ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ОСНОВАНИЙ
И ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАДИОИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ



Москва — 1971

gost.e-ecolog.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3
1. Общие положения 4
2. Определение плотности грунтов 4
3. Нейтронный метод определения влажности грунтов . . 19
4. Определение скорости и направления фильтрации грунтовых вод методом радиоактивных индикаторов 28
5. Исследование абразивных свойств скальных грунтов и других материалов с помощью меченых атомов 36
6. Тарировка радиоизотопных плотномеров и влагомеров и обработка результатов измерений 40

НИИ оснований и подземных сооружений
ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
РАДИОИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ГРУНТОВ

* * *

Стройиздат

Москва, Кузнецкий мост, д. 9.

* * *

Редактор издательства Л. А. Савранская

Технический редактор К. Е. Тархова

Корректор С. Г. Левашова

Сдано в набор 12/IX 1970 г. Подписано к печати 16/III 1971 г. Т-04489. Бумага 84×108$^{1}/_{32}$—0,75 бум. л. 2,52 усл. печ. л. (уч.-изд. 3,4 л). Тираж 13.000 экз. Изд. № XII—2634. Зак. 2006. Цена 17 коп.

Типография № 32 Главполиграфпрома.
Москва, Цветной бульвар, 26

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ОСНОВАНИЙ
И ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РАДИОИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ
Москва — 1971

УДК 624.131.43:621.039,8

«Рекомендации по использованию радиоизотопных методов для определения физико-механических свойств грунтов» разработаны НИИ оснований и подземных сооружений Госстроя СССР в соответствии с планом научно-исследовательских работ института.

В Рекомендациях изложены основные правила проведения радиометрических измерений плотности, влажности и абразивности грунтов, определения направления и скорости фильтрации, а также тарировки радиометрических приборов, оценки погрешностей измерения, обработки результатов непрерывной записи и рекомендуемая регистрирующая аппаратура.

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектно-изыскательских институтов, строительных лабораторий, занимающихся исследованиями свойств грунтов.

Рекомендации составлены канд. техн. наук М. И. Смородиновым, инженерами А. А. Морозовым и И. В. Лавровым.

3—2—4

План I кв. 1970 г., № 17

ПРЕДИСЛОВИЕ

Устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений — сложные комплексы строительного производства, базирующиеся на достижениях механики грунтов, позволяющей достаточно точно учитывать деформации грунтовых оснований под действием внешней нагрузки. Сложность вопросов, изучаемых механикой грунтов, связана с тем, что грунт представляет собой дисперсную среду, в порах которой заключены вода и газ.

Грунтовое основание может быть слоистым, неоднородным, с переменным уровнем грунтовых вод. Деформация основания зависит от вида грунта, поэтому механика грунтов тесно связана с инженерной геологией и грунтоведением. Эти науки взаимно дополняют друг друга в области разработки полевых методов исследования грунтов для проектирования сооружений.

Изучение свойств, состава грунтов и изменчивости их в разрезе отложений можно удовлетворительно решить методами, позволяющими оценивать свойства грунтов в условиях их естественного залегания. В этой области признанным направлением изучения грунтов является использование ядерных излучений.

Применение радиоактивных изотопов и источников ядерных излучений при инженерно-геологических и гидрологических исследованиях, для контроля качества выполнения земляных работ и в научных исследованиях получило значительное развитие как в Советском Союзе, так и за рубежом.

Практика использования радиоактивных методов в строительстве показала, что они значительно ускоряют и удешевляют проведение исследований.

В настоящее время создан ряд установок и приборов (Всегингео, ВНИИГиМ, НИИ оснований и др.), позволяющих определять некоторые физические характеристики грунтов в естественном залегании.

Применение радиоизотопных методов совместно с другими методами исследований позволяет оценить в полевых условиях прочностные и деформативные свойства грунтов.

Дирекция института

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие Рекомендации распространяются на определение свойств грунтов, а также на изучение направления и скорости фильтрации грунтовых вод радиоизотопными методами при инженерно-геологических изысканиях, научных исследованиях и других работах.

1.2. При работе с радиоизотопными приборами следует выполнять требования «Санитарных правил работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений»* и «Правила перевозки радиоактивных веществ»**. Персонал, занятый на выполнении работ, сдает экзамен по технике безопасности руководителю работ.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ГРУНТОВ

Гаммаскопический метод

Назначение и область применения

2.1. Данный раздел устанавливает методику радиометрических измерений плотности грунтов путем просвечивания их пучком γ-квантов.

2.2. Гаммаскопический метод используется для послойного определения плотности грунтов до глубины 1,5 *м* в лабораторных и полевых условиях.

Физическая сущность метода

2.3. Метод основан на ослаблении интенсивности пучка γ-квантов при прохождении его через слой вещества в зависимости от плотности последнего.

2.4. При прохождении через вещество γ-кванты в основном взаимодействуют с электронами, передавая им всю или часть своей энергии. Для квантов с энергией 0,3—3 *Мэв* основное значение имеют два процесса: фотоэлектрическое поглощение и комптоновское рассеяние. При фотоэлектрическом поглощении происходит полное поглощение γ-кванта атомом. При комптоновском рассеянии γ-квант не исчезает, а только передает часть своей энергии электрону.

2.5. Измерение плотности материалов производится по двум схемам, которые различаются по принципу регистрации узкого или широкого пучка γ-лучей.

2.6. При использовании узкого пучка регистрируются только γ-кванты, не взаимодействовавшие со средой при прохождении их от источника до детектора (рис. 1). При широком пучке детектор регистрирует γ-кванты, как не взаимодействующие со средой, так и испытавшие комптоновское рассеяние (рис. 2).

---

* Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений (№ 333—60). Госатомиздат, 1963.

** Правила перевозки радиоактивных веществ (№ 349—60). Госатомиздат, 1961.

Конструктивные схемы датчиков

2.7. Конструктивные схемы датчиков (см. рис. 1 и 2) для определения плотности гаммаскопическим методом включают в себя источник излучения и детектор (газоразрядный или сцинтилляционный счетчик γ-квантов).

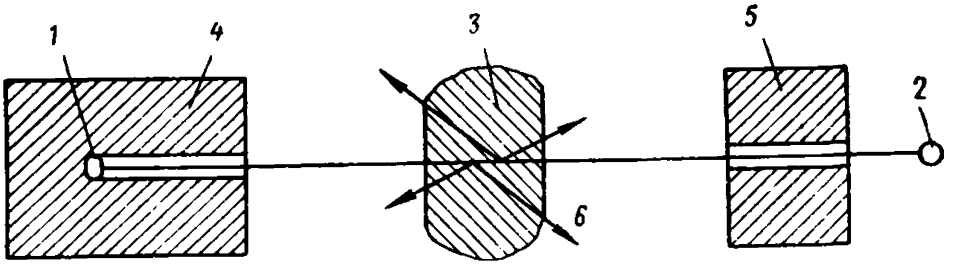

Рис. 1. Схема определения плотности узким пучком γ-квантов

1—источник γ-излучения; *2*—детектор; *3*—исследуемый объект; *4*—свинцовый контейнер с узким цилиндрическим отверстием (коллиматором); *5*—свинцовый экран с коллиматором; *6*—рассеянное излучение

2.8. В качестве детекторов применяют различные типы счетчиков. Графическая зависимость эффективности газоразрядных и сцинтилляционных счетчиков от энергии γ-излучения приведена на рис. 3 и 4.

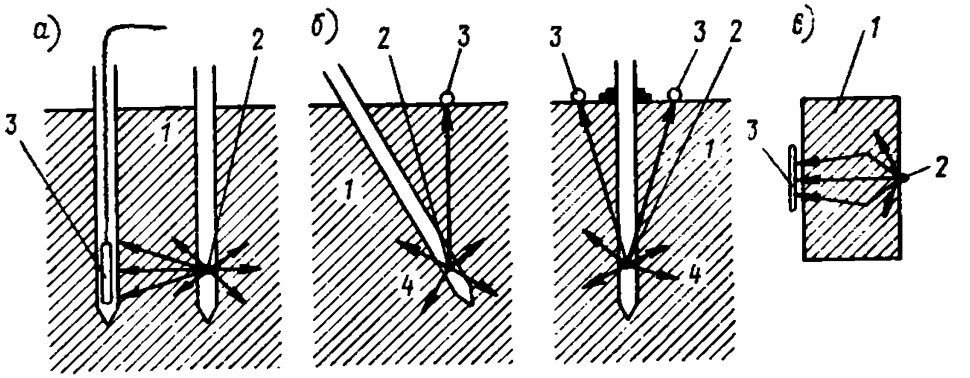

Рис. 2. Схемы измерений плотности широким пучком γ-квантов

а—источник и детектор, находящиеся непосредственно в исследуемой среде; *б*—источник (или детектор), находящийся на поверхности среды, детектор (или источник) в среде; *в*—исследуемая среда между источником и детектором; *1*—исследуемая среда; *2*—источник γ излучения; *3*—детектор; *4*—рассеянное излучение

2.9. В большинстве датчиков используются радиоактивные источники Co^{60} (1,17 и 1,33 *Мэв*), Cs^{137} (0,66 *Мэв*) и Ra^{226} (0,8 *Мэв*) активностью 1—5 *мг · экв* Ra. Применение источников большей активности не рекомендуется по условиям техники безопасности.

2.10. При проведении измерений гаммаскопическим методом применяют три схемы:

а) по схеме рис. 2, *а* производят измерение плотности грунтов на глубину до 1,5 *м* путем параллельного опускания или поднятия источника и детектора по высоте исследуемого слоя;

б) схема на рис. 2, *б* применяется при определении плотности поверхностных слоев мощностью 20—60 *см*;

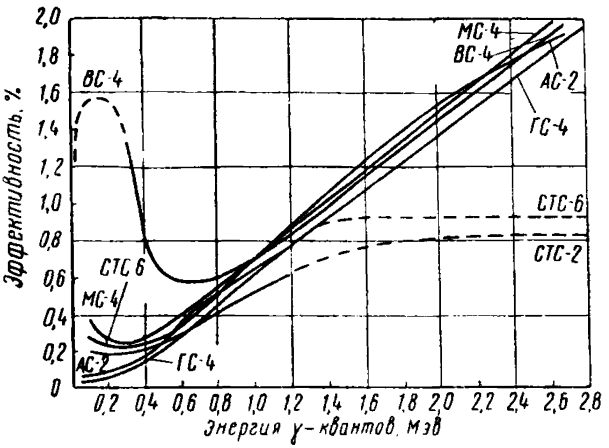

Рис. 3. Зависимость эффективности газоразрядных счетчиков от энергии γ-излучения

в) схема рис. 2, *в* обычно используется для лабораторных определений плотности образцов, монолитов, смесей, суспензий и т. д.

2.11. Измерения в узком пучке производят путем коллимации γ-квантов. Коллимация осуществляется в основном двумя способами:

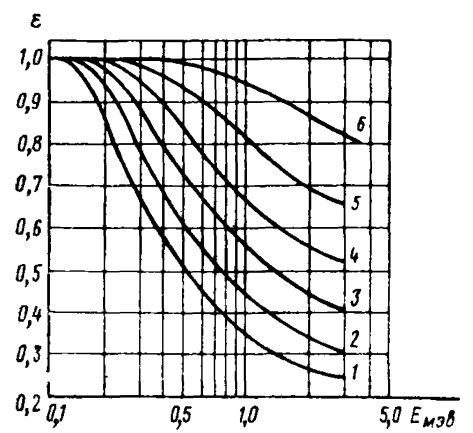

Рис. 4. Зависимость эффективности сцинтилляционных счетчиков (кристалл NaI (Tl) от энергии γ-квантов

1—кристалл ∅ 30×20 *мм*; *2*—кристалл ∅ 40×40 *мм*; *3*—кристалл размером 60×60 *мм*; *4*—кристалл ∅ 80×80 *мм*; *5*—кристалл ∅ 120×120 *мм*; *6*—кристалл ∅ 200×200 *мм*

применением свинцовых коллиматоров (см. рис. 1) или сцинтилляционного детектора, способного различать регистрируемое излучение по энергиям.

Методика проведения измерений

2.12. При использовании узкого пучка плотность определяют по формуле

$$\rho = \frac{\ln I_0/I}{\mu d}, \qquad (1)$$

где I — регистрируемая интенсивность при просвечивании слоя грунта в *имп/мин*;

I_0 — интенсивность, регистрируемая при отсутствии грунта (поглощающей среды), в *имп/мин;*

d — толщина просвечиваемого слоя в *см;*

μ — массовый коэффициент ослабления γ-излучения в грунте, зависящий от энергии излучения и химического состава среды.

Теоретические значения μ для источника Co^{60} $\mu=0{,}0562$ *см²/г*; для источника Cs^{137} $\mu=0{,}0773$ *см²/г*.

2.13. Использование метода узкого пучка на практике затруднено, так как требует использования громоздких коллимирующих систем (конструктивная коллимация), а также значительно уменьшает эффективность использования источника γ-квантов. Применяется при необходимости тщательной дифференции изучаемого образца (монолита) по высоте. Длина коллимационного отверстия должна составлять не менее 5 диаметров при диаметре не более 1 *см*.

2.14. В практике измерений чаще используют широкий или частично коллимированный пучок γ-квантов. В этом случае детектор регистрирует не только первичные γ-кванты, но и вторичные рассеянные. γ-лучи, пришедшие к детектору после одного или нескольких рассеяний, обладают энергией, меньшей, чем энергия первичного излучения. Таким образом, в общем случае детектор регистрирует определенный непрерывный спектр γ-излучения. Характер спектра регистрируемого γ-излучения зависит от расположения в среде источника по отношению к детектору, состава и физико-механических свойств рассеивающей и поглощающей среды, конструкции прибора и геометрии измерений.

2.15. При просвечивании широким пучком плотность определяется по формуле

$$\rho = \frac{\ln I_0/I}{\eta \mu d}, \qquad (2)$$

где η — коэффициент, учитывающий регистрацию рассеянного излучения ($\eta<1$).

Коэффициент η получают экспериментально путем непосредственного измерения на средах определенной плотности. Величина его зависит от характера регистрируемого γ-спектра. Последний зависит не только от перечисленных в п. 2.14 факторов, но и от массовой толщины поглощающего слоя ($T=\rho d$). Особенно существенно изменение коэффициента η происходит при малых значениях $T<30\div40$ *г/см²*. При $T>60\div70$ *г/см²* этот коэффициент остается практически постоянным. Определение коэффициента η следует производить при нескольких значениях T (не менее 5—6).

2.16. При проведении измерений плотности широким пучком γ-квантов слой, с которого снимается информация, составляет $l+(4\div8)$ *см* в зависимости от плотности, где l — длина катода детектора.

2.17. Значения μ-—γ-излучения Co^{60} и Cs^{137} для основных породообразующих элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Массовые коэффициенты ослабления γ-излучения для основных породообразующих элементов

Источники	Элементы						
	H_2O	Si	Al	O	Na	Mg	K
Co^{60}	0,0627	0,0560	0,0546	0,0566	0,0539	0,0559	0,0547
Cs^{137}	0,0845	0,0774	0,0764	0,0771	0,0734	0,076	0,0752

Коэффициент μ для воды примерно на 11% больше, чем для скелета грунта, так как электронная плотность водорода в два раза больше, чем для других элементов, слагающих грунты.

