Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLV, вып. 2, 1963 г.

МЕТОД АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМНОГО ВЕСА ГОРНЫХ ПОРОД И РУД ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ГАММА-ЛУЧЕЙ В ШИРОКОМ ПУЧКЕ

В. А. Арцыбашев

Определение объемного веса горных пород и руд по ослаблению в них гамма-лучей производится на месте залегания без нарушения структуры, естественного режима влажности и т. д. При этом автоматически учитываются макро- и микротрещиноватость, кавернозность и другие особенности структуры и текстуры горных пород и руд.

Определение объемного веса по ослаблению гамма-лучей имеет несомненные преимущества перед другими методами: простоту, высокую производительность и экономичность.

Опубликованные исследования по этому методу касаются в основном определения объемного веса грунтов (см., например [3, 7, 8]). Предложенные методики основаны на относительных измерениях объемного веса путем сравнения измерений in situ с измерениями на эталонах плотности. Методика относительных измерений связана с громоздкими тарировочными работами, что лишает метод основного его преимущества — оперативности и простоты.

Предложенный в настоящей статье метод абсолютных измерений объемного веса не требует проведения тарировочных или каких-либо других предварительных работ.

Теория абсолютных измерений объемного веса. Физической основой метода определения объемного веса среды по ослаблению гамма-лучей является пропорциональная зависимость между линейным коэффициентом ослабления гамма-лучей μ и объемным весом ρ

$$\mu = \rho\varphi(Z, E), \tag{1}$$

где φ — некоторая функция;
Z — атомный вес среды;
E — энергия гамма-лучей.

Если фиксировать Z и E, т. е. проводить измерение ослабления гамма-лучей определенного источника в определенной среде, то зависимость между степенью ослабления излучения и объемным весом будет следующая:

$$\frac{J}{A} = F(\rho d), \tag{2}$$

где J — интенсивность гамма-лучей, ослабленная слоем среды толщиной d;
A — интенсивность измерений в тех же условиях при отсутствии поглощающего слоя;
ρd — поверхностная плотность поглощающего слоя, $г/см^2$.

Если зависимость (2) известна, то ее использование для определения объемного веса элементарно просто: J измеряется, A рассчитывается по известной активности источника и расстоянию между источником и детектором, по отношению $\frac{J}{A}$ находится ρd, а затем и ρ, так как d известно из геометрии измерений.

Теоретической основой рассматриваемого метода является установление конкретного вида зависимости (2) и учет влияния Z среды на эту зависимость. Рассмотрим вначале влияние Z среды на ослабление гамма-лучей.

Для энергий естественных и искусственных гамма-источников (до 10 *Мэв*) основными процессами взаимодействия гамма-лучей с веществом являются фотоэффект, комптонэффект и процесс образования пар. Вероятности фотоэффекта и процесса образования пар существенно зависят от Z среды, а вероятность комптонэффекта мало зависит от Z. При определении объемного веса по ослаблению гамма-лучей желательно максимально уменьшить влияние Z среды. Это можно сделать, например, соответствующим выбором энергии источников: надо использовать такие источники, для которых преобладающим процессом взаимодействия излучения с веществом будет комптонэффект. Поэтому для определения объемного веса следует применять источники, энергия излучения которых лежит в пределах 0,5—3 *Мэв*. Именно этот диапазон энергий рассматривается в настоящей статье.

Зависимость (2) для конкретной среды можно установить расчетами или экспериментально. При экспериментальном выяснении закона (2) измерения целесообразно производить в одной среде постоянного объемного веса, а весь необходимый диапазон ρd получать, меняя d. Сложность экспериментального установления закона (2) заключается в трудностях моделирования целого ряда сред. Кроме того, чисто экспериментальный подход затрудняет выяснение общих закономерностей и ряда особенностей рассматриваемого явления. Расчетный метод [2] в сочетании с экспериментом дал возможность довести точность полученных данных до точности эксперимента для всех практически интересных сред.

