

ПЗ21
K219 09

Экземпляр
чит. зала

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР

ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Е. Г. КАРДАШ

КОНТРОЛЬ ПЛОТНОСТИ ГИДРОСМЕСИ ПРИ ПОМОЩИ ГАММА-ЛУЧЕЙ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР

ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

ВСЕСОЮЗНЫЙ ИНСТИТУТ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОРГАНИЗАЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА
«ОРГЭНЕРГОСТРОЙ»

Московский филиал

Е. Г. КАРДАШ

КОНТРОЛЬ ПЛОТНОСТИ ГИДРОСМЕСИ ПРИ ПОМОЩИ ГАММА-ЛУЧЕЙ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА

1959

ЛЕНИНГРАД

ГОС. ПУБЛИКАЦ.
АППАРАТ-ТЕХНИЧЕСКАЯ
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ СЛУЖБА

1290/14
59.

Рассмотрены основные теоретические и технические вопросы, связанные с разработкой и применением метода и приборов для контроля плотности жидкостей и концентрации бинарных смесей по поглощению гамма-лучей радиоактивных изотопов. Проанализированы точность метода, выбор излучателя, его энергии и активности, выбор детектора излучения. Рассмотрены вопросы градуировки приборов и т. п. Описано устройство некоторых радиоактивных плотномеров, главным образом тех, в создании которых автор принимал участие.

Основное внимание уделено приборам для измерения плотности водогрунтовой смеси, проходящей по грунтопроводу землесосных снарядов. Однако ряд положений распространяется на контроль плотности и концентрации других взвесей, жидкостей и смесей.

Кратко рассмотрены некоторые особенности приборов для контроля плотности грунта в намывных плотинах. Проанализирована возможность измерения количества вещества и, в частности, контроля выработки землесосного снаряда.

Книга рассчитана на работников лабораторий и производств, использующих и разрабатывающих радиоактивные приборы для контроля плотности материалов.

Д
4965

Редактор И. И. Бронштейн

Техн. редактор Г. Е. Ларионов

Сдано в пр-во 8/І 1958 г.

Подписано к печати 2/ІІІ 1959 г.

Бумага 84×108¹/₃₂

5,33 л.

Уч.-изд. л. 6

Т-02843

Тираж 2000

Цена 3 р. 50 к.

Зак. № 14

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава первая. Физические основы метода измерения плотности при помощи гамма-лучей	8
1. Некоторые понятия и определения	8
2. Закономерности ослабления гамма-лучей жидкими смесями	11
2. Точность метода	21
4. Выбор энергии излучения	24
5. Выбор активности источника	27
Глава вторая. Плотномеры для землесосных снарядов	33
1. Блок-схема прибора	33
2. Выбор детектора излучения	35
3. Плотномеры с ионизационными камерами. Промышленный прибор „гамма-грунтомер“	39
4. Конструкция гамма-грунтомера	44
5. Плотномеры с газоразрядными счетчиками	52
6. Градуировка плотномеров для земснарядов	61
7. Ошибки измерения плотности, обусловленные неоднородностью смеси, текущей по трубе	67
Глава третья. Опыт промышленной эксплуатации плотномеров на земснарядах	73
Глава четвертая. Перспективы гамма-лучевого метода контроля плотности (концентрации)	83
1. Автокомпенсационные и некоторые другие новые приборы	83
2. Измерение содержания компонентов в смесях. Контроль количества вещества	90
3. Измерение выработки земснаряда	94
4. Некоторые примеры использования в гидротехническом строительстве методов измерения, основанных на поглощении гамма-лучей	98
Литература	103

ВВЕДЕНИЕ

Использование излучений искусственных радиоактивных изотопов в измерительной технике открывает широкие возможности для создания новых средств контроля производственных процессов. Перспективной областью использования радиоактивных излучений в промышленности является контроль плотности жидкостей, текущих по трубам, и, в частности, контроль плотности гидросмеси (пульпы) при возведении намывных плотин и в гидротранспорте.

Особенно велик объем земляных работ, выполняемых способами гидромеханизации при помощи землесосных снарядов, применяемых на гидротехнических строительствах, в сельском хозяйстве, при углублении и спрямлении русла рек, на строительстве портов и т. п. Для повышения производительности землесосных снарядов очень важно поддерживать на оптимальном уровне концентрацию или зависящую от нее плотность водогрунтовой смеси, транспортируемой по грунтопроводу. При отсутствии специального прибора для измерения плотности или концентрации¹ гидросмеси багер-мейстер, управляющий работой земснарядов, вынужден был руководствоваться показаниями вакуумметра, манометра и амперметра главного двигателя, показания которых неоднозначно зависят от плотности смеси. Это является одной из причин того, что плотность гидросмеси колеблется в боль-

¹ Концентрацией или относительным содержанием грунта в смеси в данном объеме называется отношение общего объема частиц грунта к объему смеси. В гидромеханизации эту величину называют также консистенцией или действительной консистенцией [Л. 1]. Количественная оценка содержания грунта в смеси производится также по ее удельному весу (усредненному по сечению трубы) или плотности смеси, численно равной удельному весу и имеющей размерность $г/см^3$ или $т/м^3$.

Приборы для непрерывного измерения плотности или концентрации жидкостей и взвесей, в том числе водогрунтовой смеси, называются плотномерами. Некоторые приборы этого назначения (для земснарядов) получили название пульпомеров, консистомеров или грунтомеров.

ших пределах и часто бывает значительно ниже возможной при данных условиях.

Поиски и разработки приборов для непрерывного измерения плотности тидросмеси ведутся более 50 лет. Только в Советском Союзе было предложено более 40 различных систем и конструкций плотномеров и грунтомеров [Л. 1, 2 и 3]. Действие этих приборов основано на разных технических принципах, в частности на определении веса участка грунтопровода или отводной от него трубки; на измерении разности давлений в разных участках трубы; на измерении электропроводности водогрунтовой смеси и др.

Существенным недостатком большинства приборов перечисленных типов является необходимость контакта с контролируемой средой. Из-за этого или иных принципиальных или конструктивных недостатков ни один из этих приборов не получил сколько-нибудь широкого промышленного применения.

В 1949 г. был предложен бесконтактный прибор для измерения плотности жидкости, текущей по трубе, действие которого основано на просвечивании трубы с жидкостью рентгеновскими лучами¹. Однако и этот прибор не получил практического применения из-за его сложности, громоздкости аппаратуры, необходимости облегчения просвечиваемого участка грунтопровода, и т. п.

Применение радиоактивных изотопов, излучение которых не подвержено внешним воздействиям и обладает большой проникающей способностью, позволило создать приборы для непрерывного дистанционного измерения плотности гидросмеси, которые обладают рядом преимуществ перед приборами других типов. Радиоактивные плотномеры не требуют контакта с контролируемой средой и переделки грунтопровода. Чувствительный узел плотномера может быть установлен на любом участке грунтопровода. Радиоактивные плотномеры могут работать зимой и летом при любых метеорологических условиях. Они достаточно просты в изготовлении и в эксплуатации.

Летом 1952 г. на землесосных снарядах были впервые испытаны в производственных условиях гамма-лучевые плотномеры (гамма-грунтомеры), разработанные в Центральной научно-исследовательской лаборатории (ЦНИЛ) Госгортехнадзора и экспериментально-исследовательских

¹ Авторское свидетельство № 93185 на имя В. М. Коган.

мастерских (ЭИМ) Министерства речного флота [Л. 4]*. Испытания подтвердили преимущества гамма-лучевых приборов над приборами других типов.

С 1953 г. на ряде земснарядов, используемых в речном флоте, а с 1955 г. на земснарядах, работавших на строительстве Сталинградской, Горьковской, Волжской имени В. И. Ленина, Каховской и некоторых других ГЭС, применялись гамма-грунтомеры серийного изготовления.

В настоящее время известны и другие гамма-лучевые плотномеры жидкости. Например, в химической, пищевой и других отраслях промышленности применяются гамма-лучевые плотномеры, разработанные в НИИТеплоприборе. Разрабатываются и начинают внедряться плотномеры для контроля плотности угольной пульпы при гидродобыче и обогащении угля и руд, для контроля плотности пульпы при производстве алюминия и в других отраслях промышленности как в Советском Союзе, так и за рубежом.

* Способ и приборы для контроля плотности пульпы, основанные на применении радиоактивных излучений, были приняты к внедрению на Всесоюзном конкурсе Министерства речного флота СССР в 1950 г. Авторское свидетельство № 99455 на имя Е. Г. Кардаша.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ГАММА-ЛУЧЕЙ

1. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

При прохождении через вещество гамма- и бета-излучение радиоактивных изотопов поглощается и рассеивается веществом. Интенсивность потока гамма-лучей и бета-частиц, прошедших через некоторый слой вещества или рассеянных им, зависит от плотности и химического состава вещества. Действие радиоактивных плотномеров основано на измерении ослабления потока гамма-лучей или бета-частиц при прохождении их через вещество или измерении интенсивности рассеянного веществом излучения.

Бета-частицы почти полностью поглощаются слоем твердого или жидкого вещества толщиной в несколько миллиметров. Поэтому метод, основанный на поглощении бета-частиц, можно применять лишь для измерения плотности газов и тонких слоев твердых и жидких материалов. Метод обратного рассеяния бета-частиц или гамма-лучей можно использовать для измерения плотности однородных открытых веществ или отделенных от приемника излучения тонкой стенкой.

Измерение плотности жидкостей, проходящих по трубам большого диаметра со стенками значительной толщины (в частности, контроль плотности водогрунтовой смеси, проходящей по грунтопроводу земснарядов), может быть осуществлено лишь по методу поглощения гамма-лучей.

В качестве источников гамма-лучей в измерительных приборах применяются искусственные радиоактивные изотопы, имеющие достаточный период полураспада (изотопами данного элемента называются его разновидности, отличающиеся атомным весом).

Проникающая способность гамма-лучей и механизм их взаимодействия с веществом, предопределяющий выбор изо-

топа для контроля тех или иных веществ, зависит от энергии гамма-квантов. Энергия гамма-квантов обычно измеряется в мегаэлектрон-вольтах — или килоэлектрон-вольтах ($1 \text{ Мэв} = 1000 \text{ кэв}$). Для контроля плотности или состава вещества используются искусственные радиоактивные изотопы, излучающие гамма-лучи с энергией $0,02\text{—}1,8 \text{ Мэв}$.

Поток излучения, состоящий из квантов с одинаковой энергией, называется *монохроматическим*. Таким излучением обладает, например, искусственный радиоактивный изотоп цезия — цезий 137. Спектр излучения большинства радиоактивных изотопов представляет собой совокупность нескольких монохроматических линий; такой спектр называется *линейчатым*. Линейчатый спектр, состоящий из двух линий, характерен, например, для гамма-излучения кобальта 60, состоящего из гамма-квантов с энергией $1,17$ и $1,33 \text{ Мэв}$.

Гамма-лучи обнаруживаются и количественно сравниваются по их ионизационному воздействию, происходящему в результате ионизации воздуха или иной среды электронами, выбиваемыми гамма-квантами из атомов среды. Ионизационное воздействие гамма-лучей характеризуется *дозой*. За единицу дозы рентгеновских или гамма-лучей принят *рентген*. Один рентген — это такая доза в воздухе, при которой в $0,00129 \text{ г}$ воздуха (т. е. в 1 см^3 сухого атмосферного воздуха при 0°C и 760 мм рт. ст.) образуются ионы с общим зарядом в одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака.

Доза, отнесенная к единице времени, называется *мощностью дозы*. В настоящей брошюре чаще других в качестве единицы мощности дозы употребляется *микро-рентген в секунду*: $1 \text{ мкр} = 10^{-6} \text{ рентгена}$.

Согласно существующим нормам Госсанинспекции для людей, работающих с радиоактивным излучением, допустима доза облучения не свыше $0,05$ рентгена за рабочий день. При 8-часовом рабочем дне этой дозе соответствует средняя мощность дозы $1,9 \text{ мкр/сек}$.

Для количественной характеристики потока гамма-лучей, кроме мощности дозы, употребляется понятие *интенсивности* потока гамма-лучей. Интенсивность I потока гамма-лучей определяется количеством энергии излучения, проходящей в единицу времени через площадку 1 см^2 , перпендикулярную направлению распространения излучения, и, следовательно, для монохроматического излучения равна

$$I = Nh\nu,$$

где N — число гамма-квантов, падающих на упомянутую площадку 1 см^2 ;

$h\nu$ — их энергия.

Для линейчатого спектра:

$$I = \sum_i N_i h\nu_i,$$

где N_i — число гамма-квантов, обладающих энергией $h\nu_i$.

В приборах для контроля плотности вещества измеряется изменение интенсивности потока одного и того же источника, происходящее в результате изменения параметров поглотителя. В этом случае изменение интенсивности излучения может характеризоваться изменением числа N гамма-квантов, падающих на 1 см^2 поверхности детектора (хотя, строго говоря, это не совсем верно из-за возможного изменения спектрального состава излучения). Мощность дозы излучения от одного и того же источника в первом приближении также пропорциональна интенсивности излучения. Поэтому в дальнейшем интенсивность потока излучения будем выражать либо в N квантов/ см^2 , либо в единицах мощности дозы мкр/сек .

Количественная характеристика потока гамма-лучей в значительной мере зависит от того, какой применен детектор (приемник) излучения. Детектором излучения называют преобразователь, в котором под воздействием излучения возникают электрические или световые, или иные сигналы. В измерительных приборах в качестве детектора излучения обычно применяют либо счетчики частиц (и гамма-квантов), например газоразрядные счетчики (Гейгера—Мюллера), сцинтилляционные счетчики, импульсные ионизационные камеры, либо детекторы, в которых измеряется средний ионизационный ток, например интегрирующие ионизационные камеры.

В последнем случае измеряется ионизационное действие гамма-лучей и количественная оценка потока гамма-лучей производится в единицах мощности дозы (обычно в мкр/сек). При использовании в качестве детектора счетчиков Гейгера—Мюллера некоторых типов эффективность счета (т. е. количество импульсов, приходящихся на определенное количество гамма-квантов) почти не зависит от энергии гамма-квантов. В этом случае прибор показывает величину, пропорциональную общему количеству гамма-

квантов в потоке, независимо от их энергии. Другие счетчики Гейгера—Мюллера (например, с вольфрамовым катодом), а также сцинтилляционные счетчики имеют различную эффективность по отношению к гамма-квантам различных энергий. Это необходимо иметь в виду при сравнении потоков, измеренных детекторами разных типов.

Интенсивность потока излучения зависит от количества вещества радиоактивного излучателя. Количество радиоактивного излучателя характеризуется его активностью. Активность источника гамма-лучей измеряется в миллиграмм-эквивалентах радия (*мг-экв*). Гамма-лучи препарата активностью 1 *мг-экв* радия создают такую же ионизацию в воздухе как 1 *мг* радия, излучение которого фильтровано 0,5 *мм* платины.

Распространена также единица активности излучателя *милликюри* или *кюри*; *милликюри* — это активность такого количества радиоактивного вещества, в котором происходит в среднем $3,7 \cdot 10^7$ актов радиоактивного распада в секунду, т. е. столько же, сколько в 1 *мг* радия.

Эта единица более удобна в тех случаях, когда интенсивность потока излучения характеризуется числом гамма-квантов на 1 *см*². Необходимо лишь иметь в виду, что для разных изотопов число гамма-квантов, возникающих в результате одного акта распада, различно. При количественной оценке потока излучения по ионизационному воздействию (мощности дозы) более удобно применение единицы активности миллиграмм-эквивалент радия.

Соотношение между единицами активности для различных радиоактивных изотопов приводится в таблицах [Л. 5].

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-ЛУЧЕЙ ЖИДКИМИ СМЕСЯМИ

Интенсивность узкого параллельного монохроматического пучка гамма-лучей, испускаемого точечным источником, прошедших через слой вещества толщиной *x*, связана с интенсивностью *I*₀ потока, падающего на этот слой, экспоненциальной зависимостью:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления гамма-лучей в веществе — величина, постоянная для данной энергии гамма-квантов, плотности и состава вещества.

В приборах для измерения плотности жидкостей, проходящих по трубам (рис. 1) и в большинстве других промышленных устройствах для контроля плотности, в отличие от упомянутого случая, большей частью используется расходящийся широкий немонахроматический поток гамма-лучей, и энергетический спектр излучения изменяется при прохождении через вещество. Кроме того, излучение проходит через несколько слоев разного химического состава, например воздух — стальную стенку трубы — контролируемую смесь и т. д. Ослабление потока в этом случае может быть расчи-

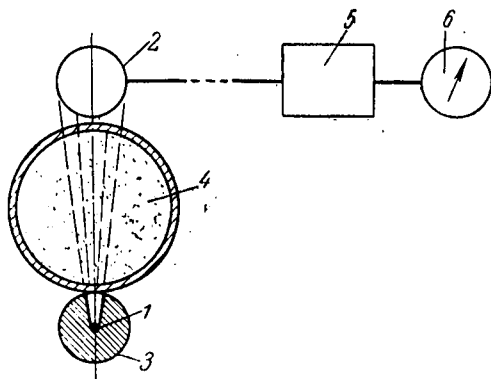


Рис. 1. Схема гамма-плотнмера.

1 — излучатель; 2 — детектор излучения; 3 — защитный контейнер; 4 — контролируемая смесь; 5 — усилительно-преобразовательный блок; 6 — показывающий прибор.

тано с достаточной степенью точности по формуле, аналогичной соотношению (1), но с другим значением коэффициентов ослабления и начальной интенсивности:

$$I = I_1 e^{-\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \dots + \mu_n x_n}, \quad (2)$$

где I — интенсивность потока излучения, прошедшего через контролируемый объект;

I_1 — интенсивность излучения, регистрируемая детектором при отсутствии поглотителей;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ — толщины слоев поглотителя;

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ — усредненные для соответствующего слоя и спектрального состава излучения линейные коэффициенты ослабления гамма-лучей.

Коэффициенты ослабления зависят от состава и толщины слоя, наличия предыдущих слоев, геометрии устройства и энергии излучения. Для каждого конкретного устройства эти коэффициенты находятся экспериментально или экстраполируются из табличных данных.

Для контроля плотности гидросмеси, проходящей по трубе, выражение (2) можно записать в виде

$$I = I_1 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu x + \mu_2 x_2)}, \quad (3)$$

где x_1 , μ_1 — толщина первой стенки и коэффициент ослабления излучения в ней;

μ — усредненный коэффициент ослабления излучения в контролируемой смеси;

x — толщина слоя контролируемой смеси (обычно равная внутреннему диаметру трубы);

x_2 и μ_2 — толщина стенки и коэффициент ослабления на выходе пучка.

Ослаблением излучения в воздухе можно пренебречь. Ослабление за счет расхождения пучка, пропорциональное для точечного излучателя квадрату расстояния от него детектора излучения, учитывается благодаря тому, что начальной интенсивностью I_1 считается интенсивность, отмечаемая в отсутствие поглотителей детектором, находящимся в той же точке, где измеряется I .

Заметим, что интенсивность I_c излучения, прошедшего через пустую трубу, равная

$$I_c = I_1 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)}, \quad (4)$$

есть величина постоянная для данного устройства; поэтому выражение (3) можно упростить, записав его в виде

$$I = I_c e^{-\mu x}. \quad (5)$$

Обычно в плотномерах компенсируется сигнал, соответствующий начальной плотности, с тем чтобы при этой плотности объекта стрелка прибора устанавливалась в начале шкалы и вся шкала прибора соответствовала бы диапазону изменения контролируемой плотности. В частности, в приборе для измерения плотности водогрунтовой смеси компенсируется сигнал, соответствующий интенсивности излуче-

ния, проходящего через трубу с чистой водой. Эта интенсивность равна

$$I_s = I_c e^{-\mu_s x}, \quad (6)$$

где μ_s — линейный коэффициент ослабления излучения в воде.

Таким образом, прибор показывает разность интенсивностей:

$$I - I_s = I_s [e^{-(\mu - \mu_s) x} - 1]. \quad (7)$$

Разделив обе части уравнения (7) на I_s , получим формулу

$$\frac{I}{I_s} = e^{-(\mu - \mu_s) x}, \quad (8)$$

показывающую зависимость ослабления излучения, проходящего через трубопровод с водогрунтовой смесью, от среднего значения линейного коэффициента μ ослабления гамма-лучей в смеси.

Аналогично для двухкомпонентной смеси, содержание одного из компонентов в котором меняется от нуля, получим:

$$\frac{I}{I_2} = e^{-(\mu - \mu_2) x}, \quad (9)$$

где I_2 — интенсивность излучения, проходящего через сосуд, заполненный лишь одним компонентом;

μ_2 — коэффициент ослабления излучения в этом компоненте;

μ — как и прежде, усредненный коэффициент ослабления излучения в смеси — переменная величина, зависящая от соотношения содержания компонентов в смеси.

При энергии гамма-лучей 0,3—1,5 Мэв, используемых большей частью в промышленных плотномерах, ослабление потока гамма-лучей в веществах, состоящих из легких элементов, обусловлено почти целиком комптоновским рассеянием гамма-лучей. При этих величинах энергии линейный коэффициент ослабления μ излучения пропорционален количеству электронов, находящихся в единице объема поглотителя, и, следовательно, величине

$$\mu \approx \rho \frac{Z}{A},$$

где ρ — плотность элемента, g/cm^3 ;
 z — атомный номер элемента;
 A — его массовое число.

Для сложных веществ

$$\mu \approx \sum_i \rho_i V_i \left(\frac{z}{A} \right)_i = \sum_i P_i \left(\frac{z}{A} \right)_i,$$

где V_i — объемная, а P_i — весовая коцентрация i -го компонента.

Отношение $\frac{z}{A}$ для водорода равно единице, а для всех других легких элементов, в том числе элементов, входящих в состав большинства грунтов, оно почти одинаково и равно приблизительно $\frac{1}{2}$. Таким образом, отношение $\frac{\mu}{\rho}$ для всех веществ, состоящих из легких элементов, кроме водорода, практически одинаково при одной и той же энергии гамма-квантов, лежащей в упомянутом диапазоне.

Коэффициент $\frac{\mu}{\rho} = \mu_0$ называется массовым коэффициентом ослабления и измеряется в cm^2/g . Подставляя значение $\mu = \mu_0 \rho$ в выражение (5) и (9), получим:

$$\frac{I}{I_c} = e^{-\mu_0 x \rho}, \quad (10)$$

$$\frac{I}{I_2} = e^{\mu_0 x (\rho - \rho_2)}, \quad (11)$$

где ρ — плотность смеси;

ρ_2 — плотность основного компонента смеси. При заполнении сосуда только этим компонентом интенсивность излучения становится равной I_2 .

В этих формулах все величины постоянны, за исключением измеряемой плотности ρ и зависящей от нее интенсивности излучения I .

Для смесей с водой и другими водородными соединениями формулы (10) и (11) не точны, так как массовый коэффициент ослабления μ_0 гамма-лучей в веществах, содержащих водород, существенно отличается от μ_0 для других веществ. Например, μ_0 гамма-излучения кобальта 60 в воде на 11% больше μ_0 для песка. Это необходимо иметь в ви-

ду, так как почти все жидкости, применяемые в технике и встречающиеся в природе, содержат водород.

Зависимость массового коэффициента ослабления от z , т. е. от химического состава поглотителя, характерна также для тяжелых элементов. При малых энергиях излучения в ослаблении излучения заметную роль начинает играть фотоэлектрическое поглощение. Коэффициент фотоэлектрического поглощения резко изменяется с изменением атомного номера элемента поглотителя, поэтому при малых энергиях тамма-квантов μ_0 становится зависимым от z также для легких элементов. Эта зависимость сказывается тем резче, чем меньше энергия излучения и чем больше атомный номер элемента (рис. 2) [Л. 6].

Для всех упомянутых случаев, т. е. для смесей, компоненты которых имеют разные массовые коэффициенты ослабления и ослабление излучения в которых зависит, следовательно, не только от общей плотности, но и от химического состава вещества, при определении коэффициента ослабления следует исходить из того, что ослабление гамма-лучей является в первом приближении аддитивным свойством среды, т. е. что суммарный коэффициент ослабления гамма-лучей в однородной смеси равен

$$\mu = \sum_i \mu_i Q_i, \quad (12)$$

где Q_i — отношение объема i -го компонента к объему смеси, т. е. концентрация этого компонента в смеси;
 μ_i — линейный коэффициент ослабления излучения в i -м компоненте.

В частности, для смеси грунта с водой суммарный коэффициент ослабления равен

$$\mu = \mu_2 Q + \mu_g (1 - Q), \quad (13)$$

где μ_2 — коэффициент ослабления гамма-лучей в грунте;
 Q — объемное содержание его в смеси, т. е. отношение объема грунта к объему смеси.

Подставляя это значение μ в выражение (8), получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{I}{I_0} &= e^{-x(\mu_2 - \mu_g)Q}; \\ Q &= - \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{(\mu_2 - \mu_g)x}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

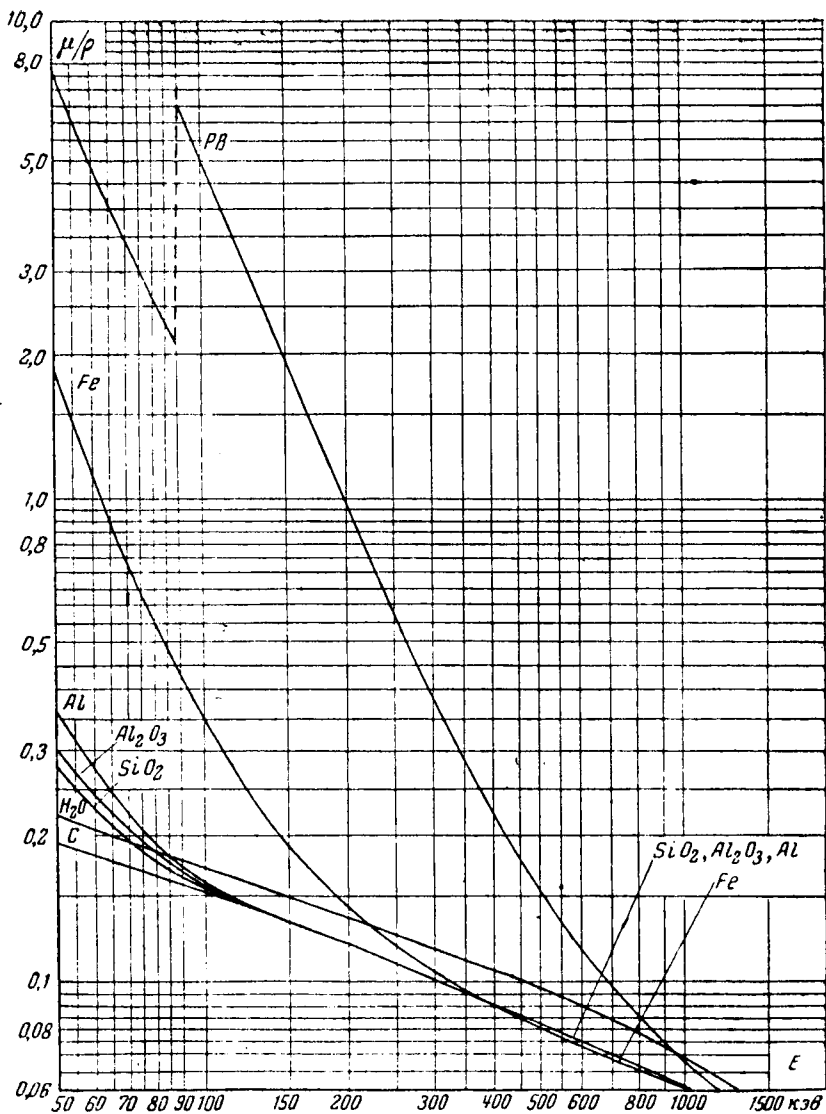


Рис. 2. Зависимость массовых коэффициентов ослабления некоторых легких веществ и свинца от энергии излучения.