2.18. Если исследуемая среда состоит из твердой фазы (скелет грунта) и воды, закон ослабления пучка γ-квантов принимает следующий вид:

$$I = I_0 e^{-(\mu_г \rho_г + \mu_в \rho_в) d}, \qquad (3)$$

где $\rho_г$ — число граммов твердой фазы в 1 $см^3$ (объемный вес твердой фазы грунта);

$\rho_в$ — число граммов воды в 1 $см^3$ (объемная влажность, выраженная в $г/см^3$);

$\mu_г$, $\mu_в$ — массовые коэффициенты ослабления для грунта и воды.

Логарифмируя, получим:

$$(\mu_г \rho_г + \mu_в \rho_в)\, d = \ln \frac{I_0}{I},$$

откуда

$$\rho = \rho_г + \rho_в = \frac{\ln I_0/I}{\mu_г d} - \frac{\mu_г - \mu_в}{\mu_г} \rho_в. \qquad (4)$$

Для определения плотности грунтов с высокой точностью необходимо знать влажность.

Для узкого пучка выражение (4) примет вид

$$\rho = \frac{\ln I_0/I}{\mu_г d} - 0{,}11\, \rho_в \qquad (5)$$

или

$$\rho = \frac{\ln I_0/I}{\mu_г d} - 0{,}11\, \omega \rho_г, \qquad (6)$$

где ω — весовая влажность, равная

$$\omega = \frac{\rho_в}{\rho_г}. \qquad (7)$$

Для широкого пучка рекомендуется зависимость

$$\rho = \frac{\ln I_0/I}{\mu_г d} - 0{,}08\,\rho_в \qquad (8)$$

или

$$\rho = \frac{\ln I_0/I}{\mu_г d} - 0{,}08\,\omega\rho_г. \qquad (9)$$

2.19. Определение плотности твердой фазы грунта при известной весовой или объемной влажности производится по формулам, получаемым из выражения (3):

$$\rho_г = \frac{\ln I_0/I}{\mu_г d} - \frac{\mu_в}{\mu_г}\rho \qquad (10)$$

или

$$\rho_г = \frac{\ln I_0/I}{(\mu_г + \mu_в\omega)\,d}. \qquad (11)$$

2.20. Определение плотности скелета грунта при полном влагонасыщении производится по формуле

$$\rho_г = \frac{\ln I_0/I - \mu_в\gamma_в d}{\left(\mu_г - \mu_в\dfrac{\gamma_в}{\gamma_г}\right)d}, \qquad (12)$$

где $\gamma_в$ — удельный вес воды, 1 *г/см*^{3};

$\gamma_г$ — удельный вес скелета грунта, 1 *г/см*^{3}.

Формула (12) получается после подстановки выражения

$$\rho_в = \gamma_в\left(1 - \frac{\rho_г}{\gamma_г}\right)\ г/см^3 \qquad (13)$$

в зависимость (10).

2.21. Минимальные примеси (в вес. %) к Si-среде, которые можно не учитывать при измерении плотности гаммаскопическим методом, приведены в табл. 2.

2.22. При изменении толщины или материала экрана детектора (корпус, обсадные трубы и т. д.), геометрии измерений необходимо вводить поправочные коэффициенты K для определения действительного значения массовой плотности T:

$$T = T_п K,$$

где $T_п$ — массовая плотность при новых условиях измерений.

Значения коэффициентов K для некоторых условий измерения приведены в табл. 3.

2.23. Основными источниками случайных ошибок (статистических) являются ошибки измерения интенсивности γ-излучения, связанные с нестабильной работой аппаратуры и флуктуациями радиоактивного распада. Погрешности определения коэффициентов η, μ и толщины просвечиваемого слоя d вносят систематические ошибки в величины определения плотности. Конструкция датчика должна обеспечивать строгое и постоянное взаимное геометрическое расположение источника и детектора излучения по отношению друг к другу и к объекту измерения.

Таблица 2

Минимальные примеси (в вес. %) к Si-среде, которые можно не учитывать при измерении плотности гаммаскопическим методом

Источник	Детектор	Группа элементов		
		Al, Na, Cl, P	Fe, Cu, Ni, Zn	H_2O
Co^{60}	Газоразрядный	14	14	7
Cs^{137}	»	15	11	6
Co^{60}	Сцинтилляционный	13	10	6
Cs^{137}	»	12	7	7
Ra^{226}	Газоразрядный	14	5	7
Ra^{226}	Сцинтилляционный	14	6	6

Таблица 3

Значения коэффициентов K для различной геометрии измерений

Толщина экрана в *мм* и наименование материала	Геометрия измерений		
	детектор-источник в среде	детектор или источник на поверхности среды	среда между источником и детектором
Легкие элементы (атомный вес<30)			
5,Fe	1	0,97	0,95
3,Fe	1,015	0,975	0,95
1—2, Al	1,035	0,98	0,96
Средние элементы (атомный вес<60)			
5,Fe	1	0,98	0,97
3,Fe	1,01	0,985	0,97
1—2, Al	1,02	0,99	0,97

Экспериментальное определение коэффициентов η и μ (когда последний трудно рассчитать теоретически с достаточной точностью) производится измерительными устройствами, которые применяются для измерений в натурных или производственных условиях.

Расчет массового коэффициента ослабления для сложной среды выполняется по формуле

$$\overline{\mu} = \sum_{i=1}^{m} p_i \mu_i, \qquad (14)$$

где p_i — относительное весовое содержание i-го элемента в веществе.

2.24. Относительная ошибка измерения плотности гаммаскопическим методом оценивается по формуле

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{I\Delta I_0 + I_0\Delta I}{I_0 I\,(\ln I_0 - \ln I)} + \frac{\Delta\eta}{\eta} + \frac{\Delta\mu}{\mu} + \frac{\Delta d}{d}, \qquad (15)$$

получаемой дифференцированием уравнения (2).

2.25. Ориентировочно активность S источника γ-излучения определяется по формуле

$$S \approx \frac{4\pi R^2 e^{\eta\mu\rho d}}{3{,}7\cdot 10^7 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 (\eta\mu\rho d)^2 \varepsilon v t m} \text{ мкюри}, \qquad (16)$$

где R — расстояние между источником и детектором в *см;*
ε — эффективность регистрации γ-квантов детектором;
v — площадь сечения детектора в *см*^{2};
t — время измерения в *сек*;
m — число γ-квантов на распад в источнике.

2.26. Для определения плотности гаммаскопическим методом в некоторых случаях целесообразно пользоваться тарировочной зависимостью $I=f(\varrho)$. Тарировочная зависимость строится в полулогарифмической сетке координат, где по одной из осей координат откладывается $\ln I$. Если $\mu=\text{const}$ и $\eta=\text{const}$, зависимость принимает вид прямой. Тарировку проводить не менее чем по пяти эталонным точкам.

2.27. Тарировка устройства должна периодически контролироваться по двум-трем реперным точкам. При проверке тарировки следует учитывать возможную поправку на распад радиоактивного источника.

2.28. При регистрации γ-квантов с энергией >150 *кэв* (что полностью устраняет влияние фотоэффекта) значение массового коэффициента ослабления практически не зависит от вариации химического состава твердой фазы грунта, так как отношения эффективных порядковых номеров $Z_{эф}$ к эффективным массовым числам $A_{эф}$ для элементов, слагающих твердую фазу различных типов грунтов, изменяются очень мало (0,501—0,507).

Метод рассеянного γ-излучения

Назначение и область применения

2.29. Данный раздел устанавливает методику определения радиометрическим способом плотности грунтов путем регистрации интенсивности рассеянных средой γ-квантов.

2.30. Метод рассеянного γ-излучения используется для измерения плотности грунтов в естественном залегании и плотности насыпных грунтов (до глубины 20—30 *м*), изучения режима влажности грунтов, определения плотности поверхностных слоев (5—15 *см*) без внедрения датчика в исследуемый массив и т. д.

Физическая сущность метода

2.31. Измерение плотности исследуемой среды методом рассеянного γ-излучения производится радиометрическими приборами, в которых источник и детектор γ-квантов разделены свинцовым экраном,

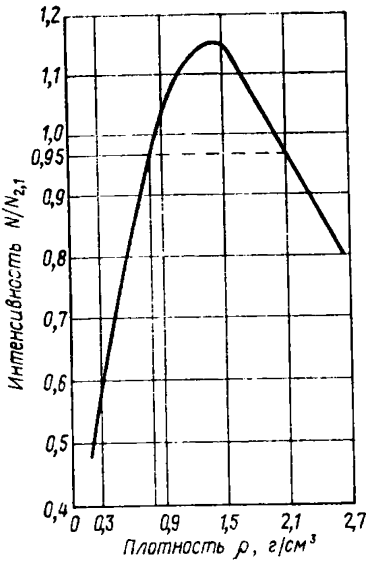

Рис. 5. Общий вид зависимости $N=f(\varrho)$

поглощающим прямое γ-излучение. Детектор регистрирует в основном излучение, рассеянное средой, контактирующей с прибором.

2.32. При проведении измерений плотности среды данным методом пользуются функциональной зависимостью между регистрируемой интенсивностью γ-излучения и плотностью среды $I=f(\varrho)$. График этой зависимости можно разделить на три части: восходящую, область максимума и нисходящую ветвь (рис. 5). Положение максимума зависит от базы прибора, т. е. расстояния между серединой детектора и источника, энергии источника и конструкции самого радиометрического прибора.

2.33. Такой характер зависимости обусловлен конструкцией двух процессов: рассеяния и поглощения γ-излучения. Вероятность комптоновского эффекта пропорциональна числу электронов в единице объема. Поэтому с увеличением плотности среды интенсивность рассеянного излучения должна возрастать, что и наблюдается при небольших значениях плотности. Однако в результате многократного рассеяния происходит уменьшение энергии γ-кванта и, следовательно, увеличивается вероятность его поглощения за счет фотоэффекта. Постепенно поглощение начинает превалировать, и тогда при увеличении плотности среды интенсивность рассеянного излучения, регистрируемого детектором, уменьшается.

2.34. Теоретически установленная зависимость $I=f(\varrho)$ не обеспечивает достаточной точности для решения практических задач, так как очень сложно одновременно учесть все факторы, влияющие на изменение регистрируемой интенсивности γ-излучения. Поэтому устанавливают функциональную связь между плотностью среды и интенсивностью рассеянного γ-излучения, полученную для конкретной аппаратуры и конструкции радиоизотопного плотномера, экспериментально.

Конструктивные схемы датчиков

2.35. Основными элементами датчиков для определения плотности методом рассеянного γ-излучения являются: детектор, регистрирующий рассеянные γ-кванты, источник радиоактивного излучения и свинцовый экран, расположенный между ними.

2.36. По условиям применения датчики делятся на глубинные и поверхностные (рис. 6).

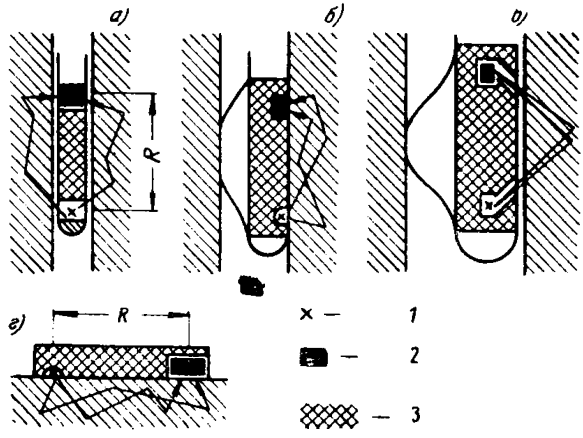

Рис. 6. Типы γ—γ-датчиков

а — датчик для определения плотности в скважинах малого диаметра; *б* и *в* — датчики для определения плотности в скважинах большого диаметра; *г* — датчик для измерения плотности поверхностных слоев; *1* — источник; *2* — детектор; *3* — разделительный экран

2.37. По условиям измерения различают 4π-датчики с симметричным излучением и регистрацией, охватывающей все пространство вокруг датчика, и 2π-датчики с односторонним излучением и регистрацией.

2.38. Датчики (зонды) типа *а* (рис. 6, *а*), используются для изучения свойств грунтов и пород в скважинах малого диаметра (20—50 *мм*). Диаметр гильзы, в которой размещаются все элементы зонда, и свинцового экрана делают равным диаметру скважины.

2.39. Датчики типов *б*, *в* (рис. 6, *б*, *в*) используются при исследованиях в скважинах большого диаметра (90—120 *мм*).

2.40. Измерение плотности тонких поверхностных слоев (5—15 *см*) выполняется зондом типа *г* (рис. 6, *г*).

Методика определения плотности

2.41. Основными характеристиками плотномеров, базирующихся на методе рассеянного γ-излучения (γ—γ-плотномеры), являются: абсолютные скорости счета; форма и крутизна зависимости $I=f(\varrho)$; геометрические размеры сфер, с которых снимается информация; точность измерений.

2.42. Эти характеристики зависят от аппаратурных, скважинных, контактных и грунтовых факторов.

2.43. Аппаратурные факторы: активность излучателя; эффективность регистрирующего устройства; длина и диаметр чувствительного объема детектора; спектральная чувствительность детектора; энергетический спектр исходных γ-квантов; взаимное расположение источника излучения и детектора (база плотномера); форма, диаметр и толщина экрана-разделителя.

2.44. Скважинные факторы: диаметр скважин, материал и толщина обсадных труб.

2.45. Контактные факторы: затрубные зазоры, уплотнения и наличие каверн, зазоры между подошвой прибора и средой (поверхностный плотномер).

2.46. Грунтовые факторы: химический состав гранулометрический состав, влажность, градиент плотности.

Активность излучателя и эффективность регистрирующего устройства

2.47. Регистрируемая интенсивность γ-излучения увеличивается пропорционально активности источника.

Активность источника практически не влияет на крутизну зависимости $I=f(\varrho)$. Малая эффективность регистрирующего устройства может ухудшить зависимость скорости счета от плотности. При проведении измерений интегральная регистрируемая интенсивность должна составлять несколько тысяч импульсов в минуту.

В подавляющем большинстве плотномеров применяются радиоактивные источники Co^{60} (1,17 и 1,33 *Мэв*), Cs^{137} (0,66 *Мэв*) и Ra^{226} (0,8 *Мэв*) активностью 1—5 *мг · экв* Ra.

Длина, диаметр и спектральная чувствительность детектора

2.48. Эти факторы в значительной степени определяют все характеристики γ — γ-плотномеров.

Увеличение диаметра и длины детектора приводит к увеличению регистрируемой прибором скорости счета. Такое увеличение не всегда целесообразно, так как при практических измерениях в определенных условиях требуются приборы оптимальных базы и диаметра. Регистрируемые спектры рассеянного γ-излучения для сред различной плотности (рис. 7) указывают на целесообразность применения детекторов с большей спектральной чувствительностью в области малых энергий. Использование таких детекторов увеличивает абсолютную скорость счета, крутизну и улучшает форму зависимости $I=f(\varrho)$; кроме того, они позволяют несколько увеличить сферу, с которой снимается информация (рис. 8).