Непосредственные расчеты показывают, что все элементы, встречающиеся в рудах в заметных весовых количествах, можно разделить на девять групп по способности ослаблять гамма-лучи (различиями внутри групп можно пренебречь):

1) Si, C, N, O, Mg, S, K, Ca
2) Al, Na, P, Cl
3) Fe, Ni, Cu, Zn
4) Co, Ti, V, Cr, Mn
5) Ag, Mo, Sn, I, Ba
6) H_2O
7) W
8) Pb, Pt, Au, Hg, Bi
9) U, Th

Первым в каждой группе стоит наиболее характерный элемент. В отдельную группу выделена вода, так как она имеет аномальные поглотительные свойства из-за повышенной электронной плотности водорода.

Таким образом, все многообразие практически интересных сред можно свести к девяти группам элементов или их комбинациям. Каждая группа характеризуется одной зависимостью (2). Следовательно, любую практически интересную сложную среду можно охарактеризовать с помощью девяти установленных зависимостей (2) или их комбинаций.

На рис. 1 приведены рассчитанные графики зависимости (2) для источников Cs^{137} и Co^{60} при регистрации излучения газоразрядными счетчиками типа МС или СТС в экране из 5-*мм* Fe. Геометрия измерений бесконечная, т. е. источник и детектор погружаются в изучаемую среду бесконечно больших размеров (так что границы среды не влияют на ослабление гамма-лучей). Индекс графика указывает группу элементов. Как точность графиков, так и их различия удобно выражать сдвигом по оси ρd в % ρd. В этом случае точность в один процент ρd будет соответствовать такой же точности в определении объемного веса, так как можно считать, что d измеряется без систематических ошибок. Графики рис. 1 имеют точность не менее 1% ρd для первых

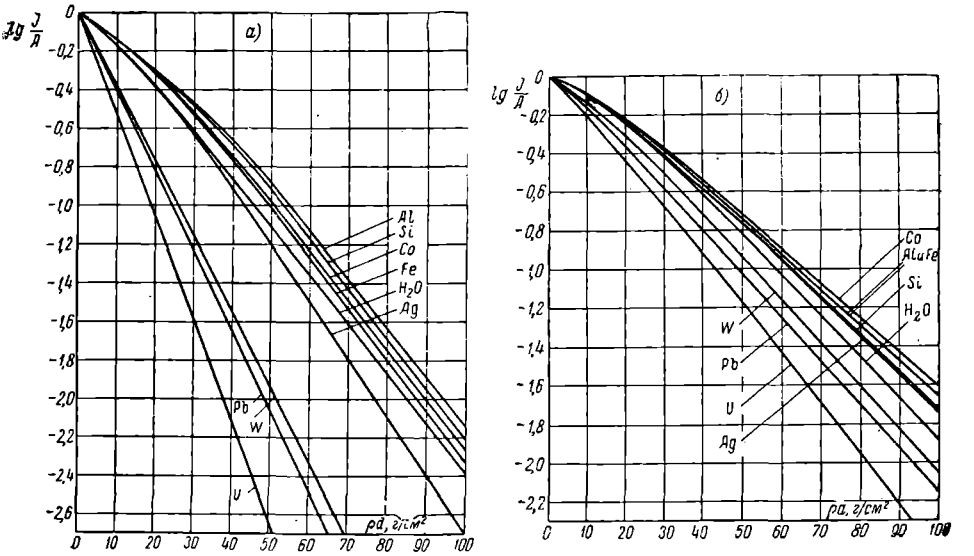


Рис. 1. Ослабление гамма-лучей в различных средах:
а — Cs^{137}; E_0 = 0,66 *Мэв*; *б* — Co^{60}; E_0 = 1,25 *Мэв*

шести групп и 1—2% для трех последних групп. Используя графики, можно наметить методику определения объемного веса реальных сред— горных пород и руд.

Определение объемного веса горных пород и руд. Способы получения графиков ослабления гамма-лучей в сложных средах (горные породы и руды) из графиков девяти простых сред зависят от спектрального состава рассеянного излучения в компонентах сложной среды. Анализ спектров рассеянного излучения в различных однородных средах можно провести на основе приближенного представления спектрального распределения, которое получается при расчете регистрируемой интенсивности методом последовательных столкновений [2]

$$\frac{J}{A} = \sum_{n=0}^{M} \frac{J_n}{A}, \qquad (3)$$

где J_n — спектральная интенсивность гамма-излучения с энергией квантов E_n;

n — номер спектральной линии.