Эти формулы пригодны для расчета ослабления излучения в любой двухкомпонентной среде, компоненты которой имеют существенно разнящиеся коэффициенты ослабления. Они связывают измеряемую интенсивность излучения с искомым содержанием контролируемого компонента.

Формулы (14) позволяют получить данные для построения шкалы прибора в процентах содержания контролируемого компонента в смеси. Прибор, измеряющий интенсивность излучения, проходящего через двухкомпонентную смесь, может контролировать не только усредненную по сечению плотность смеси, но и процентное содержание компонентов в смеси. В многокомпонентных смесях прибор позволяет определять содержание лишь одного компонента, если коэффициент ослабления излучения в нем существенно отличается от коэффициента ослабления в остальной смеси. Изменение соотношения процентного содержания других компонентов должно быть незначительным по сравнению с изменением содержания контролируемого компонента.

Из формул (14) видно также, что по ослаблению излучения можно контролировать содержание компонентов в бинарных смесях даже в тех случаях, когда компоненты смеси имеют близкие значения плотности, но различные μ . Если значения ρ одинаковы, то для этого должен существенно различаться μ_0 у обоих компонентов. Как уже отмечалось, это имеет место для веществ с различным содержанием водорода. Разность в значениях μ_0 компонентов других веществ может быть увеличена путем использования излучения с малой энергией, как видно из рис. 2.

Коэффициенты μ_2 и μ_6 определяются экспериментально для установки данного типа и размеров. В случаях, когда необходимо нахождение точного значения μ_2 в компоненте, содержание которого в смеси составляет малую долю, этот коэффициент должен находиться из экспериментальной кривой ослабления излучения в смеси, так как спектральный состав излучения, проходящего через смесь, отличается от спектрального состава излучения, проходящего только через данный компонент.

На рис. 3 показаны графики ослабления гамма-лучей кобальта 60 в водогрунтовой смеси в зависимости от процентного содержания в ней песка. Графики построены в полулогарифмическом масштабе для труб разных диаметров, используемых на землесосных снарядах. Измерения выполнялись с помощью измерителя интенсивности излучения, идентичного промышленному прибору с ионизационной ка-

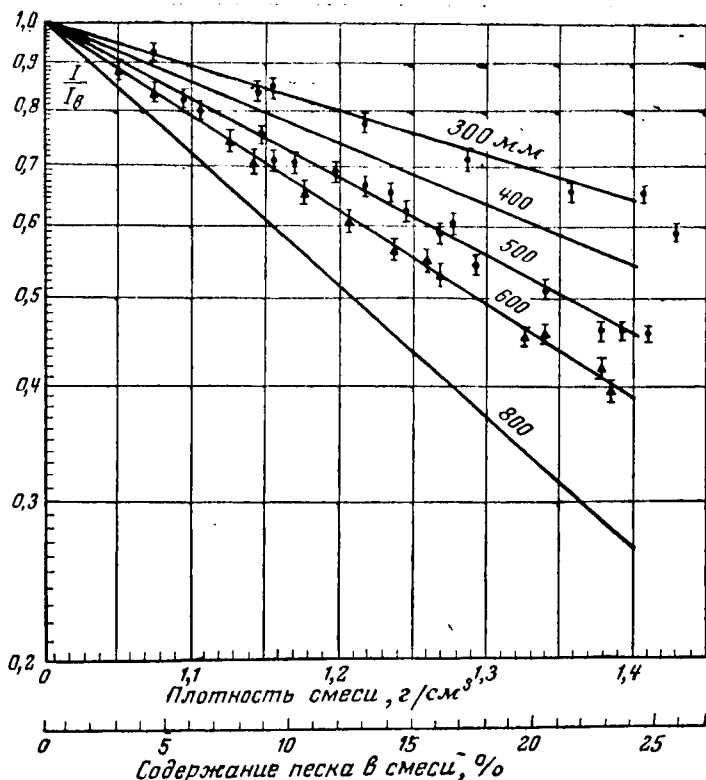


Рис. 3. Кривые ослабления гамма-лучей кобальта 60 (широкого расходящегося пучка) гидросмесью в зависимости от плотности смеси.

мерой, применяемому на земснарядах для измерения плотности. Излучателем служил кобальт 60, помещенный в свинцовый контейнер с конусным отверстием; таким образом, графики построены для широкого расходящегося пучка излучения при условиях, идентичных условиям работы промышленных плотномеров на земснарядах.

Кривые для диаметров 300 и 500 мм построены экспериментально. По этим кривым и кривой ослабления гамма-лучей в воде определялись коэффициенты μ_s и μ_2 по формулам:

$$\mu_s = \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x},$$

$$\mu_z = \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{Qx} + \mu_0.$$

Для других диаметров эти коэффициенты определены путем линейной экстраполяции полученной экспериментальной зависимости μ_0 и μ_z от диаметра. Экспериментальная кривая для диаметра 600 мм практически не отличается от кривой, построенной по формуле (10) на основании полученных для этого диаметра значений μ_0 и μ_z . Прямолинейность графиков, построенных в полулогарифмическом масштабе, подтверждает достаточную точность экспоненциальной зависимости (14).

Как отмечалось выше, значения коэффициентов ослабления широкого пучка гамма-излучения зависят от условий эксперимента: ширины и угла расхождения пучка, типа и размера детектора, толщины поглотителя и т. д. Поэтому кривыми, показанными на рис. 3, можно пользоваться лишь в тех случаях, когда условия измерения близки к тем, в которых они получены.

В ряде случаев предпочтительна градуировка приборов в единицах плотности ρ смеси. Зависимость ослабления излучения от плотности бинарной смеси, компоненты которой имеют различные μ_0^* , найдем, подставив в формулу (14) выражение для Q через ρ :

$$\frac{I}{I_{жс}} = e^{-x \frac{\mu_z - \mu_{жс}}{\rho_z - \rho_{жс}} (\rho - \rho_{жс})}, \quad (15)$$

откуда

$$\rho = - \frac{\ln \frac{I}{I_{жс}}}{x \frac{\mu_z - \mu_{жс}}{\rho_z - \rho_{жс}}} + \rho_{жс},$$

где $\rho_{жс}$ — плотность чистой жидкости;

ρ_z — плотность второго компонента.

Если жидкой основой смеси является вода, то

$$\frac{I}{I_0} = e^{-x \frac{\mu_z - \mu_0}{\rho_z - 1} (\rho - 1)}; \quad \rho = - \frac{\ln \frac{I}{I_0}}{x \frac{\mu_z - \mu_0}{\rho_z - 1}} + 1. \quad (16)$$

* Напомним, что для смесей, компоненты которых имеют одинаковые μ_0 , можно пользоваться более простым выражением (11).

Для водогрунтовой смеси можно считать $\rho_s = \rho_{\text{песка}} = 2,65$.
В этом случае

$$\frac{I}{I_s} = e^{-x \frac{\mu_z - \mu_s}{1,65} (\rho - 1)}; \quad \rho = - \frac{\ln \frac{I}{I_s}}{x \frac{\mu_z - \mu_s}{1,65}}. \quad (17)$$

3. ТОЧНОСТЬ МЕТОДА

Как видно из предыдущего изложения, ослабление гамма-лучей, проходящих через грунтпровод с гидросмесью, зависит только от средней плотности смеси, если считать, что плотность равномерно распределена по сечению трубы. В этом случае ошибка измерения плотности обусловлена только погрешностью измерения интенсивности потока излучения.

Как известно¹, абсолютная ошибка функции равна произведению абсолютного значения ее производной на абсолютную ошибку аргумента. Поскольку при изменении плотности толщина x контролируемого слоя не изменяется, интенсивность излучения в выражении (10) можно считать функцией только одной переменной ρ . Следовательно, ошибка ΔI измерения интенсивности излучения связана с допустимой ошибкой $\Delta \rho$ измерения плотности соотношением

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial \rho} \Delta \rho. \quad (18)$$

Отсюда

$$\Delta \rho = - \frac{\Delta I}{I_c \mu_0 x e^{-\mu x}}; \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = - \frac{\Delta I}{I_c \mu x e^{-\mu x}}, \quad (19)$$

где $\Delta \rho$ — абсолютная ошибка измерения плотности;

$\frac{\Delta \rho}{\rho}$ — относительная ошибка;

μ — линейный коэффициент ослабления излучения в контролируемой смеси;

μ_0 — массовый коэффициент ослабления в смеси;

x — толщина контролируемого слоя.

Из формулы (14) получим аналогичным путем для ошибки измерения концентрации выражение

$$\Delta Q = - \frac{\Delta I}{I_c e^{-\mu x} (\mu_z - \mu_s) e^{-(\mu_z - \mu_s) Q x}}. \quad (20)$$

¹ См., например, Я. С. Безикович, Приближенные вычисления, Гостехиздат, 1949.

Дальнейший анализ формул (19) и (20) показывает, что выбор активности излучателя, оптимального изотопа и другие закономерности, вытекающие из этих формул, по существу, идентичны, поэтому дальнейшие рассуждения основаны на анализе более простой формулы (19). Полученные результаты справедливы также для случая контроля концентрации.

Как показано в работе А. И. Богачева, Б. И. Верховского и А. Н. Макарова [Л. 7], ошибки измерения интенсивности излучения складываются из ошибок $\Delta I_{\phi\lambda}$, обусловленных флуктуациями интенсивности излучения, связанными со статистическим характером радиоактивного распада, и аппаратурных ошибок ΔI_{ann} , обусловленных несовершенством применяемой аппаратуры. Так как обе причины существенно различны по своей природе и действуют независимо одна от другой, то

$$\Delta I = \pm \sqrt{\Delta I_{\phi\lambda}^2 + \Delta I_{ann}^2}. \quad (21)$$

Если в рассматриваемом случае одна из составляющих более чем вдвое превосходит другую, то последняя увеличивает общую ошибку не более, чем на 11% и ею можно пренебречь. Рассмотрим случай, когда флуктуационная ошибка существенно превосходит аппаратурную, т. е. когда колебания стрелки прибора обусловлены в основном статистическим характером радиоактивного распада.

Интенсивность излучения пропорциональна частоте поступления гамма-квантов и их энергии. При неизменной энергии излучения (в данном приборе при данном излучателе энергия излучения практически не изменяется) измерение интенсивности излучения идентично измерению частоты поступления гамма-квантов. Число гамма-квантов N , регистрируемых прибором за время τ усреднения его показаний, равно

$$N = N_c e^{-\mu x} \epsilon \tau, \quad (22)$$

где ϵ — эффективность регистрации гамма-квантов, т. е. отношение числа гамма-квантов, регистрируемых детектором излучения, к числу падающих на него гамма-квантов;

N_c — число гамма-квантов, падающих на детектор в единицу времени, если поглотитель — пустой сосуд.

Среднее квадратичное отклонение ΔN в числе регистрируемых прибором гамма-квантов [Л. 8] равно

$$\Delta N = \pm \sqrt{N} = \pm \sqrt{N_c e^{-\mu x} \varepsilon \tau}. \quad (23)$$

Подставляя полученное значение в выражение (19) и вместо I_c величину $N_c \varepsilon \tau$, равную числу импульсов, регистрируемых детектором за время τ , получим следующие значения средней квадратичной ошибки измерения плотности:

$$\Delta \rho = \pm \frac{e^{\frac{1}{2} \mu x}}{\mu_0 x \sqrt{N_c \varepsilon \tau}}; \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pm \frac{e^{\frac{1}{2} \mu x}}{\mu x \sqrt{N_c \varepsilon \tau}}. \quad (24)$$

Как видно из этой формулы, флуктуационная ошибка может оказаться значительной при малом числе гамма-квантов, регистрируемых прибором за время измерения. Поэтому, в частности, при пользовании газоразрядными счетчиками обычно преобладает флуктуационная ошибка вследствие малой эффективности и ограниченной разрешающей способности счетчиков, т. е. ограниченной интенсивности измеряемого ими потока. Однако и в этом случае флуктуационная ошибка может быть уменьшена за счет увеличения τ настолько, что существенную роль начинает играть аппаратурная ошибка.

Если аппаратурная ошибка, обусловленная, например, классом точности измерительного прибора или нестабильностью параметров отдельных узлов аппаратуры, существенно (более чем вдвое) превосходит флуктуационную ошибку, то можно пренебречь флуктуационной ошибкой. В этом случае ошибка может быть найдена по формулам (19), если вместо ΔI подставлять величину аппаратурной ошибки измерения интенсивности излучения. Аппаратурная ошибка преобладает большей частью при применении интегрирующих ионизационных камер, даже наиболее совершенных, так как при этом обычно используются интенсивные потоки излучения и, следовательно, ошибка, связанная со статистическим характером радиоактивного распада, может быть незначительной. Вместе с тем, уменьшение аппаратурной ошибки при использовании ионизационных камер представляет известные трудности, так как это связано с повышением точности измерения малых ($10^{-10} \div 10^{-12} \text{ а}$) ионизационных токов.

4. ВЫБОР ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Из формул (19) и (24) видно, что ошибка измерения плотности зависит от соотношения между коэффициентом ослабления μ и длиной пучка гамма-лучей в контролируемом материале x . Найдя производную $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ или $\Delta\rho$ по x и приравняв ее нулю, убедимся, что ошибка $\Delta\rho$ и $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ имеет минимальное значение, если $\mu x = 1$ или $\mu_0 \rho x = 1$ в случае преобладания аппаратурной ошибки над флуктуационной и $\mu x = 2$ или $\mu_0 \rho x = 2$ в случае преобладания флуктуационной ошибки.

При указанных оптимальных соотношениях между μ и x ошибка измерения плотности принимает значение

$$\Delta\rho = \frac{\Delta I}{I_c} \rho e, \quad \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta I}{I_c} e \quad (25)$$

в случае преобладания аппаратурной ошибки и

$$\Delta\rho = \frac{e\rho}{2\sqrt{N_{c\epsilon\tau}}}, \quad \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{e}{2\sqrt{N_{c\epsilon\tau}}} \quad (26)$$

в случае преобладания флуктуационной ошибки.

Насколько существенно приближение к оптимальному

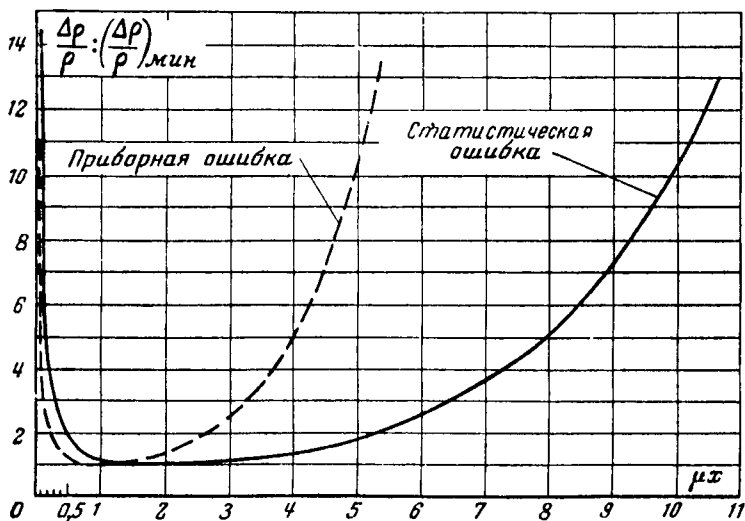


Рис. 4. Зависимость относительной ошибки от толщины поглотителя и коэффициента ослабления.

соотношению между μ и x , видно из графиков рис. 4, где по вертикальной оси отложена ошибка $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ в относительных единицах, а по горизонтальной оси — произведение μx . Небольшие отклонения от оптимального значения μx мало сказываются на ошибке измерения. Так, если μx больше или меньше оптимального значения в 2 раза, то ошибка возрастает в 1,3 раза, но при дальнейшем увеличении или уменьшении μx ошибка возрастает многократно и тем быстрее, чем больше отклонение от оптимального соотношения.

Достигнуть оптимального соотношения можно, применив соответствующий изотоп, от энергии гамма-излучения которого зависит коэффициент ослабления μ , либо за счет задания величины x . Некоторые долгоживущие изотопы, которые могут быть использованы для измерения плотности, перечислены в табл. 1. Указаны также приближенные зна-

Таблица 1

Наименование и массовое число изотопов	Период полураспада	Энергия гамма-квантов, <i>Мэв*</i>	Выход гамма-квантов на 100 распадов*	Гамма-постоянная, $\rho/\mu \cdot \text{см}$	μ для легких элементов (для широкого пучка)	Оптимальное значение ρx , г/см^2	
						при преобла- дании аппара- турной ошибки	при преобла- дании флуктуа- ционной ошибки
Олово 119	250 дней	0,065 0,024	100 12	0,34	0,19	5,3	10,6
Европий 155	1,7 года	0,087	100	0,51	0,18	5,5	11
Теллур 121	154 дня	0,114 0,081	91 100	1,45	0,14	7,1	14,2
Селен 75	127 дней	0,4 0,268 0,138	14 63 19	1,49	0,12	8,3	16,6
Барий 133	7,5 года	0,36 0,29 0,08 0,07	74 26 32 6	2,12	0,11	9,1	18,2
Европий 154	16 лет	1,12 0,78 0,34	50 50 50	6,23	0,085	12	24
Цезий 137	33 года	0,661	92	3,5	0,085	12	24
Цезий 134	2,3 года	0,80 0,60	91 100	9,88	0,085	12	24
Марганец 54	310 дней	0,84	100	4,83	0,075	13,3	26,6
Кобальт 60	5,3 года	1,25	200	13,2	0,063	16	32

* Для наиболее интенсивных линий или средняя энергия.

чения массовых коэффициентов ослабления μ_0 , по которым можно выбрать наиболее подходящий для каждого конкретного случая изотоп при заданном x и ρ .

Когда выбор подходящего изотопа затруднен из-за его дефицитности или малого периода полураспада, оптимальное соотношение между μ и x может быть достигнуто путем изменения x . Как видно из табл. 1, путем выбора изотопа возможно изменение μ не более чем в 3 раза. Поэтому в ряде случаев изменение x — единственный способ получения оптимума. При контроле плотности жидкостей, текущих по

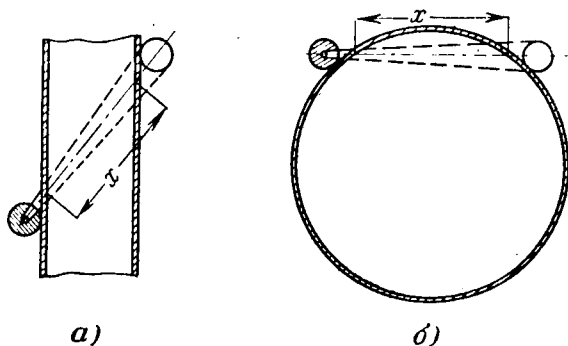


Рис. 5. Способы получения оптимального значения x .
а — для труб малых диаметров; б — для труб больших диаметров.

трубам малого диаметра (< 10 см), или измерении плотности тонкого слоя необходимое значение x ($x_{opt} = \frac{1}{\mu}$ или

$\frac{2}{\mu}$) может быть достигнуто за счет направления пучка лучей под острым углом к оси трубы, как показано на рис. 5,а. Необходимо однако иметь в виду, что при этом увеличивается также общее расстояние между излучателем и детектором, а следовательно и необходимая активность излучателя. Поэтому целесообразность такого направления пучка должна быть проверена расчетом для каждого отдельного случая.

При контроле плотности жидкости или смесей, находящихся в трубах или резервуарах большого диаметра, оптимальное соотношение может быть достигнуто за счет направления пучка по хорде (рис. 5,б), если распределение

плотности по сечению равномерно. При этом необходимо учитывать увеличение поглощения в стенках трубы.

На земснарядах применяются грунтопроводы диаметром от 250 до 800 мм. Для всех этих труб при преобладании аппаратурной ошибки наиболее подходящим изотопом является кобальт 60. При преобладании флуктуационной ошибки кобальт 60 является оптимальным излучателем для труб диаметром 400—800 мм. Для труб диаметром 250—400 мм при этом более подходит цезий 137.

Необходимо отметить, что приведенное выше соотношение между μ и x оптимально только в том смысле, что при данной активности источника это соотношение позволяет получить максимальную точность, или, иначе говоря, при выполнении этого соотношения необходимая активность препарата минимальна. В ряде случаев выгоднее отойти от этого соотношения с тем, чтобы получить большую точность, хотя и при большей активности источника, но при меньшей интенсивности излучения, проходящего сквозь свинцовые защитные устройства. С этой точки зрения более целесообразно применять изотопы с меньшей энергией гамма-квантов, т. е. с большим μ , ввиду того, что с уменьшением энергии излучения коэффициент ослабления в свинце возрастает значительно быстрее, чем в воде, песке и других легких веществах (рис. 2). Поэтому, в частности, для плотномеров, применяемых на земснарядах, с трубами до 500 мм более рационально использовать цезий 137.

Хотя при этом коэффициент ослабления излучения в воде увеличивается в 1,3 раза и, чтобы не возросла ошибка измерения, активность излучателя надо увеличить в 1,69 раз, однако свинцовый контейнер со стенками толщиной 5 см, например, ослабляет излучение кобальта 60 в 12,5 раза, а излучение цезия 137 в 250 раз. Как видим, применяя цезий 137 вместо кобальта 60 в рассмотренном случае можно увеличить активность излучателя в несколько раз, повышая соответственно точность измерения. Несмотря на увеличение активности, интенсивность излучения, проходящего сквозь свинец, будет в несколько раз меньше, чем при использовании кобальта 60.

5. ВЫБОР АКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА

Как видно из формул (19) и (24), погрешность измерения, как флуктуационная, так и аппаратурная, уменьшается при увеличении интенсивности излучения I , если, как это имеет место в большинстве случаев, ошибка ΔI плотмера

измерения интенсивности излучения не зависит от I . С другой стороны, из соображений техники безопасности необходимо стремиться к минимальной интенсивности излучения. Поэтому выбор активности излучателя для промышленного прибора имеет большое значение.

Максимально допустимая ошибка $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ измерения плотности задается условиями производства. Аппаратурная ошибка ΔI_{ann} измерения интенсивности излучения зависит от типа и конструкции прибора, режима его работы и т. п. Для данного прибора ΔI_{ann} величина большей частью постоянная и может быть определена экспериментально. Для того, чтобы ошибка прибора в измерении плотности не превосходила максимально допустимого значения $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, активность A источника в миллиграмм-эквивалентах радия в случае, когда доминирует аппаратурная ошибка измерения интенсивности излучения, должна быть равна

$$A = 4,26 \cdot 10^{-4} R^2 \frac{\Delta I_{ann} e^{\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2}}{\frac{\Delta\rho}{\rho} \mu x} \quad (27)$$

Формула (27) получается из (19), если учесть, что мощность дозы излучения в I мкР/сек связана с активностью излучателя A в миллиграмм-эквивалентах радия зависимостью $A = 4,26 \cdot 10^{-4} I R^2$, где R — расстояние в сантиметрах между излучателем и детектором излучения.

Если преобладает флуктуационная ошибка, активность A_{ϕ_1} препарата в милликюри, необходимая для того, чтобы ошибка измерения плотности не превышала допустимого значения $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, равна

$$A_{\phi_1} = \frac{4\pi R^2 e^{\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2}}{3,7 \cdot 10^7 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 (\mu x)^2 \varepsilon \tau S \gamma} \quad (28)$$

где S — площадь сечения детектора в плоскости, перпендикулярной направлению потока гамма-квантов;
 γ — число гамма-квантов на один акт распада.

Выражение (28) получается из (24), если подставить число гамма-квантов N_γ , попадающих через пустой сосуд на

детектор, находящийся на расстоянии R от излучателя активностью 1 мкюри за τ сек, равно

$$N_c = \frac{3,7 \cdot 10^7 S \nu e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)}}{4\pi R^2}.$$

Как видно из формулы (19) и (24), при увеличении μx ошибки измерения уменьшаются, если при этом одновременно увеличивать активность излучателя так, чтобы интенсивность излучения, регистрируемого детектором, оставалась неизменной. К такому способу повышения точности иногда приходится прибегать при пользовании газоразрядными счетчиками. Газоразрядные счетчики имеют ограниченную разрешающую способность, обусловленную наличием значительного «мертвого» времени (времени нечувствительности). При большой интенсивности облучения (большой загрузке счетчиков) возрастает доля несосчитанных гамма-квантов и поэтому нарушается линейность зависимости частоты регистрируемых импульсов от частоты гамма-квантов, падающих на счетчик. Из-за этого точность измерения снижается и нарушается градуировка прибора. Поэтому при работе с газоразрядными счетчиками интенсивность облучения должна быть ограничена. Загрузку, т. е. интенсивность облучения счетчиков, необходимо ограничивать также для увеличения срока их службы. Наиболее долговечными являются так называемые галогенные счетчики. Для того чтобы эти счетчики работали в области линейной зависимости частоты импульсов от интенсивности облучения, скорость счета не должна превышать 200—300 импульс/сек. У счетчиков типа ВС и некоторых других типов линейная область значительно больше; однако, чтобы срок службы этих счетчиков был не меньше 30—60 суток непрерывной работы, скорость счета не должна превышать 100—200 импульс/сек.

