

1173058-11

НИИАР-10(721)

**В.Б.Иванов**

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ  
НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДИК  
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО  
КРИТЕРИЯ**

**П р е п р и н т**

**Москва-ЦНИИатоминформ-1987**

УДК 519.241.6:620.179.1

Иванов В.Б. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДИК МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ: Препринт. НИИАР-10(721).- М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.- 14 с.

Рассматриваются вопросы использования теории информации для оценки эффективности применения неразрушающих методов исследования. Результаты измерения апостериорного количества информации, заключающейся в массивах экспериментальных данных, могут служить дополнительным критерием для выбора метода, технических или программных средств, обеспечивающих данный метод.

Рис.4, список лит. - 9 назв.

Научный редактор - канд.техн.наук В.А.Качалин



Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ), 1987

## ВВЕДЕНИЕ

Широкое развитие атомной энергетики, выразившееся в расширении объема строительства водо-водяных реакторов (ВВЭР-400, ВВЭР-1000, РБМК-1000, РБМК-1500), реакторов на быстрых нейтронах (БН-600, БН-800 и др.), а также новых типов реакторов для целей теплоснабжения (АСТ-500, АСТ-1) [1], поставило перед реакторным материаловедением много новых задач, в частности, улучшение экономических и надежных показателей элементов активных зон ядерных реакторов. Для решения этой задачи необходимо увеличить процент выгорания делящегося материала при допустимо малом количестве вышедших из строя твэлов. В настоящее время ведутся работы по созданию таких твэлов, которые обеспечили бы надежную работу ядерных реакторов в условиях маневрирования мощности, при более высоких удельных энерговыделениях и т.п.

Все это - сложные научно-технические задачи, для решения которых проводится большой объем исследований как опытных, так и штатных тепловыделяющих сборок (ТВС) и твэлов [2]. Наиболее сложным этапом этих исследований является завершающий - исследование облученных элементов в защитных камерах. Это объясняется, во-первых, спецификой условий, в которых проводятся измерения, и во-вторых, тем, что именно на этом этапе получают основную информацию о работоспособности и конечных характеристиках испытываемых конструкций и материалов.

В последнее время разработано и применяется на практике большое количество методов исследований, основанных на различных физических принципах и осуществляемых на различ-

ном оборудовании [3]. Потребности реакторного материаловедения заставляют искать новые методы, совершенствовать и модернизировать существующие, поэтому методическая работа становится все более самостоятельным научно-техническим направлением. Исследователю и разработчику приходится выбирать из целого ряда существующих методик ту, которая больше всего подходит для решения стоящих перед ними задач. В качестве критериев при таком выборе принимаются самые различные показатели, например, точность измерений, чувствительность, динамический диапазон, а также производительность, стоимость оборудования, надежность его работы и т.д.

Эти показатели должны учитываться в обобщенной оценке эффективности методики. Однако самым весомым фактором при этом должно являться количество информации, которое можно получить, применяя ту или иную методику и аппаратуру для измерения заданного параметра. Объективной предпосылкой применения теории информации в данном случае является то, что количество получаемой информации непосредственно связано с точностью измерений, динамическим диапазоном и чувствительностью [4,5]. Таким образом, информационный критерий объединяет несколько "разрозненных" показателей и позволяет сделать более общие выводы.

В последнее время появился ряд публикаций [5,6], где информационный критерий используется в качестве количественной величины, определяющей эффективность измерений для ряда частных случаев.

В данной работе описана попытка применения теоретико-информационных представлений для оценки эффективности неразрушающих методик послереакторных материаловедческих исследований.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

С точки зрения теории [4] количество информации  $I$ , получаемое в результате измерения, равно разности энтропий до и после получения результата измерения:

$$I = H(x) - H(x/x_n) \dots, \quad (1)$$

где исходная неопределенность, т.е. безусловная энтропия  $H(x)$  зависит только от распределения вероятностей различных значений измеряемой величины и дискретности меры (числа деления шкалы), а условная  $H(x/x_n)$  равна энтропии распределения вероятностей погрешностей.