На основании аддитивных свойств среды в отношении ослабления моноэнергетического гамма-излучения можно определить коэффициент ослабления гамма-лучей в сложной среде как среднее арифметическое из коэффициентов ослабления в компонентах сложной среды с учетом их весовой доли [1]. Процесс осреднения (интерполяции) можно при-

менить также к логарифму интенсивности, так как последний пропорционален коэффициенту ослабления [1]. В нашем случае моноэнергетической является спектральная интенсивность J_n, поэтому именно к ней нужно применить процедуру интерполяции

$$\ln \frac{J_n}{A} = \sum_{i=1}^{L} p_i \left(\ln \frac{J_n}{A} \right)_i , \tag{4}$$

где p_i — весовая доля i-го компонента;

$\left(\ln \frac{J_n}{A} \right)_i$ — логарифм в i-ом компоненте сложной среды.

Для интегральной интенсивности в сложной среде, учитывая (3), имеем

$$\frac{J}{A} = \sum_{n=0}^{M} \exp \left\{ \sum_{i=1}^{L} p_i \left(\ln \frac{J_n}{A} \right)_i \right\} \tag{5}$$

Если спектральную интенсивность можно представить в виде

$$\left(\ln \frac{J_n}{A} \right)_i = \ln \frac{J_n}{A} + \ln K_i , \tag{6}$$

то, как легко показать, выражение (5) упрощается

$$\frac{J}{A} = \exp \sum_{i=1}^{L} p_i \left(\ln \frac{J}{A} \right)_i . \tag{7}$$

Формулу (5) можно назвать формулой интерполяции по спектру, а (7) — по интегральной интенсивности.

Рассмотрим условие (6), необходимое для интерполирования по интегральной интенсивности. Величина K_i зависит только от компонента среды и толщины поглощающего слоя ρd, для которой производится расчет, и не зависит от n, т. е. является одинаковой для всего спектра рассеянного излучения. Величина $\ln \frac{J_n}{A}$ не зависит от i, т. е. одинакова для всех компонентов сложной среды. Условие (6) выражает возможность совмещения спектров рассеянного излучения во всех компонентах смеси в один спектр простым сдвигом каждого i-го спектра в системе координат $\ln \frac{J_n}{A}$, ρd на одну и ту же для всех n величину $\ln K_i$. Условие (6), таким образом, выражает сходство спектров и его можно назвать условием подобия.

Рассмотрим горные породы и руды. Элементарный состав большинства распространенных горных пород приведен в табл. 1, рассчитанной по данным А. Н. Заварицкого [4] и М. С. Швецова [6]. Как видно из сравнения с группами элементов, за немногим исключением горные породы состоят преимущественно из элементов группы Si с примесями элементов групп Al, Fe, Co и H_2O. Для этих групп выполняется условие подобия спектров (6). Следовательно, графики ослабления гамма-лучей в горной породе любого состава можно легко получить, используя исходные графики и формулу интерполяции по интегральной интенсивности (7).

Графики ослабления гамма-лучей в горных породах будут либо полностью совпадать с графиком группы Si, либо незначительно отличаться от него, так как горные породы, во-первых, состоят в основном из элементов группы Si, во-вторых, графики для элементов пяти групп, входящих в состав горных пород, мало отличаются друг от друга (рис. 1). Ввиду слабого влияния изменений вещественного состава

горных пород на графики ослабления гамма-лучей рекомендуется оценивать это влияние для конкретной горной породы и, если необходимо, учитывать его, используя усредненные данные по вещественному составу, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Содержание элементов разных групп в горных породах, вес. %

Группы элементов	Изверженные горные породы				Осадочные горные породы								
	кислые	щелочные	основные	ультраосновные	глины	песчаные и кремнистые	известняки	фосфориты	латериты	железистые	марганцевые	каменная соль	гипс и ангидрид
Si	82	73	82	83	79	86	98	82	30	60	19	92	82
Al	12	21	10	5	9	8		16	19	3	2		
Fe	5	4	7	10	5	3			25	34	1		
Co					—				3		68		
H_2O					5	1			20		10	6	18
	99	98	99	98	99	98	98	98	97	97	100	98	100

Полезные компоненты руд, как правило, не входят в группу Si. С точки зрения учета вещественного состава рудные элементы можно разделить на легкие (группы Fe, Co, Al), средние (группа Ag) и тяжелые (группы W, Pb, U). Учет вещественного состава руд легких элементов производится так же, как учет вещественного состава пород: интерполяцией по интегральной интенсивности. Руды тяжелых элементов представляют собой смесь из компонентов, для которых не выполняется условие подобия спектров (6). Следовательно, графики ослабления гамма-лучей в рудах тяжелых элементов необходимо рассчитывать путем интерполяции по спектру. Разница между интерполяцией по спектру и по интегральной интенсивности будет тем больше, чем больше тяжелого элемента и чем меньше энергия источника. Для источников Cs^{137} и Co^{60} эта разница составляет 1—5% *pd*.

