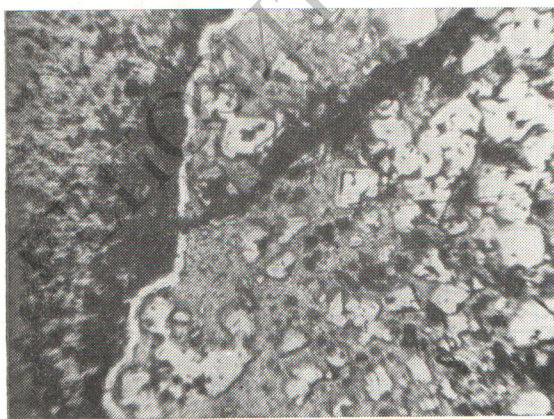


Р и с. 6. Шлиф № 1. Оболочка со стороны теплоносителя. Межкристаллитная коррозия. Эрозионный износ (×500)

ратурный градиент в твэле увеличивается в связи с образованием пористости и накоплением газообразных и твердых продуктов деления. Механические напряжения усугубляются статическим давлением газовых осколков и различным коэффициентом термического расширения сердечника и оболочки.

Образование пор обнаружено и в частицах интерметаллида в результате накопления и диффузии газообразных и твердых продуктов деления. Следует отметить хорошее состояние диффузионного контакта сердечника с оболочкой.

Металлографический анализ оболочки твэла показал наличие включений интерметаллида Mg<sub>2</sub>Si размером от 3 до 20 мкм (рис. 6). Внутренняя поверхность оболочки подвержена бомбардировке ядрами осколков со стороны близлежащих частиц горючего и воздействию химически активных продуктов деления. В результате на глубине до 0,2 мм наблюдается образование пор (см. рис. 5). Со стороны теплоносителя оболочка подвержена межкристаллитной коррозии (см. рис. 6) на глубину 0,2—0,3 мм. Наблюдается эрозионный износ поверхности в турбулизированном потоке теплоносителя, приводящий к нарушению целостности окисной пленки и увеличению скорости коррозии. При металлографическом анализе не были обнаружены сквозные повреждения оболочки, однако глубина аномалий на кривых распределения осколочных элементов и характер выхода этих элементов в теплоноситель во время разгерметизации позволяют предполагать существование ослабленных участков оболочки. Технологические дефекты (овальность сердечника, эксцентричный сдвиг сердечника относительно оси твэла, вмятины в оболочке до 0,5 мм, сколы,



Р и с. 5. Шлиф № 9. Радиационное повреждение сердечника и оболочки (×100)



срезы оребрения) неизбежно приводят к неравномерной толщине оболочки. В местах утонения оболочки могут перекрываться зоны радиационного повреждения со стороны внешней и внутренней поверхностей, что делает возможным выход продуктов деления в теплоноситель.

Таким образом, разработанная установка для  $\gamma$ -сканирования стержневых твэлов реактора ИВВ-2 позволяет выявить особенности распределения долгоживущих продуктов деления и тем самым идентифицировать места повреждения оболочки, подлежащие металлографическому анализу.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность А. М. Демидову за обсуждение результатов работы и высказанные ценные замечания, а также В. П. Криворотовой,

В. Н. Новичихину и З. Б. Слепухиной за помощь при металлографическом анализе и обработке результатов.

Поступила в Редакцию 15/VII 1974 г.  
В окончательной редакции 9/I 1975 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голицкий Б. Н. и др. «Атомная энергия», 1968, т. 25, вып. 1, с. 24.
2. Веселкин А. П. и др. В сб.: Вопросы физики защиты реакторов. Вып. 5. М., Атомиздат, 1972, с. 251.
3. Кузнецова А. П., Шаров Б. В. «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 1, с. 58.
4. Вебер К. Е., Гириш Г. Г. В кн.: Металлургия ядерной энергетики и действие облучения на материалы. М., Metallurgizdat, 1956, с. 298.

## Рецензии

**Современная ядерная электроника.** В двух томах. Т. 1. Измерительные системы и устройства. Авт.: Крашенинников И. С., Курочкин С. С., Матвеев А. В. и др. М., Атомиздат, 1974, 20 л., 2 р. 20 к.

Современная ядерная электроника, призванная решать задачи ядерной физики, все больше выступает не в качестве подсобной или второстепенной дисциплины, а как самостоятельный раздел общей электроники.

Рецензируемая книга отличается от многих предшествующих изданий более строгим научным подходом к раскрытию тем и изложению содержания. Это не учебник, однако включенный в книгу материал может быть весьма полезен физикам, инженерам, преподавателям, работающим в этой области или применяющим электронику для научных и технических целей.

Первый том содержит две главы. В первой обобщен и переработан фундаментальный материал по теоретическому анализу факторов, определяющих физическую природу и характер регистрируемых потоков данных, получаемых от детекторов понижающего излучения. Этот материал имеет важное значение, позволяя строго научно обосновать предельные или точностные характеристики регистрируемых данных, которые в процессе измерения претерпевают влияние детектирующих, усиливающих, формирующих, кодирующих и прочих устройств. В то же время сами потоки на входе могут характеризоваться сложными статистическими закономерностями по многим параметрам (например, амплитудному, временному распределению и пр.), а реакция перечисленных устройств, помимо специфичных передаточных функций, может усложняться многими дополнительными факторами, такими, как шумовые флуктуации, статистический разброс значения параметров и т. п. Заслугой авторов является систематизация, обобщение и научное обоснование этих сведений, рассредоточенных в многочисленной литературе.

К некоторым недостаткам этой главы следует отнести отсутствие более полных сведений по управляемым и оптимальным фильтрам, позволяющим получить более высокое отношение сигнал-шум. Кроме того желательно в последующих изданиях дать большее число

разных примеров и численно решенных задач, иллюстрирующих теоретические выводы.

Вторая глава посвящена разбору элементов и узлов современных электронных приборов ядерной физики, характеризующихся широким применением микроэлектроники, повышенными параметрами по сравнению с ядерной электроникой второго поколения, большим числом кодируемых данных, а также включением в свой состав технических средств прямой связи с ЭВМ.

Следует отметить, что быстрое развитие микроэлектронной базы резко изменило структуру приборов ядерной электроники и потребовало новых подходов при их создании. Это нашло отражение в книге, и в настоящее время нет более полного изложения подобного материала. В книге приведены особенности работы схем, их структуры, рассмотрена схемотехника и методы, позволяющие реализовать заданные параметры и точности работы узлов усиления формирования, амплитудного и временного кодирования, аналоговых операций и других процессов обработки сигналов, характерных для ядерной электроники. Эти сведения весьма полезны разработчикам электронной аппаратуры, в том числе неядерного профиля, так как они обобщают рассредоточенные сведения, содержат анализ причин и факторов, от которых зависят получаемые характеристики.

К недостаткам этого раздела или общей компоновки материала следует отнести «резкий» переход от строгого изложения теоретических вопросов первой главы к разбору конкретных аппаратурных элементов второй главы. Следовало бы ввести дополнительный параграф, показывающий аппаратное построение систем и узлов как следствие теоретических выводов. Кроме того, во второй главе есть некоторое дублирование в описании шумовых процессов в усилителях.

В настоящее время невозможно в ограниченном объеме книги передать все разнообразие в построении отдельных приборов, важно дать основные мало стареющие принципы и методы, с чем авторы книги успешно справились.

Рецензируемая книга — весьма полезна для широкого круга читателей. Она вносит существенный вклад в развитие отечественной науки и приборостроения.

ШТРАНИХ И. В.