Энтропия  $H(x)$  в общем случае вычисляется по формуле [7]

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n P_i \log P_i, \quad (2)$$

где  $P_i = \frac{n_i}{n d_i}$

или для гистограммы рис.1 [4]

$$H(x) = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n} \log \frac{n d_i}{n_i}. \quad (3)$$

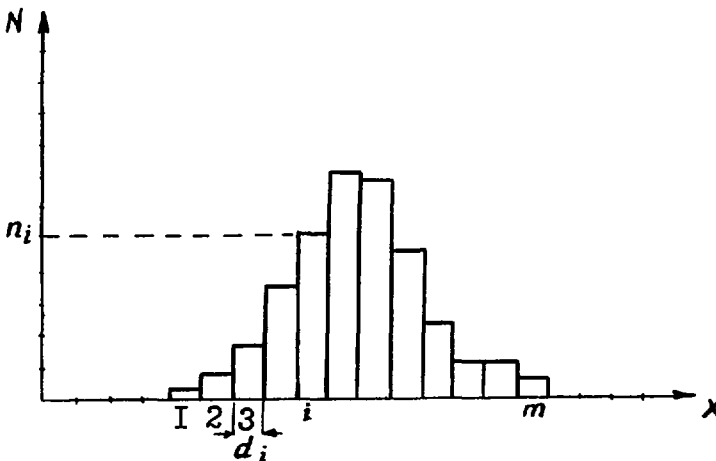


Рис.1. Гистограмма результатов измерения параметра  $x$ ,

$$\sum_{i=1}^m n_i = n$$

Если  $d_i = d$ , т.е. ширина всех столбцов гистограммы одинакова, то

$$H(x) = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n} \log \frac{n}{n_i} + \log d. \quad (4)$$

Для простейшего случая, когда в измерительном тракте один источник помех, значение  $H(x/x_n)$  определяется по формуле (4) и на этой основе может быть получено энтропийное значение погрешности [4]

$$\Delta = \pm \frac{1}{2} \exp H(x/x_n), \quad (5)$$

позволяющее заменить любую погрешность с произвольным законом распределения погрешностью с резко ограниченным равномерным распределением с тем же значением энтропии. Наибольшую потерю информации из всех возможных в природе законов распределения вероятности погрешностей дает нормальное распределение.

Приведенные выражения не учитывают того, что время измерения, предоставляемое прибору для определения отдельного значения исследуемой величины, конечно, а измеряемая величина является функцией времени, координаты и т.д. Кроме того, в общем случае отдельные результаты измерений статистически зависимы. Все это приводит к тому, что при измерениях, когда аналоговая входная величина квантуется и по амплитуде, и по времени, во-первых, возникают шумы квантования как самого измеряемого сигнала, так и шумов измерительного устройства, а во-вторых, количество получаемой информации зависит от соотношения величины интервала между двумя измерениями и интервала корреляции (если первый меньше второго, то существует избыточность информации, а если больше, то возможна потеря её). Поскольку перечисленные факторы существенны при оценке полной информационной способности методик, средств измерения и алгоритмов обработки, предпринимаются попытки количественно определить возникающие потери информации. Так  $H(x)$  для процесса, измеряемого дискретно через интервал времени  $T$  с количеством уровней квантования  $K$ , равна [5]

$$H(x) = -P_0(T) \log P_0(T) - \sum_{n=1}^k P_n(T) x \times \left[ 2 \sum_{m=1}^n P(m/n) \log P(m/n) + P(0/n) \log P(0/n) \right], \quad (6)$$

где  $P_n(T)$  – вероятность  $n$  переходов с уровня на уровень за время  $T$ ;

$P(m/n)$  – вероятность получения значения, отличающегося от предыдущего на  $m$  уровней (при условии  $n$  – переходов).

