

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. А. Добринская

Как известно, с производством Pu^{239} и U^{233} тесно связано получение искусственно-радиоактивных изотопов, которые в настоящее время широко применяются для научных исследований в области физики, химии^{1, 2, 3}, биологии⁴ и медицины⁵, а также в промышленности^{6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14} для разработки новых методов производства, для контроля производственных процессов и в приборостроении^{15, 16, 17}.

В строительной промышленности до сих пор радиоактивные изотопы применяются ещё недостаточно. Между тем, несомненно, что и здесь внедрение новых методов исследования и контроля с применением радиоактивных изотопов даст существенные результаты и будет способствовать техническому прогрессу.

Настоящий обзор посвящён изложению важнейших работ по применению радиоактивных изотопов для исследования строительных материалов и строительных механизмов, контроля металлических конструкций, вентиляции и отопительных систем, а также некоторым другим вопросам, связанным с задачами строительной промышленности.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Большое число работ посвящено применению радиоактивных изотопов для исследования строительных материалов.

Весьма важный вопрос о взаимодействии цемента и бетона с водой и различными растворёнными в ней веществами мало доступен исследованию прежними физико-химическими методами. Применение радиоактивных изотопов дало возможность получить в этой области ряд ценных результатов.

Исследование диффузии в цемент различных веществ проводится путём погружения образцов цемента в воду, в которой [растворены

соли, меченные радиоактивными изотопами. После выдержки в течение длительного времени при постоянной температуре образец цемента вынимается, промывается, после чего измеряется его активность на торцовом счётчике, как показано на рис. 1. После этого поверхностный слой сошлифовывается на определённую глубину и снова производится измерение активности. Такое сошлифовывание с последующим измерением активности повторяют несколько раз.

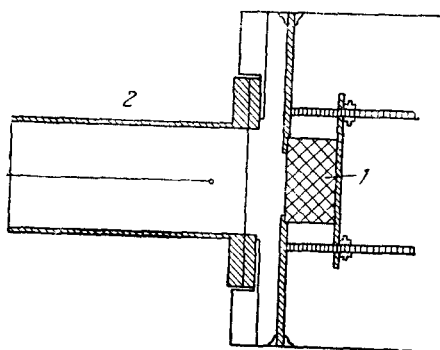


Рис. 1. Измерение активности образца цемента 1 при помощи торцового счётчика 2.

Таким образом, получается зависимость активности J от толщины снятого слоя

$$J = f(x). \quad (1)$$

Как известно, интеграл уравнения одномерной диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

в случае диффузии из одного слоя большой толщины в другой имеет вид

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy. \quad (4)$$

Пренебрегая самопоглощением в тонком слое цемента, мы можем положить

$$\Delta J = kC \quad (5)$$

и, следовательно,

$$\frac{\Delta J}{\Delta J_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \quad (6)$$

Это уравнение позволяет по экспериментально найденным значениям ΔJ , x и t вычислить величину D коэффициента диффузии исследуемого вещества в цемент.

Производя опыты при различных температурах, можно определить температурную зависимость D , которая для цемента и бетона имеет вид

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}. \quad (7)$$

Для примера на рис. 2 приведены результаты опытов Спинкса, Болдуина и Горвальдсона¹⁸ по проникновению иона SO_4 в цемент в результате выдерживания образца цемента в насыщенном растворе $\text{CaS}^{35}\text{O}_4$ в течение 4-х недель.

В таблице I приведены коэффициенты диффузии различных анионов и катионов в цемент и бетон, определённые авторами цитируемой выше работы.

Эта таблица показывает, что коэффициент диффузии иона SO_4^{--} имеет примерно в 3 раза большую величину, чем коэффициент диффузии иона Ca^{++} . Коэффициенты диффузии различных ионов могут отличаться друг от друга в десятки раз, причём анионы проникают в цемент и бетон значительно быстрее, чем катионы.

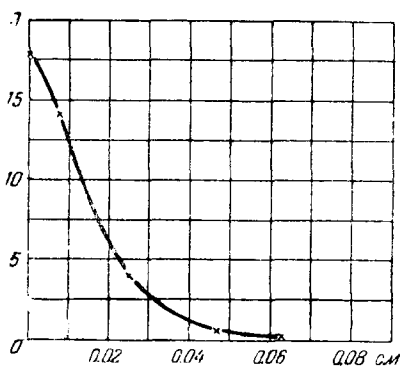


Рис. 2. Распределение активного S^{35}O_4 в образце цемента после пропитки в течение 4-х недель.

Коэффициент диффузии $D \cdot 10^{10} \text{ см}^2/\text{сек}$

Таблица I
 $T = 21^\circ \text{C}$

	Нормальный		Сульфатостойкий	
	цемент	бетон (1:2)	цемент	бетон (1:2)
$\text{Na}_2\text{S}^*\text{O}_4$	1,3	8,9	1,4	9,4
CaS^*O_4	1,5	8,5	2,6	9,5
Бетон (1:2)				
Na^+	3	Ca^{++}	2,8	
SO_4^{--}	6			
J^{--}	130	SO_4^{--}	8,5	

Опыты по исследованию диффузии иона SO_4^{--} в нормальный и сульфатостойкий цемент и бетон показали, что сульфатная коррозия бетона зависит не от скорости проникновения сульфат-иона, а от скорости химических процессов.