Однако при регистрации γ-квантов с энергией менее 150 *кэв* показания плотномера могут быть искажены за счет вариации химического состава. Регистрацию детектором мягкого излучения можно предотвратить экранировкой его стальной или свинцовой пластиной с массовой толщиной 2—3 *г/см*^{2}. При работе со сцинтилляционным детектором тот же результат можно достигнуть дискриминацией импульсов, поступающих от детектора.

Энергетический спектр исходных γ-квантов

2.49. Применение источников с большой энергией излучения позволяет увеличить величину сфер, с которых снимается информация. Однако при этом ухудшается крутизна зависимости $I=f(\varrho)$, так как уменьшается массовый коэффициент ослабления.

Использование источников с меньшей энергией излучения смещает максимум зависимости $I=f(\varrho)$ в сторону меньших плотностей при постоянной величине базы плотномера.

Взаимное расположение источника излучений и детектора

2.50. База прибора в наибольшей степени определяет форму и крутизну зависимости $I=f(\varrho)$.

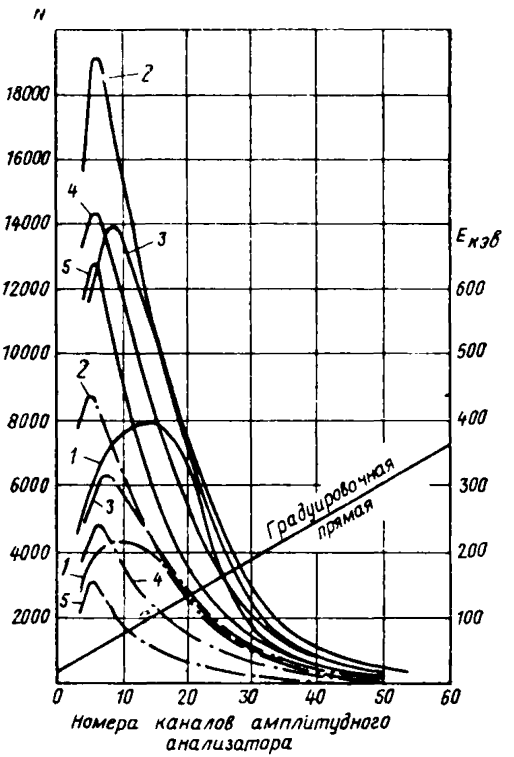

Рис. 7. Регистрируемые спектры рассеянного γ-излучения для различных плотностей
1—ρ = 0,16 *г/см³*; *2*—ρ=0,82 *г/см³*; *3*—ρ=1 *г/см³*; *4*—ρ=1,42 *г/см³*; *5*—ρ=1,8 *г/см³*

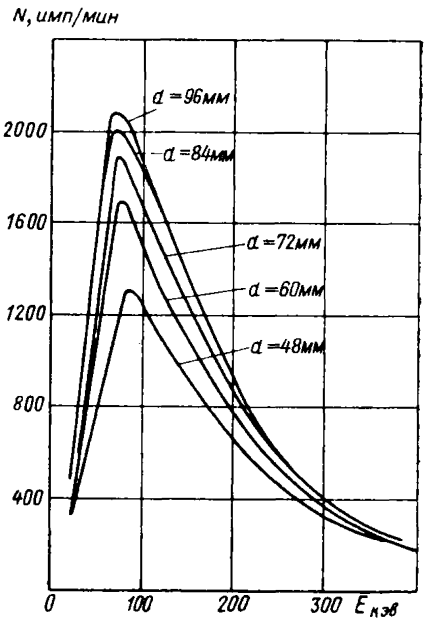

Рис. 8. Регистрируемые спектры рассеянного γ-излучения, снятые со слоев различной толщины (источник Ra^{226})

При выборе конструкции γ—γ-плотномера важно определить оптимальную базу прибора, которая в основном определяется необходимой степенью дифференциации исследуемого слоя по вертикали, активностью и энергией используемого источника, диапазоном плотностей, скважинными условиями и необходимой точностью измерений. В практике грунтовых исследований в основном пользуются ниспадающей ветвью зависимости $I=f(\varrho)$. Увеличение базы в этом случае приводит к улучшению зависимости $I=f(\varrho)$. С другой стороны, это влечет за собой уменьшение дифференциации плотности по вертикали и вызывает резкое уменьшение регистрируемой интенсивности γ-излучения.

Опыт показывает, что для грунтовых условий измерений наиболее целесообразно использовать приборы с базой 20—40 *см*.

Ориентировочно максимум зависимости $I=f(\varrho)$ можно определить по зависимости

$$\rho_{\text{макс}} = \frac{1}{\mu L}, \qquad (17)$$

где L — база прибора;

μ — массовый коэффициент ослабления γ-квантов исходной энергии.

Форма, диаметр и толщина экрана-разделителя

2.51. В плотномерах экран-разделитель предназначается для защиты детектора от прямого излучения источника и рассеянного излучения в самом приборе. Последнее определяет его диаметр и отчасти форму. Обычно экран-разделитель изготовляют из свинца. Рекомендуемая толщина разделителя равна для Co^{60} и Cs^{137} не менее 14—15 и 10—12 *см* соответственно.

Форма экрана сильно влияет на регистрируемую скорость счета, в некоторой степени на крутизну зависимости $I=f(\varrho)$ и горизонтальный радиус сферы, с которой снимается информация (радиус влияния R_r).

В основном применяют экраны-разделители трех форм: конической, цилиндрической и цилиндрической, переходящей в конус, обращенный к источнику.

Применение экрана-разделителя конической формы по сравнению с цилиндрическим увеличивает регистрируемую скорость счета в 2—3 раза, но уменьшает чувствительность прибора $\kappa_{\text{пр}}$ изменению плотности исследуемой среды. Радиус влияния зависит от конусности экрана и имеет максимальную величину при угле конусности, равном 45°. Если расстояние между источником и детектором превышает рекомендуемую толщину экрана, его желательно составлять из двух частей: $^2/_3$ у источника, а $^1/_3$ у детектора.

Диаметр экрана-разделителя должен быть равным внутреннему диаметру гильзы прибора.

Диаметр скважин, материал и толщина обсадных труб

2.52. При проведении измерений плотности прибором, основанным на методе рассеянного γ-излучения, особое внимание нужно уделять диаметру скважин, в которых производятся измерения. Незначительное увеличение диаметра скважин резко увеличивает регистрируемую скорость счета (рис. 9). При этом величина прироста

скорости счета практически остается постоянной при измерениях на грунтах различной плотности. Это позволяет при небольших увеличениях диаметра скважин (до 5 *мм*) использовать ту же самую тарировочную зависимость $I=f(\varrho)$ с введением поправки на увеличение регистрируемой интенсивности за счет наличия зазоров.

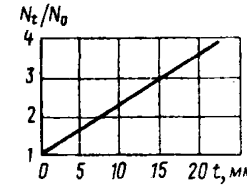

Рис. 9. Влияние увеличения диаметра скважин на регистрируемую скорость счета

При большем различии диаметров уменьшается крутизна зависимости $I=f(\varrho)$ и требуется корректировка используемой тарировочной зависимости данного прибора.

Проведение измерений в скважинах, заполненных водой, требует получения тарировочных зависимостей $I=f(\varrho)$ применительно к данным условиям измерений.

Для обеспечения достаточной точности и упрощения интерпретации полученных результатов измерения следует проводить на скважинах одинакового диаметра (желательно меньшего) с обсадными трубами, изготовленными из одного и того же материала и имеющими строго одинаковую толщину стенок.

Затрубные зазоры, зазоры между подошвой прибора и средой (поверхностный плотномер), уплотнения и наличия каверн

2.53. Перечисленные факторы существенно искажают показания плотномера. Затрубные зазоры значительно увеличивают регистрируемую скорость счета: ухудшают крутизну зависимости $N=f(\varrho)$ и уменьшают радиус влияния. Поэтому нежелательно проведение измерений в обсаженных скважинах, пройденных буром диаметром более чем обсадные трубы, а также в обсадных трубах, имеющих наружные соединительные муфты. При забивке обсадных труб в грунт происходит уплотнение прилегающих к трубе слоев. Тарировочная зависимость $N=f(\varrho)$ в этом случае должна учитывать данное уплотнение. Проведенные эксперименты показали, что способ забивки (статический, динамический и вибрационный) обсадных труб диаметром до 50 *мм* в различные грунты не оказывает существенного влияния на качество получаемых данных о плотности. Уплотнение учитывается при тарировке прибора в обсадных трубах, забитых в эталонную среду. Такой метод измерений целесообразно использовать в неустойчивых водонасыщенных сыпучих и текучих грунтах.

Наличие зазора между подошвой датчика поверхностного плотномера и грунтом значительно увеличивает регистрируемую скорость счета (аналогично увеличению диаметра скважины). Каверны в стенках или за обсадной трубой также искажают показания плотномера. При этом скорость счета может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от ее расположения. Нахождение каверны напротив детектора вызывает увеличение скорости счета, а напротив источника — уменьшение [для ниспадающей ветви зависимости

$N = f(\varrho)$]. При измерении поверхностным плотномером в местах наложения прибора не должно быть трещин или пустот, а если этого нельзя избежать, их следует засыпать так, чтобы плотность засыпаемого материала примерно равнялась плотности грунта.

Гранулометрический состав, влажность

2.54. При проведении измерений на средах, включающих крупноразмерные фракции, необходимо уделять особое внимание контактным условиям, которые могут в значительной степени исказить показания плотномера. Гранулометрическая крупность материалов должна быть не более 0,1 L, так как в противном случае объем, с которого снимается информация, не будет характеризовать средней плотности исследуемого массива.

Влияние влажности при измерении плотности имеет довольно сложный характер, объясняемый повышенной электронной плотностью и уменьшенным значением фотоэлектрического поглощения воды по сравнению с твердой фазой грунта. По этой причине при измерениях на сухом грунте с объемным весом 1 *г/см*^{3} и воде скорость счета на воде получается выше. При экранировке детектора слоем железа толщиной 5 *мм* это превышение составляет ~5%.

С другой стороны, измерения на влажном и водонасыщенном грунте показывают некоторое занижение скорости счета, которое получается в силу того, что происходит более интенсивное рассеяние γ-квантов и поглощение их твердой фазой грунта.

Учет влажности можно производить поправочным коэффициентом K, равным (без экранировки детектора)

$$K = \frac{100 + \omega}{100 + 1{,}08\,\omega}, \qquad (18)$$

где ω — весовая влажность в %.

Вертикальные градиенты плотности

2.55. Информация о плотности снимается путем регистрации γ-квантов, рассеянных в среде, окружающей прибор. При однородной плотности объем, с которого снимается информация, и регистрируемая скорость счета имеют вполне определенную величину. Изменение плотности в этом объеме приводит к изменению потока γ-квантов, фиксируемого детектором.

В практике измерений наиболее часто встречаются два случая:

1) контактирующие слои имеют мощность более 2 L; при этом условии сфера, с которой снимается информация, полностью вписывается в исследуемый слой;

2) слой с однородной плотностью, включающий в себя прослойку толщиной менее 2 L.

В первом случае при непрерывной регистрации скорости счета вблизи контакта двух сред, отличающихся по плотности, получаются переходные значения скорости счета (рис. 10), обусловленные тем, что информация поступает из того и другого слоя. Значение скорости счета принимает постоянную величину, когда информация снимается только из одной среды. Характер переходной скорости счета зависит от соотношения плотностей контактирующих сред и базы

прибора. Начало изменения регистрируемой интенсивности γ-квантов соответствует расположению верхнего края детектора на расстоянии 5 *см* от верхнего слоя, а конец — моменту, когда источник вышел из нижнего слоя на 5—10 *см* (в зависимости от плотности).

Во втором случае регистрируемая скорость счета будет иметь

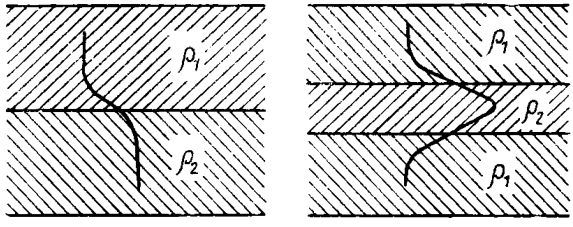

Рис. 10. Влияние вертикальных градиентов плотности на регистрируемую скорость счета

максимум или минимум (первый соответствует условию, когда прослойка по плотности меньше вмещающего слоя; второй — больше). Мощность прослойки (ориентировочно) определяется расстоянием между точками перегиба. Прослойки толщиной 0,1—0,2 L очень незначительно оказывают влияние на скорость счета. Поэтому для лучшего расчленения исследуемого массива по вертикали желательно применять плотномеры с меньшей базой.

3. НЕЙТРОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ

Назначение и область применения

3.1. Данный раздел устанавливает методику определения влажности грунтов радиометрическим способом по регистрации тепловых, надтепловых нейтронов или захватного γ-излучения, а также по степени ослабления пучка быстрых нейтронов.

3.2. Нейтронный метод определения влажности используется для измерения влажности грунтов в естественном залегании и насыпных грунтов (до глубины 20—30 *м*), контроля замачивания грунта, изучения режима влажности грунта и т. д.

Физическая сущность метода

3.3. Измерение влажности нейтронным методом проводится радиометрическими приборами — датчиками, содержащими источник быстрых нейтронов и детектор, регистрирующий тепловые (надтепловые) нейтроны, или захватное γ-излучение, либо то и другое вместе.

3.4. При проведении измерений влажности пользуются функциональной связью между водородосодержанием среды, которое в основном зависит от влажности, и регистрируемой плотностью потока тепловых (надтепловых) нейтронов или захватного γ-излучения.

3.5. Метод основан на том, что быстрые нейтроны, испускаемые источником в окружающую прибор среду, испытывают соударения с ядрами химических элементов и рассеиваются, передавая им свою энергию. В результате многократных столкновений нейтроны замедляются до скорости теплового движения.

Основными параметрами, определяющими рассеяние и замедление быстрых нейтронов, являются сечения рассеяния и захвата, а также средняя логарифмическая потеря энергии.

Средняя логарифмическая потеря энергии определяется как

$$\xi = \ln \frac{E_1}{E_2}, \qquad (19)$$

где E_1 — начальная энергия нейтрона;

E_2 — энергия после соударения с ядром.

Вероятность взаимодействия (рассеяния или захвата) нейтрона с ядром характеризуется величиной его сечения σ, выражаемой в барнах (10^{-24} *см*^{2}).