Эта формула учитывает погрешности квантования по уровню и во времени самой исследуемой величины без учета влияния погрешностей измерительной системы. Условная энтропия определяется композицией шума измерительного устройства и шума квантования, поэтому необходимо учитывать, что при изменении шага квантования во времени при определенном способе интерполяции могут наблюдаться потери информации [8]:

$$\Delta I = H_1(x/x_n) - H_2(x/x_n). \quad (7)$$

Мощность шума квантования зависит от шага квантования и способа интерполяции, поэтому при вычислении потерь информации необходимо учитывать шаг квантования, коэффициенты интерполяционного многочлена, передаточную функцию системы и спектральные плотности шума измерительной системы и шума квантования во времени.

На практике для получения максимально возможного количества информации, а также взаимозависимостей контролируемых параметров один и тот же объект исследуется различными методами в одно и то же или в различное время. Если событие  $X$  – измерение с помощью одной методики, а событие  $Y$  – повторное измерение с помощью другой, то количество информации  $I(XY)$  о событии  $(X, Y)$  без учета потери информации из-за погрешностей равно [7]

$$I(X, Y) = H(Y) - H(Y/X) \dots, \quad (8)$$

где  $H(Y)$  - энтропия события  $Y$ ;

$H(Y/X)$  - условная энтропия события  $Y$ , при условии события  $X$ :

$$H(Y/X) = - \sum_{i=1}^n P_i \sum_{j=1}^m P(y_j / X_i) \log P(y_j / X_i). \quad (9)$$

Здесь  $P_i$  - вероятность того, что событие  $Y$  принимает  $i$ -е значение;  $P(y_j / X_i)$  - условная вероятность того, что событие  $Y$  примет значение  $j$  при  $i$ -м значении события  $X$ . Эта формула легко трансформируется в случае объединения трех и более событий [9].

В ряде случаев полезно знать частную информацию о системе, содержащуюся в сообщении о событии. Значение такой информации при сохранении тех же обозначений, что и в формуле (9), равно [7]

$$I_{X_i \rightarrow Y} = \sum_{j=1}^m P(y_j / X_i) \log \frac{P(y_j / X_i)}{z_j}, \quad (10)$$

где  $z_j$  - вероятность того, что событие  $Y$  приняло значение  $j$ :

$$I_{X_i - Y_j} = \log \frac{P(y_j / X_i)}{z_j}. \quad (11)$$

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДИК В РЕАКТОРНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Как было показано во введении, исследователя или разработчика методик интересуют ответы на такие вопросы:

I. Какая методика (средство измерения, алгоритм обработки) более информативна при проведении исследований какого-либо одного параметра? Например, какую выбрать методику для измерения внешнего размера облученного твэла (дифференциально-трансформаторные или емкостные преобразователи, теневой метод, лазерное сканирование [3] и т.д.) или для оценки осевого массопереноса топлива (гамма- или нейт-



рунное сканирование, гамма- или нейтронно- абсорбционный метод [3] и т.д.)?

2. Какие два или более метода наиболее информативны при оценке одного и того же параметра объекта при различных состояниях этого объекта? Например, какие методы дают больше информации о целостности оболочки облученного твэла (вихретоковые плюс ультразвуковые, вихретоковые плюс гамма-сканирование, только вихретоковые, но до и после облучения и т.д.)?

3. Какие значения характеристики измерительной аппаратуры (чувствительность, точность) наиболее оптимальны для оценки состояния объекта при его исследовании до и после облучения?

4. Какая часть исследуемого объекта наиболее информативна для оценки динамики изменения его состояния?

Можно сформулировать и еще целый ряд подобных вопросов. Попробуем извлечь из информационной оценки количественную величину, способствующую решению поставленных выше вопросов, на примере неразрушающих методов исследований элементов активной зоны ядерных реакторов (твэлов, пэлов, тепловыделяющих сборок).