Дополнительные данные по диффузии различных ионов в бетон получены недавно Гевентмен и Сэм¹⁹. Они исследовали проникновение в образцы бетона размером $3 \times 3 \times 2,5$ мм ряда катионов — Cs¹³⁴, Nb⁹⁵, Ru¹⁰⁶, Ce¹⁴⁴ и аниона J¹³¹. Авторы получили ряд радиоавтографов, которые можно было сравнить с микрофотографиями разрезов бетона, полученных путём сошлифовывания образцов различной глубины. На рис. 3 приведены типичные микрофотографии и радиоавтографы. При помощи сравнения ряда радиоавтографов можно исследовать проникновение катионов и анионов вглубь бетона. Коэффициенты диффузии вычислялись по формулам (3) — (6). Полученные данные сопоставлены в таблице II.

Таблица II

Коэффициенты диффузии в цемент, известь и бетон

Ион	Концентрация раствора	Коэффициент диффузии $D \cdot 10^{10}$ см ² /сек		
		цемент	известь	бетон
J ¹³¹	8×10^{-13} МКJ	—	—	1580
J ¹³¹	0,01 МКJ	—	—	3020
J ¹³¹	0,15 МКJ	—	120	—
Cs ¹³⁴	3×10^{-9} М CsCl	—	—	24,5
Cs ¹³⁴	0,01 М CsCl	—	—	20,8
Na ²²	0,15 М Na ₂ SO ₄	—	3,0	—
Ca ⁴⁵	насыщ. CaSO ₄	0,1	2,8	—

Как видно из таблицы, в последней работе были подтверждены основные выводы Спинкса.

От химического состава некоторых строительных материалов зависит устойчивость в месте соприкосновения с другими материалами. Так, существенную роль могут играть процессы, происходящие на поверхности раздела цемент — железо в железобетоне.

Важной задачей при строительстве печей для варки стекла и доменных печей является подбор таких огнеупоров, которые при высоких температурах лишь очень медленно реагируют с расплавленным стеклом и шлаками. Исследование реакций на границах раздела во всех перечисленных случаях может быть легко выполнено с помощью меченых атомов²⁰.

При помощи радиоактивного изотопа железа в Институте чёрных металлов А. А. Шварцман, П. Л. Грузин и С. А. Печенев²¹ исследовали проникновение железа в кирпичи из магнезита, хромомагнезита и динаса. На поверхность образца из огнеупорного кирпича наносился тонкий слой железной окалины, в которую было