Основные параметры, характеризующие взаимодействие нейтронов с наиболее распространенными химическими элементами, входящими в состав грунта, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Основные параметры, характеризующие взаимодействие нейтронов с химическими элементами

Элемент	Атомный вес	Средняя логарифмическая потеря энергии на одно взаимодействие	Число соударений для замедления с $E=3\div5$ *Мэв* до тепловой	Сечение рассеяния нейтронов σ_S в *барн*	Сечение поглощения тепловых нейтронов σ_a в *барн*
H	1	1	19	38	0,332
O	16	0,12	154	4,2	0,0002
Si	28	0,0698	297	1,7	0,13
Al	27	0,0723	290	1,4	0,23
B	11	0,171	89	4	769
Cl	35,5	0,0561	343	16	31,6
Mn	55	0,0359	529	2,3	13,2
Fe	56	0,0353	539	11	2,53

Из всех химических элементов, входящих в состав грунтов и горных пород, наиболее сильным замедлителем является водород. Для замедления быстрых нейтронов до тепловых на атоме водорода требуется 19 столкновений, в то время как на ядрах других элементов —в десятки раз больше.

Тепловые нейтроны диффундируют в среде и затем захватываются ядрами элементов среды, что сопровождается испусканием γ-квантов захватного излучения. Водород обладает большей вероятностью захвата тепловых нейтронов, чем другие элементы.

В результате замедления и диффузии вокруг источника образуется поле тепловых нейтронов. Чем выше влажность среды, тем меньше линейные размеры этого поля и тем больше его плотность.

Глубинность нейтронного метода

3.6. Глубинность приближенно оценивается радиусом сферы влияния $R_г$, ограничивающим объем грунта, в котором рассеивается и замедляется до 95% регистрируемого излучения. Для чистой воды радиус сферы влияния принят равным 15 *см*. Для грунтов различной влажности радиус сферы влияния определяется по формуле

$$R_г = 15 \sqrt[3]{\frac{100}{\omega_{об}}}, \qquad (20)$$

где $\omega_{об}$ — объемная влажность в %.

3.7. Определение влажности грунтов производят следующими способами:

а) по регистрации тепловых (надтепловых) нейтронов;

б) по регистрации захватного γ-излучения;

в) по суммарной регистрации тепловых нейтронов и захватного γ-излучения;

г) по регистрации быстрых нейтронов.

3.8. Этим способам соответствует четыре модификации нейтронного метода:

а) нейтрон-нейтронный метод по тепловым или надтепловым нейтронам;

б) нейтронный γ-метод;

в) комбинированный метод;

г) нейтронный метод просвечивания.

Наибольшим распространением пользуются нейтрон-нейтронный и комбинированный методы.

3.9. В нейтрон-нейтронном методе производится регистрация тепловых (или надтепловых) нейтронов с помощью борных или сцинтилляционных нейтронных счетчиков.

3.10. В нейтронном γ-методе производится регистрация захватного γ-излучения с помощью газоразрядных или сцинтилляционных счетчиков γ-излучения.

3.11. В комбинированном методе применяются в основном газоразрядные счетчики, регистрирующие захватное γ-излучение, возникающее в результате взаимодействия тепловых нейтронов с водородом и кадмием, из которого выполнен экран счетчика.

3.12. В абсорбционном нейтронном методе, который основан на определении степени ослабления первичного пучка нейтронов, используются сцинтилляционные счетчики быстрых нейтронов (использование этого метода затруднено в связи с недостаточной его разработкой и отсутствием эффективных детекторов быстрых нейтронов).

Конструктивные схемы датчиков

3.13. Датчики для определения влажности грунтов, горных пород и т. д. включают в себя источник быстрых нейтронов и детектор.

3.14. Тип детектора зависит от используемого способа определения влажности (п. 3.7).

3.15. Во всех модификациях метода используются источники быстрых нейтронов типов: плутоний-бериллиевые (Pu+Be), полоний-бериллиевые (Po+Be), радий-бериллиевые (Ra+Be), америций-бериллиевые (Am+Be).

3.16. Основными характеристиками нейтронных источников являются: удельный выход нейтронов на единицу активности α-излучателя в *имп/сек . кюри,* активность α-излучателя в кюри, интенсивность γ-излучения, период полураспада. γ-излучение является побочным продуктом почти каждого нейтронного источника (γ-фон). Основной компонент γ-фона — собственное γ-излучение α-препарата. Период полураспада источника нейтронов определяется только распадом α-излучателя. Характеристики наиболее употребительных источников нейтронов приведены в табл. 5.

3.17. Конструктивные схемы нейтронных влагомеров определяются:

а) взаимным расположением источника и детектора;

б) наличием разделительного экрана между источником и детектором;

Таблица 5

Характеристики источников нейтронов

Название источника	Период полураспада	Средняя энергия нейтронов в *Мэв*	Удельный выход нейтронов 10^6 *н/сек на 1 кюри*	γ-излучение в *мр/ч.м* на 1 *кюри*
Радий-бериллиевый . . .	1622 года	3,63	15	850
Полоний-бериллиевый . .	138,4 суток	4,3	2,5	0,01
Плутоний-бериллиевый .	24 360 лет	4,5	2	3,7
Америций-бериллиевый .	470 »	5,4	2,9	—

в) применением кадмиевого экрана вокруг детектора.

3.18. В зависимости от назначения нейтронного влагомера и используемого способа определения влажности применяются:

а) соосное (торцовое) расположение источника и детектора (рис. 11, *1*);

б) боковое расположение (рис. 11, *2*);

в) схема просвечивания (рис. 11, *3*).

3.19. Соосное (торцовое) расположение источника и детектора используется при глубинных измерениях влажности (глубинные влагомеры) во всех модификациях нейтронного метода, за исключением метода просвечивания.

3.20. Боковое расположение источника и детектора характерно для поверхностных влагомеров, а также глубинного датчика, основанного на нейтрон-нейтронном методе (в тех случаях, когда диаметр глубинного датчика не ограничивается диаметром скважин).

3.21. В схеме просвечивания детектор быстрых нейтронов находится на поверхности среды, а источник — в среде.

3.22. Разделительный экран между источником и детектором применяется во влагомерах, основанных на комбинированном и нейтронном γ-методах.

Экран выполняется из вещества с большим атомным номером (свинец, вольфрам, висмут) и предназначен для защиты детектора от прямого попадания собственного γ-излучения нейтронного источника. Разделительный экран позволяет в значительной степени снизить внутренний «фон» датчика.

3.23. В датчиках, основанных на комбинированном методе, используется кадмиевый экран, окружающий детектор. Экран (толщиной 0,5—0,8 *мм*) поглощает тепловые нейтроны с образованием γ-излучения, которое регистрируется детектором.

3.24. Существующие типы нейтронных датчиков, определяемые сочетанием описанных выше конструктивных элементов, показаны в табл. 6 и на рис. 11.

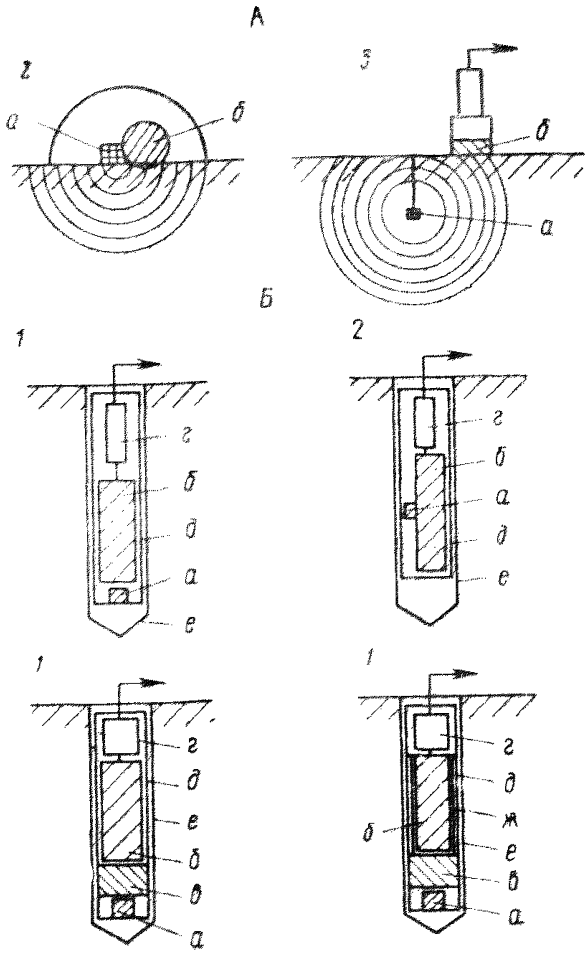

Рис. 11. Типы нейтронных датчиков

А—поверхностные влагомеры; *Б*—глубинные влагомеры; *1*—соосное (торцовое) расположение источника и детектора; 2—боковое расположение источника по отношению к детектору; 3—схема просвечивания; *а*—источник быстрых нейтронов; *б*—детектор; *в*—разделительный экран; *г*—эмиттерный (или катодный) повторитель; *д*—гильза; *е*—обсадная труба; *ж*—кадмиевый экран

Таблица 6

Типы нейтронных датчиков

Модификации метода	Взаимное расположение источника и детектора	Разделительный экран	Кадмиевый экран	Тип детектора
Глубинные датчики-влагомеры				
Нейтрон-нейтронный метод	Соосное	Нет	Нет	Борный, нейтронный, сцинтилляционный
То же	Боковое	»	»	Борный, газоразрядный, сцинтилляционный
»	Соосное	Есть	»	
Комбинированный метод	»	»	Есть	Газоразрядный

Продолжение табл. 6

Модификация метода	Взаимное расположение источника и детектора	Разделительный экран	Кадмиевый экран	Тип детектора
Поверхностные датчики-влагомеры				
Нейтрон-нейтронный метод	Боковое	Нет	Нет	Борный, нейтронный, сцинтилляционный
Абсорбционный нейтронный метод	Схема просвечивания	»	»	Сцинтилляционный счетчик быстрых нейтронов

Методика определения влажности

3.25. Основными характеристиками нейтронных влагомеров являются:

а) абсолютные скорости счета;

б) чувствительность прибора к влажности грунта;

в) точность измерений.

3.26. Эти характеристики зависят в основном от тех же факторов, что и характеристики метода определения плотности по рассеянному γ-излучению (пп. 2.43; 2.44; 2.45; 2.46).

Активность (мощность) излучателя

3.27. В нейтронных влагомерах обычно используются источники с характеристиками, приведенными в табл. 5, с выходом нейтронов $(1—10)\,10^5$ *нейтрон/сек*. Более мощные источники использовать нежелательно по условиям техники безопасности. Регистрируемая интенсивность изменяется прямо пропорционально мощности. Мощность источника не влияет на характер зависимости $N=f(\omega_{об})$. Уменьшение эффективности детектора может привести к уменьшению крутизны зависимости $N=f(\omega_{об})$.

Типы детекторов

3.28. Выбор типа детектора зависит от применяемого метода и способа определения влажности.

Длина (база) и диаметр датчика

3.29. Длиной (базой) нейтронного датчика называется расстояние между серединой источника и серединой детектора. База датчика является важнейшей характеристикой, определяющей чувствительность влагомера к изменению влажности.

Датчики в зависимости от базы различают на доинверсионные и заинверсионные. Зависимость $N=f(\omega_{об})$ для доинверсионных датчиков является возрастающей с увеличением влажности, а заинверсионных — убывающей. При базе детектора, соответствующей инвер-

сионному расстоянию (~ 20 *см*), влагомер практически не чувствителен к изменению влажности. Для определения влажности грунта в строительстве в основном применяются доинверсионные датчики.

У датчиков с очень малой длиной (нулевых) тарировочная зависимость $N=f(\omega_{об})$ практически прямолинейна в широком диапазоне влажностей (до 80—90%).

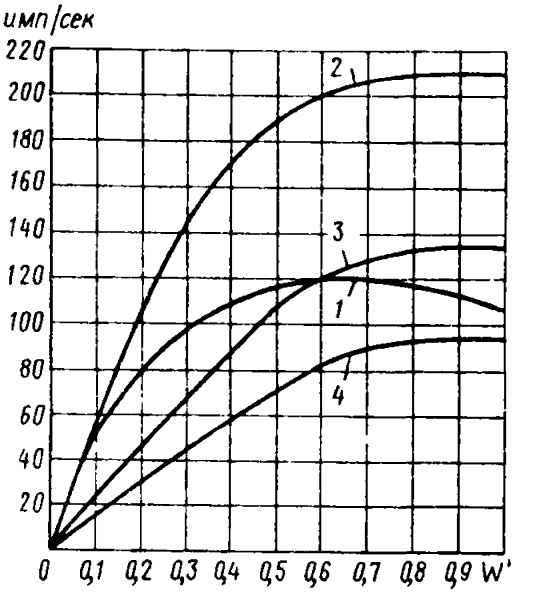

Рис. 12. Зависимость чувствительности нейтронного влагомера от базы датчика.

1, 2, 3 и *4*—база длиной соответственно 24, 12, 6 и 3 *см*

С приближением базы к инверсионной характеристика влагомера $N=f(\omega_{об})$ выположивается в интервале больших влажностей (более 30—40% объемной влажности) (рис. 12).

База датчика выбирается с учетом возможного диапазона изменения влажности грунта.

При проведении измерений на средах малой влажности (1—25%) целесообразно применять датчики с большей базой (10—12 *см*) при комбинированном методе с целью увеличения чувствительности и точности измерений.

При необходимости производить измерения в широком диапазоне влажностей (до 40% и более) следует использовать короткие датчики.

База датчика должна оставаться всегда строго постоянной, поскольку даже небольшое (1—2 *мм*) смещение источника по отношению к детектору изменяет зависимость $N=f(\omega_{об})$.

Диаметр скважины, материал и толщина обсадных труб

3.30. Увеличение диаметра скважины влечет за собой уменьшение регистрируемой интенсивности. При этом с увеличением влажности разница в скорости счета увеличивается. Это наблюдается при регистрации как тепловых нейтронов, так и при суммарной регистрации тепловых нейтронов и захватного (радиационного) γ-излучения.

В скважинах, заполненных водой, при увеличении диаметра происходит более резкое изменение скорости счета в сторону ее увеличения. В таких случаях желательно иметь скважины меньшего диаметра или располагать дополнительными калибровочными зависимостями применительно к данным условиям измерений.

Применение различных обсадных труб в большинстве случаев приводит к изменению зависимости $N=f(\omega_{об})$.

Алюминиевые и дюралевые трубы с толщиной стенок 2—2,5 *мм* практически не влияют на зависимость $N=f(\omega_{об})$. Стальные трубы такой же толщины уменьшают скорость счета. Трубы с толщиной стенок 2—3 *мм* смещают зависимость $N=f(\omega_{об})$ вниз на 3—5% при регистрации тепловых нейтронов и на 6—8% при суммарной регистрации тепловых нейтронов и радиационного γ-излучения. Трубы с толщиной стенок 4—5 *мм* снижают скорость счета в области больших влажностей более чем на 10%.

Затрубные зазоры, уплотнение и наличие каверн

3.31. Наличие этих факторов уменьшает точность измерений влажности. Первый уменьшает регистрируемую скорость счета и ухудшает крутизну зависимости $N=f(\omega_{об})$. Так, при влажности $\omega_{об}=30\%$ зазор величиной 5—10 *мм* уменьшает скорость счета на 2—3%, а при влажности 10% — на 0,5—1%.