Определяя количество информации, получаемое с помощью двух альтернативных методик (ответ на первый вопрос), следует иметь в виду следующие ограничения. Для облученных объектов исследования очень сложно или невозможно априори определить закон распределения измеряемой величины, так как, во-первых, условия облучения определены недостаточно точно, а, во-вторых, систематическая ошибка не может быть учтена во многих случаях из-за отсутствия калибровочных образцов, позволяющих отделить влияние облучения от погрешностей методики. Поэтому энтропия  $H(x_1)$  (для первой методики) и  $H(x_2)$  (для второй) определяется апостериори по полученным гистограммам распределения измеряемой величины (рис.2).

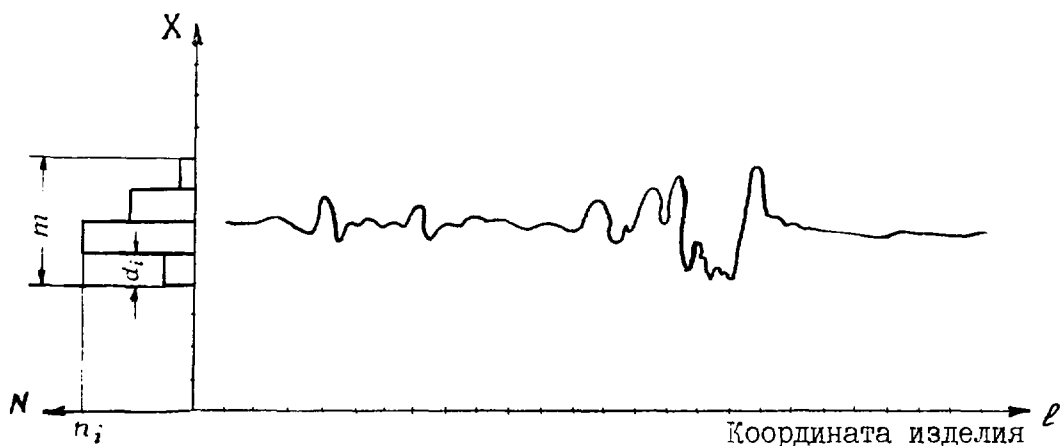


Рис.2. Полученное значение  $X = f(l)$   
и гистограмма результатов измерения

Второй член формулы (I)  $H(x_1/x_{n_1})$  или  $H(x_2/x_{n_2})$ , зависящий только от распределения вероятностей случайной погрешности, определяется по гистограммам, полученным для разных методик при заранее известном распределении или фиксированном значении измеряемого параметра (на калибровочном образце), тогда  $I_1 = H(x_1) - H(x_1/x_{n_1})$  - количество информации, получаемое при использовании первой методики, а  $I_2 = H(x_2) - H(x_2/x_{n_2})$  - второй.

При неразрушающих исследованиях протяженных объектов информации, полученной по гистограмме рис.2, недостаточно, так как большое значение имеет точное знание координаты той или иной аномалии. Различные методики независимо от способа и точности перемещения объекта исследования обеспечивают различную точность "привязки" аномалии к координате, поэтому необходимо также оценивать количество информации, получаемой от знания координаты. Можно заметить (рис.2), что в пределах одной единицы отсчета координаты функция  $X$  на всем протяжении данной реализации пересекает разное количество уровней квантования измеряемой величины, поэтому одинаковая погрешность координаты в разной степени влияет

на погрешность "привязки" значения функции к координате. Тогда количество информации, которое несет координата, определяется по гистограмме рис.3 и с учетом погрешности определения координаты по специальным эталонам равно

$$I_{k_1} = H(k_1) - H(k_1/p_1); \quad I_{k_2} = H(k_2) - H(k_2/p_2).$$

Так как события, устанавливающие значения функции и значения координаты, независимы, то общее количество информации, получаемое при использовании первой методики, равно  $I_1 + I_{k_1}$ , а второй -  $I_2 + I_{k_2}$ ; более информативна та методика, у которой эта сумма больше.