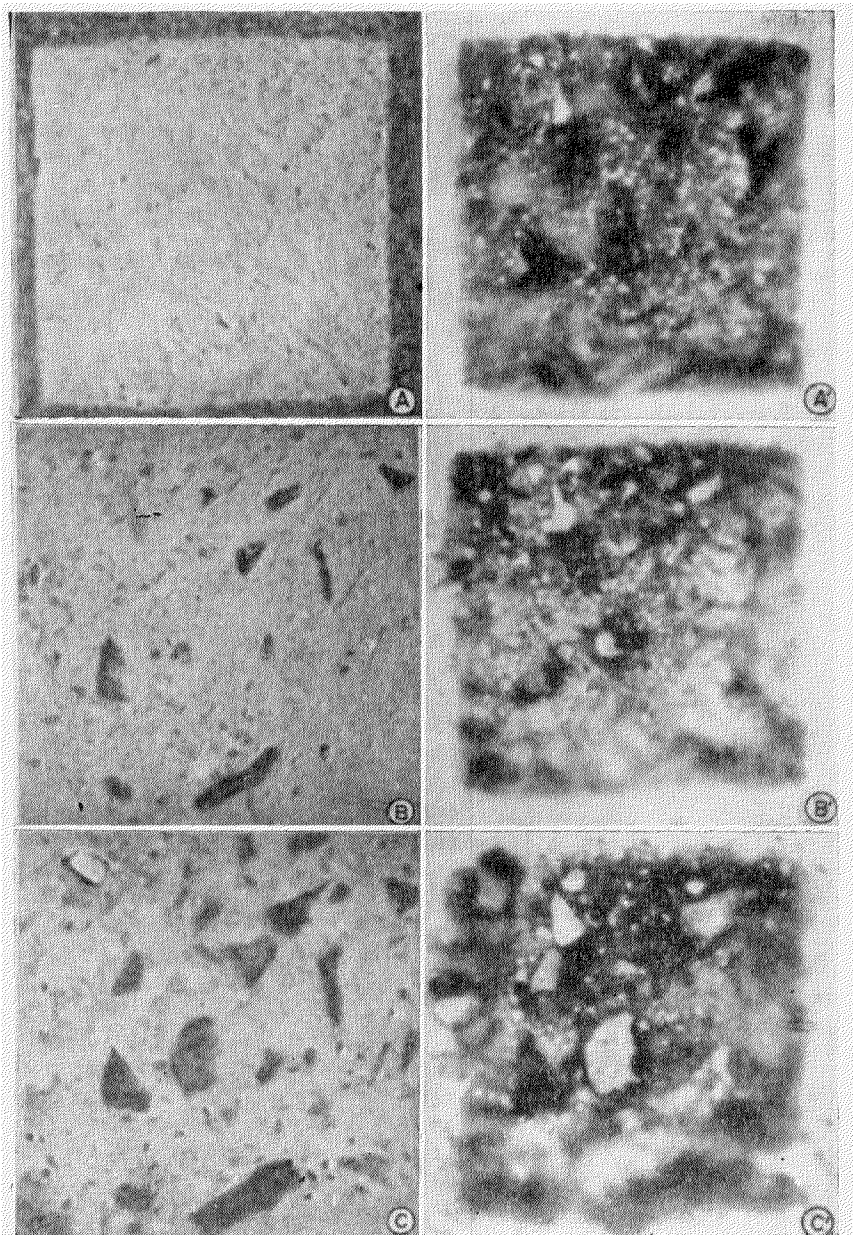


Рис. 3. Микрофотографии (слева) и радиоавтографы (справа) образцов бетона, полученные в результате проникновения в него меченых катионов. A, A' — наружная поверхность, B, B' — после первого и C, C' — после второго шлифования.

введено радиоактивное железо Fe^{59} . Далее образец подвергался нагреванию в течение 40—100 часов при температурах 1120—1330°.

Степень проникновения Fe^{59} после нагревания исследовалась путём стачивания слоёв с поверхности образца и измерения их активности. В результате этих опытов было установлено, что скорость проникновения железа из шлаков, характеризующая коэффициентами диффузии, в трёх исследованных случаях может быть выражена следующими уравнениями:

$$D = 224e^{-78700/RT} \text{ (магнезит),} \quad (8)$$

$$D = 3,1e^{-28400/RT} \text{ (хромагнезит),} \quad (9)$$

$$D = 0,1e^{-44800/RT} \text{ (динас).} \quad (10)$$

Повидимому, стойкость огнеупоров по отношению к химическому разрушению возрастает параллельно уменьшению скорости проникновения окислов железа в кирпич. Разумеется, без применения метода радиоактивных индикаторов решение этой задачи было бы сильно затруднено.

Одной из существенных характеристик строительных материалов является их пористость, которая зависит от методов приготовления и может меняться от внешних условий.

Г. И. Логгинов, Т. Ю. Любимова и М. А. Шашковская²² с помощью радиоактивных изотопов исследовали зависимость пористости цементного камня от числа циклов замораживания и размораживания. Г. И. Логгинов и О. М. Хусанова⁷³ разработали метод определения удельной поверхности песка, цемента и других пористых тел. По адсорбции из водного и спиртового растворов $\text{Na}_2\text{W}^{185}\text{O}_4$.

Скорость проникновения воздуха через перегородку из исследуемого материала можно определять по радиоактивности, регистрируемой с помощью счётчика, как показано на рис. 4. Другой из возможных вариантов исследования скорости проникновения газов сводится к применению эманационного метода. Для этой цели при приготовлении образца бетона к исходному сырью следует добавить небольшое количество (около 0,1%) какой-нибудь соли урана или

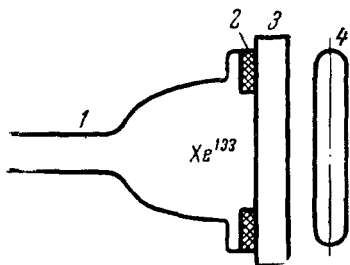


Рис. 4. Схема установки для исследования пористости материалов. 1 — колокол для подачи воздуха с примесью, 2 — прокладка, 3 — исследуемый материал, 4 — счётчик.

около 0,03 миллиграмма радия. Как известно, в равновесии с ураном находятся все члены семейства урана, в том числе и радон. Помещая образец исследуемого бетона в сосуд, можно по скорости выделения радона судить о пористости бетона. Концентрацию радона в сосуде можно определить, просасывая воздух через этот

сосуд и направляя его в ионизационную камеру или в электрометр. Воздействуя каким-нибудь способом на этот бетон, например, замораживая или нагревая его и повторяя вышеупомянутые опыты, можно сделать заключение об изменении пористости.

При исследовании проницаемости материалов для воды в последнюю вводится либо радиоактивный изотоп водорода — тритий (H^3), либо в ней растворяются инертные, не адсорбирующиеся на исследуемых материалах радиоактивные соли. Скорость проникновения воды и в этом случае определяется по нарастанию радиоактивности, измеряемой счётчиком.

Радиоактивные изотопы могут оказать большую помощь при исследовании физических и химических процессов, связанных с производством цемента, бетона и других строительных материалов. Меченые атомы могут применяться для контроля однородности смешивания отдельных компонентов цемента, для контроля равномерности распределения небольших присадок, для выбора наиболее эффективных конструкций и размеров соответствующих машин.