Уплотнения непосредственно около обсадной трубы и локальные каверны небольшой величины слабо влияют на показания влагомеров.

Зазоры между подошвой датчика и грунтом

3.32. На результаты измерений влажности поверхностными нейтронными влагомерами большое влияние оказывают зазоры между подошвой датчика и грунтом, а также неровности поверхности грунта (рис. 13).

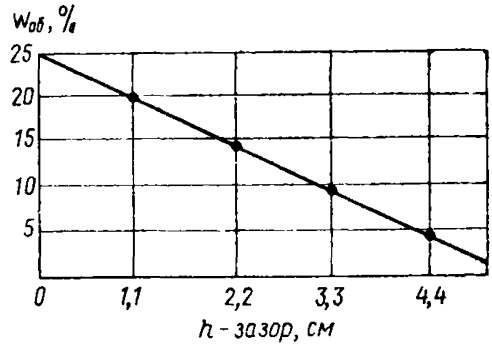

Рис. 13. Влияние зазора на результаты измерения влажности поверхностным нейтронным влагомером

Ошибки, вызываемые зазорами и неровностями, не поддаются предварительному учету, поэтому для их исключения необходимо производить измерения на тщательно выровненных площадках с засыпкой углублений грунтом, взятым в окрестностях места измерений.

Химический состав

3.33. Результаты измерений влажности нейтронными влагомерами могут искажаться при наличии в грунте аномальных поглотителей тепловых нейтронов, к которым относятся бор, хлор, марганец, железо (табл. 7). Эти элементы имеют большие сечения погло-

Таблица 7

Характеристики аномальных поглотителей тепловых нейтронов

Показатели	Элементы			
	Cl	B	Fe	Mn
Сечение поглощения в *барн*	54	452	13	16
Среднее содержание в % к весу	0,01—0,04	0,0001	1,5—5	1,5—5
Содержание элементов, которые можно не учитывать при определении влажности, в % к весу .	0,06	0,001	—	Колебания ±1%

щения тепловых нейтронов. В большинстве грунтов аномальные поглотители встречаются в малых количествах, и их влияние можно не учитывать.

В некоторых грунтах их содержание возрастает настолько (например, засоленные или загипсованные грунты), что требуется принимать специальные меры к их учету или исключению влияния.

Одним из способов исключения влияний аномальных поглотителей является проведение измерений влажности по надтепловым нейтронам, так как сечение поглощения этих элементов резко уменьшается с возрастанием энергии нейтронов.

При измерениях по надтепловым нейтронам детектор помещается в экран из кадмия (внешний слой) и водородсодержащего вещества толщиной 1—3 *см*. Водородсодержащее вещество замедляет надтепловые нейтроны до тепловых, которые и регистрируются детектором. Однако скорости счета при измерениях по надтепловым нейтронам уменьшаются в 5—10 раз по сравнению с регистрацией тепловых нейтронов. При проведении измерений нейтронным влагомером иногда необходимо учитывать водород, входящий в твердую фазу грунта, а также в органические примеси. Водород, содержащийся в скелете грунта, является химически связанным и подразделяется на кристаллизационный и конституционный.

Кристаллизационный водород содержится главным образом в гипсе, конституционный приходится на гидроксильные ионы глинистых минералов. Наличие химически связанного водорода в скелете грунта смещает кривую зависимости $N=f(\omega_{об})$ вверх параллельно самой себе.

В большинстве случаев, если не нужна большая точность измерений (до 2%), влиянием конституционного водорода можно пренебречь.

Влияние кристаллизационного водорода необходимо учитывать при содержании его свыше 5%.

Органических примесей в грунтах обычно содержится мало. Вводить поправку на содержание органических веществ нужно, когда оно составляет 10% по весу.

Для грунтов, содержащих указанные формы водорода, необходимо пользоваться тарировочными зависимостями для данных условий измерений.

Гранулометрический состав

3.34. Гранулометрический состав грунтов не оказывает влияния на точность измерения влажности нейтронным влагомером при крупности гранулометрических элементов до 5 *см*. Изменения скорости счета могут возникнуть при закладке скважин в грунтах, имеющих крупные включения, за счет нарушения структуры грунта. Последнее оказывает такое же незначительное влияние, как наличие каверн или локальных уплотнений.

Плотность скелета грунта

3.35. Грунт в сухом состоянии обладает некоторой замедляющей способностью по отношению к быстрым нейтронам, хотя и значительно меньшей, чем водород. С увеличением плотности скелета грунта $\rho_{ск}$ при данной влажности скорость счета увеличивается. При изменении $\rho_{ск}$ от 1,4 до 1,8 $г/см^3$ ошибка в определении влажности может достигнуть 5—6% абсолютного значения влагосодержания. Для исключения влияния $\rho_{ск}$ на результаты измерений необходимо иметь тарировочные зависимости $N=f(\omega_{об})$ для различных значений плотности скелета.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ГРУНТОВЫХ ВОД МЕТОДОМ РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ

Назначение и область применения

4.1. Этот раздел устанавливает методику применения радиоактивных индикаторов для определения фильтрационных свойств грунтов; оценки однородности отдельных слоев; выявления трещиноватых зон в основании сооружений; контроля фильтрационного режима в основании и теле земляных плотин, дамб, береговых сооружений; оценки эффективности работы дренажных систем и т. д.

Сущность метода

4.2. Сущность метода радиоактивных индикаторов состоит в определении закономерностей движения подземного потока путем наблюдения за движением радиоактивных соединений, введенных в изучаемый поток и перемещающихся вместе с ним. Присутствие радиоактивных индикаторов в потоке устанавливается путем радиометрических измерений, непосредственно в пусковых или контрольных скважинах или путем анализа отбираемых из скважин проб воды.

4.3. По сравнению с другими индикаторами, используемыми для

исследования движения подземного потока, радиоактивные индикаторы имеют ряд преимуществ:

а) используются очень низкие концентрации радиоактивных веществ, обусловливающие возможность приготовления растворов индикаторов, по своим физическим свойствам практически не отличающихся от исследуемого потока;

б) индикаторы после введения их в поток могут быть легко обнаружены по наличию проникающего излучения;

в) наличие радиоактивных соединений с различными физическими и химическими свойствами, в том числе соединений самораспадающихся через определенные, иногда очень малые промежутки времени, позволяет в случае необходимости повторно производить работы на том же участке.

Эти достоинства максимально приближают радиоактивные индикаторы к индикаторам идеальным, легко обнаруживаемым и перемещающимся так же, как частицы потока.

4.4. Метод радиоактивных индикаторов хотя в целом имеет точность и чувствительность выше, чем химический, электрический и калометрический методы, тем не менее ввиду особенности работы с радиоактивными веществами не заменяет во всех случаях другие общепринятые методы исследования. При проведении исследований в потоках повышенной минерализации, в окрашенных водах, при больших скоростях движения подземного потока, а также неоднородном строении пласта следует использовать метод радиоактивных индикаторов; его следует также рекомендовать в случаях, когда применение других индикаторных методов не дает практических результатов.

Способы определения направления и параметров подземного потока

4.5. Для определения направления и параметров подземных водных потоков могут быть применены: метод пусковой скважины; метод наблюдательных скважин; метод координатных измерений.

4.6. Метод пусковой скважины основан на определении интенсивности уменьшения концентрации радиоактивного индикатора в скважине и определении направления его выноса потоком из скважины, в которую он был введен.

Индикатор вводится в пробуренную скважину и равномерно в ней распределяется. После этого ведут наблюдения за изменением его концентрации A за время опыта τ. Приравнивая количество индикатора $Aqd\tau$, вынесенное потоком из скважины, к изменению содержания индикатора $v_0 dA$ в объеме скважины, получаем дифференциальное уравнение, решение которого для случая постоянного расхода потока подземных вод q имеет следующий вид:

$$q = \frac{v_0}{\varepsilon\tau} \ln \frac{A_0}{A}, \qquad (21)$$

где A_0 — концентрация индикатора в скважине при $\tau=0$;

ε — коэффициент, учитывающий нарушение потока скважиной.

Для цилиндрических скважин с чистыми стенками без обсадки принимается $\varepsilon=2$. Для малопрокачанных скважин, пройденных колонковым бурением, $\varepsilon=1$, а с глинистой промывкой $\varepsilon=0{,}3 \div 0{,}6$.

Скорость движения подземного потока u определяется из выражения

$$u = \frac{q}{\omega}, \qquad (22)$$

где ω — площадь поперечного сечения скважины.

Определение направления потока подземных вод производится путем использования зонда с коллиматором (рис. 14), который при проведении измерений периодически поворачивается в скважине. Получаемый график распределения активности (рис. 15) дает возможность по результатам измерений определить направление движения потока.

Активная пористость породы на участке между скважинами определяется формулой

$$n = \frac{q}{u\,\omega}. \qquad (23)$$

Скорость фильтрации определяется по формуле

$$v_{\Phi} = u\,n. \qquad (24)$$

Метод пусковой скважины — один из наиболее перспективных методов исследования подземных водных потоков с помощью радиоактивных индикаторов. В отличие от других методов здесь не требуется предварительно определять направление потока и измерять разность напоров. Существенным является также использование только одной скважины для проведения измерений.

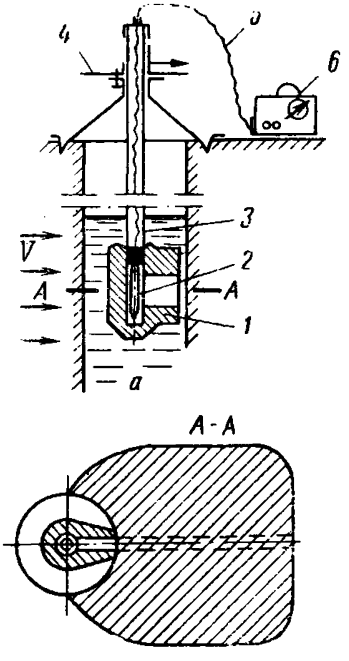

Рис. 14. Зонд для определения направления движения грунтового потока

1—коллиматор; *2*—детектор; *3*—штанга; *4*—указательный лимб; *5*—кабель; *6*—регистратор

4.7. Метод наблюдательных скважин основан на наблюдении за появлением радиоактивного индикатора в группе наблюдательных скважин, расположенных ниже по течению потока. В пусковую

скважину, расположенную выше наблюдательных, на расстоянии z (рис. 16) вводится индикатор и регистрируется время прохождения индикатором $\tau_р$ этого расстояния со скоростью u. Тогда скорость движения подземного потока равна:

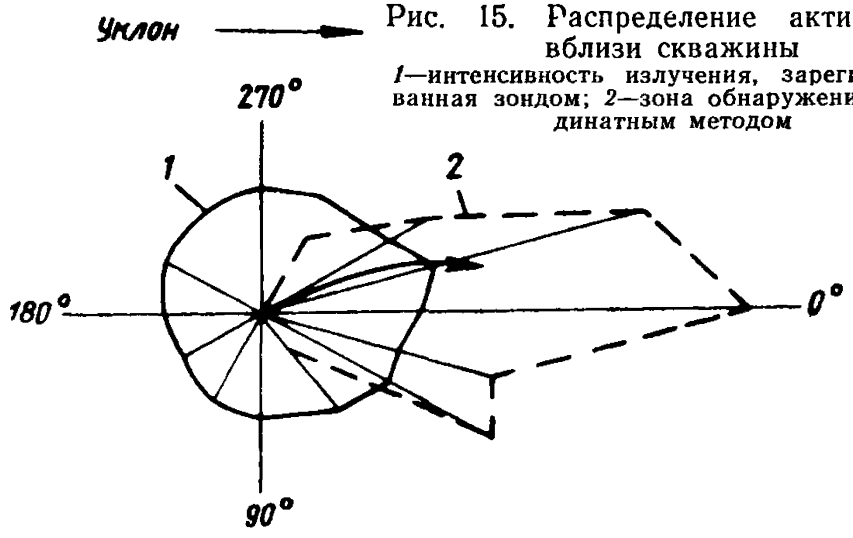

Рис. 15. Распределение активности вблизи скважины

1—интенсивность излучения, зарегистрированная зондом; *2*—зона обнаружения координатным методом

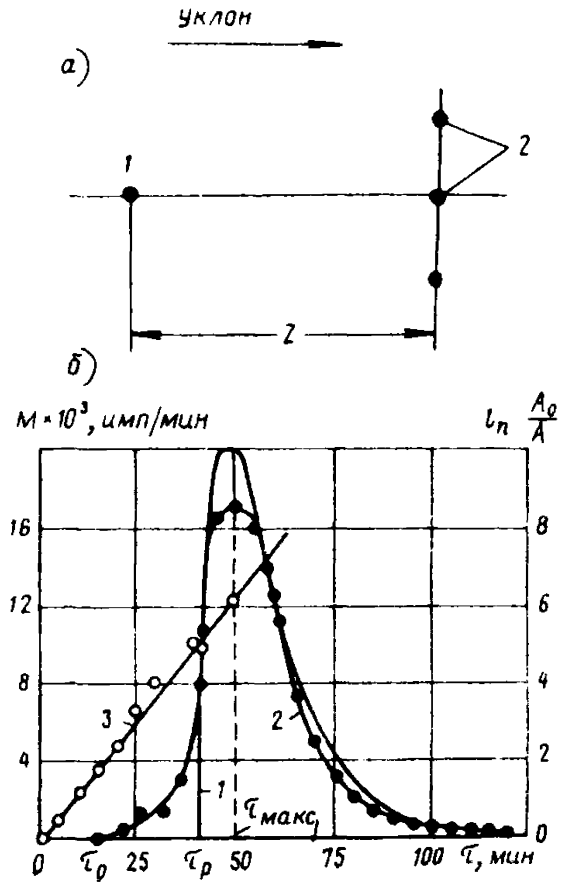

Рис. 16. Метод наблюдательных скважин

а—схема расположения скважин: *1*—пусковая скважина; *2*—наблюдательные скважины; *б*—график изменения концентрации индикатора в наблюдательной скважине: *1*—теоретическая кривая; *2*—экспериментальные данные; *3*—изменение концентрации в пусковой скважине

$$u = \frac{z}{\tau_p}. \qquad (25)$$

Расход потока вод рассчитывается по формуле

$$q = \frac{z n \omega}{\tau_p}, \qquad (26)$$

где n — пористость породы.

Приведенные зависимости могут быть использованы при расстоянии между пусковой и наблюдательной скважиной не менее 2,5 *м*.

4.8. Метод координатных измерений основан на наблюдениях за распределением в грунте радиоактивного индикатора, предварительно введенного в скважину. Измерения концентрации метки ведутся по координатной сетке через 0,1—0,2 *м*.

При работе с β-индикаторами пробы отбираются бурами и подвергаются лабораторному радиометрическому анализу. При использовании γ-излучающих индикаторов применяют заглубляемые в грунт зонды.