Для ответа на второй вопрос (о выборе нескольких методов для исследования одного параметра) следует определить количество информации, которое дают наблюдения сразу двумя методами (8).

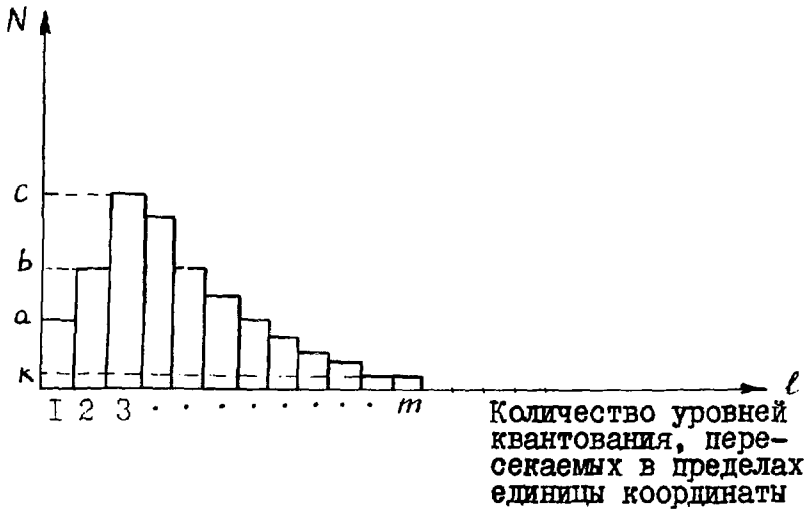


Рис.3. Гистограмма, построенная по количеству пересечений уровней квантования в пределах единицы координаты:  $a$  - количество участков на оси  $l$ , где функция  $x$  в пределах единицы отсчета координаты не пересекает ни одного уровня квантования;  $b$  - один уровень квантования;  $c$  - два уровня квантования;  $k$  -  $m$  уровней квантования

Для выяснения алгоритма вычисления величин  $H(Y)$  и  $H(Y/X)$  обратимся к рис.4. Здесь  $H(Y)$  – энтропия события  $Y$ , заключающегося в определении результата и следования одного параметра одной методикой (или одного параметра после облучения):

$$H(Y) = -\sum_{j=1}^m \tau_j \log \tau_j, \quad (12)$$

где  $\tau_j$  – вероятность  $j$ -го события, определяемая по гистограмме события  $Y$  (проекция на ось координат).  $H(Y/X)$  – условная энтропия события  $Y$  при условии  $X$ , вычисляется по формуле (9), где  $P_i$  определяется по гистограмме события  $X$ , а значение  $P(y_j/x_i)$  получают следующим образом. На каждой координате  $\ell_k$  приводят в соответствие значения параметра в событии  $Y$  и этого же параметра в событии  $X$ . Отношение количества одинаковых ( $j$ -х) значений параметра в событии  $Y$  к количеству одинаковых ( $i$ -х) значений параметра в событии  $X$  есть величина  $P(y_j/x_i)$ . Если события  $X$  и  $Y$  одинаковы (кривые на рис.4 совпадут), то