Спектры рассеянного излучения в легких и средних элементах различаются не так существенно, как в тяжелых элементах. Влияние разницы в спектрах на интерполяцию для рассматриваемых источников и детекторов мало, поэтому для смеси легких и средних элементов можно пользоваться интерполяцией по интегральной интенсивности.

При определении объемного веса руд тяжелых элементов естественно выбирать такие условия измерений, в которых влияние вещественного состава будет минимальным. Руководствуясь этим, для определения объемного веса руд тяжелых элементов целесообразно использовать источник Co^{60}. Для трех групп тяжелых элементов на рис. 2 представлены графики, полученные интерполяцией по спектру (детектор-счетчик МС или СТС, экранированный 5-*мм* Fe). Для руд легких и средних элементов интерполяцию можно провести по данным рис. 1.

В рудах тяжелых элементов на определение объемного веса заметное влияние оказывает структурный фактор: неравномерность размещения легких и тяжелых элементов относительно друг друга. Чтобы уменьшить или полностью исключить это влияние, необходимо выполнить измерения J два раза, поменяв местами источник и детектор при повторном измерении, и затем усреднить величину $\lg \frac{J}{A}$.

Методика и техника полевых работ. Для определения объемного веса в полевых условиях необходимо иметь серийный радиометр со

счетчиком типа МС или СТС в соответствующей экранировке, источник гамма-лучей (Cs^{137} или Co^{60}), механизмы для проходки в горной породе шпуров малого диаметра, допускающих помещение в них гильзы радиометра, два деревянных шаблона по диаметру шпуров и металлическую линейку для измерения расстояний между шпурами.

Условие бесконечной геометрии выполняется измерением в шпурах на некотором расстоянии от поверхности. Желательно, чтобы шпуры