Этот метод дает наилучшие результаты при исследовании торфяных грунтов, а также почвенных горизонтов, где отбор проб и заглубление зондов осуществляется довольно просто. Время проведения отбора проб устанавливается обычно по появлению индикатора в одной из наблюдательных скважин, окружающих пусковую.

Нанося на разрез грунта значения удельной активности, можно проследить пути и скорости движения воды по отдельным горизонтам.

Вид и количество вводимого радиоактивного индикатора

4.9. Правильный выбор соответствующего индикатора и определение его количества для запуска предопределяют качество получаемых результатов исследований.

При отборе соответствующего индикатора необходимо учитывать следующие его характеристики: вид радиоактивного излучения, энергию излучения, период полураспада, предельно допустимую концентрацию, стоимость изотопа.

4.10. Подбор индикаторов следует производить с учетом особенностей принятого способа его регистрации, химического состава воды грунтового потока, предполагаемой длительности проведения исследований и сорбционной способности грунта.

4.11. Способ регистрации определяет требуемую энергию излучения радиоактивного индикатора, что обусловлено тем, что наблюдения непосредственно в пусковой или наблюдательной скважине можно практически вести лишь за индикаторами, обладающими γ-излучением или достаточно жестким β-излучением. Индикаторы с мягким β-излучением можно обнаружить только при лабораторном анализе в отобранных из скважин пробах воды.

4.12. Влияние химического состава грунтового потока учитывается при определении типа химического соединения радиоактивного индикатора. По возможности следует выбирать в качестве индикатора радиоактивные изотопы таких элементов, стабильные изотопы которых присутствуют в природных водах.

4.13. В зависимости от необходимой длительности исследований выбирают радиоактивные изотопы, период полураспада которых близок к продолжительности работ. Для исследования движения подземных вод рекомендуется применять изотопы с периодом полураспада не более 60 суток.

4.14. Сорбционные свойства грунта имеют решающее значение для выбора типа индикатора. Это объясняется тем, что при явлениях сорбции происходят нежелательные потери индикатора; поэтому при выборе индикаторов предпочтение оказывается малосорбирующимся индикаторам.

4.15. Практика проведения исследований движения подземного водного потока позволяет рекомендовать в качестве индикатора следующие радиоактивные изотопы (табл. 8).

Таблица 8

Радиоактивные индикаторы

Изотоп	Период полураспада T	Вид излучения	Соединение
Тритий-3 (T)	12,4 года	β	Вода — H_2O
Натрий-24 (Na)	15,06 *ч*	β, γ	Натрий хлористый — NaCl
Сера-35 (S)	87,1 суток	β	Натрий сернокислый, сера элементарная — Na_2SO_4, S
Железо-59 (Fe)	45,1 »	β, γ	Железо сернистое—FeS
Бром-82 (Br)	35,8 *ч*	β, γ	Алюминий бромистый, калий бромистый, натрий бромистый — $ALBr_2$, KBr, NaBr
Рубидий-80 (Rb)	19,5 суток	β, γ	Рубидий углекислый, рубидий хлористый
Йод-131 (J)	8,14 »	β, γ	Натрий йодистый, калий йодистый

4.16. Определение количества вводимого радиоактивного индикатора производится с учетом способа проведения исследований, особенностей взаимодействия вещества индикатора с изучаемой средой, разрешающей способностью аппаратуры и предельно допустимыми концентрациями индикатора.

При использовании способа пусковой скважины следует вводить минимальные количества индикаторов. В качестве ориентировочных величин начальных концентраций при запуске рекомендуются значения порядка 10^{-6}—5×10^{-7} *мкюри/мл* с общей активностью пусковой порции 10—50 *мкюри*. При использовании других способов начальная концентрация индикатора должна обеспечивать четкое обнаружение его в наблюдательных скважинах или отбираемых пробах. Если наблюдательная скважина расположена на расстоянии до 5 *м* от пусковой, то ориентировочную величину начальной концентрации индикатора можно принимать равной 10^{-4} и 10^{-5} *мкюри/мл*.

Введение и обнаружение радиоактивных индикаторов

4.17. Введение радиоактивных индикаторов может осуществляться нагнетанием или заливом в скважины предварительно подготовленного раствора радиоактивного индикатора (залив раствора мо-

жет быть рекомендован только при неглубоком уровне стояния воды в скважине путем вскрытия ампулы или какой-либо другой емкости с радиоактивным соединением непосредственно в пусковой скважине).

4.18. Приготовление растворов радиоактивных индикаторов должно производиться в полевой радиохимической лаборатории. Вскрытие ампул или пусковых емкостей с радиоактивными индикаторами непосредственно в пусковой скважине следует осуществлять с помощью дистанционных устройств.

4.19. Для равномерного распределения индикатора по всей глубине скважины инъекцию проводят в отдельных точках с интервалом в несколько метров, после чего вода в скважине перемешивается спиралью.

В неглубокие скважины индикатор вводится при помощи шланга, который оканчивается стеклянной бюреткой, содержащей раствор индикатора. Для инъекции индикатора нажимают на резиновую грушу, присоединенную сверху к шлангу. Индикатор вводят порциями через 0,5—1 *м* по глубине, и затем воду в скважине перемешивают.

4.20. Уменьшение количества радиоактивного индикатора в пусковой скважине или его появление в наблюдательной скважине может быть определено двумя способами: измерением активности проб воды, отбираемых через определенные промежутки времени, и измерением активности воды непосредственно в скважинах без отбора проб.

4.21. Отбор проб воды из скважин может осуществляться с помощью различных пробоотборников. Объем пробы, отбираемой из скважины, должен быть достаточен для последующего определения количества содержащегося в ней радиоактивного индикатора. Измерение активности отбираемых проб производят в радиохимической лаборатории с помощью соответствующей радиометрической аппаратуры.

4.22. Средняя концентрация индикатора в скважине определяется путем предварительного перемешивания воды мешалкой и отбора проб в нескольких местах по высоте, из которых готовят среднюю пробу для радиометрического анализа.

4.23. При послойных измерениях скоростей движения воды пробы отбирают последовательно с различных горизонтов. Желательно, чтобы диаметр пробоотборника был много меньше диаметра скважины.

4.24. Объем отбираемых проб колеблется от 10 до 100 *мл*. Чем меньше концентрация индикатора, тем больше должен быть объем пробы. Однако он должен оставаться достаточно малым (1—3%) по сравнению с объемом воды, в который введен индикатор или в котором анализируется его появление.

4.25. Перед проведением анализа пробы очищают фильтрованием (при этом следует убедиться в том, что фильтр не сорбирует радиоактивную метку) и концентрируют: выпариванием (для I^{131} при температуре ниже +70° С) или путем переведения радиоактивного элемента в нерастворимое соединение. Жидкие пробы объемом 0,5—1 *мл* переносят микропипеткой в штампованные из фольги чашечки стандартных размеров и высушивают. При переводе индикатора в нерастворимое соединение твердый радиоактивный осадок концентрируют на кружке плотной фильтровальной бумаги.

4.26. Полученные препараты помещают под детектор и при помощи радиометрической установки измеряют скорость счета импульсов N, пропорциональную концентрации индикатора в пробе A.

Все измерения ведут при одинаковом взаимном расположении детектора и препаратов, что позволяет определить относительную концентрацию индикатора $A/A_0=N/N_0$.

4.27. Все расчеты расхода q по уравнению $q=\frac{v_0}{\varepsilon\tau}\ln\frac{N_0}{N}$ должны вестись по линейным участкам зависимостей $\ln\frac{N_0}{N}=f(\tau)$, когда изменение концентрации метки вызвано одним лишь эффектом разбавления.

Обработка результатов

4.28. Для надежного измерения расхода потока подземных вод необходимо получить не менее 4—5 значений концентрации индикатора A для различных моментов времени τ. Промежуток времени проведения измерений $\Delta\tau$ можно определить по формуле, предварительно задавшись вероятной скоростью фильтрации:

$$\Delta\tau=\frac{\pi d}{4v_0}. \qquad (27)$$

Значение интервалов времени между моментами отбора проб или измерения концентрации индикатора зондами получают разделив $\Delta\tau$ на число намеченных измерений m.

4.29. Чтобы не вводить поправок на радиоактивный распад, активность всех проб измеряют за малый промежуток времени $\Delta\tau\leqslant\frac{T}{70}$

Если $\Delta\tau\leqslant\frac{T}{70}$, то поправка, учитывая влияние распада, не превышает 1%, и ею можно пренебречь.

4.30. Время, необходимое для измерения содержания индикатора в анализируемой пробе, с заданной точностью рассчитывается по формуле

$$t=\left(\frac{100}{\delta}\right)^2\frac{1}{N}\ \text{мин}. \qquad (28)$$

где N — скорость счета препарата в *имп/мин*;

$\delta=2\div3\%$.

4.31. Проба может считаться содержащей индикатор, если превышение скорости счета импульсов над фоном втрое больше средней статистической ошибки измерений, т. е.

$$N-N_\Phi\geqslant 3\sqrt{\frac{N}{\tau}+\frac{N_\Phi}{\tau_\Phi}}, \qquad (29)$$

где τ и τ_Φ — время измерения активности препарата и фона соответственно.

4.32. При использовании изотопов I^{131}, Br^{82}, Co^{60}, Cr^{51} измерение концентрации можно производить непосредственно в скважине.

4.33. Материал корпуса не должен сорбировать радиоактивный индикатор. Однако небольшая часть активности может поглощаться. Это создает дополнительный фон N'_Φ, который необходимо вычитать из результатов измерений. Для определения N'_Φ следует про-

водить систематические контрольные измерения зондом в чистой воде.

4.34. При проведении измерений желательно использовать скважины большого диаметра для уменьшения влияния зонда на распределение индикатора по глубине скважины.

4.35. Регистрацию индикатора непосредственно в скважине производят с помощью зонда и счетчика в герметизированном корпусе, опускаемом на кабеле в скважину. По кабелю электрические импульсы со счетчика поступают на радиометрическую регистрирующую аппаратуру, располагаемую вблизи скважины.

4.36. Для радиометрических измерений в скважинах при исследовании движения подземного потока может быть рекомендован комплект аппаратуры «Риф».

4.37. Все работы с радиоактивными индикаторами должны производиться в соответствии с требованиями Санитарных правил № 333—60, а транспортировка радиоактивных индикаторов должна производиться в соответствии с требованиями Правил № 349—60.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНЫХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ И ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕЧЕНЫХ АТОМОВ

Метод истирания радиоактивного эталона

Абразивность — свойство скальных грунтов (горных пород) или иных материалов изнашивать контактирующие с ними в процессе эксплуатации рабочие поверхности деталей машин или оборудования. Применение метода истирания радиоактивного эталона заключается в следующем.

5.1. Для работы применяется станок с вращающимся шпинделем, несущим вдоль своей продольной оси определенную нагрузку (20—30 *кг*). Можно реконструировать для этой цели настольный сверлильный станок.

5.2. В патрон станка закрепляют цилиндрическую оправку, имеющую со стороны патрона хвостовик, а с другой — плоскую кольцевую поверхность.

5.3. В цилиндрическую оправку (рис. 17, *а*) с хвостовиком и кольцеобразным выступом закрепляют радиоактивную твердосплавную вставку.

5.4. Радиоактивность вставки по W (вольфраму) получают путем облучения ее в реакторе потоком нейтронов. Если активность вставки на рабочем столе не превышает 3—5 *мкюри*, то исследования абразивности данным методом по степени радиационной опасности относятся ко II классу работ. Все работы с радиоактивными изотопами в рассматриваемом разделе регламентируются соответствующими инструкциями и правилами работы с открытыми источниками излучений.

5.5. Перед началом опыта оправку устанавливают на шлифовальную плиту так, чтобы регулировочный винт был сверху оправки. Регулировочным винтом радиоактивную вставку устанавливают на уровень плоскости торца. После этого оправку (рис. 17, *б*) закрепляют в пиноли станка. При помощи рычага оправку подводят к по-

верхности образца горной породы. Степень прижатия оправки к поверхности образца регулируют грузом, подвешенным к рычагу. Для защиты от излучения радиоактивного эталона устанавливают свинцовый экран. Перед началом опыта с радиоактивным эталоном

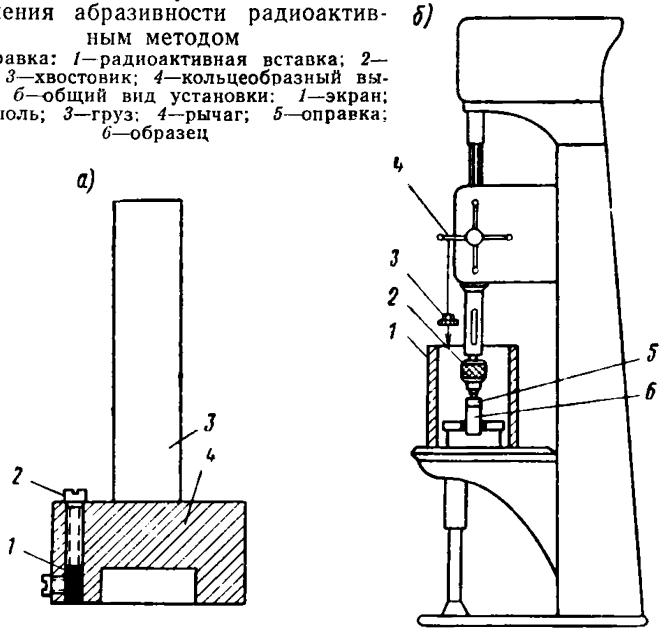

Рис. 17. Общий вид установки для определения абразивности радиоактивным методом
а—оправка: *1*—радиоактивная вставка; *2*—винт; *3*—хвостовик; *4*—кольцеобразный выступ; *б*—общий вид установки: *1*—экран; *2*—пиноль; *3*—груз; *4*—рычаг; *5*—оправка; *6*—образец

плоскость торца образца обрабатывают абразивным кругом, закрепленным в шпинделе станка. Этим обеспечивается параллельность плоскостей торца оправки и образца.

5.6. В результате истирания под определенной нагрузкой на поверхности образца горной породы возникает радиоактивный след — «пятно истирания». Радиоактивность различных по своим свойствам пород или грунтов при прочих равных условиях пропорциональна абразивности исследуемого образца.

Если активность эталона обозначить N, а активность пятна истирания n, то изменение веса радиоактивного эталона за 1 *сек* можно определить по формуле

$$\Delta q = KK_1K_2 \frac{nq}{Nt}, \qquad (30)$$

где K — коэффициент перехода, учитывающий геометрию измерений;

K_1 — коэффициент, учитывающий уменьшение активности в результате естественного распада;

K_2 — коэффициент, учитывающий применение разных приборов для измерения радиоактивности эталона и пятна истирания;

q — вес эталона в *мг*;

Δq — изменение веса эталона в *мг*;

t — продолжительность истирания в *сек*.

5.7. Для измерения радиоактивности пятна истирания образец вносят в свинцовый «домик», внутри которого имеются полки для размещения радиоактивных препаратов.

5.8. В процессе проведения экспериментов могут быть использованы образцы разной высоты. В этом случае во избежание погрешностей при измерениях необходимо сохранить неизменным расстояние между радиоактивным пятном истирания и катодом счетчика.