Брун и Линднер²³ использовали радиоактивный изотоп Ca^{45} для определения скорости реакции образования силиката $CaSiO_3$ при температурах $1155^\circ - 1295^\circ C$. Для этой цели смеси порошков $SiO_2 + 2Ca^{45}O$ прессовались в таблетки и нагревались в атмосфере азота. После нагревания SiO_2 и $2CaO$ разделялись при помощи смеси глицерина и спирта в присутствии небольшого количества $SiCl_2$, ускорявшего разделение. Далее, с помощью счётчика Гейгера — Мюллера измерялась активность SiO_2 , содержащей $Ca^{45}SiO_3$. По данным авторов зависимость константы скорости реакции образования $CaSiO_3$ от температуры описывается уравнением

$$K = 2,8 \cdot 10^{-2} e^{-54000/RT} \text{ моль} \cdot \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}. \quad (11)$$

Эти результаты могут быть использованы при изучении процессов, протекающих при изготовлении цементного клинкера.

Радиоактивные изотопы могут оказать существенную помощь и при исследовании механизма схватывания цемента²⁴, а также при определении растворимости отдельных его компонентов.

А. М. Смирнова и П. А. Ребиндер²⁵ применили изотоп Ca^{45} для исследования кинетики гидратации цементного клинкера.

Большую роль в строительной промышленности играет дерево, свойства которого в значительной степени зависят от обработки. Для сохранения дерева его пропитывают различными антигнилостными минеральными или органическими веществами. Методика исследования процесса пропитки мало отличается от вышеописанной методики исследования диффузии в цемент. Следует отметить только, что в связи с гораздо большей скоростью процессов в этом случае исследование распределения радиоактивного изотопа в зависимости от расстояния от поверхности может быть выполнено методом радиографии. Для этой цели после проведения процесса

пропитки в течение определённого времени образец дерева распиливается перпендикулярно к поверхности пропитки. К поверхности распила прижимается чувствительная фотоплёнка, которая после соответствующей экспозиции проявляется. Почернение плёнки S следующим образом зависит от концентрации C радиоактивного вещества:

$$S = \gamma \lg C + \gamma_0. \quad (12)$$

Определив зависимость почернения от глубины проникновения $S = f(x)$, можно легко найти $C = \varphi(x)$ и вычислить коэффициент диффузии по вышеприведённой формуле (3). Для примера на рис. 5 изображён радиоавтограф, полученный при пропитке южной сосны водным раствором SrCl_2 , к которому был добавлен радиоактивный

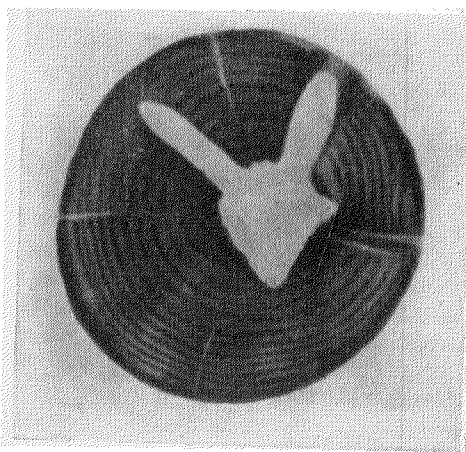


Рис. 5. Радиоавтограф поперечного среза сосны, пропитанной радиоактивным раствором $\text{Sr}^{90} \text{Cl}_2$.

изотоп стронция²⁶. В этих опытах после определённого времени пропитки образец сосны был удалён из раствора и промыт. К поверхности пропитки была прижата фотграфическая плёнка, которая после экспозиции в течение 2-х часов была проявлена и обработана обычными фотографическими методами. Радиоавтограф показывает, что раствор пропитывает главным образом внешнюю часть дерева. Он почти не проникает в ядро и суки. Проведение таких исследований может дать ценные сведения для подбора наиболее эффективных антисептических веществ.

Такой же приём можно использовать при исследовании коррозии бетона, проникновения воды в строительные материалы, фильтрации и т. д. Однако следует отметить, что метод радиографии даёт обычно качественные, а не количественные результаты.

Радиоактивные изотопы могут с успехом применяться также для анализа строительных материалов. При этом может быть использован ряд разнообразных методов.

Повидимому, наиболее быстрым методом определения бора в стекле и в цементе является метод поглощения медленных нейтронов, разработанный Мартелли²⁷. Этот метод основан на большой вероятности поглощения медленных нейтронов ядрами бора по сравнению с ядрами других элементов, присутствующих в стекле и в цементе.

Для анализа применяется нейтронный источник — смесь $Ra + Be$ (или $Sb^{124} + Be$), окружённый парафином для замедления нейтронов. Образец исследуемого стекла или цемента помещается на парафин, как показано на рис. 6. Нейтроны, замедленные в парафине, проходят через образец, после чего они попадают на диспрозиевый детектор. Атомы диспрозия поглощают нейтроны, причём образуется радиоактивный изотоп Dy^{165} . Чем выше содержание бора в образце,

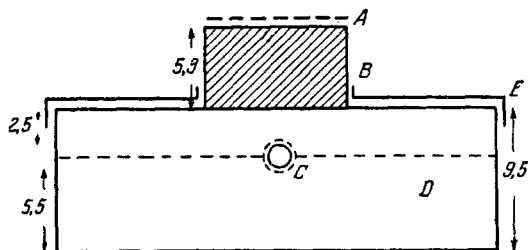
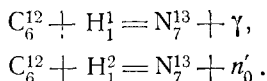


Рис. 6. Схема установки для определения содержания бора в стекле. A — диспрозиевый детектор, B — анализируемое стекло, C — нейтронный источник, D — парафин, E — кадмиевая защита.