$$P(y_j/x_i) = 1, \quad H(Y/X) = 0;$$

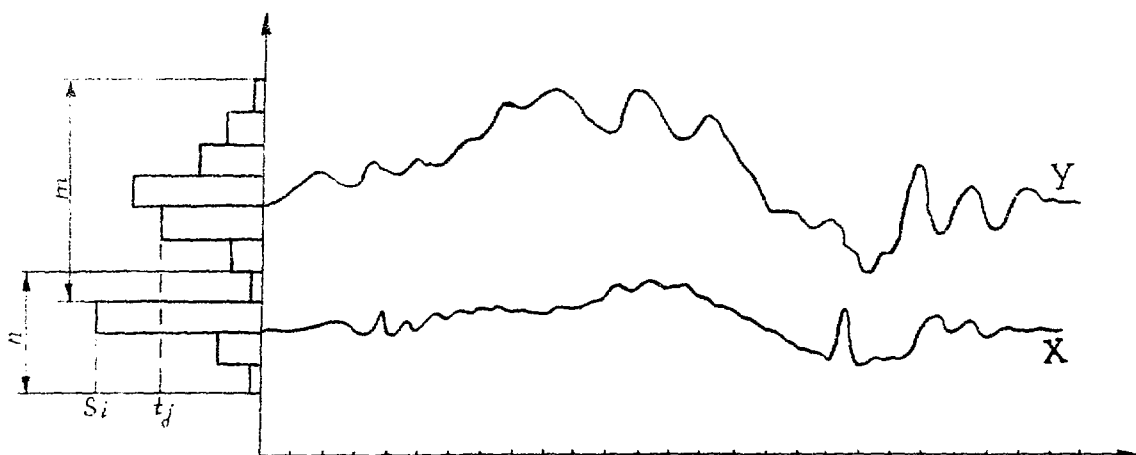


Рис.4. Значения  $X=f(\ell)$ ,  $Y=f(\ell)$  и соответствующие

$$\text{гистограммы } \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{j=1}^m t_j$$

$I(X, Y) = H(Y)$  — максимальна, т.е. получена максимальная информация о взаимных свойствах методик, которая позволяет сделать вывод о том, что для наблюдения параметра достаточно одной из применяемых методик. Если события  $X$  и  $Y$  независимы, то  $H(Y/X) = H(Y)$ ,  $I(X, Y) = 0$ , т.е. применение двух методик бессмысленно, они дают различную (некоррелированную) информацию об объекте, а не об одном и том же параметре.

Из нескольких пар сравниваемых методик  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$  целесообразнее применять те, у которых  $I(X, Y)$  больше.

Определение  $I(X, Y)$  дает возможность ответить и на третий вопрос (об оптимальных значениях характеристик измерительной аппаратуры для оценки параметра объекта). Заниженная чувствительность метода, не позволяющая различить значения параметра (например  $X$ , и тогда  $\rho_j = P = I$ ), приводит к тому, что  $P(y_j/X_i) = r_j$  и  $I(X, Y) = 0$ , и наоборот, завышенное значение чувствительности приводит к слабой зависимости  $X$  и  $Y$ , и также  $I(X, Y) \approx 0$ . Оптимальные характеристики технических средств соответствуют максимуму  $I(X, Y)$ .

Поскольку статистическая погрешность одинаково уменьшает величину энтропии  $H(Y)$  и  $H(Y/X)$ , для сравнения информативности  $I(X, Y)$  учет такой погрешности необязателен. Так как для получения значения  $P(y_j/X_i)$  приходится относить события  $X$  и  $Y$  к одной и той же координате (определенной для  $X$  и  $Y$  независимо), погрешности определения координаты уменьшают величину  $I(X, Y)$  и, таким образом, учитываются при сравнении соответствующих методов и технических средств.

Наконец, для ответа на последний вопрос можно использовать формулу (10). Определяя величину  $I_{X_i \rightarrow Y}$  по алгоритму формулы (9) для разных значений измеряемой величины  $X$ , затем для максимальных значений  $I_{X_i \rightarrow Y}$ , можно установить соответствие  $i$ -го значения координатам исследуемого объекта.

Определить перечисленные выше величины можно уже при первичной обработке данных и, таким образом, иметь совмест-

но с массивами экспериментальных данных принадлежат им количественную информационную характеристику, которую затем использовать для анализа возможности применения тех или иных методов.

При вычислении энтропии по гистограммам с применением формул (3), (4) необходимо учитывать член, определяющий измеряемую величину. Наиболее просто это осуществляется нормированием измеренной величины на максимальное значение и выражение её в одинаковых долях для всех сравниваемых методов. В общем случае при вычислении энтропии необходимо учитывать все перечисленные в разд. I погрешности.