Обозначим через m максимально допустимую скорость счета для данного типа счетчика. Эта частота счета определяет максимально допустимую для данного устройства активность излучателя в милликюри, равную

$$A_{\max} = \frac{m \cdot 4\pi R^2 e^{\mu_1 x + \mu_2 x_1 + \mu_3 x_2}}{3,7 \cdot 10^7 S \nu e} \quad (29)$$

Допустимая из условий максимальной загрузки счетчика активность $A_{\max}$ излучателя может оказаться меньше, чем необходимо для получения заданной точности. Чтобы ошибка прибора при этом не превосходила заданного значения,

приходится увеличивать постоянную времени прибора. Однако величина постоянной времени обусловлена возможной скоростью изменения контролируемого параметра и в ряде случаев должна быть ограничена. При этом необходимая точность может быть достигнута за счет увеличения активности излучателя, если увеличивать одновременно величину μ или x . Это позволяет, как видно из выражения (29), увеличить активность излучателя без увеличения загрузки счетчиков. Действительно, если активность излучателя брать из условия максимальной загрузки счетчиков, т. е. так, чтобы счетчик давал m импульсов в секунду, то погрешность измерения плотности принимает значение

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pm \frac{1}{\mu x \sqrt{m\tau}}. \quad (30)$$

Как видим, в этом случае погрешность обратно пропорциональна μx .

Более целесообразно уменьшать ошибку увеличивая μ , т. е. применяя изотопы с малой энергией излучения. Это обусловлено тем, что, как показано ранее, при уменьшении энергии излучения в определенном диапазоне, несмотря на увеличение при этом активности излучателя, необходимая толщина свинцовой защиты не увеличивается. Увеличение же x влечет за собой также увеличение расстояния R между излучателем и детектором, и при этом необходимая активность излучателя может возрасти чрезмерно.

Хотя всякое увеличение активности излучателя нежелательно с точки зрения техники безопасности, однако вредность для обслуживающего персонала в большинстве случаев (особенно при применении изотопов с большим периодом полураспада, когда замена изотопов может происходить достаточно редко) зависит не от активности источника, а от мощности дозы облучения. Последняя существенно уменьшается при увеличении μ (применении изотопов с меньшей энергией), несмотря на увеличение активности, как за счет резкого увеличения ослабления в свинце (рис. 2), так и за счет уменьшения ионизационной постоянной. Целесообразность повышения точности за счет увеличения активности излучателя при одновременном увеличении μ , т. е. за счет применения изотопов с мягким гамма-излучением, или при увеличении x должна быть проверена расчетом в каждом отдельном случае.

В табл. 2 представлены рассчитанные по формулам (27) и (29) необходимая активность излучателя кобальта 60 для

плотномер с ионизационной камерой и максимально допустимая активность для плотмера с газоразрядными счетчиками при установке их на грунтопроводы, применяемые на землесосных снарядах. В качестве исходных брались данные промышленного гамма-грунтомера с ионизационной камерой и опытного прибора ЦНИЛ с газоразрядными счетчиками СТС-8.

Таблица 2

Внутренний диаметр грунтопровода, см	Толщина стенок, см	Контролируемая плотность среды, г/см ³	Расстояние между излучателем и осью детектора излу- чения, см	Необходимая актив- ность источника для прибора с камерой, мкюри	Необходимая мини- мальная толщина свинцовой защиты, см	Максимально допу- стимая активность для прибора со счет- чиками, мкюри	Минимальная посто- янная времени для прибора со счетчи- ком ¹ , сек
25	0,3	1—1,4	50	12	2,0	1	126
30	0,3	1—1,4	55	17	2,6	2	90
40	0,5	1—1,4	70	42	4,5	10	45
50	0,8	1—1,4	80	77	5,5	28	27
60	0,8	1—1,4	90	188	7,0	106	18
70	1,2	1—1,4	100	365	8,0	319	13
80	1,2	1—1,4	110	770	9,5	950	9

¹ Постоянная времени указана для случая применения одного счетчика.

Средняя ошибка ΔI_{ann} гамма-грунтомера с камерой в определении интенсивности излучения, как показывают проведенные измерения, равна $\pm 0,05$ мкр/сек. Эта ошибка получается при интенсивности облучения 1—5 мкр/сек и объеме ионизационной камеры для всех диаметров труб 10 л. Постоянная времени прибора с камерой во всех случаях равнялась 2—4 сек. Допустимая средняя ошибка измерения плотности взята $\pm 0,01$ г/см³ из условий работы земснарядов.

В табл. 2 указана также толщина свинца защитного контейнера, необходимая для того, чтобы доза облучения за 8 ч при расстоянии 1 м от контейнера не превышала допустимой нормами Госсанинспекции.

Приведенная в таблице активность для счетчиков может быть уменьшена в $n\alpha \frac{\tau_1}{\tau_2}$ раз, где n — число параллельно включенных счетчиков, α — коэффициент ($\alpha \leq 1$), уменьшающийся с увеличением количества параллельно включен-

ных счетчиков; τ_1 — фактическая постоянная времени прибора; τ_2 — постоянная времени, указанная в табл. 2.

При применении счетчиков больших размеров чем СТС-8, для которых построена таблица, активность может быть уменьшена еще в $\frac{S_1}{S_0}$ раз, где S_0 — площадь проекции боковой поверхности катода счетчика СТС-8 (равная 30 см^2), а S_1 то же у применяемых счетчиков.

Из табл. 2 видно, что с увеличением диаметра контролируемого грунтопровода уменьшается постоянная времени прибора со счетчиками, необходимая для получения заданной точности. Однако следует иметь в виду, что при этом значительно возрастает активность источника. При уменьшении активности препарата соответственно должна быть увеличена постоянная времени прибора. Рационально уменьшать активность препарата или постоянную времени за счет увеличения в некоторых пределах числа параллельно включенных счетчиков, так как общее число импульсов при этом увеличивается. Целесообразно также уменьшение необходимой активности излучателя за счет увеличения размеров счетчиков.

Для стационарных приборов целесообразно несколько увеличить активность препарата против табличной с тем, чтобы заданная точность сохранилась и по прошествии нескольких лет.

Из табл. 2 видно, что газоразрядные счетчики целесообразно применять при контроле плотности жидкостей, текущих по трубам больших диаметров — свыше 500 мм , в то время как для труб диаметром меньше 400 мм , по-видимому, более целесообразно применение ионизационных камер или сцинтилляционных счетчиков, особенно, когда недопустимы значительные запаздывания в показаниях.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПЛОТНОМЕРЫ ДЛЯ ЗЕМЛЕСОСНЫХ СНАРЯДОВ

1. БЛОК-СХЕМА ПРИБОРА

Гамма-лучевой плотномер для земснарядов предназначен для непрерывного дистанционного измерения плотности водогрунтовой смеси, проходящей по грунтопроводу земснаряда, или процентного содержания в ней грунта. Плотномер представляет собой прибор непрерывного действия для измерения интенсивности потока гамма-лучей, проходящего через грунтопровод, по которому течет водогрунтовая смесь. От обычного измерителя интенсивности излучения плотномер отличается главным образом наличием регулируемой компенсации сигнала, соответствующего началу отсчета. Это надо для того, чтобы на выходе прибора был нулевой сигнал при интенсивности излучения, соответствующей нулевому содержанию грунта в смеси, т. е. при прохождении по грунтопроводу чистой воды. Приборы этого типа для земснарядов получили название «гамма-грунтомеров».

Гамма-грунтомер (рис. 1) устроен следующим образом. Под трубопроводом помещается радиоактивный препарат 1, излучающий гамма-лучи. Обычно применяется дешевый и недефицитный искусственный радиоактивный изотоп с большим периодом полураспада, например кобальт 60. Препарат, представляющий собой небольшой стерженек в алюминиевой оболочке, находится в свинцовом шаровом защитном контейнере 3 с конусным отверстием. Толщина стенок контейнера берется такой, чтобы он обеспечивал безопасность обслуживающего персонала как при эксплуатации прибора, так и при перевозке и хранении препарата. Отверстие при перевозке контейнера закрывается свинцовой заглушкой.

Детектор излучения 2 крепится с противоположной стороны трубы. Обычно в качестве детектора излучения применяется ионизационная камера или группа газоразрядных

счетчиков. Непосредственно в камере или в прилегающем к ней тубусе монтируется первая ступень усиления — электрометрическая лампа. При применении счетчиков в одном тубусе с ними обычно монтируется катодный повторитель или формирующие элементы и интегрирующая ячейка, дающая на выходе постоянный ток, который можно передавать по кабелю в рубку управления земснаряда. Блок, содержащий ионизационную камеру с первой лампой или газоразрядные счетчики с катодным повторителем, называется выносным блоком. Выносной блок и контейнер с излучателем крепятся на грунтопроводе 4 с помощью хомутов.

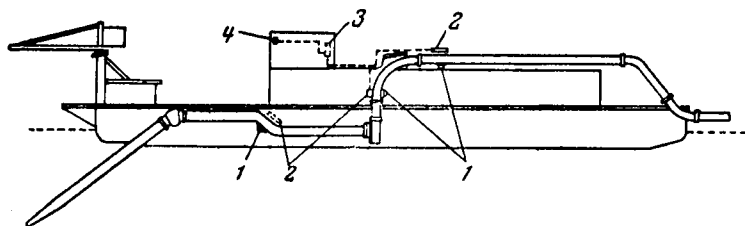


Рис. 6. Схема расположения узлов гамма-грунтомера на земснаряде.
1 — контейнер с пзлучателем; 2 — ионизационная камера или счетчики; 3 — блок настройки; 4 — показывающий прибор.

Выносной блок связывается с измерительным (усилительно-преобразовательным) блоком 5 с помощью многожильного экранированного кабеля. Измерительный блок, содержащий обычно схему питания и последние ступени усилителя, устанавливается в рубке управления. При применении газоразрядных счетчиков в этом блоке, кроме стабилизированного выпрямителя напряжения, монтируется ламповый вольтметр или каскады формирования и усреднения импульсов. В измерительном блоке смонтированы переменные сопротивления регулировки прибора для подбора режимов работы ламп, регулировки нуля и усиления, поэтому измерительный блок называется также пультом управления или блоком настройки. Показывающий прибор выполняется в отдельном амортизирующем блоке и устанавливается на приборном пульте земснаряда.

Пример расположения перечисленных блоков гамма-грунтомера на земснаряде схематически показан на рис. 6, где показано несколько возможных вариантов расположения на грунтопроводе чувствительного узла (излучателя и выносного блока). Обычно он устанавливается на участке с наиболее равномерным распределением плотности смеси

по сечению трубы. На тех земснарядах, для которых существенно уменьшение запаздывания в показаниях, излучатель и выносной блок устанавливаются обычно на всасывающей линии. При установке чувствительного узла на горизонтальном участке трубопровода пучок гамма-лучей направляется по вертикальному диаметру трубы снизу вверх или наоборот с целью усреднения измеряемой концентрации смеси по вертикали, так как плотность смеси неравномерна главным образом в этом направлении.

Прибор может питаться от электрической сети земснаряда или от батарей и аккумуляторов.

2. ВЫБОР ДЕТЕКТОРА ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящее время для промышленных измерительных приборов применяются три основных типа детекторов гамма-лучей: ионизационные камеры, газоразрядные и сцинтилляционные счетчики.

При выборе детектора излучения и связанной с ним измерительной схемы для производственного прибора, и в частности плотномера для земснарядов, необходимо исходить из того, насколько он обладает следующими свойствами: 1) точностью и быстродействием, т. е. возможностью получения заданной постоянной времени; 2) стабильностью характеристик и их независимостью от внешних условий (вибраций, колебаний температуры, влажности и т. п.); 3) надежностью в работе, простотой в эксплуатации, возможностью применения простой измерительной схемы с минимальным количеством ламп или других деталей с ограниченным сроком службы.

Приборами с ионизационными камерами рационально измерять значительные потоки излучения, что позволяет достичь высокой точности при малой постоянной времени прибора. При использовании газоразрядных счетчиков интенсивность потока излучения должна быть ограничена. Поэтому высокая точность при применении счетчиков может быть достигнута лишь за счет увеличения постоянной времени.

Чтобы обеспечить заданную точность измерения при использовании газоразрядных счетчиков, обычно необходима активность излучения не меньшая, чем для прибора с ионизационной камерой. Но получающаяся при этом интенсивность потока часто оказывается недопустимой для счетчиков и ее приходится брать меньше, а для достижения заданной точности соответственно увеличить постоянную времени. С другой стороны, в случаях измерения медленно изменяю-

щейся плотности постоянная времени прибора может быть взята большой и при применении газоразрядных счетчиков необходимая точность измерения может быть достигнута при малой активности излучателя.

Необходимо, однако, иметь в виду, что при увеличении постоянной времени прибора уменьшается только флуктуационная ошибка, при уменьшении же активности растет как флуктуационная, так и приборная ошибка. Поэтому снижение активности за счет увеличения постоянной времени прибора возможно лишь в определенных пределах.

Из сказанного выше следует, что приборы с камерой можно рекомендовать в тех случаях, когда необходимо обеспечить быстроедействие при значительном потоке излучения. Счетчикам следует отдать предпочтение, когда допустимы значительные запаздывания в показаниях, за счет чего можно уменьшить интенсивность облучения. Выше было показано, что приборы с ионизационными камерами целесообразно применять на земснарядах с малыми диаметрами грунтопровода до 500 мм включительно, особенно при диаметрах 250 и 300 мм, так как при этих диаметрах достаточно большой поток излучения получается при небольших активностях излучателя. Применение же приборов со счетчиками для труб диаметром меньше 500 мм возможно лишь на тех типах земснарядов, где допустимо запаздывание в показаниях на 20—60 сек.

Такие запаздывания допустимы на малых земснарядах при дноуглублении и аналогичных работах, где насыщение смеси изменяется медленно. При работах по намыву плотин насыщение смеси может быстро изменяться в значительных пределах, например из-за обвалов грунта в забое. Чтобы поддерживать насыщение на высоком уровне, необходим быстро реагирующий прибор, поэтому для таких земснарядов прибор с большой постоянной времени рекомендовать нельзя. С другой стороны, для труб диаметром 700—800 мм представляется более целесообразным применение счетчиков, так как для прибора с ионизационной камерой в этом случае нужны активности порядка 0,5—1 г-экв радия и для защиты необходим свинцовый контейнер весом 30—40 кг.

Как показано ранее (табл. 2), при увеличении толщины просвечиваемого слоя постоянная времени прибора может быть уменьшена при одновременном увеличении активности. При применении приборов со счетчиками активность источника может быть уменьшена в несколько раз по сравнению с величинами, приведенными в табл. 2, за счет параллель-

ного включения нескольких счетчиков большого размера, например ВС-9. Постоянная времени для прибора с такими счетчиками при активности препарата кобальта 60, равной 100 мкюри, и применении группы из трех счетчиков на грунтопроводе диаметром 800 мм должна составлять около 15 сек.

Стабильность показаний прибора и подверженность влиянию внешних условий зависят не только от детектора, но и от выбранной схемы, конструкции и выполнения прибора.

В простых приборах прямого усиления с применением симметричных двойных ламп и балансных схем можно обеспечить достаточную для ряда производств стабильность усиления, несмотря на то, что при этом неизбежно влияние внешних условий на детектор излучения. В большинстве случаев главной причиной изменения показаний прибора с камерой являются колебания температуры среды. Однако погрешность в показаниях плотномера на земснарядах, возникающая при обычных колебаниях температуры, большей частью остается в допустимых пределах. Как показал опыт эксплуатации приборов, корректировка нуля требуется лишь при изменениях температуры более чем на 10° С. В случаях, когда требуется высокая точность измерения плотности, влияние колебаний температуры должно исключаться.

Счетные характеристики газоразрядных счетчиков и, следовательно, отмечаемая прибором скорость счета также изменяются со временем, особенно в результате интенсивного или длительного облучения. Значительное изменение счетных характеристик отмечается также под влиянием изменения температуры [Л. 9 и 10]. При небольших изменениях температуры, например происходящих в течение одних суток, и достаточно малых интенсивностях облучения стабильность плотномеров со счетчиками в большинстве случаев удовлетворяет требованиям, предъявляемым к прибору на земснаряде. Приборы этого типа нуждаются в корректировке нуля (начала отсчета) по эталонному излучению, как и приборы прямого усиления с камерой.

Опыт эксплуатации приборов показал, что приборы обоих типов могут быть выполнены достаточно стабильными для того, чтобы их можно было применять на земснарядах, где возможны по меньшей мере раз в сутки проверка и корректировка показаний прибора по эталонному излучению, которое получается, когда по грунтопроводу пропускается вода без грунта.

Существенное повышение стабильности показаний и сведение к минимуму погрешностей, связанных с влиянием внешних условий и колебаний напряжения питания, достигается при применении дифференциальных схем измерения, в которых производится непрерывное сравнение двух потоков излучения, проходящих один через контролируемый объект, а другой через эталонный поглотитель. Возникающий сигнал после усиления управляет перемещением клинообразного поглотителя таким образом, что ток на входе и выходе усилителя все время сводится к нулю. Применение дифференциальной ионизационной камеры, состоящей из двух половин, высоковольтные электроды которых имеют разную полярность, позволяет почти полностью исключить влияние внешних условий, так как обе половины камеры нетрудно выполнить с одинаковой зависимостью изменения ионизационного тока от внешних условий. Применение дифференциальных схем измерения при использовании газоразрядных счетчиков менее эффективно, так как в производственных условиях трудно подбирать газоразрядные счетчики с одинаковой зависимостью счетных характеристик от внешних условий.

Чтобы повысить стабильность усиления и уменьшить влияние на устойчивость усиления колебаний питающего напряжения, применяют модуляцию сигнала [Л. 11 и 12], поступающего с ионизационной камеры, и усиление по переменному току. Однако при этом для повышения стабильности показаний прибора приходится усложнять его конструкцию, что не всегда оправдано.

Для повышения надежности и безотказности действия прибора в тяжелых условиях эксплуатации очень важны простота устройства, виброустойчивость, длительность работы без смены ламп, т. е. надежность прибора. Поэтому весьма важно, чтобы в производственном приборе было минимальное количество ламп и других деталей с ограниченным сроком службы. Из этих соображений первые приборы для земснарядов, на которых возможно осуществить корректировку показаний по воде, строились по схеме прямого усиления с электрической компенсацией начала отсчета.

В качестве детектора излучения перспективно также применение сцинтилляционных счетчиков, значительно превосходящих счетчики Гейгера — Мюллера по эффективности регистрации гамма-излучения и разрешающей способности. Однако необходимо иметь в виду, что размеры люминесцентных кристаллов, выпускаемых в настоящее время промыш-

ленностью, во много раз меньше размеров больших газоразрядных счетчиков. В связи с этим, общее число регистрируемых гамма-квантов при применении сцинтилляционных счетчиков может оказаться не больше, чем при применении газоразрядных счетчиков большого размера, и там, где размеры детектора излучения не лимитированы, преимущества сцинтилляционного счетчика не столь очевидны. В последнее время разработаны большие кристаллические, жидкостные и пластмассовые сцинтилляторы, а также фотоэлектронные умножители с большим плоским фотокатодом, предназначенные для работы с большими сцинтилляторами. Это позволит создавать приборы с высокой точностью измерения при малой постоянной времени и небольшой активности источника.

К недостаткам сцинтилляционного прибора относится нестабильность фотоэлектронного умножителя — изменение со временем его чувствительности под влиянием облучения. Это вынуждало ограничивать интенсивность облучения и размеры сцинтиллятора. В последнее время успешно разрабатываются приборы, в которых этот недостаток исключается за счет применения дифференциальной схемы измерения, в которой оба потока излучения, проходящие через контролируемый объект и через эталон, воспринимаются попеременно одним детектором излучения. Следует отметить, что дифференциальная схема измерения, в которой оба потока излучения воспринимаются одним детектором, может быть с успехом применена для исключения нестабильности также счетчиков Гейгера—Мюллера.

3. ПЛОТНОМЕРЫ С ИОНИЗАЦИОННЫМИ КАМЕРАМИ. ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПРИБОР «ГАММА-ГРУНТОМЕР»

Ионизационная камера представляет собой стабильный, простой и долговечный детектор гамма-лучей, широко применяемый в точных приборах. Разработка промышленного прибора с ионизационной камерой затруднена тем, что ионизационные токи, возникающие в камере под влиянием гамма-лучей, обычно весьма малы. Однако существуют методы усиления и достаточно точного измерения токов до $10^{-15} \div 10^{-16}$ а [Л. 13], ионизационный же ток в камере серийного плотномера составляет около 10^{-11} — 10^{-12} а.

Для измерения таких токов применяются специальные электрометрические лампы, работающие при пониженном анодном напряжении и накале и имеющие малый сеточный ток. Применение электрометрических ламп позволяет ис-

пользовать большое входное сопротивление 10^{10} — 10^{11} ом и получить значительное изменение потенциала на сетке лампы при малом изменении ионизационного тока.

В качестве входной лампы (первой ступени усиления) в усилителе гамма-грунтомера (электрическая схема прибора показана на рис. 7*) применен электрометрический двойной симметричный пальчиковый тетрод 2Э2П. Эта электрометрическая лампа имеет два анода и две управляющие сетки, расположенные симметрично относительно общей нити накала и катодной сетки. Такая конструкция при применении балансной мостиковой схемы позволяет свести к минимуму влияние колебаний эмиссии, колебаний напряжения питания и ряда других факторов на дрейф выходного тока [Л. 14]. Применение этой лампы позволило создать всего на двух лампах простой усилитель прямого усиления по балансной схеме, почти не уступающий по стабильности показаний более сложным и совершенным усилителям другого типа.

Электрометрическая лампа устанавливается в тубусе, примыкающем к ионизационной камере или непосредственно в ней. Вторая лампа, двойной триод 6Н8С, устанавливается в основном блоке-пульте настройки.

С целью компенсации начального сигнала, возникающего под влиянием излучения, проходящего сквозь грунтопровод с чистой водой, регулируется напряжение смещения на управляющей сетке левой (рабочей) половины входной лампы L_1 . На управляющей сетке правой половины лампы устанавливается постоянное отрицательное напряжение смещения обычно 2 в. Отрицательное напряжение смещения на сетке левой половины превышает по абсолютной величине напряжение на правой настолько, чтобы компенсировать падение напряжения на входном сопротивлении R_1 , возникающее при ионизационном токе, соответствующем началу отсчета прибора. Величина этого напряжения устанавливается в лаборатории по эталонному излучению, интенсивность которого равна интенсивности излучения, проходящего через грунтопровод с чистой водой. Для этого регулируется напряжение смещения с помощью переменного сопротивления R_3 так, чтобы напряжение на выходе первой лампы 2Э2П равнялось нулю при среднем положении ползунка сопротивления R_7 , что обеспечивает работу лампы в симметричном режиме. Точная настройка нуля в производствен-

* Прибор разработан в Центральной научно-исследовательской лаборатории Госгортехнадзора Е. Г. Кардашом, А. Г. Кубих и др.

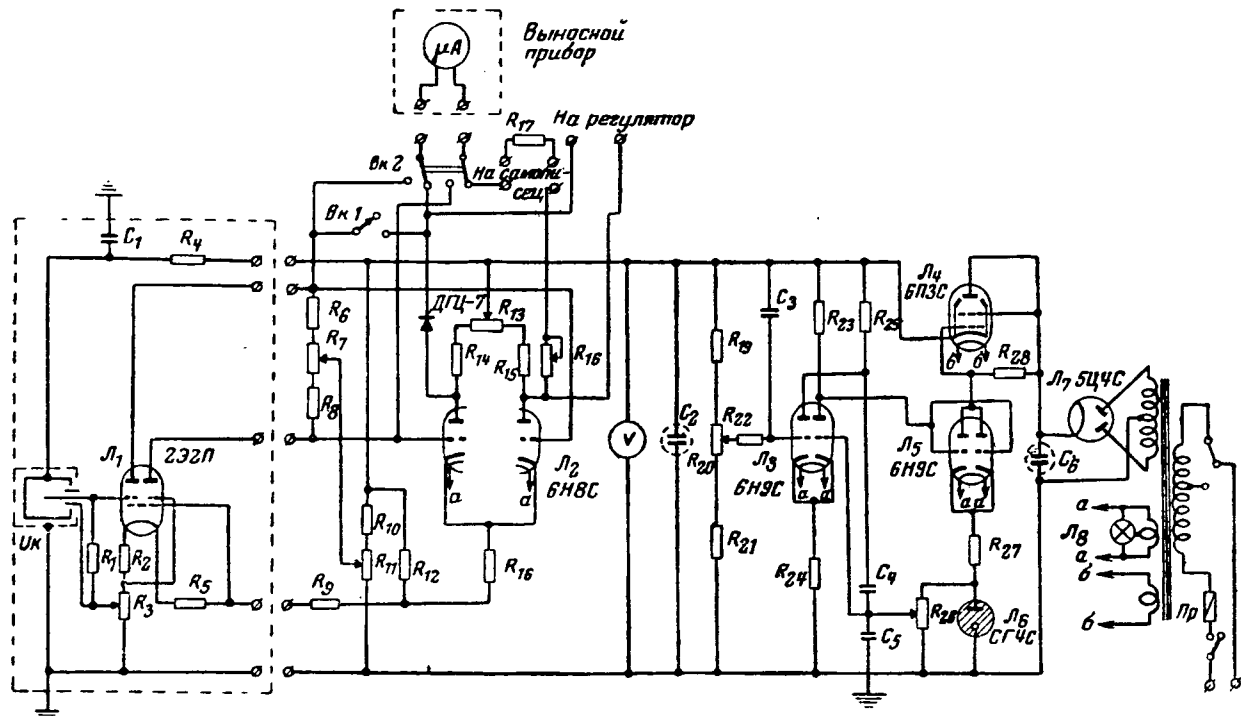


Рис. 7. Электрическая схема плотномера для земснарядов гамма-грунтомера с ионизационной камерой (вариант ЦНИЛ — ЭИМ).

ных условиях осуществляется с помощью переменных сопротивлений R_7 и R_{13} , регуляторы которых вынесены на переднюю панель блока настройки.

Вторая ступень усиления выполняется на двойной лампе 6Н8С, включенной также по балансной мостиковой схеме. Эта лампа устанавливается в блоке настройки, содержащем, кроме того, стабилизированный выпрямитель напряжения.