тем больше нейтронов в нём поглотится и тем менее активным окажется диспрозиевый индикатор. Если заранее испытать несколько эталонов, содержащих известные количества бора, то можно построить градуировочную кривую, которая даст возможность определять содержание бора в исследуемых образцах. Этот метод нашёл практическое применение для определения содержания бора в бетоне, используемом для защиты обслуживающего персонала от потока нейтронов, например в урановом реакторе.

Другой часто применяющийся метод анализа известен под названием «активационный анализ». Этот метод используется в ряде случаев для определения небольших концентраций элементов, образующих при реакции с нейтронами или быстрыми ионами радиоактивные изотопы. В качестве примера применения активационного анализа можно привести разработанный Арденне во время войны метод определения углерода в железе 28 .

При бомбардировке анализируемого образца протонами или дейтонами образуется радиоактивный азот по реакциям:



Изотоп N^{13} быстро распадается, испуская позитроны. Активность анализируемого образца после бомбардировки определяется на счётчике и сравнивается с активностью эталона с известным содержанием углерода. При вполне удовлетворительной точности анализ

вместе со временем, затрачиваемым на бомбардировку образца, отнимал всего 15 минут. Этот метод анализа недавно был проверен и усовершенствован И. Кюри²⁹.

Радиоактивные изотопы могут оказать существенную помощь аналитику во всех случаях, когда приходится определять вещество в очень малых концентрациях.

Так, растворимость трудно растворимых веществ, например, стекла, гипса, цемента может быть определена, если в исследуемые материалы заранее ввести радиоактивный изотоп или подвергнуть образцы активации на урановом реакторе. После обработки образца водой или другим растворителем в течение длительного времени для достижения равновесного состояния образец удаляется, растворитель испаряется, и количество оставшегося твёрдого вещества определяется по активности налёта, часто невидимого невооружённым глазом. Если объём растворителя известен, по полученным данным легко вычислить растворимость исследуемого вещества.

Дополнительные сведения о применении радиоактивных изотопов для определения растворимости можно найти в статье Ан. Н. Несмеянова³⁰. Обзор, посвящённый применению искусственной радиоактивности в аналитической химии, опубликовали М. Б. Нейман и В. Б. Миллер³¹.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

До настоящего времени исследование износа двигателей и строительных механизмов представляло чрезвычайно трудоёмкую задачу. Обычно исследование начиналось с разборки двигателей и механизмов и тщательного измерения отдельных подвижных частей и деталей. Затем двигатели и механизмы собирались и испытывались в течение длительного времени при определённом режиме работы. После этого производилась разборка механизмов, и микрометраж трущихся частей позволял рассчитать степень износа отдельных деталей. Трудоёмкость и длительность таких испытаний не давали возможности производить широкие испытания износа при различных режимах работы и, таким образом, непрерывно совершенствовать механизм. Применение радиоактивных изотопов коренным образом изменило состояние этого вопроса^{32, 33, 34, 35, 36}. Новый метод заключается в том, что в трущиеся части, износ которых желательно подвергнуть исследованию (поршневые кольца, стенки цилиндра, подшипники, цапфы), вводят подходящий радиоактивный изотоп Fe^{59} , Co^{60} , Sn^{125} , Cr^{51} и т. д. Радиоактивный изотоп вводится либо непосредственно в сплав, из которого готовятся детали, либо в прутки $d = 3-4$ мм, которые запрессовываются в отверстия, высверленные в деталях. В некоторых случаях исследуемая деталь может быть предварительно активирована путём облучения на ядерном реакторе. При износе детали во время испытаний радиоактивный изотоп попадает в

смазочное масло. Время от времени пробы масла исследуются на радиоактивность при помощи счётчиков. Ясно, что по нарастанию радиоактивности масла со временем можно рассчитать износ исследуемой детали. Опыт показал, что при подходящем подборе концентрации и радиоактивности вводимого элемента, такое испытание износоустойчивости одной детали отнимает не более нескольких часов и во много раз сокращает затраты.

Опыты по исследованию износа двигателей, работающих на лёгком и тяжёлом топливе, и износа различных механизмов показали, что в начале испытания новой машины износ сравнительно высок, далее он быстро уменьшается, стремясь к постоянному значению, как показано на рис. 7, где приведены результаты испытаний износа поршневых колец двух бензиновых двигателей одной серии. Период обкатки характеризуется притиркой деталей и истиранием случайных микровыступов, заусениц и т. д. Постоянный износ во втором периоде зависит от конструкции двигателя, режима нагрузки, качества смазки и топлива. Рассмотренный метод даёт возможность исследовать износ каждой детали машины в отдельности и, таким образом, подбирать для каждой детали наиболее подходящую марку сплавов.