Комплексный метод оценки абразивности и сопротивляемости разрушению горных пород и материалов

5.9. Методика предусматривает одновременное экспериментальное определение двух основных показателей свойств горных пород и других материалов, характеризующих их прочностные (сопротивляемость разрушению, буримость) и абразивные свойства, знание которых необходимо в проектно-конструкторских, технологических и экономических расчетах.

5.10. Для оценки абразивно-прочностных свойств могут быть использованы установки или оборудование, предназначенное для получения информации о сопротивляемости горных пород (грунтов или иных материалов) разрушению (буримости).

5.11. Показатели свойств материалов, характеризующие их сопротивление разрушению, определяют согласно методическим указаниям для работы с конкретными установками и оборудованием, упомянутыми в п. 5.10.

5.12. Абразивные свойства образцов или исследуемого массива оценивают одновременно с выполнением исследований сопротивляемости разрушению по изменению радиоактивности поверхностного слоя активированного инструмента-эталона (после его работы в течение определенного промежутка времени или после прохождения им равных отрезков пути). Абразивность может быть определена в относительных или весовых единицах.

5.13. Для активации твердосплавных инструментов-эталонов и сплавов групп ВК (вольфрамо-кобальтовый) следует применять облучение поверхности эталонов альфа-частицами с применением ускорителей заряженных частиц.

5.14. Для характеристики абразивности образцов в весовых единицах износа определяется конечная радиоактивность инструмента-эталона, а также радиоактивность известного по весу количества материала эталона в виде порошка или фольги толщиной менее глубины активации. Весовой износ эталона за единицу времени (или единицу пути) получают из следующих зависимостей:

$$M = \frac{N_0 - N}{N_n L} \qquad (31)$$

или

$$M = \frac{N_0 - N}{N_n t}, \qquad (32)$$

где N_0 и N — радиоактивность эталона до и после эксперимента по разрушению образца исследуемого материала с поправкой на естественный распад;

N_n — радиоактивность известного объема материала эталона;

L — путь инструмента-эталона;

t — время работы инструмента-эталона.

На рис. 18 показана установка исследования абразивных свойств материалов, позволяющая кроме абразивности получать информацию о сопротивляемости образца разрушению резанием.

5.15. Характеристика абразивности в весовых или относительных единицах может быть получена путем авторадиографии равных по длине участков забоя или поверхности образцов, обработанных радиоактивным эталоном.

При использовании метода авторадиографии активацию эталона можно производить как заряженными частицами, так и потоком нейтронов.

5.16. Применение радиоизотопов для оценки абразивности:

а) повышает чувствительность метода, что позволяет проводить измерения на твердосплавных эталонах в широком диапазоне изменения свойств материалов как на слабо абразивных, так и на сильно абразивных образцах; иные методы этого не позволяют;

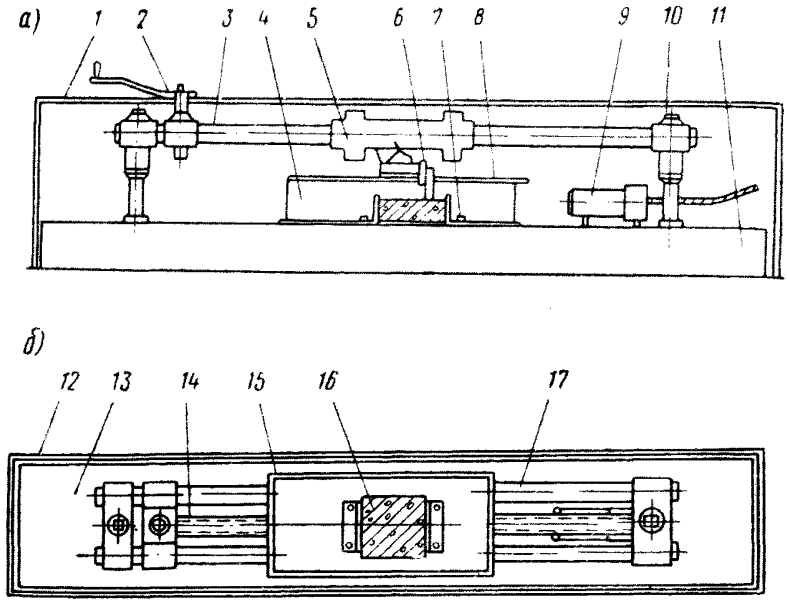

Рис. 18. Установка для исследования абразивных свойств материалов

а — вид сбоку; *б* — план: *1, 12* — кожух; *2* — рукоятка для перемещения резца; *3, 17*—направляющие; *4, 15* — герметический кожух; *5* — державка для резца; *6* — радиоактивный резец; *7* — поддон; *8*— крышка кожуха; *9* — фотоумножитель со сцинтилляционным счетчиком; *10* — стойки; *11, 13* — подставки из швеллера; *14* — винт; *16*— образец породы

б) существенно сокращает время проведения экспериментов;

в) позволяет проводить наблюдения за изменением прочностных и абразивных свойств образцов в условиях, близких к производственным, или проводить разовые эксперименты в специальных условиях (например, эксперименты на малых по объему образцах, в стесненных условиях экспериментальных боксов или лотков).

6. ТАРИРОВКА РАДИОИЗОТОПНЫХ ПЛОТНОМЕРОВ И ВЛАГОМЕРОВ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Тарировка радиоизотопных плотномеров и влагомеров

6.1. Тарировкой называется экспериментальное установление функциональной связи между плотностью (влажностью) среды и интенсивностью регистрируемого радиоактивного излучения, выполненное для конкретных условий измерений, аппаратуры и конструкции радиоизотопного прибора.

Такие ограничения при тарировке вызваны тем, что на характеристики приборов оказывает влияние большое количество различного рода факторов, перечисленных в пп. 2.43; 2.44; 2.45; 2.46. Создание радиоизотопных приборов, строго идентичных по своим конструкции и эффективности регистрирующей схеме, практически мало вероятно. Однако при проведении тарировки конкретного прибора по определенной методике измерений большинство указанных факторов остается неизменным и не влияет на качество тарировки. Этому необходимо уделять должное внимание, так как от него непосредственно зависит точность измерений плотности и влажности исследуемой среды.

6.2. Наиболее качественная тарировка получается при проведении ее на средах, тождественных по своим физическим и минералогическим характеристикам объектам, где намечается измерение плотности и влажности. Это положение обычно трудновыполнимо, и тарировку производят на средах, приближенно тождественных предполагаемым объектам измерений.

6.3. Тарировку радиоизотопных приборов обычно проводят в натурных или стационарных (лабораторных) условиях. Оба эти способа обладают своими недостатками. В первом случае не всегда удается найти объекты со значениями плотности и влажности в широком диапазоне, необходимом для качественной тарировки приборов; кроме того, определение плотности и влажности термо- и объемно-весовыми способами часто производят с довольно большими погрешностями. Во втором случае можно уменьшить влияние указанных недостатков благодаря возможности получения сред с большим диапазоном плотности и влажности и осуществления более тщательного контроля за плотностью и влажностью приготовляемых эталонных сред.

Однако в этом случае грунтовые условия обычно значительно больше отличаются от тех, в которых предполагается проведение измерений. Целесообразно проводить комбинированную тарировку этими двумя способами. Особенно она необходима в грунтах, содержащих большое количество аномальных поглотителей и химически связанной воды.

6.4. При тарировке глубинного плотномера и влагомера в натурных условиях производят выбор объектов с различными значениями плотности и влажности (не менее 4—5 объектов). Для удовлетворительного построения зависимости $N=f(\omega_{об})$ нейтронного влагомера необходимы объекты со значениями объемной влажностью 3—5; 10—15; 20—30; 40—50%; для построения зависимости $N=f(\rho)$ значения плотности 1,5—1,6; 1,7—1,9; 2—2,2 $г/см^3$.

В месте проведения тарировки грунт должен быть однородным в пределах сферы, с которой снимается информация.

Для плотномеров (источник Co^{60}) и влагомеров (доинверсионных) радиус этих сфер

$$R_\rho = \frac{16{,}6}{\rho}\ см;\quad R_{\omega_{об}} = 15\sqrt[3]{\frac{100}{\omega_{об}}}\ см. \qquad (33)$$

6.5. При проведении тарировки должны соблюдаться следующие условия: измерения проводятся в обсадных трубах (одинаковые диаметр, материал и толщина стенок), погруженных одним и тем же способом; наличие зазоров между стенкой обсадной трубы и грунтом недопустимо; стабильность работы приборов проверяют в контрольно-калибровочном устройстве (обычно рабочий контейнер, установленный в строго определенном месте) до и после каждого проведенного измерения; предварительно должен быть снят отсчет на воде, который является абсолютным контролем эффективности регистрирующей схемы и параметров данного прибора.

6.6. Методика проведения тарировки в натурных условиях следующая. На выбранной площадке закладываются скважины глубиной 1 *м* (при влажности более 10%) или 1,3 *м* (при влажности меньше 10%). При тарировке плотномеров достаточна глубина скважины 1 *м* при любых значениях плотности. Далее после проведения измерений на контрольно-калибровочном устройстве определяют скорости счета в скважине при расположении середины базы прибора на глубине 55, 60 и 65 *см* (для скважин 1, 2 *м*) и 45, 50 и 55 *см* (для скважин 1 *м*). Из шурфа, закладываемого над скважиной, отбирают пробы для определения плотности и влажности термо- и объемно-весовыми способами. Отбор проб производится по трем горизонтам, расположенным для влагомера на расстоянии 10 *см* от верхнего края детектора, на середине базы прибора и на расстоянии 10—15 *см* ниже конца источника; отбирается по 5—8 проб с каждого горизонта. Для плотномеров пробы отбираются с горизонтов, проходящих через верхний край детектора, середину базы прибора и нижний край источника. Пробы отбираются по коцентрическим окружностям для влагомеров на расстоянии 15—20 *см* от стенки скважины, а для плотномеров — на расстоянии 5—7 *см*. По полученным средним значениям скоростей счета и плотности (влажности) строят зависимость $N=f(\omega_{об})$ или $N=f(\rho)$. Рекомендуется для плотномеров вместо значений средней скорости счета откладывать отношение к ее средней скорости счета в контрольно-калибрующем устройстве. Реперной точкой является отношение скорости счета в контрольно-калибрующем устройстве и воде.

6.7. При тарировке поверхностного влагомера и плотномера поверхность площадки выравнивают. Измерения производят на подготовленной площадке при отсутствии зазора между подошвой датчика и поверхностью грунта. Затем повторяют измерения после поворота датчика на 180 и 90° (два положения). После определения скоростей счета берут пробы на плотность и влажность: для плотномера по двум горизонтам на глубине 5 и 10 *см*, а для влагомера по трем горизонтам на глубине 5, 15 и 25 *см*. В том и другом случае отбирают по 4—5 проб с каждого горизонта.

Тарировка поверхностных плотномеров и влагомеров должна быть произведена на 6—8 площадках с различными значениями плотности и влажности, равномерно распределенными по диапазону возможных измеряемых влажностей.

6.8. В лабораторных условиях проведение тарировки глубинного влагомера значительно более трудоемко, нежели тарировка плотномера, так как в последнем случае объем приготовляемой эталонной смеси составляет примерно 1,7 $м^3$. Ниже прилагается методика приготовления грунтовой смеси различной влажности для указанной

емкости и определения средней скорости счета. На дне емкости размером 120×120×120 *см*³ закладывают перфорированные трубы (2—3 шт.), обтянутые сеткой. Желательно с наружной стороны установить пьезометрическую трубку. Приготовление грунтовой смеси различной влажности производят обычной растворомешалкой на 50—100 *л*. Для этих целей используют песчаный грунт с начальной весовой влажностью не более 1—2%. Далее путем добавления воды (количество воды определяется расчетом) получают нужные значения влажности грунта. Грунт достигает равномерной влажности после перемешивания в течение 3 *мин*. Укладку грунта в тарировочную емкость необходимо производить слоями толщиной не более 15 *см* с тщательной трамбовкой. Засыпаемые порции грунта взвешиваются. Из каждого третьего замеса (после укладки) отбирают по 3—4 пробы для определения плотности и влажности.

Определение средней скорости счета целесообразно проводить не только в центре емкости, но и по диагоналям (рис. 19). Такое измерение позволяет уточнить объемы, с которых снимается инфор-

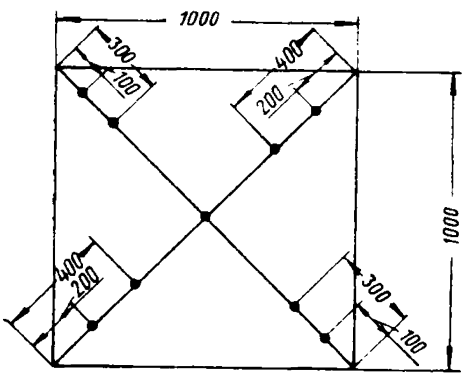

Рис. 19. Схема проведения измерения на эталонной среде

мация, и получить осредненное значение скорости по всей емкости. Закладку скважины производят после укладки всего грунта последовательно от углов емкости к центру.

6.9. Поверхностные плотномеры и влагомеры в лабораторных условиях тарируются в емкостях размером 60×60 *см*² и глубиной 40 *см*. Техника тарировки такая же, как при натурной тарировке.

Погрешности измерений плотности и влажности в грунтах

6.10. Радиоизотопные методы определения плотности и влажности грунтов являются количественными, и поэтому для них, как и для любых других количественных методов, необходимо знание возможных ошибок измерения, способов их учета и исключения.

6.11. В общем случае в состав возможных погрешностей измерений входят следующие: статистические; аппаратурные; погрешности тарировки приборов; погрешности, обусловленные отклонением условий измерений от стационарных, принятых при тарировке.

При непрерывной записи плотности и влажности к вышеперечисленным добавляется еще и так называемая динамическая погрешность.

Общая среднеквадратическая погрешность измерений определится в первом случае как

$$\Delta_{общ} = \sqrt{\Delta_{ст}^2 + \Delta_{ап}^2 + \Delta_{тар}^2 + \Delta_{нестац}^2}, \qquad (34)$$

где $\Delta_{ст}$, $\Delta_{ап}$ $\Delta_{тар}$, $\Delta_{нестац}$ — соответственно среднеквадратические (статистическая, аппаратурная, тарировочная, нестационарная) погрешности.

6.12. Статистические погрешности измерений обусловлены статистическим характером регистрации излучения нейтронов и γ-квантов.

Процесс непрерывного колебания интенсивности излучения около среднего ее значения называется статистической флуктуацией. Она может быть оценена расчетом абсолютных и относительных среднеквадратических (Δ, σ) и вероятных ошибок измерений (ε).

Абсолютная среднеквадратическая погрешность определения скорости счета импульсов равна:

$$\Delta = \sqrt{N} = \sqrt{It}, \qquad (35)$$

где N — число зарегистрированных импульсов за t *мин*;

I — средняя скорость счета в *имп/мин*.