При помощи переменного сопротивления R_{16} , ручка которого вынесена на переднюю панель блока настройки, регулируется чувствительность выходного прибора, т. е. осуществляется «растяжка» шкалы. Регулировкой начала отсчета (условного нуля) и чувствительности шкала прибора приводится в соответствие с диапазоном фактического изменения контролируемой плотности гидросмеси, колеблющейся обычно в пределах 1,00—1,40 г/см³.

Прибор имеет вывод для подключения самописца и дополнительного усилителя или реле, сигналы с которого могут быть поданы на систему регулирования или на интегратор для указателя выработки земснаряда. Переключатель Bk_2 и тумблер Bk_1 предназначены для переключения измерительного прибора на первую ступень и замыкания входа, что позволяет проверять каждую ступень усиления отдельно и быстро находить неисправность в случае выхода прибора из строя, а также добиться симметрии каждой ступени.

Напряжение питания стабилизируется при помощи электронного стабилизатора обычного типа, который обеспечивает стабильность показаний в пределах $\pm 1\%$ шкалы при колебаниях напряжения в сети $\pm 10\%$ от номинала. Это соответствует изменению входного напряжения на 2,5 мВ. При изменении контролируемой плотности от 1,00 до 1,40 г/см³ ионизационный ток в камере изменяется от $1,7 \cdot 10^{-11}$ до $0,8 \cdot 10^{-11}$ а при диаметре грунтопровода 500 мм. Напряжение на входе изменяется при этом на 240 мВ, если входное сопротивление $R_1 = 2,7 \cdot 10^{10}$ ом.

При эксплуатации приборов выяснилось, что колебания напряжения на земснарядах, питающихся от береговой сети, очень велики. На таких земснарядах прибор должен включаться через дополнительный феррорезонансный стабилизатор напряжения, например СНЭ-120-0,1 мощностью 100 вА. На земснарядах с автономной электросиловой установкой нельзя пользоваться феррорезонансными стабилизаторами, потому что небольшая электросиловая установка земсна-

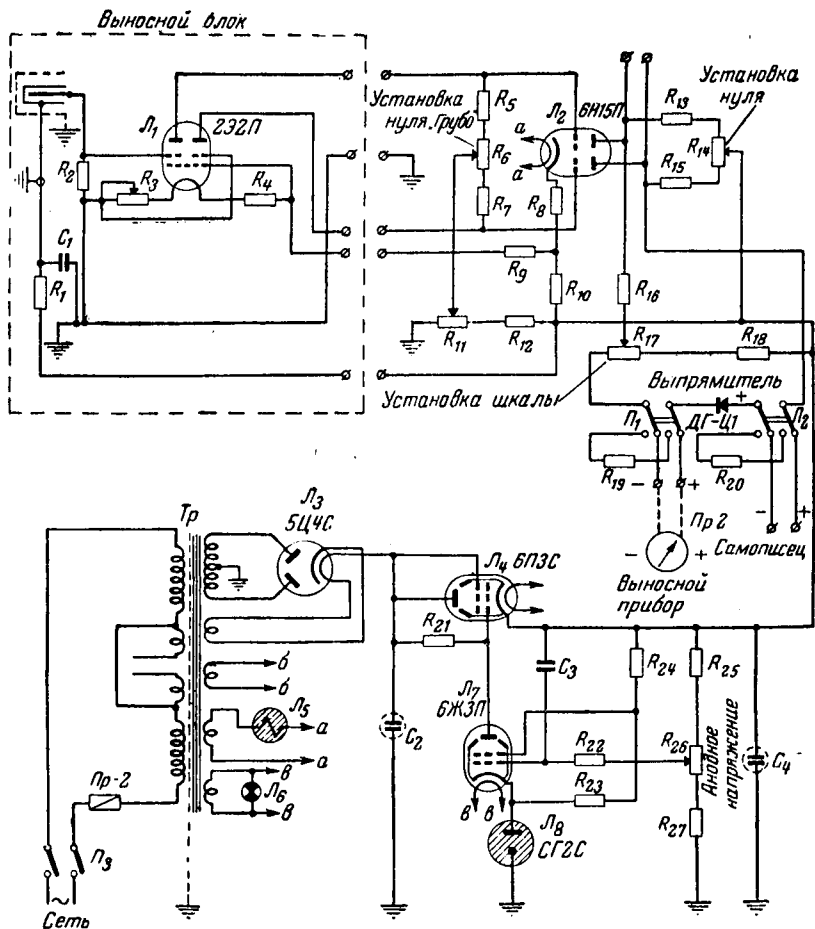


Рис. 8. Электрическая схема гамма-гравиметра.

ряда не обеспечивает необходимой стабильности частоты. В то же время напряжение на этих земснарядах колеблется в небольших пределах и удовлетворительная стабилизация достигается при помощи электронного стабилизатора блока настройки.

Небольшая серия приборов по описанной схеме была изготовлена экспериментальными мастерскими (ЭИМ) речного флота и с 1953 г. эксплуатируется на землесосных снарядах.

В 1954—1955 гг. промышленностью было изготовлено несколько серий плотномеров для земснарядов — гамма-грунтомеров, отличающихся от описанного прибора конструктивно и некоторыми деталями схемы [Л. 15]. Эти приборы¹ установлены на земснарядах строительства электростанций и речного флота с 1955 г.

Схема заводского прибора (рис. 8) отличается от схемы прибора ЦНИЛ — ЭИМ тем, что несколько упрощен стабилизатор напряжения, в качестве второй усилительной лампы применен двойной триод 6Н15П, отсутствует переключатель для раздельной поверки первого и второго каскадов. Недостатком этой схемы по сравнению с описанной выше является то, что регулировка смещения управляющей сетки электрометрической лампы 2Э2П невозможна и компенсация сигнала при условном нуле осуществляется только переменными сопротивлениями R_6 и R_{14} , изменяющими анодные нагрузки первой и второй ламп. Поэтому первая лампа работает не в симметричном режиме, что несколько снижает стабильность ее работы.

4. КОНСТРУКЦИЯ ГАММА-ГРУНТОМЕРА

От конструктивного оформления промышленного прибора в значительной мере зависят удобство его эксплуатации и поверки и надежность прибора в работе. На землесосных снарядах приборы работают при непрерывных вибрациях в различных метеорологических условиях, при наличии электрических и магнитных помех, что потребовало тщательной конструктивной разработки узлов серийного образца грунтомера.

Гамма-грунтомер состоит из четырех отдельных блоков: выносного блока — ионизационной камеры с электрометрической ступенью; пульта настройки, содержащего вторую ступень усиления и стабилизированный выпрямитель; показывающего прибора и свинцового контейнера с радиоактивным препаратом.

Выносной блок и контейнер с излучателем устанавливаются на грунтопроводе. Блок настройки и показывающий прибор монтируются в рубке багермейстера.

На рис. 9 и 10 показаны конструкция и общий вид выносного блока (вариант завода). В приборе применена

¹ Прибор разработан инженерами Н. М. Хлюстиком, В. Г. Бобылевым и др. на основании технических условий и данных ЦНИЛ Госгортехнадзора.

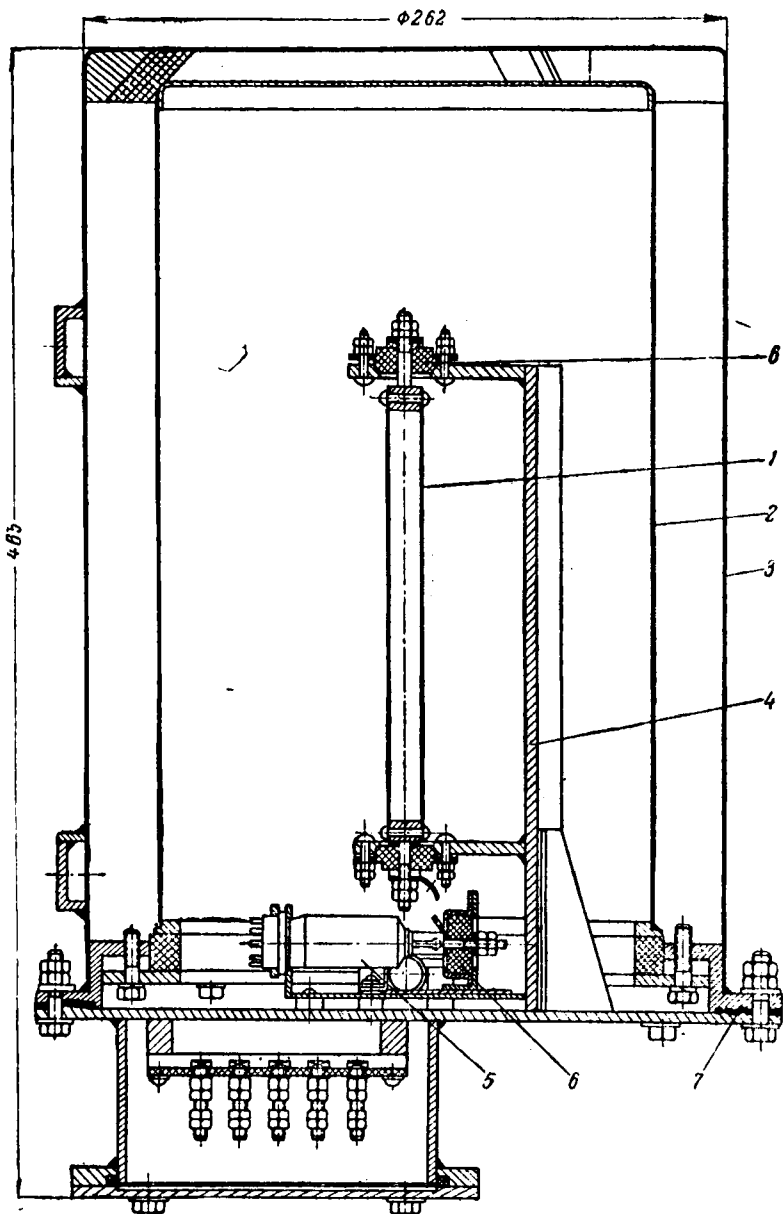


Рис. 9. Конструкция выносного блока гамма-грунтомера.

1 — собирающий электрод; 2 — высоковольтный электрод; 3 — кожух; 4 — стойка;
5 — электрометрическая лампа; 6 — изолятор (янтарь); 7 — резиновая прокладка.

цилиндрическая ионизационная камера, объемом 10 л. Электрометрическая лампа укреплена непосредственно в камере. Большое внимание уделено виброустойчивости ее деталей. Центральный (собирающий) электрод надежно закреплен на янтарных изоляторах.

Камера выполнена из дюралюминия¹ и закрыта кожухом из листовой стали, экранирующим камеру и устраняющим возможность механических повреждений. Герме-

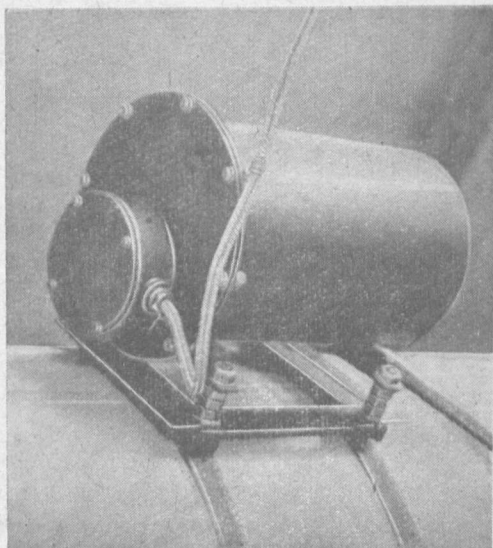


Рис. 10. Общий вид выносного блока с ионизационной камерой.

тичность достигается при помощи прокладок из морозостойкой резины. Как показала практика, этого обычно вполне достаточно. При особенно тяжелых условиях работы хорошие результаты получаются при дополнительной заливке соединений кабельной массой или менделеевской замазкой.

Габаритные размеры камеры выбраны сравнительно большими, так как в стационарном приборе, каким является плотномер для земснарядов, размеры отдельных бло-

¹ Для увеличения ионизационного тока правильнее было бы выполнять камеру из тонкой листовой стали, оцинкованной изнутри.

ков прибора не имеют существенного значения и лимитируются лишь удобствами транспортирования на место установки и стоимостью изготовления. Применение большой камеры позволяет при сравнительно малой активности источника получить достаточную точность прибора с простой схемой усилителя.

На рис. 11 показана конструкция камеры гамма-грунтомера, разработанного в ЦНИЛ. Эта камера отличается от заводской наличием отдельного герметичного тубуса для

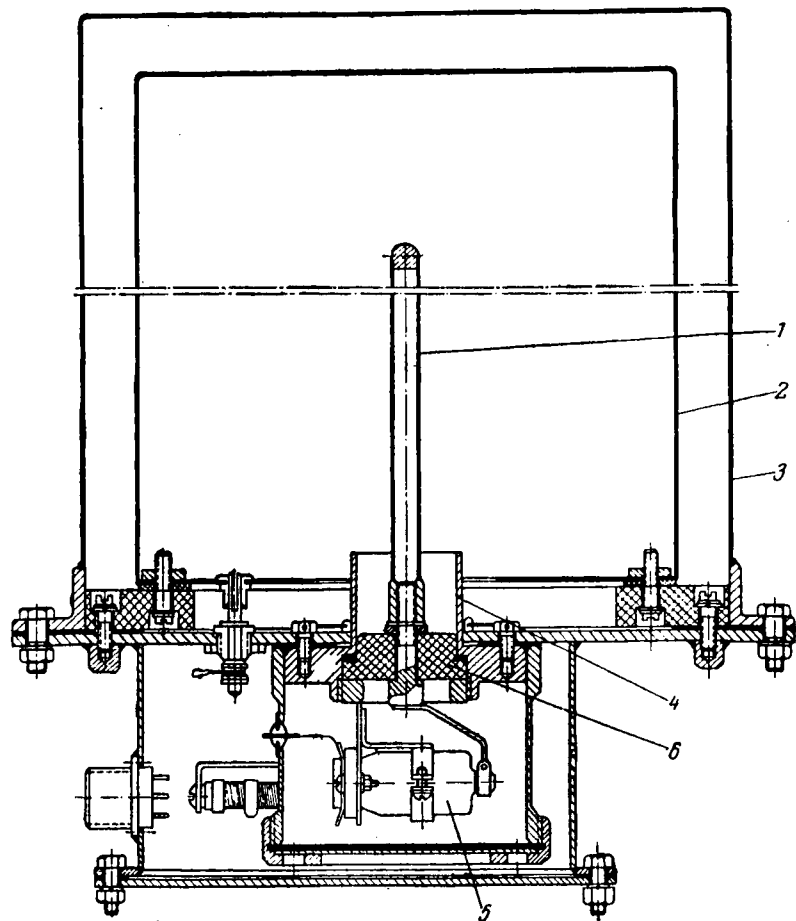


Рис. 11. Конструкция ионизационной камеры вариант ЦНИЛ — ЭИМ.
1 — собирающий электрод; 2 — высоковольтный электрод; 3 — кожух; 4 — охранное кольцо; 5 — электрометрическая лампа; 6 — янтарный изолятор.

электрометрической лампы с отделением, где установлено полупеременное сопротивление для подстройки напряжения смещения сетки лампы с целью электрической компенсации условного нуля. Хотя устройство этой камеры несколько сложнее заводской, ее преимущество заключается

в возможности заменять лампу не вскрывая всей камеры (объем камеры 12 л).

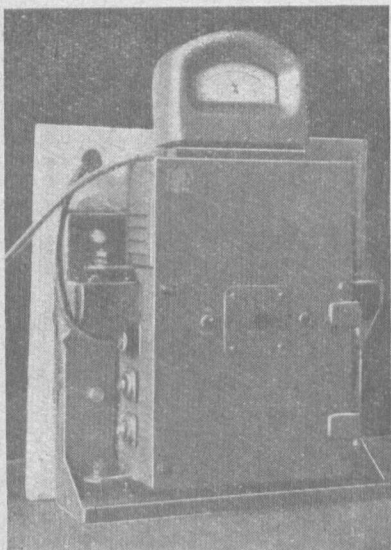


Рис. 12. Общий вид блока настройки (второй каскад усиления со стабилизированным выпрямителем) и показывающего блока.

Блок настройки, заводской вариант которого изображен на рис. 12 и 13, выполнен в виде плоской, вытянутой в высоту коробки размерами $160 \times 130 \times 430$ мм. Передняя крышка пломбируется; для удобства поверки и настройки прибора она выполнена на шарнирах. Все сопротивления и конденсаторы вынесены на гетинаксовую планку, находящуюся в доступном для осмотра и ремонта месте. На рис. 13 показан блок настройки с открытой передней крышкой, сюда же вынесены ручки переменных сопротивлений регулировки нуля, чувствительности и напряжения анодов ламп.

В последней серии приборов регулятор нуля выведен на переднюю панель, чтобы нуль прибора можно было регулировать, не открывая передней крышки. Весь блок подвешен на резиновых амортизаторах.

Блок настройки имеет выводы для подключения самопишущего гальванометра и дополнительного усилителя. Необходимость в последнем возникает, если сигнал с плотного номера используется для работы указателя выработки или системы регулирования режима работы земснаряда.

Блок настройки соединен многожильным экранированным кабелем длиной 15 — 50 м с ионизационной камерой и двухжильным кабелем длиной 5 м с выносным показывающим прибором.

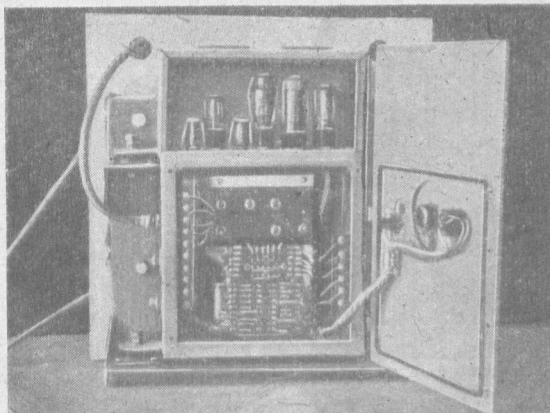


Рис. 13. Блок настройки с открытой крышкой.

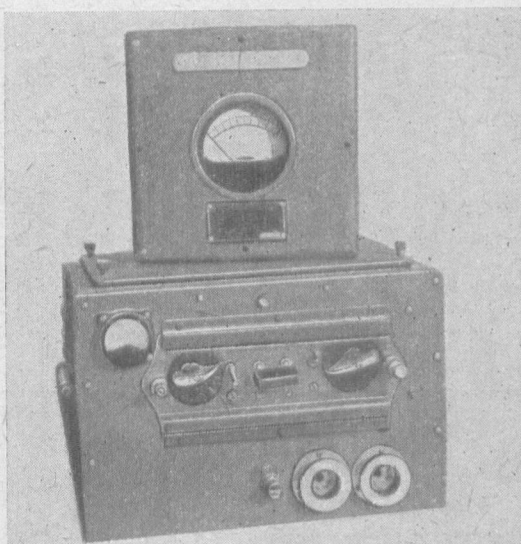


Рис. 14. Общий вид блока настройки и показывающего прибора; вариант ЦНИЛ — ЭИМ.

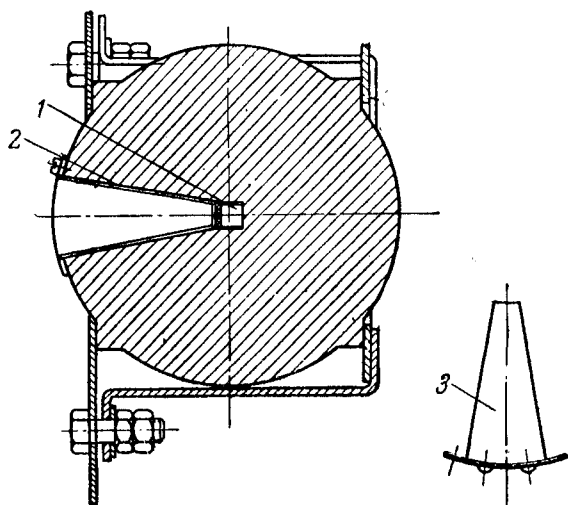


Рис. 15. Контейнер.

1 — радиоактивный препарат; 2 — конусная пломба; 3 — свинцовая заглушка.

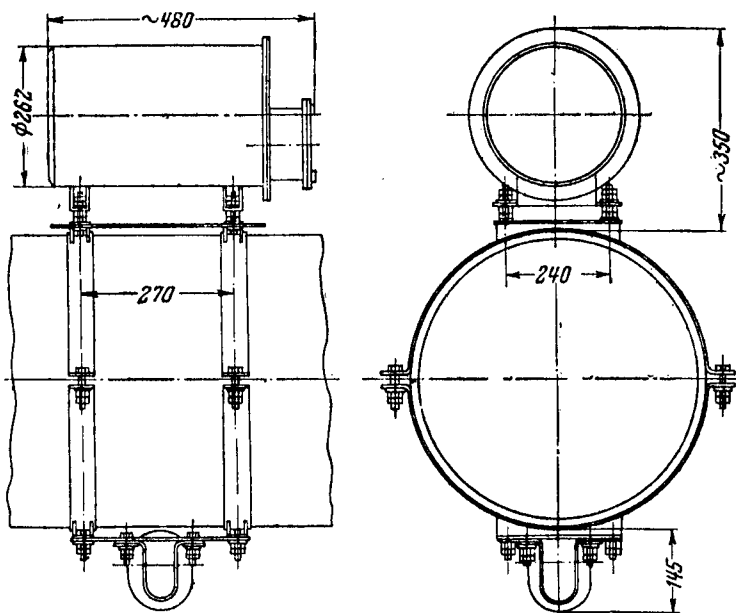


Рис. 16. Схема крепления контейнера и камеры на грунтопроводе.

Выносной показывающий прибор (рис. 12), в качестве которого применен микроамперметр М-24, устанавливается на приборном пульте рубки управления земснаряда.

Микроамперметр установлен в специальном кожухе на амортизаторах, предотвращающих влияние вибраций. Шкала прибора проградуирована в объемных процентах содержания грунта в пульпе с учетом пористости укладываемого грунта, равной 40%.

На рис. 14 показан вариант блока настройки и выносного показывающего прибора ЦНИЛ — ЭИМ. Конструкция блока отличается от заводской расположением деталей. На переднюю панель вынесены ручки регулировки нуля и регулировки чувствительности, тумблеры выключения из сети и переключения на поверку прибора. Все ручки закрыты задвижкой из органического стекла, которая пломбируется. Ручки регулировки нуля и чувствительности снабжены лимбами.

Остальные переменные сопротивления вынесены под шлиц на торец прибора. Блок снабжен вольтметром, показывающим напряжение на выходе стабилизатора. Хотя блок настройки такого типа в конструктивном отношении менее совершенен, чем заводской вариант, наличие вольтметра и тумблеров переключения прибора на проверку облегчает быструю поверку и наладку прибора при выходе его из строя. Например, переключатель позволяет сразу определить какая из двух ступеней усиления вышла из строя.

Контейнер (рис. 15) имеет форму шара с конусным отверстием, направленным на камеру. Через это же отверстие закладывается гильза с радиоактивным препаратом, гильза пломбируется с помощью конуса из дюралюминия.

На рис. 16 показана схема крепления выносного блока и контейнера на грунтопроводе. Крепление осуществляется с помощью хомутов, обеспечивающих возможность уста-

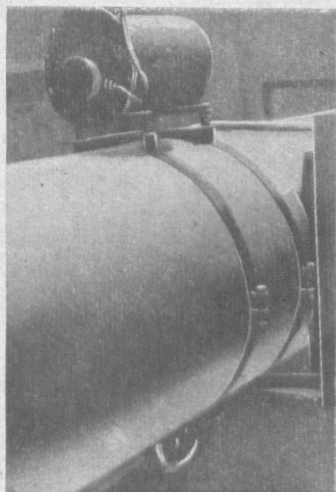


Рис. 17. Общий вид контейнера и камеры, установленных на грунтопроводе земснаряда.

новки излучателя и выносного блока на любом участке грунтопровода. Контейнер или камера могут быть сняты независимо один от другого. На рис. 17 показаны контейнер и выносной блок, установленные на грунтопроводе земснаряда.

5. ПЛОТНОМЕРЫ С ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ СЧЕТЧИКАМИ

Измерение плотности с помощью газоразрядных счетчиков в лабораторных условиях или при эпизодических измерениях производится обычно путем регистрации числа импульсов, возникающих в счетчике за определенный промежуток времени, при помощи специального пересчетного устройства с механическим регистратором на выходе.

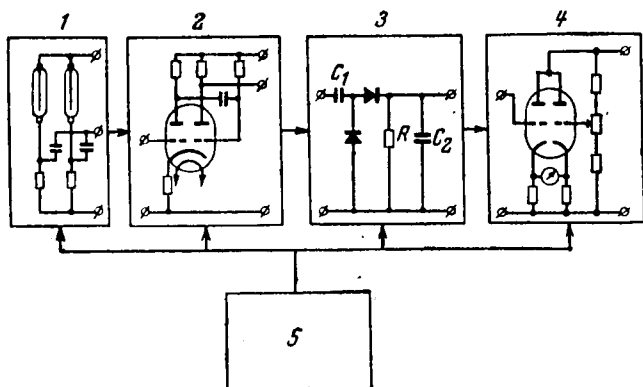


Рис. 18. Скелетная схема измерителя интенсивности излучения с газоразрядными счетчиками.

1 — газоразрядные счетчики; 2 — стандартизатор импульсов; 3 — интегрирующая ячейка; 4 — ламповый вольтметр; 5 — стабилизированный выпрямитель.

Измеряя число импульсов в отсутствии поглотителя и помещая затем поглотитель между излучателем и детектором, получают отношение интенсивностей $\frac{I}{I_0}$ и по формуле (10) находят плотность объекта. Для измерения постоянно меняющейся плотности в производственных условиях необходимо непрерывное измерение частоты импульсов. Для этой цели применяется преобразователь, в котором вырабатывается напряжение, пропорциональное частоте импульсов, возникающих в счетной трубке под воздействием облучения. Типичная скелетная схема прибора для измерения интенсивности излучения по средней скорости счета показана на рис. 18. Подробное описание

приборов этого типа вошло в ряд книг [Л. 11, 16 и 17], поэтому ниже изложены лишь основные моменты.