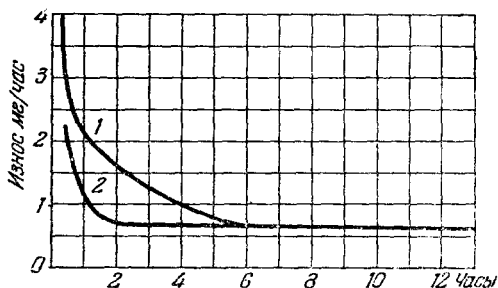


Рис. 7. Зависимость износа поршневого кольца от времени работы для двух бензиновых двигателей.

Этот же метод может быть с успехом применён для нахождения наиболее подходящих режимов работы двигателей и механизмов, для подбора смазочного масла и топлива. Методом радиоактивных изотопов было показано, что замена одного сорта топлива другим в некоторых случаях значительно уменьшает износ. Так, уменьшение содержания серы в бензине с 1,2 до 0,05% уменьшает износ деталей двигателя в 2 раза, как видно на рис. 8, где приведены результаты испытаний с помощью радиоактивного изотопа Fe^{59} .

Введение некоторых добавок поверхностно-активных веществ в смазочные масла, а также изменение его температуры могут уменьшить износ в несколько раз. На рис. 9 приведены результаты подобных исследований, выполненных Ю. С. Заславским, Г. И. Шор

и Ф. Б. Лебедевой³⁷. В цитируемой работе изучалась зависимость износа поршневого кольца от температуры охлаждающей воды и качества смазочного масла. Из рис. 9 видно, что при снижении температуры охлаждающей воды от 30° до 20° износ увеличивается в 2 раза. Введение в автол небольших количеств (около 3%) присадки НАКС сильно уменьшает износ при низких температурах.

Подобные исследования важны при изучении и

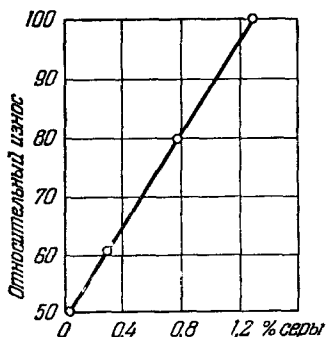


Рис. 8. Зависимость износа двигателей от содержания серы в топливе.

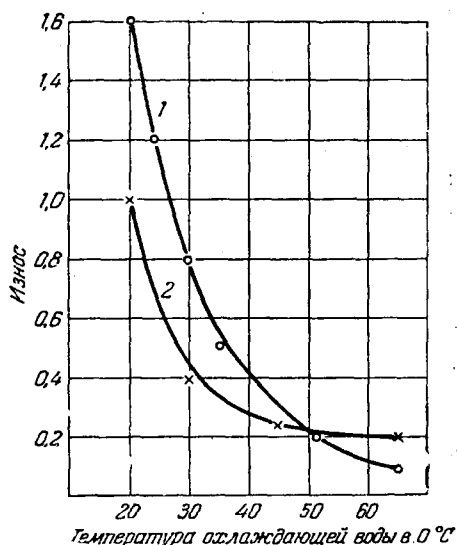


Рис. 9. Зависимость износа поршневого кольца от температуры охлаждающей воды. 1 — смазка автол, 2 — автол с присадкой НАКС.

выборе условий эксплуатации сложных строительных машин, которые уже в настоящее время играют большую роль и будут широко использоваться при осуществлении в дальнейшем ещё более грандиозных планов строительства.

III. КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Ряд работ посвящён применению радиоактивных изотопов для исследования коррозии, определения толщины защитных покрытий и контроля качества сварных швов.

В настоящее время общепринята плёночная теория коррозии металлов, разработанная академиком В. А. Кистяковским³⁸. Согласно этой теории на поверхности окисляющегося металла образуется тонкая плёнка окиси. Дальнейшее окисление металла связано с диффузией реагентов через эту плёнку. Можно себе представить два различных механизма дальнейшего окисления. Первый механизм харак-

теризуется диффузией атомов металла через плёнку окисла. Лишь достигая поверхности, они окисляются в результате бомбардировки молекулярным кислородом. Второй механизм предполагает диффузию молекул кислорода через плёнку по направлению к поверхности металла, где и образуются молекулы окислов.

Для того чтобы установить, какой из этих механизмов справедлив в случае окисления меди на воздухе, был поставлен следующий опыт³⁹. На поверхность медной пластинки электролизом был осаждён весьма тонкий слой меди, содержавшей радиоактивный изотоп Cu^{64} , как схематически показано на рис. 10. Далее эта пластинка была подвергнута окислению на воздухе при температуре 1000° .

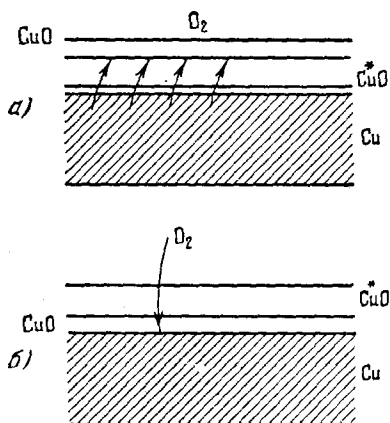


Рис. 10. Схема проведения опыта для изучения механизма окисления меди.