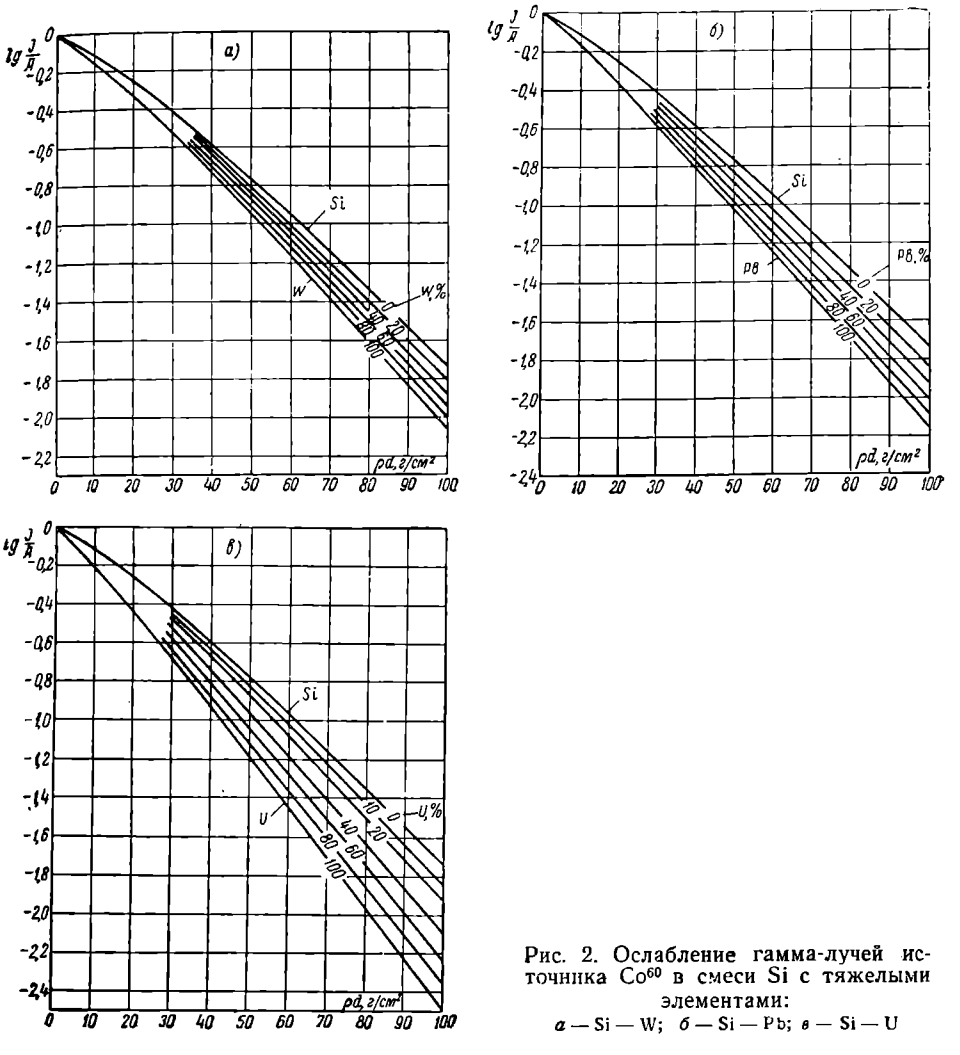


Рис. 2. Ослабление гамма-лучей источника Co^{60} в смеси Si с тяжелыми элементами:
а — Si — W; *б* — Si — Pb; *в* — Si — U

были близки к параллельным. При нарушении параллельности необходимо измерить расстояние между центрами шпуров на поверхности и на некотором расстоянии от нее в воздухе (с помощью шаблонов, вставленных в шпуры), а затем вычислить расстояние между центрами шпуров в точке измерения.

Источник и детектор размещаются по оси шпуров на равной глубине от поверхности. Если расстояние между центрами шпуров R, диаметр шпуров D, то толщина поглощающего слоя

$$d = R - D. \qquad (8)$$

Соотношение (8) нарушается, если проходка шпура ведется с уплотнением его стенок (например, при проходке ломиком в мягкой

горной породе). В этом случае, если весь материал из объема шпура запрессовывается в стенки, для правильного определения объемного веса нужно принимать $d = R$.

Чтобы сэкономить количество шпуров и увеличить точность работ, в каждом шпуре нужно производить максимальное число измерений (от 3—4 до 10—12 при глубине шпура от 0,5 до 1,5 *м*). Первая точка для исключения влияния поверхности располагается на глубине 20 *см*, остальные — через 10 *см* друг от друга.

Оптимальная активность источника для определений объемного веса около 1 *мкюри*. Такая активность обеспечивает достаточную величину измеряемой интенсивности и почти исключает особые меры соблюдения безопасности работ.

При измерении ослабленной интенсивности J необходимо учитывать естественную гамма-активность горных пород, вычитая ее из наблюдаемого эффекта. Интенсивность источника в воздухе A удобно определять градуированием радиометра с помощью используемого источника с последующим вычислением

$$A = \frac{S}{R^2}, \tag{9}$$

где S — активность источника на единице расстояния в воздухе (паспортная величина).

Градуирование (эталонирование) заключается в установлении соответствия между показаниями прибора и интенсивностью излучения, выраженной в каких-либо единицах, например в микрорентгенчасах (*мкр/ч*) [5].

Если расстояние между источником и детектором такого же порядка, как и размеры детектора, то нужно учитывать размеры счетчика, вычисляя

$$A = \frac{S}{Rl} \operatorname{arctg} \frac{l}{R}, \tag{10}$$

где $2l$ — длина катода счетчика.

Оптимальная толщина поглощающего слоя при определении объемного веса 50—100 *г/см²*. Следовательно, оптимальное расстояние между шпурами R в общем случае будет различным в породах разного объемного веса.

Как показал анализ точности полевых работ, наибольшая доля ошибок определения объемного веса связана с ошибкой измерения ослабленной интенсивности, поэтому интенсивность следует измерять особенно тщательно. При среднем качестве работ точность определения объемного веса около 2% (среднеквадратическая относительная ошибка). Уровень систематических ошибок определяется в основном точностью графиков ослабления гамма-лучей, используемых для вычисления объемного веса. Для рекомендуемых нами условий определения объемного веса систематическая ошибка будет менее 1—1,5%.