Основным звеном прибора служит интегрирующая RC ячейка 3 (рис. 18) с достаточно большой постоянной времени. На ячейку поступают импульсы со счетных трубок 1, предварительно стандартизованные по амплитуде и форме в формирующем устройстве 2. Стандартизация импульсов обычно осуществляется при помощи запертого одновибратора [Л. 17] или спусковой схемы иного типа, срабатывающей при поступлении импульса со счетчика и дающей импульс всегда одной и той же амплитуды и формы. Дальнейшее формирование импульсов осуществляется с помощью дозирующего конденсатора C_1 [Л. 11] и диодов.

Каждый импульс, поступающий на RC -ячейку, увеличивает заряд конденсатора C_2 . Одновременно заряд стекает по сопротивлению R . В результате на конденсаторе C_2 создается равновесное напряжение U_0 , которое пропорционально частоте импульсов, если параметры схемы выбраны так, что амплитуда импульсов во много раз больше напряжения U_0 . Равновесное напряжение U_0 , устанавливающееся на интегрирующей ячейке, измеряется ламповым вольтметром с показывающим прибором, обычно микроамперметром, на выходе.

Из-за статистического характера радиоактивного распада импульсы, поступающие на интегрирующую ячейку, следуют нерегулярно один за другим. Это приводит к колебаниям напряжения на интегрирующей ячейке и, следовательно, вызывает колебания стрелки прибора. Как показано в упомянутой работе [Л. 16], относительное среднее квадратичное отклонение напряжения на интегрирующей ячейке равно

$$\frac{\Delta U_0}{U_0} = \pm \frac{1}{\sqrt{2NRC_2}}, \quad (31)$$

где N — число импульсов в секунду;

R — сопротивление;

C_2 — емкость интегрирующей ячейки.

От величины RC_2 — постоянной времени прибора, зависит интервал времени, за который усредняется измеряемая скорость счета.

Импульсы напряжения, поступающие с газоразрядных счетчиков, различны по амплитуде, форме и ширине, что вызывает дополнительные флуктуации напряжения на интегрирующей ячейке. Поэтому для более точного измерения в случае, когда нежелательно увеличение постоянной вре-

В 1952 г. был подвергнут производственным испытаниям плотномер, разработанный в лаборатории Котлонадзора, в котором для формирования импульсов и улучшения работы газоразрядных счетчиков применялось гасящее устройство [Л. 17] для принудительного гашения разрядов счетчика, действующее по принципу реверсирования полярности напряжения на счетчике. При этом сокращается длительность импульса, уменьшается «мертвое» время, т. е. время нечувствительности, повышается разрешающая способность и увеличивается срок службы счетчиков.

В приборе были использованы три счетчика АММ-4, включенных параллельно. Впоследствии взамен них были применены счетчики ВС-9 с вольфрамовым катодом с большей эффективностью регистрации гамма-квантов, что позволило уменьшить активность излучателя.

В приборе осуществлена электрическая компенсация сигнала, устанавливающегося на интегрирующей ячейке при прохождении воды по грунтопроводу. Для этого на сетку лампы катодного вольтметра подавалось соответствующее отрицательное смещение. Стабилизация напряжения осуществлялась феррорезонансным стабилизатором. Гасящий каскад с интегрирующей ячейкой был смонтирован в выносном блоке — в одном тубусе с газоразрядными счетчиками. При этом на выходе выносного блока получается постоянное напряжение, которое можно передавать по длинному экранированному кабелю в измерительный блок.

Производственные испытания такого прибора, проведенные на земснарядах одновременно с испытаниями плотномера с ионизационной камерой в 1952 — 1953 гг., показали возможность его использования. Однако были зафиксированы эксплуатационные преимущества плотномера с камерой, так как постоянная времени плотномера со счетчиками достигала 1—2 мин, а постоянная прибора с камерой — 2 — 5 сек. Кроме того, прибор со счетчиками часто выходил из строя.

Существенным недостатком описанного варианта плотномера со счетчиками являлось большое число ламп в выносном блоке, устанавливаемом на грунтопроводе, подверженном наиболее интенсивным вибрациям. Кроме того, срок службы выпускавшихся в 1952 — 1953 гг. счетных трубок был слишком мал [$5 \cdot (10^7 \div 10^8)$ импульсов], что при средней частоте счета 100 импульсов в секунду соответствует всего 150—300 ч непрерывной работы трубки. Практически некоторые счетчики прослужили без замечных

изменений характеристик значительно больше, но изменение характеристики даже одного счетчика в группе приводит к значительным погрешностям в показаниях прибора. Многократное увеличение потока облучения счетчиков при освобождении грунтопровода от воды во время остановки двигателя также сокращало срок службы счетчиков и приводило к нестабильности показаний.

В последние годы отечественная промышленность разработала и выпускает новые счетные трубки, в том числе галогенные счетчики [Л. 18 и 20], в которых в качестве гасящей добавки применены галогены. Эти счетчики отличаются большим сроком службы и низким напряжением питания (300 — 400 вместо 750 — 1 200 в у других типов счетчиков). Выпускаются также счетчики некоторых других типов, например с вольфрамовым катодом серии ВС, отличающиеся большой эффективностью, особенно к мягкому излучению, хорошими счетными характеристиками и низким температурным коэффициентом.

Эти обстоятельства, а также возможность создания при использовании счетчиков простых и дешевых приборов позволили снова вернуться к плотномерам с газоразрядными счетчиками.

На рис. 20 показана электрическая схема плотномера для земснарядов с галогенными низковольтными счетчиками. При разработке прибора учтен опыт эксплуатации гамма-грунтомеров на земснарядах. Большое внимание уделено повышению его надежности, удобству эксплуатации и проверки.

Большой срок службы новых счетчиков позволяет обойтись без гасящего каскада. Низкое напряжение питания счетчиков позволило несколько упростить схему прибора и повысить его надежность.

Группа счетчиков СТС-8 применяется с отдельными нагрузочными сопротивлениями (R_1, R_2, R_3) и переходными конденсаторами (C_1, C_2, C_3). При таком соединении и правильно выбранных параметрах прибора число импульсов, регистрируемых прибором, возрастает пропорционально числу счетчиков.

В выносном блоке со счетчиками установлена лишь одна лампа (миниатюрный пентод 6Ж1Б), выполняющая функции катодного повторителя.

В качестве стандартизатора импульсов применена спусковая схема Шмидта [Л. 17] на двух пентодах $\mathcal{L}_4$ и $\mathcal{L}_5$; в другом варианте использован запертый одновибратор на

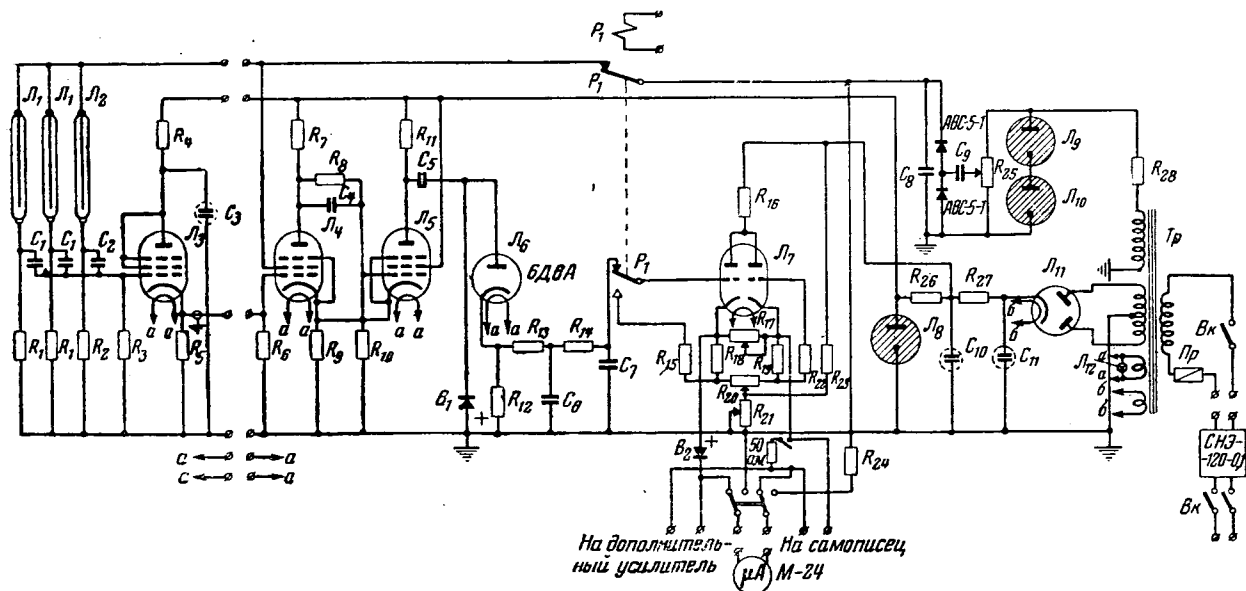


Рис. 20. Электрическая схема плотнoмера с газоразрядными счетчиками.

двойном триоде 6Н15П. Дальнейшая стандартизация формы импульсов осуществляется диодами B_1 и B_2 и дозирующим конденсатором C_5 . В качестве выпрямителя B_2 использован германиевый диод П2Б.

Напряжение на интегрирующей ячейке измеряется ламповым вольтметром, выполненным по симметричной балансной схеме с катодными нагрузками, что обеспечивает большую стабильность благодаря отрицательной связи по току. На сетку правой половины лампы подано постоянное отрицательное смещение. Смещение сетки левого триода, на который подается управляющий сигнал, регулируется переменным сопротивлением R_{21} таким образом, чтобы оно было равно смещению на правом триоде при начальной интенсивности излучения (I_0).

Для питания счетчиков применен выпрямитель на селеновых столбиках, включенных по схеме удвоения напряжения. Стабилизация напряжения питания счетчиков осуществляется с помощью миниатюрных стабилитронов СГ-5Б со стороны переменного тока.

Отсутствие специального генератора для питания счетчиков и малый расход тока позволяют осуществить стабилизацию напряжения для ламп с помощью одного стабилитрона СГ-1П. Как показал опыт, такая стабилизация обычно достаточна. При работе на земснарядах, где напряжение питания меняется в больших пределах, прибор должен включаться через феррорезонансный стабилизатор напряжения типа СНЭ-120-0,1. Стабилизатор входит в комплект прибора.

Чтобы увеличить срок службы счетных трубок, необходимо отключать подаваемое на них напряжение одновременно с выключением главного двигателя землесоса, так как при этом большей частью грунтопровод освобождается от гидросмеси и воды и интенсивность излучения, попадающего на счетчик, увеличивается в 10—100 раз (в зависимости от диаметра трубы). Питание счетчиков отключается с помощью реле P_1 , срабатывающего от кнопки выключения двигателя. Одновременно замыкается вход лампового вольтметра так, чтобы прибор показывал нуль. Весь прибор при этом отключаться не должен, чтобы избежать ошибки, могущей возникнуть в процессе прогрева прибора.

На рис. 21 показан вариант прибора¹, в котором на-

¹ При разработке электрических схем приборов, представленных на рис. 21 и 22, учтены советы Г. Д. Горлового и Р. Ф. Когана.

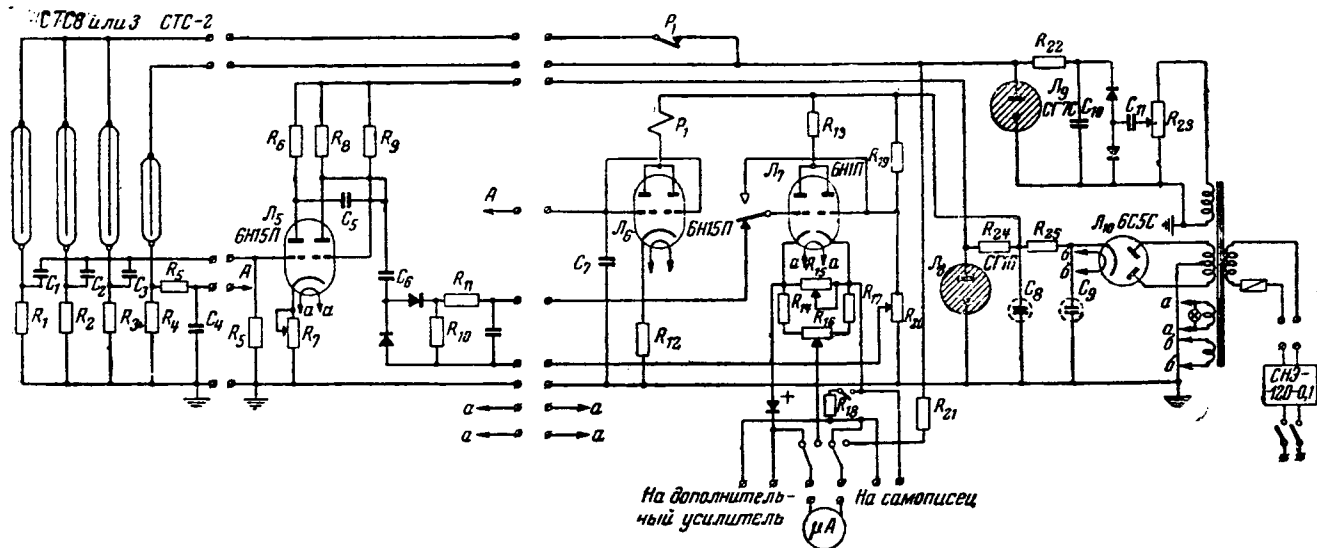


Рис. 21. Электрическая схема плотномера с газоразрядными счетчиками. Вариант с автоматическим выключателем питания счетчиков.

пряжение на счетчиках отключается автоматически при вытекании воды из грунтопровода и многократном увеличении интенсивности излучения. В блоке счетчиков установлен дополнительный счетчик $\mathcal{L}_4$, работающий в режиме среднего тока, воздействующего через лампу $\mathcal{L}_6$ на реле P_1 . При вытекании воды из грунтопровода ток, проходящий

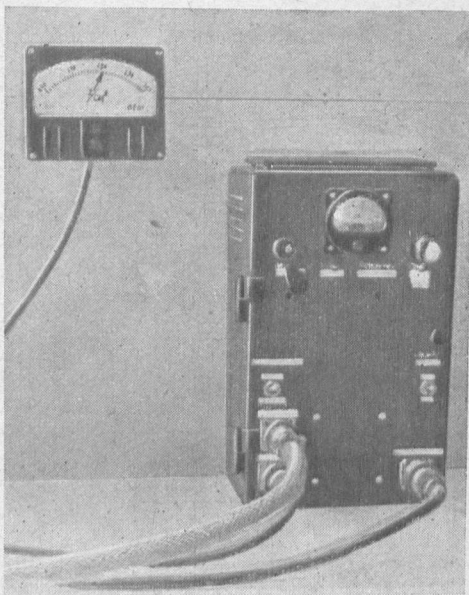


Рис. 22. Общий вид блока настройки и показывающего прибора плотномер ЦНИЛ с газоразрядными счетчиками.

через счетчик $\mathcal{L}_4$, возрастает в несколько раз. При этом срабатывает реле P_1 , отключающее напряжение основных счетчиков. Счетчики остаются выключенными до тех пор, пока трубопровод вновь не заполнится водой и ток, проходящий через счетчик $\mathcal{L}_4$, упадет. Реле P_1 при этом подаст напряжение на основные счетчики.

В этом варианте катодный повторитель отсутствует, а стандартизатор импульсов с интегрирующей ячейкой монтируется в отдельном небольшом блоке, который подвешивается вблизи (на расстоянии 1—2 м) блока со счетчиками. Это позволяет уменьшить количество деталей в блоке счетчиков, устанавливаемом на грунтопроводе. Та-

кая конструкция прибора позволяет при эксплуатации быстрее выяснить неисправности и при необходимости сменить весь блок. Кроме того, при такой конструкции оператор меньше находится под облучением при проверке прибора.

В схеме (рис 21) упрощен, кроме этого, стабилизатор напряжения питания счетчиков за счет применения корон-

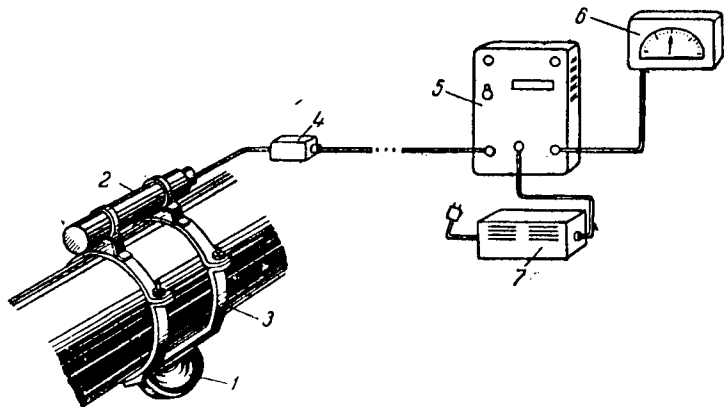


Рис. 23. Блок-схема плотномера с газоразрядными счетчиками.
1 — контейнер с излучателем; 2 — блок счетчиков; 3 — хомуты крепления;
4 — блок со стандартизатором импульсов и интегрирующей ячейкой; 5 —
блок настройки; 6 — показывающий прибор; 7 — феррорезонансный стабили-
затор напряжения.

ного стабилитрона СГ7С; несколько упрощен ламповый вольтметр.

На рис. 22 показан общий вид измерительного блока (блока настройки) и показывающего блока этого плотномера. На рис. 23 показана его блочная схема.

Конструкция контейнера с радиоактивным излучателем аналогична конструкции контейнера для прибора с ионизационной камерой (рис: 15). Активность радиоактивного источника может быть выбрана на основании данных, приведенных в табл. 2.

6. ГРАДУИРОВКА ПЛОТНОМЕРОВ ДЛЯ ЗЕМСНАРЯДОВ

Одним из преимуществ гамма-лучевого плотномера является универсальность градуировочных шкал и простота приведения показаний прибора в соответствие с фактической контролируемой плотностью непосредственно в производственных условиях.

Шкала приборов строится по кривым ослабления излучения, снятым экспериментально или построенным расчетным путем по формуле (14) с подстановкой экспериментальных значений коэффициента ослабления в компонентах смеси (воде и песке). Все приборы, предназначенные для одного и того же диаметра грунтопровода, могут иметь одинаковые шкалы. Необходимо лишь, чтобы отклонение стрелки прибора линейно зависело от интенсивности

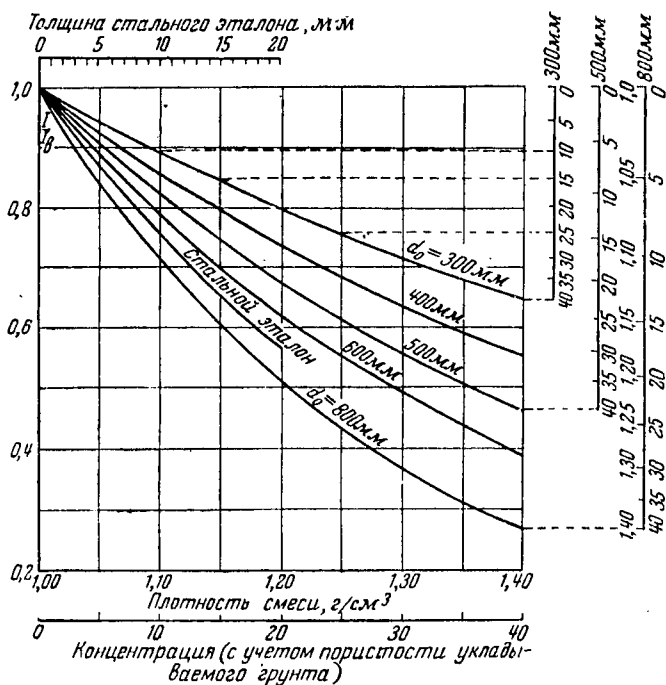


Рис. 24. Построение шкал гамма-грунтомера.

измеряемого потока излучения. Последнее условие оговаривается в технических требованиях на прибор.

Для того чтобы показания прибора соответствовали фактической контролируемой плотности гидросмеси, они проверяются по эталонному излучению в двух точках. Первое из них получается при пропускании по грунтопроводу воды без грунта, причем регулятором нуля (например, R_{14} на рис. 8) стрелка прибора ставится на нуль (если прибор проградуирован в единицах плотности, то стрелка прибора

ставится на 1,00). Второе эталонное излучение получается при введении между контейнером с излучателем и грунтопроводом, по которому пропускается вода, эталонной стальной пластины, дающей такое же ослабление гамма-лучей, какое получается при определенной известной плотности смеси. При этом стрелка прибора устанавливается на соответствующее деление шкалы с помощью регулятора «установка шкалы» (R_{17} на рис. 8). Толщина пластины подбирается заранее экспериментальным путем. Например, толщина стальной пластины, которая эквивалентна плотности $1,1 \text{ г/см}^3$ при диаметре грунтопровода 500 мм, равна 7,0 мм. Когда такая пластина помещается между контейнером и трубой, по которой проходит вода, стрелка ставится на деление 1,10 (или 10%, если шкала построена в процентах с учетом пористости укладываемого грунта).

После приведения двух точек шкалы прибора в соответствие с фактической плотностью гидросмеси показания в любой точке шкалы должны совпадать с фактической плотностью.

Способ построения шкалы по кривым ослабления показан на рис. 24. На графике приведены экспериментальные кривые ослабления и разбивка шкал для диаметров 300, 500 и 800 мм. Кривые ослабления снимались на макете грунтопровода (рис. 25) диаметром 500 мм с помощью прибора, аналогичного плотномеру для земснарядов с ио-

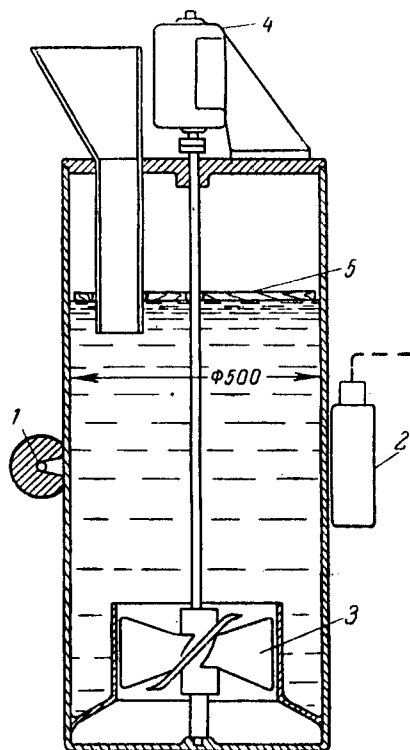


Рис. 25. Макет грунтопровода.
1 — излучатель; 2 — детектор излучения;
3 — мешалка; 4 — двигатель; 5 — поплавок.

низационной камерой. Для этого диаметра графики сверялись с результатами измерений на упрощенном макете, представлявшем собой прямоугольный бак с водой (рис. 26), в который засыпалось определенное количество грунта. Поскольку кривые ослабления, полученные на обоих макетах (рис. 25 и 26), почти совпадали, для остальных диаметров кривые строились на упрощенном макете.

Для определения толщины стальных эталонных поглотителей строились кривые ослабления гамма-лучей кобальта 60 в зависимости от толщины стальных пластин, помещаемых между контейнером с излучателем и макетом грунтопровода, заполненным водой. Кривая ослабления для стали показана на рис. 24 вместе с кривыми ослабления для гидросмеси (ослабление для стали оказалось практически не зависящим от диаметра грунтопровода в диапазоне от 300 до 800 мм). Эти кривые позволяют определить толщину стальной пластины, эквивалентной любому заданному значению плотности, для разных диаметров труб. В табл. 3 приведены толщины стальных пластин, эквивалентных плотности 1,1 и 1,15 г/см³, для труб разных диаметров, заполненных водой. Таблица действительна только для кобальта 60.

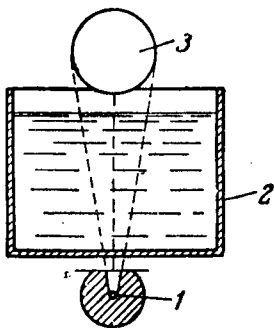


Рис. 26. Упрощенный макет грунтопровода.
1 — излучатель; 2 — сосуд; 3 — детектор излучения.

Проверка прибора по эталону производится как при его установке, так и в процессе работы, для корректировки изменения показаний прибора, вызванного уменьшением активности радиоактивного источника. Для компенсации ослабления излучателя при применении кобальта 60 достаточно одной корректировки в месяц. Как показала практика, корректировка усиления может производиться через такой же промежуток времени.

На рис. 27 показаны градуировочные кривые, построенные на основании кривых ослабления. Сравнивая положение делений шкалы для градуировочных кривых, соответствующих разным диаметрам, убеждаемся, что при использовании прибора, проградуированного для диаметра 500 мм, также для диаметра 400 или 600 мм возникает ошибка не более чем на одно деление шкалы в средней ее части.

Таблица 3

Диаметр грунтопро- вода, мм	Толщина стальной пластины, мм, эквива- лентная гидросмеси с плотностью	
	1,1 г/см ³	1,15 г/см ³
300	4,0	6,0
400	5,5	8,0
500	7,0	10,5
600	8,5	12,5
700	10,0	15,0
800	12,0	17,5

Однако практикуемое иногда использование шкалы, рассчитанной для диаметра 500 мм, также для диаметра 800 мм недопустимо, так как ошибка при этом в средней части шкалы достигает нескольких делений. Из рассмот-

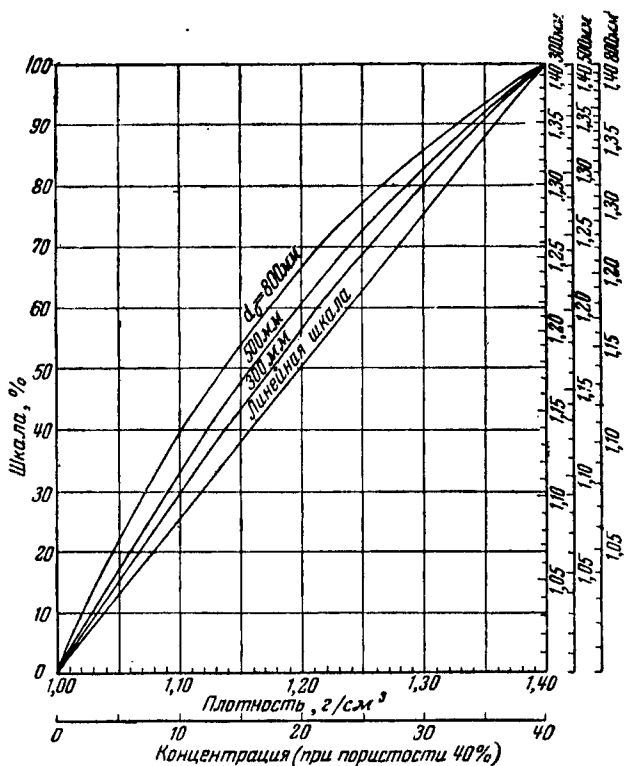


Рис. 27. Градуировочные кривые.