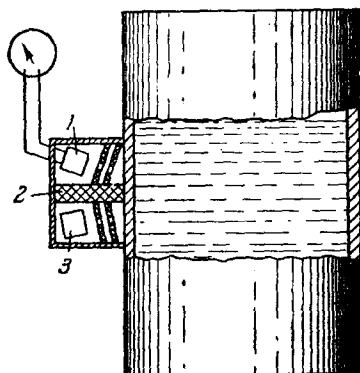


Рис. 11. Схема устройства прибора для обнаружения коррозии трубопроводов. 1 — счётчик, 2 — свинцовый экран, 3 — источник γ -лучей.

Понятно, что в случае окисления по первому механизму снаружи должен оказаться неактивный слой окиси (рис. 10, а), в случае же окисления по второму механизму снаружи должен находиться активный слой окиси (рис. 10, б). Опыты показали, что наружный слой окиси меди не активен и, следовательно, окисление сопровождается диффузией сквозь окисную плёнку атомов меди, а не кислорода.

В нашей стране широко развито строительство газопроводов и нефтепроводов огромной длины. Чрезвычайно важной задачей является борьба с внутренней коррозией этих трубопроводов. Радиоактивные изотопы, испускающие при распаде γ -лучи, позволяют просто решить задачу обнаружения внутренней коррозии труб и резервуаров без разборки последних⁴⁰. Схема прибора, позволяющего решить такую задачу, изображена на рис. 11.

Радиоактивный изотоп 3, испускающий γ -лучи, помещают в свинцовой оболочке с отверстием, через которое γ -лучи направляются на желаемое место стенки трубопровода. Проходя через стенку,

γ -лучи отражаются от слоёв металла, лежащих на различной глубине, и попадают в счётчик. Благодаря свинцовой защите 2, в счётчик, расположенный рядом с оболочкой, в которую заключён радиоактивный изотоп, могут попасть только отражённые γ -лучи. Счётчик вместе с радиоактивным изотопом заключён в общий футляр, который легко переносить с места на место. Прикладывая этот прибор к различным местам трубопровода или металлической стенки, можно легко обнаружить места, подвергнувшиеся внутренней коррозии, по резкому изменению числа импульсов, регистрируемых счётчиком в секунду.

Для борьбы с коррозией металлов последние часто защищаются покрытиями — слоями более благородных металлов, олифой или краской. Определение толщины этих покрытий без их повреждения представляет важную техническую задачу. Наиболее изящное решение этой задачи достигается при помощи радиоактивных изотопов, испускающих β -частицы^{41, 42}. Приборы, которые выпускаются для измерения толщины защитных покрытий, используют закон отражения β -частиц. Как известно, коэффициент отражения электронов зависит от порядкового номера атомов, из которых состоит отражатель. Поэтому отражение электронов от чистой поверхности металла обычно резко отличается от отражения в том случае, когда поверхность металла покрыта слоем другого состава. При этом коэффициент отражения электронов изменяется тем больше, чем больше разность порядковых номеров элемента подложки и элемента покрытия и чем толще последнее. При постоянстве состава подложки и покрытия коэффициент отражения электронов зависит от толщины покрытия.

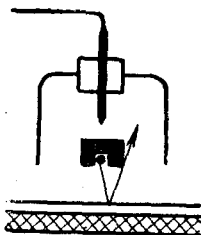


Рис. 12. Схема прибора для измерения толщины покрытий по отражению β -частиц.

Главной частью прибора для определения толщины защитных покрытий является ионизационная камера, в которую отражаются электроны, испускаемые радиоактивным изотопом, как показано на рис. 12. Радиоактивный изотоп помещается в свинцовом блоке, который исключает возможность прямого попадания в ионизационную камеру β -частиц, возникающих при радиоактивном распаде. Ионизационный ток I

зависит от интенсивности падающего пучка электронов I_0 , от толщины отражающего слоя x (в мг/см^2), коэффициентов поглощения μ и отражения α -пучка β -частиц. В случае моноэнергетического пучка можно считать, что

$$dI = \alpha I_0 e^{-2\mu x} dx \quad (13)$$

и, следовательно,

$$I = \frac{\alpha I_0}{2\mu} (1 - e^{-2\mu x}). \quad (14)$$

Коэффициент отражения α согласно Мотту⁴³ следующим образом зависит от порядкового номера Z атомов отражающего слоя, скорости электронов $v = \beta c$ (c — скорость света в вакууме) и угла θ , определяющего телесный угол пучка отражённых электронов, попадающих в ионизационную камеру:

$$\alpha = N \left(\frac{e^2 Z}{2mv^2} \right) (1 - \beta^2) \left(1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}. \quad (15)$$

В случае пучков β -частиц, скорость которых изменяется в широких пределах, формулы (13), (14) и (15) удовлетворительно описывают отражение и поглощение электронов, если для v взять некоторое среднее значение.