В заключение можно отметить, что совершенствование методик исследований облученных изделий, поиск наиболее оптимальных алгоритмов обработки, разработка новых технических средств неизбежно должны привести к поиску объективных показателей, дающих возможность оценивать и ранжировать методики, алгоритмы и т.д. с точки зрения их эффективности и информативности. Одним из таких показателей может быть количество информации, полученное при исследованиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросьянц А.М. Атомная наука и техника народному хозяйству. - М.: Энергоиздат, 1981.-160 с.
2. Басова Б.Г., Давыдов Е.Ф., Дворецкий В.Г. Дореакторный контроль опытных твэлов: Препринт. НИИАР-47(406). - Дмитровград, 1979.- 19 с.
3. Иванов В.Б., Дворецкий В.Г., Басова Б.Г. Автоматизация дистанционных материаловедческих измерений в горячих лабораториях.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 152 с.
4. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств.- Л.: Энергия, 1968.- 248 с.
5. Коган И.М. Прикладная теория информации.- М.: Радио и связь, 1981.- 216 с.

6. Tutzschky G., Danzer K. Informationstheoretische Charakterisierung des Leistungsvermögens zerstörungsfreier Prüfverfahren.-Neue Hütte, 1980, 25, S.308-312.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей.- М.: Изд-во физико-математической литературы, 1962.- 564 с.
8. Петрунявичус А.П., Шиланскас Р.П. Использование методов теории информации при квантовании сигналов во времени.- В кн.: Радиоэлектроника. Каунас, 1972, т.8, с.405-407.
9. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. - М.: Советское радио, 1966.- 677 с.

Рукопись поступила в ОПИНТИ  
29.10.86.

Валентин Борисович Иванов

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДИК  
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ

Редактор В.И.Породнова

Корректор Л.Н.Кривошеева

---

Подписано в печать 05.06.87. Т-13413. Формат 60x90 1/16.

Печать офсетная. Печ.л. 1,1. Уч.-изд.л. 0,8. Тираж 150 экз.

Зак. тип. № 1530.

Цена 12 коп.

Индекс 3624.

---

Отпечатано в Научно-исследовательском институте  
атомных реакторов им. В.И.Ленина  
433510, Димитровград-10, НИИАР



В.Б.Иванов

НИИАР-10(721)  
УДК 519.241.6:620.179.1

Оценка эффективности неразрушающих методов  
материаловедческих исследований на основе  
информационного критерия

Показана возможность использования информационного критерия в практике материаловедческих исследований при оценке эффективности того или иного метода, технического средства или программного обеспечения.

Препринт, 1987

V.B.Ivanov

RIAR-10(721)  
UDC 519.241.6:620.179.1

Assessment of the Efficiency of the Non-Destructive  
Techniques in Material Studies Based on  
an Information Criterion

Feasibility has been shown for the use of an information criterion in the material studies while assessing the efficiency of one or another method as well as of hard- or software.

Preprint, 1987

## Н А С Т О Я Щ Е Е    И З Д А Н И Е    Н И И А Р а

ЯВЛЯЕТСЯ самостоятельной, не всегда дублирующей в последствии в других изданиях ПУБЛИКАЦИЕЙ отдельных оригинальных научных трудов НИИАРа, на которую можно ссылаться в других публикациях, указывая при этом авторов, наименование, порядковый номер (НИИАР-...), год и место издания (Димитровград).

ИЗДАЕТСЯ с целью более быстрой или более полной информации по сериям

1. Ядерные реакторы
2. Методика и техника облучения
3. Радиационное материаловедение
4. Радиохимия
5. Ядерная физика
6. Вычислительная техника и электроника
7. Вычислительная математика и программирование
8. Информатика и управление

ПЕЧАТАЕТСЯ на ротаприфте НИИАРа тиражом 150 экз.

РАССЫЛАЕТСЯ в научные организации, научно-технические библиотеки и отдельным лицам в соответствии с установленным порядком.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДИК  
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ

Препринт. НИИАР-10(721), 1987, 1-14.