рения этих кривых следует также, что небольшие ошибки в построении кривых ослабления гамма-лучей, а следовательно и шкалы прибора, не сказываются на его точности.

Шкалы плотномеров для земснарядов даны в единицах плотности ($г/см^3$) или в объемных процентах содержания песчаного грунта в водогрунтовой смеси. Шкала в единицах плотности пригодна для всех грунтов, так как прибор показывает среднюю плотность контролируемого вещества. Шкала в объемных процентах содержания грунта в смеси построена для песка, но, как показали экспериментальные исследования, достаточно точна и для большинства других грунтов. Следовательно, коэффициент μ_2 [в формуле (14)] практически постоянен для большинства грунтов, взвешенных в воде.

При производственных испытаниях гамма-лучевых плотномеров на земснарядах выяснилось, что производственникам более удобна градуировка приборов в объемных процентах содержания грунта в смеси с учетом средней пористости укладываемого грунта при его естественном уплотнении. Согласно данным треста «Гидромеханизация» Министерства электростанций пористость уложенного песчаного грунта при намыве плотин составляет 35—45%. Поэтому шкала промышленных приборов для земснарядов градуировалась в объемных процентах для песчаного грунта с учетом средней пористости в естественном уплотнении, равной 40%.

При существенных отклонениях от этой средней пористости в показания прибора должна вноситься поправка.

Однако было бы правильнее, несмотря на то, что большие отклонения в пористости бывают редко, градуировать прибор в единицах плотности смеси или в объемных процентах содержания твердого в смеси (концентрации) без учета пористости намываемого грунта.

Зависимость усредненной по сечению трубопровода плотности смеси ρ от усредненной концентрации Q (отношения объема грунта к объему смеси) очевидна:

$$Q = Q\rho_2 + (1 - Q)\rho_g.$$

Отсюда

$$Q = \frac{\rho - 1}{\rho_2 - 1}, \quad (32)$$

где ρ_2 — плотность частиц твердого компонента смеси. Для песка и большинства других грунтов $\rho_2 = 2,65 \text{ г/см}^3$.

Поэтому для песка и большинства грунтов

$$Q = \frac{\rho - 1}{1,65}.$$

Если учитывать пористость ϕ , заданную в процентах, то

$$Q = \frac{\rho - 1}{(\rho_s - 1) \left(1 - \frac{\phi}{100}\right)}.$$

Приближенное значение концентрации для песка с пористостью $\phi = 40\%$ определится по формуле

$$Q \approx \rho - 1.$$

Поэтому, в частности, у применяемых в настоящее время приборов деление 0% соответствует плотности $1,00 \text{ г/см}^3$, деление 10% соответствует плотности $1,10 \text{ г/см}^3$ и т. д.

7. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ СМЕСИ, ТЕКУЩЕЙ ПО ТРУБЕ

Кроме погрешностей гамма-лучевого плотномера, зависящих от прибора и излучателя, рассмотренных в первой главе, обусловленных ошибками измерения интенсивности излучения и флуктуациями потока излучения, при измерении плотности (или концентрации) водогрунтовой смеси или другой неоднородной смеси, текущей по трубе, возникают ошибки, не связанные с качеством самого прибора или излучателя. Причиной таких ошибок является главным образом неоднородность смеси, т. е. неравномерность распределения плотности смеси по сечению трубы. Сюда же в некоторых случаях относятся следующие причины: колебания состава грунта, т. е. отклонения удельного веса частиц грунта от среднего значения, для которого измерено значение коэффициента ослабления μ_2 ; отклонения от средней пористости, для которой проградуирован прибор; различие между истинной плотностью смеси в трубе (концентрацией) и средней плотностью выливающейся смеси (расходной консистенцией), однако первая из этих ошибок пренебрежимо мала, а о вторых двух может идти речь лишь при неправильном пользовании прибором.

Как видно из формулы (14), по которой строится шкала прибора, колебания состава грунта могут вызвать ошибку прибора, проградуированного для определенного

грунта, лишь в том случае, когда при изменении состава грунта изменяется коэффициент μ_2 ослабления излучения в грунте. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что почти для всех грунтов, транспортируемых с помощью землесосных снарядов $\mu_2 = \mu_0 \rho_2$, имеет практически одинаковое значение, близкое к μ_2 песка, измеренному в тех же условиях. Объясняется это тем, что плотность частиц большинства грунтов мало отличается одна от другой. Кроме того, песок является преобладающим компонентом большинства грунтов, транспортируемых с помощью землесосов. Поэтому среднее значение плотности грунтовых частиц и соответственно μ_2 колеблется в практически пренебрежимых пределах.

Следует также отметить, что, как показано в п. 6 этой главы, небольшие изменения значения μ_2 и обусловленные ими отклонения кривой ослабления и градуировочной кривой могут вызвать лишь ничтожные ошибки в показаниях.

Влияние отклонений от средней пористости на точность показаний возникает лишь в тех случаях, когда прибор проградуирован в процентах содержания грунта в смеси с учетом средней пористости укладываемого грунта (или пористости грунта в забое при естественном уплотнении). Такая градуировка является искусственной и нецелесообразной, как выяснилось при эксплуатации приборов (хотя при обычных колебаниях пористости эта ошибка достаточно мала). При градуировке прибора в единицах плотности смеси ($г/см^3$) либо в процентах содержания грунта в смеси (концентрации) колебания пористости не имеют никакого значения.

Гамма-лучевой плотномер, как и большинство приборов для измерения плотности гидросмеси или процентного содержания грунта в смеси, независимо от принципа действия, предназначен и измеряет среднюю плотность или концентрацию смеси в определенном сечении трубы. Именно эта величина нужна для регулирования (ручного или автоматического) режима работы земснаряда. В ряде же случаев прибор пытаются использовать для измерения расходной консистенции, т. е. средней плотности выливаемой смеси, поступающей на «карту». Согласно терминологии, введенной проф. М. А. Дементьевым [Л. 21], первая величина, измеряемая прибором называется концентрацией, а вторая — консистенцией. Между концентрацией и расходной консистенцией всегда есть большее или

меньшее расхождение, поскольку средняя скорость горизонтального потока воды всегда больше средней скорости влекомых ею твердых частиц. Однако это различие не вызывает никакой погрешности в показаниях прибора, если он используется по своему назначению, т. е. для измерения концентрации или плотности смеси в трубе. Это обстоятельство необходимо подчеркнуть, так как среди гидромеханизаторов под градуировкой плотномера (или аналогичных приборов) большей частью неправильно подразумевают градуировку его в единицах расходной консистенции.

Такая градуировка может понадобиться лишь в одном случае: если плотномер используется вместе с интегратором его показаний для оценки количества намывтого грунта в кубометрах. В ряде случаев это допустимо. Как показали измерения на опытной установке строительства Мингечаурской ГЭС и на опытной землесосной установке Научно-исследовательского института транспортного строительства, истинная концентрация, измеряемая прибором, практически равна расходной консистенции при транспортировке мелких и средних песков и практически применяемых скоростях. При транспортировке крупных песков и гравия при малых скоростях расхождение может быть значительным.

Это значит, что пользоваться плотномером для измерения расходной консистенции можно лишь для легких и средних грунтов и недопустимо для гравия и тяжелых песков. Необходимо еще раз отметить, что для регулирования режима работы земснаряда важна не расходная консистенция, а концентрация, для измерения которой и предназначен прибор.

При установке измерительного узла прибора на вертикальном участке грунтопровода необходимо также учитывать изменение средней плотности, обусловленное тем, что скорость воды на вертикальном участке не равна скорости твердых частиц. На участке с восходящим потоком плотность смеси больше, а на участке с нисходящим потоком — меньше средней плотности в горизонтальной трубе из-за того, что частицы грунта движутся медленнее воды в первом случае и быстрее во втором.

Ошибки измерения, связанные с неравномерным распределением плотности по поперечному сечению трубы, возникают по следующим причинам:

1. На детектор частично попадают гамма-лучи, рас-

сеянные грунтом, находящимся в смеси. Поэтому измеряемая интенсивность излучения зависит от положения поглотителя между излучателем и детектором излучения и, следовательно, от того, где находятся плотные слои: ближе к источнику лучей или ближе к детектору. Однако, как показал эксперимент, ошибка, связанная с указанным обстоятельством при наибольшей неравномерности, не превышает 1% шкалы. Ввиду того, что на практике неравномерности значительно меньше, чем были при проведении эксперимента, эта ошибка в большинстве случаев практического значения не имеет.

2. Пучок гамма-лучей «просвечивает» лишь часть поперечного сечения грунтопровода и не реагирует на изменение концентрации в участках, не попадающих в просвечиваемую область. Эта причина погрешностей практически исключается, если направить пучок гамма-лучей вдоль имеющей место неравномерности, т. е. так, чтобы он пересекал слои с разными плотностями. Например, в горизонтальной трубе при ламинарном течении смеси имеет место неравномерность концентрации главным образом вдоль вертикального диаметра поперечного сечения трубы. Поэтому пучок гамма-лучей здесь должен быть направлен по вертикальному диаметру трубы.

3. Основной причиной погрешностей, возникающих из-за различия плотности по сечению трубы, является следующее обстоятельство:

В горизонтальной трубе при ламинарном течении смеси нижние слои оказываются более плотными, чем верхние. При прямоугольном сечении трубы общее количество вещества на пути пучка, направленного вертикально, не зависит от распределения плотности вдоль направления излучения, поэтому ослабление пучка не зависит от неравномерности распределения плотности пучка. При круглом сечении трубы в случае, когда грунт идет по дну трубы, высота слоя грунта оказывается больше, чем высота слоя того же количества песка, собранного вблизи горизонтального диаметра трубы. При равномерном распределении плотности по сечению трубы общее количество грунта на пути пучка и соответственно ослабление в нем также оказываются меньше, чем в тех случаях, когда то же количество грунта идет по дну трубы.

Предположим, что концентрация Q переменна и зависит только от расстояния h рассматриваемого горизонтального слоя гидросмеси, текущей по горизонтальной трубе,

от нижней точки внутренней окружности поперечного сечения трубы. Тогда формула (14), связывающая концентрацию Q с измеряемой прибором интенсивностью излучения, должна быть записана в виде.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-d_0(\mu - \mu_s)} \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} Q(h) dh, \quad (33)$$

где d_0 — внутренний диаметр трубы.

Сравнивая формулу (14), верную для случая $Q = \text{const}$, и (33), видим, что среднее значение концентрации, измеряемое прибором, равно

$$Q_{cp} = \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} Q(h) dh.$$

Эта величина равна средней концентрации для трубы прямоугольного сечения. Для цилиндрической трубы это не имеет места, так как площадь элемента dS сечения цилиндрической трубы, выбранного в виде горизонтальной полосы, равна

$$dS = 2\sqrt{(d_0 - h)h} dh,$$

и усреднение концентрации для круглого сечения должно иметь вид

$$2 \int_0^{d_0} Q(h) \sqrt{(d_0 - h)h} dh = Q_{cp}^* \frac{\pi d_0^2}{4},$$

откуда

$$Q_{cp}^* = \frac{2}{\pi d_0^2} \int_0^{d_0} Q(h) \sqrt{(d_0 - h)h} dh.$$

Следовательно, при неравномерной концентрации вдоль вертикального диаметра цилиндрической трубы возникают систематические погрешности в определении концентрации, равные разности $Q_{cp}^* - Q_{cp}$.

Измерения, проведенные с помощью гамма-лучевых приборов при испытаниях гамма-грунтомеров на земснарядах, показывают, что при правильном выборе места установки излучателя и детектора излучения неравномерность

концентрации по сечению, которая имеет место на земснарядах, когда грунт состоит из мелких и средних песков, практически не сказывается на показаниях прибора. При крупнозернистых песках (при средних размерах частиц ≥ 3 мм) ошибка в показаниях прибора из-за неравномерного распределения может достигать 5—10% от измеряемой величины в сторону завышения (например, при показании прибора 20% фактическая концентрация равна 18—19%).

Резюмируя рассмотрение причин ошибок, следует отметить, что, кроме ошибки прибора, в измерении интенсивности излучения, на ошибке в измерении плотности неоднородной смеси может существенно сказаться только влияние неравномерного распределения плотности по поперечному сечению трубы. Однако на земснарядах имеются участки трубопроводов, где неравномерность распределения концентрации по сечению достаточно мала.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОПЫТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛОТНОМЕРОВ НА ЗЕМСНАРЯДАХ

В результате лабораторной проверки гамма-лучевых плотномеров разных типов (в разное время проверялись приборы с ионизационными камерами и газоразрядными счетчиками разработки центральной научно-исследовательской лаборатории Госгортехнадзора и Экспериментально-исследовательских мастерских МРФ и выпускаемые на их основе серийные приборы) было выяснено:

1. Ошибка показаний приборов с ионизационной камерой для диаметра грунтопровода 500 мм при активности источника кобальта 60, равной 100 мкюри не превышает $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$, т. е. $\pm 2\%$ от измеряемого диапазона плотности (1,00—1,40 г/см³). Постоянная времени приборов в среднем равна 2—5 сек. Соответственно для приборов с газоразрядными счетчиками (с тремя счетчиками СТС-8) было получено: $\pm 0,015 \text{ г/см}^3$ при активности излучателя 20 мкюри и постоянной времени 20—50 сек.

2. Уход показаний приборов с ионизационной камерой после 24-часового непрерывного включения составлял от 1 до 3 делений шкалы в сутки в первые дни работы и не более 2 делений в сутки при дальнейшей работе (шкала разбита на 40 делений, из которых каждое соответствует изменению плотности на $0,01 \text{ г/см}^3$). Отдельные экземпляры серийного прибора давали уход, превышающий допустимые по техническим условиям 3% шкалы в сутки, но эти приборы оказались неисправными. После просушки и улучшения герметичности ионизационной камеры уход показаний лежал в упомянутом выше диапазоне.

Уход показаний приборов с газоразрядными счетчиками не превышал 1—2 делений в сутки (в первые 3—5 суток), но некоторые экземпляры начинали быстро изме-

нять свои показания на 5—8-е сутки. После смены счетчиков вновь наблюдался нормальный уход показаний.

Контроль устойчивости показаний приборов проводился при постоянной интенсивности облучения, соответствующей интенсивности, получающейся в гамма-грунтомере на земснаряде при прохождении воды по грунтопроводу, в течение 7—15 суток для каждого прибора.

3. С помощью макета грунтопровода, представляющего собой просвечиваемый снизу вверх бак с водой, в который засыпались определенные навески грунтов разного состава и крупности, было выяснено, что показания гамма-лучевых приборов практически не зависят от крупности и состава грунтов.

4. С помощью этого же макета была выяснена правильность градуировки приборов по экспериментальным кривым ослабления гамма-лучей с приведением шкалы к плотности реального объекта по показаниям, получающимся при заполнении сосуда водой и при введении между излучателем и объектом стального эталонного поглотителя.

Производственные испытания гамма-грунтомеров велись с 1952 по 1954 г. В первый период испытания проводились на земснаряде «Сормовский-4» производительностью 350 м³/ч при работах по дноуглублению и намыве дамб на перекатах Волги.

Испытанию подверглись приборы с ионизационными камерами и с газоразрядными счетчиками, разработанные в ЦНИЛ Госкотлонадзора МЭС и Экспериментально-исследовательских мастерских МРФ. В 1953 г. были повторены сравнительные испытания приборов с камерой и с газоразрядными счетчиками на земснаряде «Сормовский-3» и проводились испытания прибора ЦНИЛ, дополненного указателем выработки, на земснаряде типа 300-40, намывавшем плотину Горьковской ГЭС. В 1954 г. испытывались первые образцы серийного варианта.

Для выбора места установки измерительного узла прибора исследовалась неравномерность плотности по сечению трубы в разных участках грунтовода. Для этого одновременно использовались два прибора, в одном из которых луч направлялся по вертикальному диаметру, а в другом — по наклонному под различными углами. У обоих приборов при прохождении воды по грунтопроводу регулировался нуль и устанавливалась одинаковая чувствительность с помощью стального эталонного поглотителя.

Затем при прохождении гидросмеси разной густоты показания приборов сравнивались. Расхождения в показаниях обоих приборов свидетельствовали о неравномерном распределении плотности по сечению. Эти опыты показали, что наименьшая неравномерность имеет место на наклонном участке всасывающей линии, на горизонтальном участке напорной линии в 2—4 м от колена (перехода от вертикальной части после насоса) и на вертикальном восходящем и нисходящем участках. Для установки прибора был выбран упомянутый горизонтальный участок напорной линии. Контейнер с излучателем ставился под трубой, а детектор излучения на трубе над ним. Такое расположение обеспечивает наилучшую защиту обслуживающего персонала от гамма-лучей и облегчает доступ к выносному блоку прибора.

Стабильность условного нуля определялась по показаниям прибора при прохождении воды без грунта по грунтоводу. Ноль прибора проверялся таким образом не менее 2 раз в сутки. Уход нуля для приборов с камерой составил в среднем 2% в первые сутки и не более 1% в последующие¹. На одном из двух испытывавшихся приборов с камерой уход нуля не превышал 2% в неделю, начиная с третьего дня работы. Прибор со счетчиками показал в первые три суток уход нуля не более 1% в сутки. В последующие сутки было отмечено отклонение на 7%, вызванное изменением счетной характеристики одного из трех счетчиков. После замены счетчика прибор снова показывал малый уход нуля. Чтобы увеличить срок службы счетчиков, пришлось ввести выключение напряжения питания счетчиков при остановках двигателя.

В результате испытаний выявилась необходимость в усовершенствовании приборов и повышении виброустойчивости всех узлов, как опытных образцов ЦНИЛ и ЭИМ, так и головных образцов серии.

Летом 1956 г. проводились повторные испытания серийного гамма-грунтомера выпуска 1955 г. (который начал эксплуатироваться в 1955 г.) на лабораторном стенде Научно-исследовательского института транспортного строительства. Лабораторный стенд представлял собой стационарную землесосную установку с замкнутым грунтопроводом диаметром 300 мм с мерным баком для определения консистенции. Испытания вновь подтвердили до-

¹ Имеются в виду испытания, проведенные летом 1953 г. на земснаряде „Сормовский-3“.

статочную точность прибора и удовлетворительную стабильность показаний прибора — уход не более 1% в сутки. Ошибка не превышала $\pm 1,5\%$ (в процентах содержания грунта в смеси). Стабильность показаний этого прибора была подтверждена при его работе на землесосном снаряде в г. Кашире. Представляет интерес проведенное на этом земснаряде сравнение показаний гамма-грунтомера, проверенного предварительно в лаборатории, с показаниями вакуумметра, манометра и амперметра главного двигателя.

На рис. 28 приведена запись показаний перечисленных приборов. Показания приборов снимались одновременно через каждые 30 сек в течение 2,5 ч. Запись, в частности, показывает, что хотя вакуумметр и отражает до некоторой степени кинетику изменения концентрации, показываемой плотномером, судить по его показаниям о фактической концентрации нельзя. Можно лишь определить, и то не всегда правильно, уменьшается или увеличивается концентрация в данный момент. Еще меньше характеризуют концентрацию амперметр главного двигателя и манометр.

Интересен отмеченный за время наблюдения срыв вакуума (на 70-й минуте). Срыв вакуума произошел в результате резкого возрастания концентрации, которое можно было бы предотвратить, если бы работа землесоса регулировалась с помощью плотномера. Работа производилась на автоматизированном земснаряде, где уровень опускания всаса регулировался автоматически в зависимости от показаний вакуумметра. Как видно из графиков, при такой автоматизации имеются значительные колебания концентрации, хотя и меньшие, чем при ручном регулировании, проводимом на основании показаний того же вакуумметра. Для поддержания постоянной концентрации необходим автоматический регулятор, в котором в качестве датчика, кроме вакуумметра, используется также плотномер.

С весны 1956 г. началась эксплуатация ряда гамма-грунтомеров на землесосных снарядах, используемых на строительстве гидроэлектростанций и в речном флоте.

В первом случае были установлены грунтомеры, изготовленные заводом радиотехнической промышленности, а во втором — применялись приборы, изготовленные в Экспериментально-исследовательских мастерских речного флота. В 1956 г. на земснарядах, используемых в речном флоте,

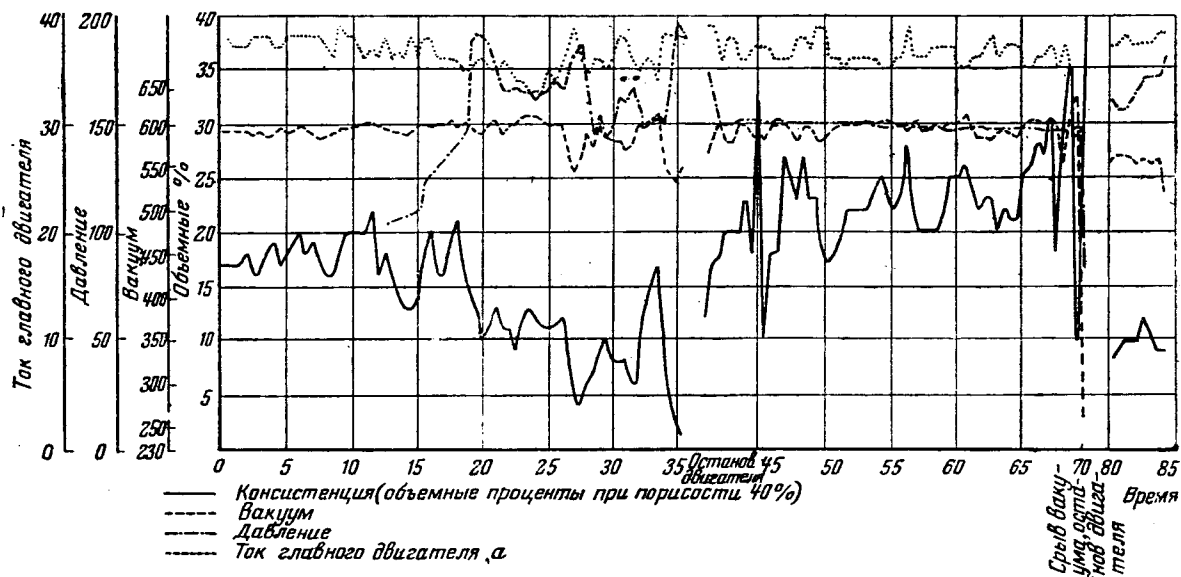


Рис. 28. Совмещенный график показаний гамма-грунтомера, манометра, вакуумметра и амперметра главного двигателя землесоса.

дополнительно эксплуатировалось 17 приборов радиотехнического завода, а в 1957 г. всего около 30. На земснарядах строительства Сталинградского, Каховского, Куйбышевского и других гидроузлов и гидростанций в 1955—1956 гг. эксплуатировалось 25—30 приборов.

Опыт применения гамма-лучевых грунтомеров показал ряд положительных эксплуатационных характеристик.

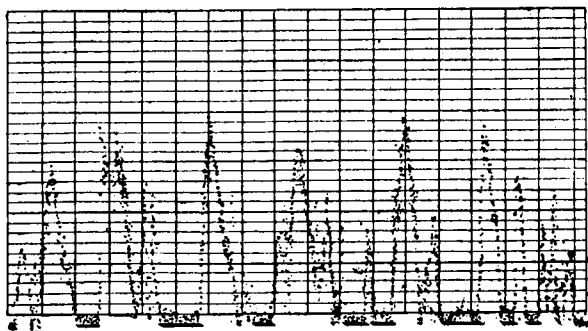
Прибор позволяет багермейстеру наблюдать концентрацию гидросмеси в любое время. Пользуясь прибором, багермейстер отмечает, при каких его показаниях начинает происходить срыв вакуума или заилиение грунтопровода, а при каких показаниях работа землесоса устойчива. В первые же дни работы с прибором багермейстеры устанавливают оптимальные значения концентрации, которые целесообразно поддерживать в данных производственных условиях, и стараются поддерживать эту концентрацию по показаниям прибора.

Эксплуатация приборов подтвердила основные преимущества гамма-грунтомеров: отсутствие контакта с контролируемой средой, простоту настройки и градуировки, независимость показаний от погоды, возможность работы зимой и летом, а также возможность быстрой установки чувствительного узла прибора на требуемом участке грунтопровода и передачи сигналов на необходимое расстояние.

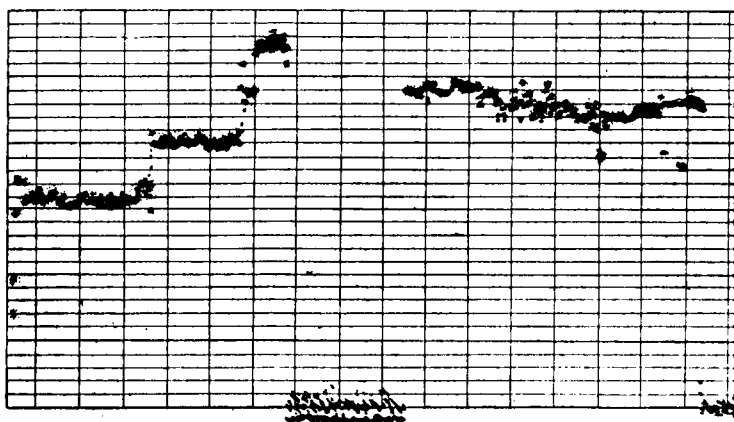
Ряд гамма-грунтомеров был укомплектован самопишущими гальванометрами СГ, которые подключались на выход прибора и записывали показания прибора на ленте. Запись на ленте наглядно показывает работу земснарядов — изменение процентного содержания грунта в смеси в течение суток, время работы и простоев. Примеры записи показаны на рис. 29. Скорость ленты 2 см/ч. Из записи на рис. 29,а видно, что концентрация колебалась в значительных пределах — от 0 до 20%. За 8 ч работы, записанных на приведенном отрезке ленты, концентрация несколько раз снижалась до нуля, что было вызвано остановкой насоса для его промывки. Запись на рис. 29,б характеризует более ровную работу землесоса. В среднем поддерживалась высокая концентрация 15—20—24%. Был лишь один (свыше часа) простой, вызванный неподготовленностью карты намыва.