Относительная среднеквадратическая погрешность равна:

$$\sigma = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{It}}. \qquad (36)$$

Из формулы следует, что при измерении интенсивности излучения в течение 1 *мин* для того, чтобы ошибка составила 1%, необходимо иметь число зарегистрированных импульсов не менее 10 000:

$$\sigma = \frac{100\%}{\sqrt{10\,000 \cdot 1}} = 1\%. \qquad (37)$$

Вероятной ошибкой измерения принято считать величину, равную 0,67 среднеквадратической ошибки.

Вероятная относительная ошибка скорости счета равна:

$$\varepsilon = \frac{0{,}67}{\sqrt{It}}. \qquad (38)$$

В 95% случаев относительная ошибка измерений не выходит за пределы удвоенной 2σ, а в 99,7% — за пределы тройной 3σ среднеквадратической погрешности измерений.

Относительная статистическая ошибка (σ) измерений может быть уменьшена за счет увеличения времени измерений или количества замеров либо путем повышения радиоактивности источника или эффективности индикатора при одном и том же времени измерений.

При измерениях радиоактивности с помощью интегрирующих устройств (например, при измерениях с интенсиметром или при записи показаний на самописец) среднеквадратические погрешности будут зависеть уже не только от величины измеряемой радиоактивности, но и от постоянной времени интегрирующего контура.

Тогда формулы для определения погрешностей скорости счета приобретают следующий вид:

абсолютная среднеквадратическая погрешность

$$\Delta = \sqrt{\frac{I}{2\tau}}, \qquad (39)$$

где I — средняя скорость счета в *имп/сек*;
τ — постоянная времени интегрирующего контура;
относительная среднеквадратическая погрешность

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2I\tau}}; \tag{40}$$

вероятная относительная погрешность

$$\varepsilon = \frac{0{,}67}{\sqrt{2I\tau}}. \tag{41}$$

Из формул (39), (40), (41) видно, что чем больше постоянная времени контура τ, тем при прочих равных условиях меньше погрешности измерения.

Выбор той или иной постоянной времени определяется условиями проведения измерения. При регистрации быстро изменяющейся радиоактивности целесообразно устанавливать малые постоянные времени (порядка 1—3 *сек*).

Абсолютные и относительные среднеквадратические ошибки измерения скорости счета не должны превосходить установленных значений, в связи с чем перед измерениями необходимо задаться величиной регистрируемой активности (или времени измерений при точечных замерах) и постоянной времени интегрирующего контура.

Определить значения этих величин можно, используя формулу (40):

$$\tau = \frac{3 \cdot 10^5}{\sigma^2 I}; \tag{42}$$

$$I = \frac{3 \cdot 10^5}{\sigma^2 \tau}. \tag{43}$$

В качестве примера в табл. 9 приведены приближенные значения для допустимой ошибки измерений, равной 3%.

Таблица 9

Приближенные значения τ и I при допустимой ошибке измерений 3%

I в *имп/мин*	1000	3000	5000	6000	8000	10 000	20 000	30 000
τ в *сек*	33	11	6,6	5,5	4	3,3	1,7	1,1

Аппаратурные ошибки

6.13. К аппаратурным ошибкам относятся ошибки, вызванные нестабильностью работы, а также просчетом импульсов вследствие нелинейности измерительного канала.

Стабильность работы аппаратуры оценивается обычно по серии контрольных или повторных измерений. Контрольные измерения проводятся ежедневно в течение всего времени работы прибора. При этом датчик прибора помещается в среду со строго определенной,

не меняющейся плотностью или влажностью. Чаще всего используют так называемые калибровочные емкости. Оценкой результатов повторных измерений также служит величина среднеквадратического отклонения (абсолютная Δ или относительная σ).

Абсолютная среднеквадратическая ошибка единичного измерения вычисляется по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{\Sigma (I_i - I)^2}{m-1}}, \qquad (44)$$

где $I_i = \frac{N_i}{t}$;

N_i — число зарегистрированных импульсов при единичном измерении;

t — время измерения;

m — число измерений (желательно не менее 20).

Относительная ошибка измерений равна:

$$\sigma = \frac{\Delta}{I}. \qquad (45)$$

Аппаратура считается работающей стабильно, если ошибки, вычисленные по формуле (44) и (45), не превосходят ошибок, вызванных статистическими флуктуациями.

Просчеты импульсов

При больших скоростях счета некоторая часть импульсов может быть не зарегистрирована вследствие просчетов, которые зависят от разрешающего времени измерительного канала.

Разрешающее время — минимальный интервал времени между импульсами, при котором они воспринимаются детектором раздельно.

Соотношение между регистрируемой I и истинной интенсивностью $I_и$ излучения определяется формулой

$$I_и = \frac{I}{1 - I\tau}. \qquad (46)$$

Для газоразрядных счетчиков τ соответствует величинам в пределах $100—300 \times 10^{-6}$ *сек*, для сцинтилляционных счетчиков оно меньше — 1×10^{-6} *сек*. Формула (46) используется для определения нелинейности регистрирующего прибора, которая характеризуется отклонением зависимости от прямой пропорциональности между интенсивностью излучения, поступающего на индикатор, и регистрируемой скоростью счета на выходе измерительного прибора.

Для газоразрядных счетчиков нелинейность достигает 1% при скорости счета $I = 2000 \div 6000$ *имп/мин* и 10% при $I = 20\,000 \div 60\,000$ *имп/мин*.

Сцинтилляционные счетчики допускают измерения скорости счета до 6000 *имп/мин* с нелинейностью 1%, однако у них максимально допустимая скорость счета ограничивается разрешающим временем пересчетных устройств, которое составляет обычно 5×10^{-6} *сек*.

6.14. Погрешности тарировки приборов определяются погрешностями в определении плотности и влажности тарировочных сред, а также погрешностями в определении скоростей счета, соответствующих данным значениям этих параметров.

Абсолютная и относительная среднеквадратическая ошибки определения плотности объемно-весовым и влажности термовесовым методом $\Delta_{ап}$ и $\sigma_{ап}$ могут быть рассчитаны по формулам

$$\Delta_{ап} = \sqrt{\frac{\Sigma (\rho_i - \bar{\rho})^2}{m(m-1)}} \text{ и } \sigma_{ап} = \frac{\Delta_{ап}}{\rho}, \quad (47)$$

где ρ_i и ρ — соответственно i-е и среднее значения плотности (или влажности), полученное при анализе проб.

Ошибка определения влажности и плотности весовыми методами уменьшается с увеличением однородности тарировочной среды.

При тарировке в полевых условиях единственным способом уменьшения возможной ошибки является выбор площадки с достаточно однородным грунтом и отбор большого количества (не менее 20—30 проб) в пределах площадки.

Ошибки определения скорости счета при тарировке рассчитываются по формулам (35), (36), (44) и (45) и могут быть сведены до минимума при увеличении времени измерений и числа повторных измерений.

Суммарная относительная среднеквадратическая ошибка тарировки определяется выражением

$$\sigma_{тар} = \sqrt{\sigma^2_{ап} + \tau^2_{сч.\ тар}}. \quad (48)$$

Опыт работ показывает, что суммарная ошибка тарировки обычно составляет не менее 1—1,5%. Поскольку график тарировки строится интерполяцией между точками тарировки, то для увеличения точности построения зависимости $N=f(\varrho)$ или $N=f(\omega_{об})$ целесообразно увеличивать число точек тарировки.

6.15. Погрешности, вызываемые контактными, скважинными и грунтовыми условиями измерений, устраняются проведением специальных увязочных измерений и введением поправочных коэффициентов.

Однако наилучшим способом их исключения является строгое соблюдение принятых при тарировке условий измерений.

6.16. Динамическая ошибка является специфической погрешностью, присущей только способу непрерывной записи. Эта ошибка, происходящая из-за инерционности интегратора, возникает вследствие того, что ток интегратора, соответствующий измеряемой радиоактивности, устанавливается постепенно.

Нарастание тока $i(t)$ интегратора происходит по экспоненциальному закону

$$i(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (49)$$

где i — ток интегратора, соответствующий измеряемой радиоактивности;

t — время измерения.

Динамическая погрешность обозначается через

$$\xi = \frac{\Delta N}{N} = e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (50)$$

При непрерывной записи кривая, характеризующая изменение истинной интенсивности, будет воспроизводиться с искажениями, обусловленными статистическими и динамическими погрешностями.

Чем больше скорость записи и постоянная времени интегратора τ, тем искажения, вносимые динамической погрешностью, будут больше.

Задаваясь определенной величиной динамической погрешности, можно вычислить минимальную мощность слоя грунта, при которой регистрируемая активность, характеризующая параметры грунта данного слоя, достигает истинного значения.

Для расчета используется формула

$$L_{\text{мин}} = \frac{v \cdot 100}{3600} \tau \ln \frac{1}{\xi}, \qquad (51)$$

где $L_{\text{мин}}$ — минимальная мощность слоя в *см*;
v — скорость подъема зонда в *м/ч*;
τ — постоянная времени в *сек*.

Величины $L_{\text{мин}}$ в *см* для некоторых значений приведены в табл. 10.

Таблица 10

Минимальная мощность слоя грунта, при которой регистрируемая интенсивность достигает своего истинного значения, для некоторых значений τ и v

v в *м/ч*	τ в *сек*					
	1	3	6	9	12	18
24	2 / 1,7	6 / 5,1	12 / 10,2	18 / 15,1	24 / 20,4	36 / 30,2
36	4,6 / 3,9	13,8 / 11,7	27,6 / 23,4	41,4 / 35,1	55,2 / 46,8	82,8 / 70,2
60	7,65 / 6,5	23 / 19,5	46 / 39	69 / 58,5	92 / 78	138 / 117
120	15,3 / 13	46 / 39	92 / 78	138 / 117	184 / 156	276 / 234

Примечание. В числителе приводится минимальная мощность $L_{\text{мин}}$ для $\xi = 0{,}01 \div 1\%$; в знаменателе—для 0,02%. При расчете таблицы не принята во внимание база прибора. Во многих случаях оптимальными являются величина τ в интервале 3—6 *сек* и скорость подъема прибора около 60 *м/ч*.

Обработка результатов непрерывной записи плотности и влажности грунтов

6.17. По диаграммам непрерывной записи плотности или влажности грунта в основном определяют: абсолютное значение плотности ϱ или влажности $\omega_{об}$ и мощность слоя, в пределах которого это значение остается неизменным.

6.18. Абсолютная величина отклонения l пера самописца зависит не только от ϱ или $\omega_{об}$ грунта, но и от настройки интегратора и самописца.

6.19. Перевод отклонений пера самописца в единицы ϱ или $\omega_{об}$ осуществляется по тарировочным графикам $l=f(\varrho)$ или $l=f(\omega_{об})$, где величинам ρ или $\omega_{об}$ соответствуют значения отклонения пера самописца при данной настройке. Можно пользоваться также графиками тарировки $N=f(\rho)$ или $N=f(\omega_{об})$ и графиком перевода отклонений пера l в значения скорости счета импульсов N (с помощью генератора импульсов).

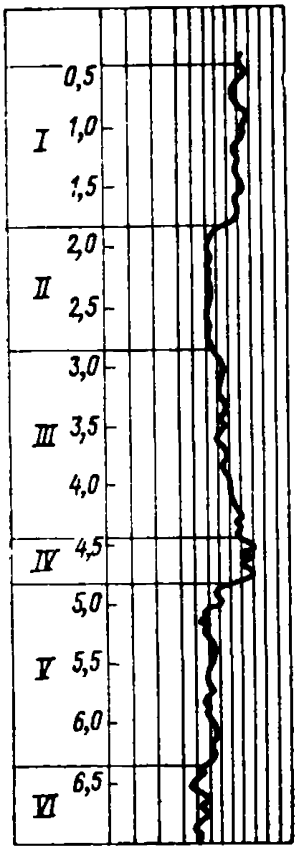

Рис. 20. Диаграмма непрерывной записи

6.20. Обработка результатов непрерывной записи включает в себя следующие операции:

а) установление нулевой линии записи и шкалы глубин скважины;

б) выделение на диаграмме участков с ровным или слабо изменяющимся характером записи, осложненным лишь статистическими флуктуациями.

В пределах данного слоя на диаграмме проводится средняя линия, отвечающая среднему значению плотности или влажности и линии, соответствующие предельно возможным колебаниям величины этого значения (равным тройной среднеквадратической ошибке измерений $\pm 3\Delta$ (рис. 20). Отклонения, превосходящие $\pm 3\Delta$, считаются принадлежащими слою с другим значением плотности или влажности. Границы слоев приближенно устанавливаются по средним точкам переходов от одного слоя к другому (рис. 20).

Абсолютные значения плотности или влажности для каждого выделенного слоя устанавливаются по средней амплитуде отклонения пера самописца. Слои, мощность которых меньше приведенных в табл. 10, для данных v, ξ, τ при интерпретации диаграмм определяются приближенно по характеру переходных участков диаграмм. Участки с аномальными свойствами, вызывающие резкие отклонения пера самописца, изучаются повторными измерениями по скважине.

При постепенном изменении плотности или влажности по скважине и отсутствии слоев с постоянными свойствами целесообразно относить значения плотности и влажности к определенным выбран-

ным глубинам с учетом поправок на скорость подъема прибора, постоянную времени интегратора и длину зонда.

Регистрирующая аппаратура

6.21. Для определения плотности и влажности радиоизотопными методами могут быть использованы радиометрические приборы специального назначения следующих типов:

а) для определения плотности ГГП-1, ПГП-1, РП-3, ИОВ-4, ИОВ-5, РИПП-66, ПШ-1;

б) для определения влажности НИВ-1, НВУ-1.

Измерения этими приборами должны производиться по инструкциям, прилагаемым к этим приборам.

6.22. Для изготовления радиометрических комплексов рекомендуется следующая аппаратура, серийно выпускаемая промышленностью:

а) геофизические приборы к установкам РА-69, «Виток-2», СРП-2к, РМС-28, НГГК-60;

б) пересчетные приборы от комплектов серии Б: ПС-100, ПП-16, ПП-8, ПП-9, ПП-12, унифицированные блоки БП-1, БП-1, БП-7, декадно-счетная установка «Тобол»;

в) интенсиметры ИСС-3, ПИ-4, унифицированные блоки БИ-2, БИ-3, БИ-4, БИ-5;

г) высоковольтовые блоки питания «Александрит 592-1 или 593-15», ВСВ-2, ВСВ-3, «Орех», БС-9.

Технические параметры детекторов γ-нейтронного излучения выбираются в соответствии с условиями работы.

При комплектовании радиометрических приборов из вышеперечисленных приборов и блоков необходимо согласовывать их электрические параметры.

Требования к измерительной аппаратуре

6.23. Аппаратура, используемая для радиометрических измерений, должна:

а) при регистрации γ-излучения относительная ошибка измерений интенсивности не превышать 1% для пересчетных устройств и 3—4% для интегрирующих схем;

б) обеспечивать устойчивую работу при колебаниях температуры окружающей среды $-20+30^{\circ}$ С и колебаниях питающего напряжения в пределах $\pm 10\%$.

gost.e-ecolog.ru