Метод в геологоразведочной практике. Полевые работы по определению объемного веса выполнялись одним бурильщиком и одним оператором. За шестичасовой рабочий день в условиях подземных горных выработок производительность бригады составляла шесть-восемь определений в пунктах, из которых каждый складывался из 30—60 измерений в трех-семи шпурах. На обработку измерений дополнительно задалживался оператор в течение 2—3 *ч*.

Стоимость одного определения объемного веса в пункте составила в среднем 2 р. 60 к. Определение объемного веса валовым методом

в тех же условиях (слабо- и среднетрещиноватые породы VI—VIII категории) при ручной проходке с применением ВВ составило 146 р. 50 к. на одно определение.

Всего на пяти месторождениях выполнено 189 определений объемного веса по ослаблению гамма-лучей. Эти определения приняты в качестве основных при подсчете запасов. Точность работ была оценена по величине среднеквадратической ошибки, вычисленной по повторным определениям. Она оказалась равной ±2,3%.

Достоверность определений объемного веса предлагаемым способом устанавливалась сравнением с определениями валовым методом, а также сравнением с массовыми (по 20—50 образцов в пункте) определениями методом парафинирования на участках относительно плотных горных пород, т. е. там, где определения объемного веса в образцах методом парафинирования дают близкие к истинным результаты. Как видно из табл. 2, определения объемного веса по ослаблению изучения не содержат заметных систематических погрешностей. Они несколько меньше значений, определенных по образцам, так как определения в образцах не учитывают макротрещиноватости и дают, следовательно, несколько завышенные значения.

Таблица 2

Объемные веса, определенные различными методами

Объемный вес ($г/см^3$), измеренный методом			Объемный вес ($г/см^3$), измеренный методом		
ослабления гамма-лучей	парафинирования	валовым	ослабления гамма-лучей	парафинирования	валовым
Месторождение I			*Месторождение IV*		
Известняки			Сильно метаморфизованные туфоалевролиты, туфопесчаники, диориты, аплиты		
2,49	2,53		2,77	2,82	
			2,80	2,92	
Фосфорсодержащие известняки			2,80	2,77	
			2,83	2,75	
2,84	2,89	2,84			
2,70	2,68	2,74	*Месторождение V*		
2,84	2,77	—	Алевролиты		
2,75	2,87				
2,61	2,58		2,57	2,61	
Месторождение II			2,66	2,71	
Фосфориты			2,65	2,74	
3,13		3,17	Диоритовый порфирит		
3,14	—	3,14			
2,93	2,94	—	2,89	2,72	
2,94	2,98				
2,98	3,04		Лампрофир		
Месторождение III					
Диоритовый порфирит			2,77	2,83	2,73
			Среднее по гамма-методу и парафинированию		
2,84	2,82		2,77	2,79	
Туфы альбитофиров			по гамма-методу и валовому методу		
			2,92		2,92
2,51	2,64				
2,78	2,87				
2,92	2,88				
2,92	2,92				
2,65	2,70				
2,72	2,74				

Опыт внедрения метода на пяти месторождениях показал, что м тод легко осваивается, не требует больших затрат и дает достоверн результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аглинцев К. К. Дозиметрия ионизирующих излучений. Гостехтеоризд 1957.

2. Арцыбашев В. А. Гамма-излучение точечного изотропного источни в однородной среде. Сб. «Вопросы разведочной геофизики», вып. 1. Гостоптехи дат, 1962.

3. Данилин А. И. Применение ядерных излучений в гидрометеорологии. Г дрометеоиздат, 1957.

4. Заварицкий А. Н. Изверженные горные породы. Изд-во АН СССР, 19

5. Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. Ред. Ал сеев В. В. и др. Госгеолтехиздат, 1957.

6. Швецов М. С. Петрография осадочных пород. Госгеолтехиздат, 1958.

7. Bernhard R., Chasek M. Nondestruct. Testing, 1953, v. XI. № 8.

8. Bernhard R., Chasek M. Proc. Amer. Soc. Testing Mater., 1955, v.