Следует отметить неудовлетворительное качество записи по точкам при помощи самопишущего гальванометра типа СГ с падающей дужкой. Более подходящими являются электронные самопишущие потенциометры.

Эксплуатация новых приборов выявила также отдельные конструктивные недостатки приборов и организационные недостатки их эксплуатации. Так, стабилизация напряжения заводского прибора оказалась недостаточной при



а)



б)

Рис. 29. Записи показаний гамма-грунтомера на самописце.

больших колебаниях напряжения, имеющих на большинстве земснарядов; ненадежный пружинный контакт в выносном блоке вызывал колебания стрелки прибора при вибрациях; в ряде приборов оказался недостаточно стабильным нуль.

Для повышения стабилизации напряжения было рекомендовано включать приборы через дополнительные ферро-

резонансные стабилизаторы (например, типа СНЭ-120-0,1), введение которых обеспечивает достаточную стабилизацию практически при любых колебаниях напряжения в сети. Уход нуля возникал главным образом из-за частых ненужных выключений и включений прибора и наблюдался также в неисправных приборах.

После введения непрерывной работы приборов и улучшения герметизации ионизационных камер случаи значительного ухода нуля сократились.

В 1955 г. заводом Министерства радиотехнической промышленности была выпущена новая серия приборов (около 40 шт.), в которых были устранены перечисленные конструктивные недостатки. Регулятор нуля был вынесен на переднюю крышку, что упростило его корректировку.

После устранения указанных выше недостатков работа приборов зависела в значительной мере от условий их эксплуатации. Там, где эксплуатация была хорошо организована, приборы работали в основном нормально.

В силу своеобразия и новизны приборов для данной отрасли промышленности объем их использования в значительной мере зависел от организации их обслуживания, наличия запасных ламп и деталей, контрольных приборов, дополнительных стабилизаторов напряжения. Недостаточное внимание к этим факторам отрицательно сказалось на работе приборов в некоторых строительных управлениях. Важность организационной стороны вопроса подтверждается тем, что приборы работали удовлетворительно на одних группах земснарядов и не работали на других. Например, в 1955 г. приборы работали вполне удовлетворительно на земснарядах строительства Сталинградской ГЭС. На строительстве Каховской ГЭС приборы сначала были настроены неправильно, но с сентября 1955 г. была налажена их нормальная работа. В 1956 г. была организована безотказная работа приборов на семи земснарядах строительства Кременчугского гидроузла. На строительстве Горьковской ГЭС, где в 1955 г. приборы в большинстве своем не работали, в 1956 г. была организована безотказная работа шести приборов.

Отрицательно сказалось на использовании приборов также то, что при их конструктивной разработке не были в достаточной мере учтены тяжелые условия работы на земснарядах. Очевидно, что наряду с улучшением организации использования приборов необходимо их усовершен-

ствование для повышения безотказности в работе и устойчивости показаний.

Более успешно эксплуатировались гамма-грунтомеры, установленные на большинстве электрифицированных земснарядов, используемых в речном флоте.

Существенно сказалась на дальнейшем повышении интереса к прибору на этих земснарядах произведенная оценка экономического эффекта, достигнутого благодаря их внедрению. Гамма-грунтомер, как любой измерительный прибор, не повышает производительности земснарядов. Он способствовал бы повышению производительности, будучи применен как датчик (чувствительный элемент) системы автоматического регулирования работы земснаряда. При ручном регулировании гамма-грунтомер помогает багермейстеру поддерживать более ровную и в среднем более высокую концентрацию смеси, что способствует повышению производительности земснаряда.

В связи с этим рост производительности в значительной мере зависит от того, насколько эффективно багермейстер руководствуется показаниями прибора при регулировании работы земснаряда. Поэтому для оценки увеличения производительности необходимо оперировать средними цифрами, полученными за длительное время на ряде земснарядов. С этой целью на основании записей в вахтенных журналах земснарядов были уточнены периоды работы при наличии гамма-грунтомеров и периоды, когда их не было или ими не пользовались. Сравнение выработки¹ одного и того же земснаряда за различные периоды одной и той же навигации с применением грунтомера и без него показало экономическую эффективность новых приборов. По данным Главводпути Министерства речного флота РСФСР для четырех земснарядов, работавших на Северной Двине в навигацию 1955 г., получено повышение производительности на 5—14% в периоды применения гамма-грунтомеров.

Хотя условия работы земснарядов при намыве плотин на строительстве электростанций значительно отличаются от работы дноуглубительных земснарядов (и в этом случае трудно ожидать такого же эффекта), однако и здесь отмечается повышение производительности при наличии прибора.

¹ Обмер выработки земснарядов в кубометрах вынутого грунта производится регулярно.

Существенным организационным вопросом является централизованная замена радиоактивных препаратов в промышленных приборах. При применении кобальта 60 препарат должен сменяться или дополняться раз в 3—4 года. Например, к навигации 1957 г. активность источников, установленных еще в 1954 г., упала на 70%. Снижение активности излучателей отрицательно сказывается на точности приборов и в ряде случаев заставляет снимать их с эксплуатации. Это главная причина уменьшения числа работающих приборов в последний год¹.

Опыт эксплуатации гамма-лучевых приборов на земснарядах подтвердил правильность принципа, положенного в основу приборов, их полезность и целесообразность расширения их внедрения. С другой стороны, опыт эксплуатации выявил недостатки приборов, необходимость повышения устойчивости их показаний и безотказности в работе в различных тяжелых производственных условиях.

¹ Сокращение использования гамма-грунтомеров на земснарядах строительства электростанций в 1958 г. обусловлено, помимо уменьшения активности источников и амортизации приборов, отсутствием центральной организации, в функции которой входило бы внедрение приборов, их усовершенствование, смена излучателей и т. п. В системе речного флота этим занимается КБ Министерства речного флота РСФСР. Здесь проводится большая исследовательская работа и работа по усовершенствованию приборов. На земснарядах речного флота продолжают успешно эксплуатироваться более 30 гамма-грунтомеров, внедряются новые приборы, начинается вводиться автоматизация земснарядов с гамма-плотномером в качестве датчика.

Гамма-грунтомеры, которые начали эксплуатироваться на земснарядах в 1953—55 гг. являются первыми гамма-лучевыми плотномерами, получившими промышленное использование. Опыт их эксплуатации позволяет конструировать новые более совершенные гамма-лучевые приборы, которые станут необходимым измерительным прибором каждого землесосного снаряда.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ ГАММА-ЛУЧЕВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ (КОНЦЕНТРАЦИИ)

1. АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫЕ И НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ НОВЫЕ ПРИБОРЫ

В плотномерах, описанных в предыдущих главах, применена электрическая компенсация сигнала, возникающего при определенной начальной плотности объекта. Ввиду того, что на земснаряде легко получить эталонное излучение (пропуская воду по грунтопроводу), по которому можно проверить и откорректировать начало отсчета (условный нуль) прибора, применение приборов с электрической компенсацией благодаря их простоте является в некоторых случаях целесообразным. Все же необходимость периодической поверки начала отсчета прибора является недостатком. Более совершенными являются уже упомянутые автокомпенсационные приборы, в которых непрерывно сравниваются два потока излучения, один из которых проходит через контролируемый объект, а другой — через эталонный поглотитель, причем вызванные обоими потоками излучения электрические сигналы автоматически уравниваются.

Применение таких нулевых автокомпенсационных схем позволяет существенно снизить погрешности, вызванные изменением внешних условий и питающего напряжения, и повысить стабильность показаний прибора.

Примером автокомпенсационного гамма-лучевого прибора может служить толщиномер, разработанный в Физическом институте Академии наук и в Центральной лаборатории автоматики [Л. 23], или плотномеры жидкости ПЖР [Л. 24, 25], разработанные в НИИТеплоприборе.

Применению компенсационных приборов на земснарядах в значительной мере препятствовала их сравнительная сложность, что затрудняет конструктивную разработку

виброустойчивого и безотказного в работе прибора. Ниже описан автокомпенсационный плотномер¹, разработанный в ЦНИЛ Госгортехнадзора, который удалось выполнить по сравнительно простой схеме [Л. 26].

Устройство прибора схематически показано на рис. 30. Дифференциальная ионизационная камера прибора состоит из основной 4 и малой дополнительной камеры 5. На

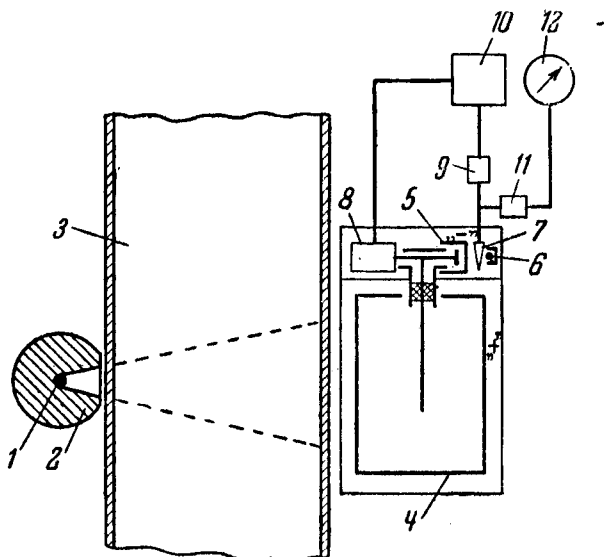


Рис. 30. Схема плотнoмера с компенсационной ионизационной камерой.

1 — основной источник; 2 — контейнер; 3 — контролируемый объект; 4 — основная камера; 5 — дополнительная камера; 6 — дополнительный источник; 7 — клин; 8 — электрометрический каскад; 9 — сервомотор; 10 — усилитель; 11 — потенциометрический датчик; 12 — вторичный прибор.

высоковольтный электрод малой камеры подается напряжение, знак которого противоположен знаку напряжения, подаваемого на основную камеру. Собирающий электрод общий для обеих камер. В малой камере создается ионизационный ток от дополнительного источника 6, излучение которого проходит через поглощающий клин, имеющий форму диска с клинообразным сечением. Клин может вра-

¹ Описываемые компенсационные плотномeры разработаны автором брошюры совместно с С. Н. Дедюковым.

щаться с помощью сервомотора 9 таким образом, что при его вращении изменяется толщина поглощающего слоя на пути дополнительного пучка излучения. При определенном положении клина ионизационный ток в малой камере равен ионизационному току, возникающему в большой камере под действием излучения, прошедшего через контролируемый объект. При этом заряд на собирающем электроде и сигнал на входе усилителя равны нулю. Ток на выходе усилителя также близок к нулю и сервомотор неподвижен. Когда плотность контролируемого вещества изменяется, равенство ионизационных токов нарушается, на выходе усилителя возникает сигнал, заставляющий сервомотор перемещать клин до тех пор, пока ионизационные токи в обеих камерах снова сравниваются, и сигнал на выходе усилителя станет близким нулю (недостаточным для срабатывания сервомотора). Таким образом каждому значению плотности соответствует определенное положение клина, а сигнал на входе и выходе усилителя 10 все время колеблется около нуля. С перемещением клина связано движение ползунка потенциометрического датчика 11, дающего сигнал на показывающий (вторичный) прибор 12, проградуированный в единицах плотности или концентрации смеси.

В описанном нулевом автокомпенсационном приборе изменение активности источника, коэффициента усиления, колебания напряжения питания и т. п. факторы практически не влияют на положение клина и показания прибора.

В разработанном образце прибора в качестве входной лампы применен двойной электрометрический тетрод 2Э2П; для усиления сигнала после электрометрической лампы использован серийный усилитель УЭ-109 от автоматического потенциометра типа ЭПД-12. Для привода клина использован сервомотор потенциометра.

В качестве дополнительного источника б применен бета-излучатель, имеющий период полураспада, близкий к периоду полураспада основного излучателя 1. Например, при использовании в качестве основного излучателя цезия 137 (период полураспада 33 года) в качестве компенсирующего бета-излучателя применен стронций 90 с периодом полураспада 22 года.

Использование бета-излучателя позволяет во много раз облегчить компенсационный клин, уменьшить размеры дополнительной камеры и обойтись без тяжелого свинцового поглотителя, экранирующего основную камеру от излуче-

ния дополнительного источника и защищающего людей. Равенство ионизационных токов обеих камер достигается при этом, несмотря на то, что малая камера имеет объем, в сотни раз меньше объема основной камеры, благодаря малому расстоянию между дополнительной камерой и бета-излучателем и высокому ионизационному действию бета-частиц.

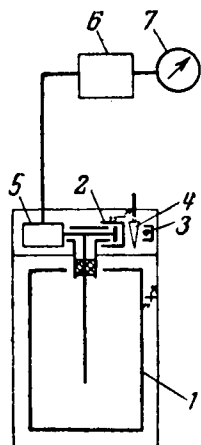


Рис. 31. Схема компенсационного плотномера без подвижных частей.

1 — основная камера;
2 — дополнительная камера; 3 — дополнительный источник; 4 — регулировочный клин; 5 — электрометрический каскад; 6 — второй каскад усилителя; 7 — показывающий прибор.

Обычно в приборах с дифференциальными камерами обе камеры выполняют строго одинаковыми, чтобы изменения ионизационного тока, возникающие в результате изменения внешних условий, были одинаковыми и компенсировали один другого. В описанном приборе с целью упрощения конструкции камеры компенсирующая камера сделана во много раз меньше основной. Однако и в этом случае изменение внешних условий сказывается незначительно, так как ионизационный ток в обеих камерах одинаков и обе камеры работают в режиме насыщения.

Для применения описанного автокомпенсационного прибора на земснарядах необходима дальнейшая тщательная конструктивная разработка ионизационной камеры, чтобы обеспечить ее вибростойкость и надежность. Наличие подвижных частей (сервопривода, клина) существенно усложняет эту задачу. В связи с этим в ряде случаев на земснарядах и аналогичных объектах более целесообразно применять плотномеры с дифференциальной ионизационной камерой упрощенного типа — без подвижных частей. В разработанной ЦНИЛ Госгортехнадзора камере этого типа применена постоянная компенсация ионизационного тока, соответствующего началу отсчета прибора.

Схематическое устройство прибора показано на рис. 31. В отличие от дифференциальной камеры с автокомпенсацией регулировочный клин служит лишь для настройки прибора и перемещается вручную (с помощью винта) для точной регулировки интенсивности компенсирующего излучения от дополнительного источника 3.

Настройку нуля прибора производят, когда контролируемый объект имеет известную начальную плотность (например, при прохождении воды без грунта по грунтопроводу земснаряду). Клины перемещают при этом до тех пор, пока на собирающем электроде установится нулевой потенциал.

Описанная дифференциальная камера была испытана с балансным усилителем применяющегося в настоящее время гамма-грунтомера (рис. 7), дополненного выпрямителем со стабилизовольтом для подачи отрицательного напряжения на дополнительную камеру. Испытания показали высокую стабильность показаний и простоту проверки условного нуля.

Преимущество описанной камеры состоит в том, что нулевой ток на выходе прибора соответствует нулевому потенциалу на его входном сопротивлении. Это позволяет проверять нуль прибора, замыкая входное сопротивление с помощью реле. Таким образом, для проверки нуля не требуется пропускать воду по грунтопроводу земснаряда. При применении описанной камеры, так же как при применении автокомпенсационного прибора, значительно уменьшается влияние изменений температуры и давления воздуха на постоянство условного нуля прибора. Изменение входного сопротивления из-за изменения температуры вовсе не вызывает ухода нуля. Это весьма существенно, потому что изменение входного сопротивления является главной причиной ухода нуля в приборах с электрической компенсацией.

Суммарный ионизационный ток и ток на выходе прибора равен нулю при определенной начальной плотности контролируемого объекта. Поэтому вся шкала прибора используется в контролируемом диапазоне плотности.

Описанный компенсационный прибор лишь немногим сложнее гамма-грунтомеров, применяемых в настоящее время на земснарядах, и значительно проще известных автокомпенсационных приборов.

В последнее время для дальнейшего повышения точности и стабильности плотномеров в ряде институтов ведутся работы по созданию компенсационных приборов с одним детектором излучения. В НИИтеплоприборе разработан плотномер ПЖР-2 [Л. 25], в котором осуществлен компенсационный принцип измерения с помощью одного источника и одного детектора излучения. Это позволяет максимально снизить аппаратную погрешность. Радиоактив-

ный излучатель этого прибора укреплен на вращающемся диске и попеременно посылает излучение на один и тот же детектор: то через контролируемую среду, то через компенсационный клин. Выход детектора переключается синхронно с перемещением излучателя таким образом, что в приборе усиливается сигнал, пропорциональный разности интенсивностей обоих потоков излучения. Усиленный сигнал управляет перемещением компенсационного клина.

Недостатком прибора является большой радиус перемещения излучателя, что затрудняет создание защитного устройства. Этот недостаток устранен в приборе с вибрирующими излучателями [Л. 27], в котором применены два источника, приводящихся в колебательное движение таким образом, что они попеременно облучают детектор. Один из источников облучает детектор через контролируемый объект, другой — через компенсационный клин. В качестве детектора излучения применен сцинтилляционный счетчик. Нестабильность фотоэлектронного умножителя и усилителя импульсов в этих приборах исключается благодаря тому, что в обоих каналах измерения используются один и тот же сцинтиллятор, умножитель и усилитель.

Для возможности применения на земснарядах приборов, основанных на описанных принципах, необходима дальнейшая разработка их схем и конструкций. Одновременно с разработкой автокомпенсационных и других усовершенствованных плотномеров с ионизационными камерами и сцинтилляционными счетчиками целесообразна дальнейшая разработка более простых приборов с газоразрядными счетчиками. Они могут найти широкое применение на малых земснарядах, где допустимы значительные запаздывания в показаниях.

В частности, целесообразна разработка простых приборов, в которых необходимая точность достигается без сложных формирующих каскадов за счет большой постоянной времени (см. гл. 2, п. 5). Схема одного из таких плотномеров с питанием от батарей показана на рис. 32. Прибор содержит всего одну лампу. Комплект батарей достаточен для питания прибора в течение полугода.

Дальнейшее повышение надежности приборов в работе и упрощение ухода за ними могут быть достигнуты при использовании новых элементов и узлов схем. Такими приборами являются разрабатываемые плотномеры с магнитными усилителями вместо электронных ламп, в частности вместо лампового вольтметра плотномера с газоразряд-

ными счетчиками. Разрабатываются также радиоактивные плотномеры с использованием полупроводниковых триодов.

Для повышения устойчивости показаний плотномеров, выполненных по схеме прямого усиления, нами был использован следующий упрощенный вариант так называемого метода контрольного сигнала, сущность которого заключается в том, что на детектор излучения периодически посылаются определенное одно и то же контрольное излучение, по которому корректируются показания прибора. Для этой цели один из описанных выше плотномеров был

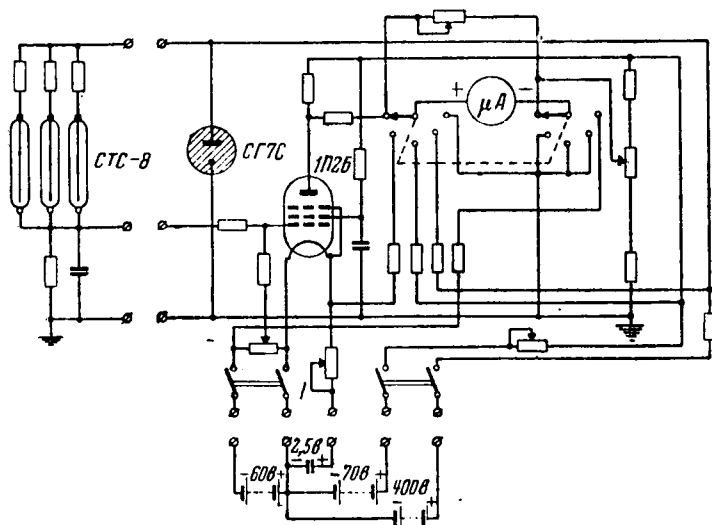


Рис. 32. Электрическая схема упрощенного плотмера с газоразрядными счетчиками.

дополнен устройством, показанным схематически на рис. 33. В качестве контрольного источника в блок счетчиков 1 был введен бета-излучатель 2 стронций 90. Шторка 3, закрывающая контрольный источник, убирается при помощи электромагнита 4 при нажатии кнопки на блоке настройки 5. Одновременно основной источник 6 смещается в контейнере 7 посредством соленоида 8, так что его излучение перекрывается толстым слоем свинца.

При нажатии кнопки детектор облучается только контрольным источником, т. е. одним и тем же определенным излучением. При нажатии второй кнопки убирается еще

одна шторка 9, причем контрольный сигнал увеличивается на определенную величину.

Интенсивность контрольного излучения регулируется при помощи клинообразного диска (не показан на рисунке), так что стрелка прибора устанавливается на начало шкалы при смещении первой шторки.

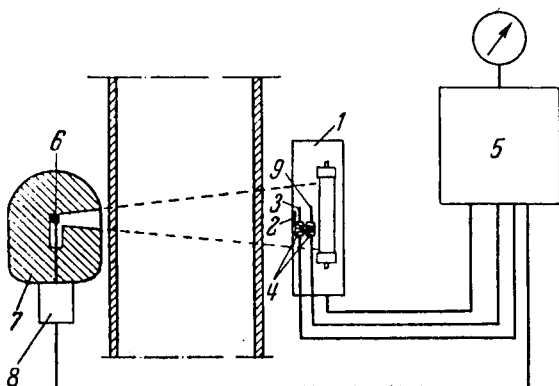


Рис. 33. Схема плотномера с контрольным источником.

1 — детектор излучения; 2 — контрольный источник; 3 — шторка; 4 — электромагнит; 5 — блок настройки; 6 — основной источник; 7 — контейнер; 8 — соленоид; 9 — вторая шторка.

Описанное устройство позволяет получить два контрольных сигнала, по первому из которых регулируется начало отсчета прибора, а по второму — его усиление.

2. ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ В СМЕСЯХ. КОНТРОЛЬ КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

Как уже отмечалось, приборы, основанные на использовании радиоактивных излучений, могут найти широкое применение для измерения и регулирования концентрации веществ, т. е. содержания отдельных компонентов в веществе. Описанные гамма-грунтомеры градуируются большей частью в процентах содержания грунта в гидросмеси и применяются для контроля содержания грунта в водогрунтовой смеси. С помощью гамма-лучей измеряются содержание минеральных примесей в продуктах обогащения угля [Л. 27], содержание серы в жидких и твердых нефтепродуктах [Л. 28] и др.

Возможность использования метода поглощения гамма-лучей для контроля содержания компонентов в смесях

кратко рассмотрена в гл. 1. В частности, показано, что контроль содержания компонентов в бинарных смесях возможен и в том случае, когда изменение состава не вызывает изменения средней плотности вещества. Решающее значение при этом имеет выбор энергии излучения. При малых энергиях излучения в механизме ослабления излучения существенную роль начинает играть фотоэлектрическое поглощение гамма-квантов. Коэффициент поглощения за счет фотоэффекта резко изменяется в зависимости от атомного номера поглотителя. Поэтому поглощение излучения при малых энергиях зависит от химического состава вещества (рис. 2).

Широко распространенным и актуальным случаем контроля содержания компонентов является измерение влажности вещества, т. е. содержания в нем воды. Измерение влажности по поглощению гамма-лучей возможно, если влажность материала изменяется в значительных пределах, а изменение содержания других компонентов практически неощутимо. Тогда усредненный коэффициент ослабления излучения зависит главным образом от содержания воды в веществе. Формулу (13) для рассматриваемого случая можно преобразовать к виду

$$\mu = \mu_1 \rho_1 (1 - P) + \mu_g P,$$

где μ_g — массовый коэффициент ослабления излучения в воде;

P — ее весовая концентрация, т. е. влажность вещества;

μ_1 — массовый коэффициент ослабления сухого вещества.

Отсюда

$$\frac{I}{I_{сух}} = e^{-x(\mu_1 - \mu_g)P}.$$

Ввиду того, что массовый коэффициент μ ослабления излучения в воде существенно отличается от μ других веществ, не содержащих водород или с иным содержанием водорода, по поглощению гамма-лучей возможен контроль влажности не только тяжелых материалов, как песок, уголь, плотность которых существенно отличается от плотности воды, но и таких, плотность которых при изменении влажности почти не изменяется, например древесины, торфа, зерна, пищевых продуктов и т. п.

При измерении влажности материалов наиболее целесообразен в большинстве случаев компенсационный метод,

при котором интенсивность гамма-лучей, проходящих через контролируемый объект, сравнивается с излучением, проходящим через такой же объект с известной влажностью, например высушенный до постоянного веса.

Аналогичными методами можно контролировать пористость материалов, степень аэрации воды, концентрацию растворов и т. п.

Возможность измерения концентрации одного из компонентов в смеси позволяет создавать приборы для измерения количества этого компонента, прошедшего за определенное время вместе со смесью через контрольное сечение.

В настоящее время гамма-лучи начинают применяться для измерения количества сыпучих веществ, проходящих по конвейеру или по трубам через данное сечение за определенное время. Это измерение основано на интегрировании показаний прибора, измеряющего интенсивность излучения, проходящего через контролируемый материал.

Вес вещества, прошедшего за время t через данное сечение (при равномерном распределении плотности и скорости по сечению), равен

$$P = \int_0^t \rho(t) x(t) y(t) c(t) dt, \quad (34)$$

где $\rho(t)$ — плотность,

$x(t)$ — толщина,

$y(t)$ — ширина,

$c(t)$ — скорость контролируемого вещества — величины переменные, зависящие только от времени.

Обычно нетрудно поддерживать постоянными ширину слоя и скорость его перемещения c . В этом случае y и c можно вынести за знак интеграла и вес вещества определится по формуле

$$P = yc \int_0^t \rho(t) x(t) dt. \quad (35)$$

Гамма-лучевой плотномер позволяет получить электрическую величину, зависящую от произведения плотности ρ на толщину x (или ширину) слоя, так как он измеряет величину

$$I - I_1 = I_1 (e^{-\mu_0 \rho x} - 1) = f(\rho x),$$

где I_1 — интенсивность излучения, проходящего через конвейер, трубу и т. п. при $x = 0$.

Возможно получение электрической величины, линейно зависящей от ρx , например в компенсационном плотноте с перемещающимся клином. Интегрируя эту величину одним из известных, предназначенных для этого приборов, получим величину, пропорциональную $\int_0^t \rho(t) x(t) dt$, т. е.

пропорциональную весу вещества, прошедшего через контролируемое сечение за время t .

Описанным способом можно определять количество (вес) угля, цемента, песка, муки, зерна и других материалов, проходящих по конвейеру, по трубам и т. п. Один из вариантов этого способа (применяемый на сахарных плантациях Гавайских островов [Л. 29]) заключается в том, что контролируемый материал свободно падает с питателя, и пучок гамма-лучей пропускается через падающий поток. Этим исключается влияние непостоянства скорости конвейера.

Аналогично, интегрируя сигнал, пропорциональный процентному содержанию переменного компонента смеси, и в частности компонента, содержащегося в жидкости, текущей по трубе, можно измерять количество этого компонента, проходящего в смеси через контрольное сечение за определенное время. Для этой цели может быть применен один из описанных выше приборов с компенсацией сигнала, возникающего при нулевом содержании контролируемого компонента и линейной зависимостью величины сигнала от его содержания в смеси.

В общем случае движения взвеси или раствора по трубопроводу концентрация Q (отношение объема искомого компонента к общему объему смеси) является функцией не только времени, но и координат точки сечения потока

$$Q = Q(x, y, t).$$

Скорость взвешенных частиц является функцией тех же переменных

$$c = c(x, y, t).$$

Объем V компонента, прошедшего в общем потоке через данное сечение, площадь которого равна S , за время t равен

$$V = S \int_0^t \int_S Q(x, y, t) c(x, y, t) dx dy dt. \quad (36)$$

При равномерном распределении концентрации контролируемого компонента по сечению (например, в растворе или взвеси, движущейся по вертикальной трубе)

$$V \approx S \int_0^t Q(t) \bar{c}(t) dt, \quad (37)$$

где $\bar{c}(t)$ — некоторая усредненная по сечению скорость движения потока, которую можно определить в каждом конкретном случае опытным путем¹.

Измеряя концентрацию $Q = Q(t)$ гамма-лучевым плотномером (с линейной зависимостью силы тока на выходе от Q) и усредненную по сечению скорость потока одним из известных расходомеров, можно с помощью интегратора произведения этих двух переменных получить величину, пропорциональную количеству контролируемого компонента.

Таким способом можно, например, определять количество растворенного или взвешенного вещества, транспортируемого с жидкостью по трубе за определенное время. Возможно измерение количества вещества также и при неравномерном распределении концентрации по сечению, если неравномерность имеет место только вдоль луча гамма-лучевого прибора и поперечное сечение сосуда имеет прямоугольную форму, например при движении жидкой взвеси в горизонтальном лотке (или трубе) прямоугольного сечения и вертикальном направлении луча.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫРАБОТКИ ЗЕМСНАРЯДА

Для учета работы земснарядов необходимо знать не только концентрацию смеси, но и количество грунта, проходящего в смеси через данное сечение за определенное время, т. е. выработку земснаряда в кубометрах грунта.

При движении водогрунтовой смеси по грунтоводу земснаряда имеет место неравномерное распределение как концентрации, так и скорости частиц грунта по сечению, т. е. применима лишь общая формула (36). Трудность измерения усугубляется тем, что скорость частиц грунта не равна скорости воды и отставание частиц зависит от их круп-

¹ Для определения $\bar{c}(t)$ градуируют прибор, сравнивая его показания с измеренным другим путем объемом контролируемого компонента, прошедшим через данное сечение за определенный интервал времени.

ности, общего расхода смеси, концентрации, положения частиц в трубе и других факторов. Поэтому при существующей технике измерения плотности и расхода гидро-смеси, например с помощью гамма-плотномера и трубы Вентури с дифманометром, возможна лишь приближенная оценка выработки земснаряда.

Прибор для такого приближенного контроля выработки состоит из гамма-лучевого плотномера с линейной зависимостью сигнала от содержания грунта в смеси, расходомера, преобразующего в электрическую величину среднюю скорость перемещения грунта в смеси, и интегратора произведения этих двух величин. Плотномер должен быть установлен на участке с равномерным распределением грунта по сечению. Интегратор показывает выработку земснаряда в кубометрах грунта за любое заданное время по приближенной формуле (37).

Для такого указателя выработки целесообразно применять автокомпенсационную схему. Напряжение, поступающее на интегратор, снимается с потенциометрического датчика перемещения компенсационного клина прибора. Если питать датчик переменным током и снимать с указателя скорости также сигнал переменного тока, то в качестве интегратора можно применять индукционный счетчик переменного тока.

На токовую обмотку счетчика подается сигнал с плотномера U_k , а на обмотку напряжения — сигнал U_c с датчика скорости (расходомера). В счетчике перемножаются обе величины и вырабатывается интеграл их произведения, так как скорость вращения диска счетчика пропорциональна произведению этих двух величин, а перемещение диска, т. е. число оборотов за время t , показываемое счетчиком, пропорционально интегралу этого произведения, т. е. числу кубометров грунта, намывтого за время t .

Перемножение напряжений, пропорциональных концентрации и скорости, может быть произведено непосредственно на потенциометрическом датчике перемещения клина концентратомера (плотномера). Для этого на потенциометр подается напряжение с расходомера (измерителя скорости), с потенциометра снимается произведение этого напряжения на расстояние между движком и краем потенциометра. Последнее пропорционально концентрации гидро-смеси, так как движок потенциометра перемещается вместе с клином соответственно изменению концентрации смеси.

Указатель выработки (рис. 34) градуируется непосред-

ственно в производственных условиях в результате сравнения показаний интегратора с фактически намытым количеством грунта за длительный срок (сутки, неделю). Такой прибор, даже при невысокой точности измерения количества намытого грунта, дает возможность объективно сравнивать выработку земснаряда за смены и производить

оперативный контроль выработки.

Из-за отсутствия в настоящее время на земснарядах проверенных практикой расходомеров, сравнение выработки на одном и том же земснаряде и оперативный приближенный контроль выработки может производиться с помощью плотномеров и интегратора поступающего с него напряжения без расходомера, несмотря на то, что расход пульпы и скорость транспортирования грунта на земснарядах колеблется в значительных пределах; такой прибор, проградуированный на основании сравнения с фактической выработкой, может служить для приближенной оценки и сравнения выработки за смену. Это возможно в условиях, идентичных

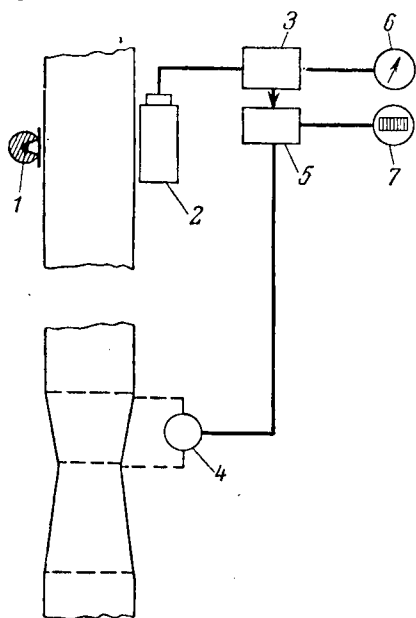


Рис. 34. Схема гамма-грунтомера с указателем выработки.

1 — излучатель; 2 — детектор излучения; 3 — усилительно-преобразовательный блок (блок настройки); 4 — расходомер (измеритель скорости смеси); 5 — смеситель; 6 — указатель концентрации; 7 — интегратор — счетчик выработки.

тем, в которых проградуирован интегратор.

При значительном изменении условий работы, резко изменяющих среднюю скорость транспортирования грунта, вносится необходимая поправка. При ряде работ, например при дноуглубительных работах с постоянной длиной рефулера, при намывных работах с мало меняющейся в процентном отношении длиной грунтопровода и высотой напора, средняя скорость транспортировки грунта, усредненная за длительное время, колеблется в небольших пределах

и зависит главным образом от изменения концентрации гидросмеси.

Ошибку интегратора можно уменьшить, сведя к минимуму ошибку, возникающую в результате того, что скорость гидросмеси зависит от концентрации. Как известно, средняя скорость движения смеси по грунтопроводу уменьшается с возрастанием концентрации смеси. Зависимость скорости смеси от ее концентрации, полученная экспери-

ментально, путем введения краски (на земснаряде типа 300-40 на строительстве Горьковской ГЭС летом 1953 г.) показана на рис. 35 (кривая 1). На этом же рисунке приведена зависимость напряжения на выходе гамма-грунтомера от концентрации гидросмеси (кривая 2), имеющая экспоненциальный характер. Вычитая из кривой 2 прямую 3, касательную к кривой 2 в начале координат, получим кривую 4, характеризующую нелинейность прибора. Кривая 4 имеет почти тот же наклон и кривизну, что кривая 1. Это сходство может быть улучшено выбором параметров усилителя. Таким путем ошибки интегратора, связанные с изменением скорости гидросмеси в зависимости от изменения плотности, могут быть существенно уменьшены.

В ЦНИЛ Госгортехнадзора был разработан и изготовлен указатель выработки земснаряда упрощенного типа, который представляет собой приставку к гамма-грунтомеру, состоящую из дополнительного усилителя постоянного тока на одной лампе 6Н5С и интегратора. В качестве последнего был применен счетчик ампер-часов постоянного тока.

Были также проведены опыты с усилителем переменного тока с вибропреобразователем на входе и индукционным счетчиком. В качестве усилителя был применен серийный, выпускаемый промышленностью, усилитель УЭ-109.

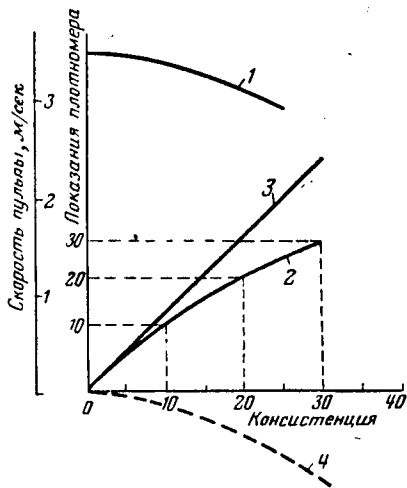


Рис. 35. Изменение нелинейности гамма-грунтомера и зависимости скорости движения смеси от ее концентрации.

В 1953 г. на строительстве Горьковской ГЭС были проведены производственные испытания этого гамма-грунтомера с указателем выработки упрощенного типа. Эти испытания подтвердили рациональность применения таких указателей на земснарядах при ряде работ. Ошибка прибора при намыве мелкого и среднего песка по сравнению с результатами обмера объема намывного грунта составляет в среднем около $\pm 7\%$. При намыве гравелистых и других тяжелых грунтов ошибка может возрасти в несколько раз. Поэтому для разработки прибора, позволяющего вести более точный учет количества намывного грунта, необходимо тщательно исследовать закономерности изменения и эпюры скорости грунтовых частиц и усовершенствовать прибор, особенно в части измерения скорости.

4. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ПОГЛОЩЕНИИ ГАММА-ЛУЧЕЙ

Одним из рациональных применений метода поглощения в гидромеханизации является контроль плотности намывных плотин и других земляных сооружений.

Могут применяться как переносные приборы для быстрого определения плотности в различных участках намывной плотины, так и приборы со стационарными датчиками для наблюдения за изменением плотности в глубине плотины в течение длительного времени.

Прибор для контроля плотности грунта состоит из усилительно-преобразовательного устройства и датчика, т. е. источника гамма-лучей и газоразрядного или сцинтилляционного счетчика. Излучатель и счетчик (детектор излучения) имеют малые габариты и жестко закреплены один относительно другого, так что расстояние между ними не может измениться. В качестве датчика, погружаемого в тело плотины, можно применить устройство (рис. 36), представляющее собой вариант известной «радиоактивной вилки» [Л. 30].

Флуктуационная ошибка измерения минимальна, если расстояние x между излучателем и детектором излучения равно $x_{opt} = \frac{2}{\mu_0 \rho}$. В случае использования кобальта 60, при измерении плотности песка $x_{opt} = 25$ см. Чтобы уменьшить влияние уплотнений грунта у излучателя и детектора излучения на точность измерения, расстояние x можно увели-

чить. По-видимому, оправдано увеличение расстояния не более чем в 2—2,5 раза по сравнению с $x_{онт}$, ибо флуктуационная ошибка увеличивается при этом незначительно, как видно из зависимости ошибки от μx (рис. 4). При дальнейшем увеличении x флуктуационная ошибка резко возрастает. Она может быть существенно уменьшена за счет увеличения длительности измерения.

Усилительно - преобразовательный блок иногда выполняется по схеме измерителя скорости счета с микроамперметром на выходе. Однако для уменьшения приборной ошибки при больших интервалах измерения более целесообразно применять пересчетное устройство с регистратором импульсов, выключающимся автоматически через заданный промежуток времени.

В качестве пересчетного устройства может быть применен прибор типа БК-3 на тиратронах МХТ-90 с холодным катодом, выпускаемый заводом «Физприбор» [Л. 22].

Секундомер и тумблер включения регистратора импульсов этого прибора снабжены электромагнитным устройством, обеспечивающим одновременное включение и выключение регистратора и секундомера. Возможно автоматическое выключение через заданный всегда один и тот же промежуток времени.

Среднее число импульсов, отмеченных регистратором за это время, зависит только от интенсивности потока излучения, попадающего на детектор излучения (газоразряд-

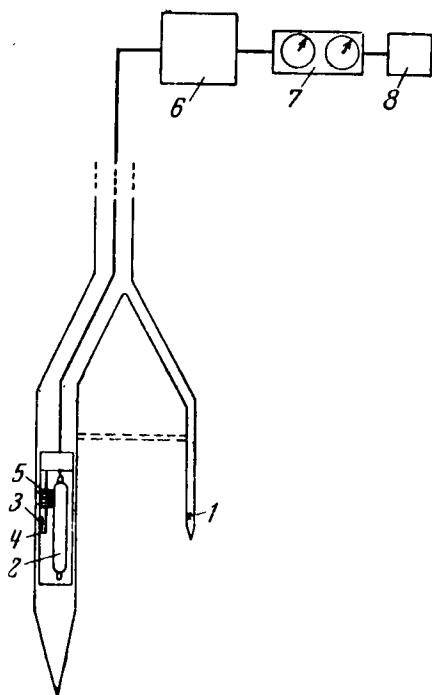


Рис. 36. Схема плотномера для земляных плотин.

1 — излучатель; 2 — детектор излучения; 3 — дополнительный бета-излучатель; 4 — шторка; 5 — электромагнитное устройство; 6 — пересчетное устройство с источником питания; 7 — регистратор импульсов; 8 — реле времени или секундомер с автоматическим выключателем регистратора.

ный или сцинтилляционный счетчик). Поскольку интенсивность потока излучения зависит только от плотности контролируемой среды, а время измерения всегда одно и то же, то число импульсов, отмеченных механическим регистратором, является непосредственной мерой плотности. Поэтому регистратор может градуироваться непосредственно в единицах плотности. Преимущество этого прибора перед измерителями скорости счета состоит в возможности многократного увеличения времени измерения, что позволяет уменьшить флуктуационную ошибку.

В полевых условиях более целесообразно применение автоматизированного батарейного пересчетного прибора ПК-106 [Л. 22]. Процесс измерения в нем автоматизирован путем синхронного запуска секундомера и счетной схемы, которая после регистрации заданного числа импульсов останавливает секундомер. Таким образом, по времени набора заданного числа импульсов определяется плотность: каждой плотности объекта при одних и тех же условиях измерения отвечает определенное положение стрелки секундомера.

Активность излучателя выбирается таким образом, чтобы частота импульсов на газоразрядном счетчике не превышала 100—200 *импульс/сек*, чтобы оставаться в линейной области зависимости скорости счета от числа падающих на счетчик гамма-квантов.

Газоразрядные счетчики изменяют свои счетные характеристики под влиянием колебаний питающего напряжения, температуры среды и других факторов, поэтому при точных измерениях плотности перед началом измерения необходимо откалибровать счетчик по эталонному излучению.

Недостатком большинства известных устройств для контроля плотности грунта является отсутствие специальных приспособлений для поверки и калибровки счетчика.

В плотномере грунта, разработанном в ЦНИЛ, для этой цели применен дополнительный бета-излучатель малой активности. Детектором излучения служит бета-счетчик СТС-5 или СТС-6. Дополнительный (контрольный) бета-излучатель помещается вблизи газоразрядного счетчика, и его бета-излучение закрывается от счетчика шторкой, которая может быть убрана при помощи электромагнитного устройства. Для контрольного бета-излучателя должен быть применен изотоп с периодом полураспада, близким к периоду полураспада основного источника; иногда целесооб-

разно применять тот же изотоп, что и для основного источника. Например, при применении в качестве основного и контрольного источника кобальта 60, контрольный источник закрывается тонкой шторкой, задерживающей бета-частицы. Его активность берется очень малой, чтобы не слишком увеличился фон гамма-лучей. Эффективность регистрации счетчиком бета-частиц во много раз больше эффективности регистрации гамма-квантов, поэтому фон от гамма-лучей дополнительного источника не имеет практического значения.

Увеличение количества импульсов, регистрируемых прибором при удалении шторки (осуществляемом дистанционно), должно быть всегда одинаково с отклонениями, обусловленными статистическим характером радиоактивного распада. Изменение среднего увеличения числа импульсов при удалении шторки свидетельствует о том, что необходимо ввести соответствующую поправку в показания прибора. При этом способе можно полностью исключить ошибки из-за изменения счетных характеристик, параметров прибора и постепенного уменьшения активности источника.

Аналогичные приборы могут применяться для контроля плотности почвы, количества выпавших осадков, в том числе контроля количества влаги, запасенной в снежном покрове, контроля слоя ила и наносов в реках и других водоемах и других аналогичных случаях. Приборы этого назначения несколько другого типа описаны в ряде работ [Л. 29 и 30].

Значительный интерес представляет контроль изменения плотности грунта в различных точках намывной плотины. Для этого в тело плотины при ее намыве закладываются или впоследствии забиваются датчики, состоящие из излучателя (предпочтителен цезий 137) и детектора излучения, жестко скрепленных между собой. Такие датчики закладывают в различных местах, изменение плотности в которых представляет интерес. От каждого датчика на поверхность выходит кабель, который подходит к общему для группы датчиков коммутационному пульту. Подключая описанный выше пересчетный блок к тому или иному датчику, можно определить плотность в той или иной точке плотины. Для исключения ошибок, обусловленных постепенным ослаблением источника и изменением характеристик счетчика, должна применяться калибровка прибора перед каждым измерением, с помощью дополнительного бета-излучателя, как описано выше.

Возможность установки чувствительного узла гамма-грунтомера на любом участке грунтопровода позволяет контролировать возникновение и степень заилиения, т. е. возникновение медленно движущегося по дну грунтопровода или неподвижного слоя грунта. Для этого в наиболее подверженных заилиению участках грунтопровода устанавливаются дополнительные чувствительные узлы (излучатель и детектор излучения). Блок настройки должен быть снабжен дополнительным переключателем, позволяющим переключать его на тот или иной чувствительный узел. Сравнивая показания, поступающие от различных датчиков, багермейстер может установить, имеется ли заилиение в контролируемых участках и не достигло ли оно угрожающих размеров. В сомнительных случаях сравнивают показания от разных датчиков при длительном пропускании по грунтопроводу воды. Этот контроль позволит вести работу при больших насыщениях, чем обычно, так как багермейстер всегда может проверить, есть ли опасность образования заилиения и грунтовой пробки.

В качестве дополнительных детекторов излучения можно применить как ионизационные камеры, так и газоразрядные счетчики. Рациональнее для этой цели применять счетчики, так как в рассматриваемом случае допустимо большое запаздывание в показаниях (до нескольких минут). Дополнительный детектор излучения может иметь большую постоянную времени и быть снабжен излучателем с небольшой активностью. Дополнительные детекторы (счетчики) могут включаться лишь на время измерения.

Возможно применение двух постоянно включенных плотномеров так, что багермейстер, сравнивая показания двух приборов, может наблюдать за наличием и возрастанием заилиения.

Метод с использованием поглощения гамма-излучения позволяет выполнить ряд исследований по гидравлике водогрунтовой смеси, которые другими способами выполнить невозможно или слишком сложно. Например, этот метод позволяет исследовать распределение плотности гидросмеси по сечению грунтопровода непосредственно на любом земснаряде и изменение распределения в зависимости от режима работы землесоса, крупности и типа грунта и т. п.

Распределение концентрации гидросмеси по сечению и изменение концентрации на разных горизонтальных слоях легче всего изучить при прямоугольном сечении трубы или лотка. При стационарном процессе излучатель с коллиматором и детектор излучения устанавливаются поочередно на разных горизонтальных слоях. Для изучения изменения процесса необходимо применить несколько коллимированных излучателей и детекторов излучения. В качестве детекторов в этом случае лучше применить сцинтилляционные счетчики, так как они при

малых размерах детектора (в данном случае люминесцентного кристалла) позволяют использовать прибор с малой постоянной времени.

Трудность исследования распределения плотности гидросмеси по сечению круглой трубы заключается в том, что хорды, определяющие толщину слоя, просвечиваемого пучком гамма-лучей, имеют разную длину на разных уровнях. Поэтому одна и та же концентрация смеси вызовет разное ослабление гамма-лучей на разных горизонтальных слоях. Чтобы исключить эту ошибку, верхние и нижние пучки направляют наискось под таким углом к плоскости поперечного сечения трубы, чтобы длина пути гамма-лучей в контролируемой смеси на разных уровнях была одинаковой. Все приборы, стоящие на разных уровнях, ставятся на нуль при прохождении воды по трубе, и их чувствительность приводится к одному значению с помощью общего стального поглотителя.

Перечисленными примерами далеко не исчерпываются возможные применения в гидротехническом строительстве метода измерения плотности и количества вещества по поглощению гамма-лучей. Однако и приведенные примеры показывают большие перспективы использования рассмотренного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шойхет С. И., Выбор рационального способа измерения относительного содержания грунта в пульпе для землесосных снарядов, Диссертация на соискание степени кандидата технических наук, 1955.
2. Иванов Н. А. и Кучер М. Г., Контроль консистенции водогрунтовой смеси, Изд. по строительству и архитектуре, 1956.
3. Скорбилин С. Ф., Автоматические плотномеры, Пищепромиздат, 1955.
4. Кардаш Е. Г. и Соколов В. С., Прибор для контроля содержания грунта в пульпе, «Электрические станции», 1954, № 2, стр. 18—19.
5. Гусев Н. Г., Справочник по радиоактивным излучениям и защите, Медгиз, 1956.
6. Бибергаль А. В., Маргулис У. Я., Воробьев Е. И., Защита от рентгеновых и гамма-лучей, Медгиз, 1955.
7. Богачев А. И., Верховский Б. И. и Макаров А. Н., К теории метода измерения толщины при помощи радиоактивного излучения, «Заводская лаборатория», 1955, № 7, стр. 808—812.
8. Вавилов О. Н., Франк И. М., Измерение разностенности труб с помощью гамма-лучей радиоактивных препаратов, Сборник «Новые методы измерения толщины», Изд. АН СССР, 1946.
9. Бетин Ю. П., Температурный эффект некоторых распространенных типов счетчиков, «Заводская лаборатория», 1955, № 1, стр. 100.
10. Пури Гилл, Температурные зависимости характеристик счетчиков Гейгера — Мюллера. Indian Journal of Physics, т. 30, № 2, 1956, стр. 62—79.

11. Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1955.

12. Лопатин Б. А., Ламповые гальванометры постоянного тока, Госэнергоиздат, 1952.

13. Берлеев Г. И., Усилители постоянного тока, «Успехи физических наук», 1953, т. 49, вып. 1.

14. Шинительмейстер И., Электронная лампа как прибор для физических измерений, Гостехиздат, 1949.

15. Каталог-справочник на измерительные приборы, Изд. бюро технической информации, МРТП, 1956.

16. Элмор В. и Сендс М., Электроника в ядерной физике, Изд. иностранной литературы, 1953.

17. Санин А. А., Радиотехнические методы исследования излучений, Гостехиздат, 1954.

18. Векслер В. И., Грошев Л. В., Исаев Б. М., Ионизационные методы исследования излучений, Гостехиздат, 1950.

19. Таточенко Л. Т. и Медведев С. В., Применение радиоактивных изотопов для измерения уровня жидкости, «Заводская лаборатория», 1955, № 10, стр. 1188—1192.

20. Дмитриев А. Б., Газоразрядные счетчики ионизирующих частиц, «Приборы и техника эксперимента», 1957, № 2.

21. Дементьев М. А., Самозаписывающий измеритель конспенции и объемного расхода пульпы для гидромеханизации, «Известия ВНИИГ», т. 52, Госэнергоиздат, 1954, стр. 182—202.

22. Кораблев Л. Н., Новые применения ламп с холодным катодом в импульсной аппаратуре, Изд. Филиала Всесоюзного института научной и технической информации АН СССР, 1956.

23. Богачев А. М., Верховский Б. И. и Макаров А. Н., Метод и аппаратура для измерения толщины стального проката при помощи радиоактивного излучения, «Заводская лаборатория», 1955, № 7, стр. 813—820.

24. Фурман К. С., Универсальный радиоактивный плотномер жидкости, Приборостроение, 1956, № 7.

25. Шумиловский Н. Н. и Мельцер Л. В., Использование в СССР ядерных излучений для контроля и автоматизации технологических процессов, Изд. АН СССР, 1957.

26. Кардаш Е. Г., Измерение плотности с помощью гамма-лучей, Доклад на всесоюзной конференции по применению радиоактивных изотопов, Изд. АН СССР, 1957.

27. Биргер Г. И., Верховский Б. И. и Овчаренко Е. Я., Новый тип радиоактивного плотмера, Доклад на всесоюзной конференции по применению радиоактивных изотопов, Изд. АН СССР, 1957.

28. Горошко В. Д., Применение радиоактивных излучений для обогащения углей и контроля их качества, Доклад на всесоюзной конференции по применению радиоактивных изотопов, Изд. АН СССР, 1957.

29. Кромптон К. Э., Методы, основанные на поглощении и отражении излучения, Доклады иностранных ученых на международной конференции по мировому использованию атомной энергии, Изд. АН СССР, 1956.

30. Ферронский В. И. и Цытович Н. А., Приборы и методы определения плотности и влажности грунтов с помощью радиоактивных излучений, Изд. Филиала Всесоюзного института научной и технической информации АН СССР, 1956.

21275

Цена 3 р. 50 к.

Д, 1
4965

Экземпляр
чит. зала