Как следует из формулы (14), при небольших толщинах подложки ионизационный ток пропорционален x :

$$I = \alpha I_0 x. \quad (16)$$

При больших значениях x ионизационный ток достигает предельной величины

$$I_{\text{пред.}} = \frac{\alpha I_0}{2\lambda}. \quad (17)$$

Эти соотношения видны из рассмотрения рис. 13, где кривая А показывает зависимость силы ионизационного тока от толщины подложки x . Величина предельного тока пропорциональна коэффициенту отражения α , который согласно формуле (15) пропорционален квадрату порядкового номера атомов подложки. Если подложка покрыта слоем, состоящим из атомов с большим порядковым номером, то по мере увеличения толщины покрытия ионизационный ток будет возрастать, как показывает кривая В на рис. 13.

Ясно, что при не слишком большой толщине покрытия последняя может быть определена по величине ионизационного тока.

Шкала измерительного прибора, измеряющего ток в ионизационной камере, может быть проградуирована непосредственно в единицах толщины покрытий. Приложив прибор к исследуемой поверхности, можно сразу отсчитать по шкале толщину покрытия в этом месте.

При изготовлении и сборке металлических конструкций очень часто применяются сварочные работы. Производить контроль сварных швов методами рентгенографии в условиях строительной площадки не представляется возможным в связи с трудностями переноски гро-

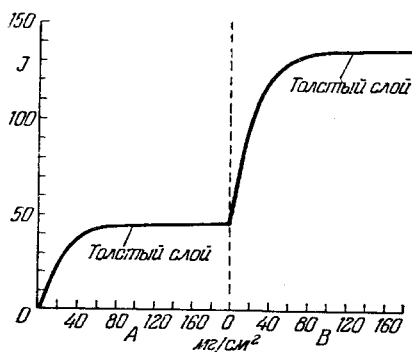


Рис. 13. Зависимость величины ионизационного тока от толщины подложки (кривая А) и покрытия (кривая В).

моздкой высоковольтной рентгеновской установки. Кроме того, следует отметить, что заводские рентгеновские аппараты, работающие при напряжении 100—150 киловольт, не позволяют производить просвечивание изделий толщиной более 1,5—2 см. За последние годы для просвечивания металлических изделий широко используются γ -лучи, испускаемые радиоактивными изотопами. Чаще всего для этой цели применяется изотоп Co^{60} , испускающий γ -лучи с энергией 1300 кэв. Это излучение может быть использовано для просвечивания изделий толщиной до 50 см^{44, 45, 46, 47}. Такой метод исследования принято называть гаммаграфией.

Для просвечивания применяется образец активированного кобальта весом порядка 1—10 г, который хранится в свинцовом контейнере⁴⁸. Контейнер, который весит около 30 кг, снабжён ручкой для переноски его с места на место. Внешний вид контейнера изображён на рис. 14. Контейнер имеет отверстие, закрытое свинцовой пробкой.

Если при помощи ключа, снабжённого длинной рукояткой, вынуть эту пробку, из контей-

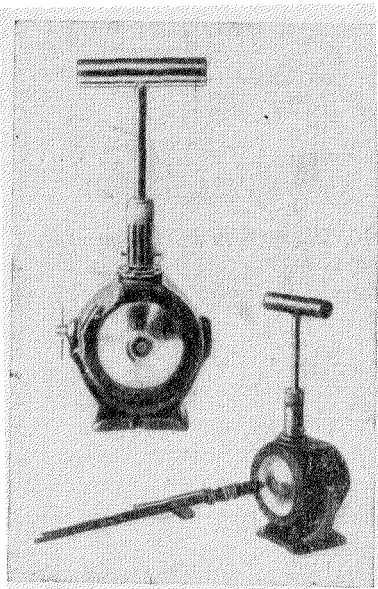


Рис. 14. Контейнер для хранения и переноски радиоактивного изотопа Co^{60} , применяемый для гаммаграфии.

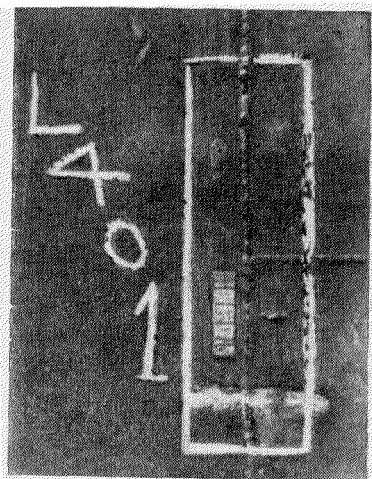


Рис. 15. Сварной шов, подготовленный к просвечиванию γ -лучами.

нера выходит направленный пучок γ -лучей, который можно использовать для просвечивания изделий.

В тех случаях, когда просвечивание изделий можно провести в цехе в отсутствии рабочих, например в ночное время, поступают

иначе. Подлежащие просвечиванию заготовки располагают по окружности. За каждой заготовкой помещают конверт с рентгеновской плёнкой. На каждом конверте ставят номер, отвечающий соответствующему изделию. В центре окружности ставят вынутый из контейнера γ -излучатель. После подходящей экспозиции (обычно несколько часов) радиоактивный изотоп убирают в контейнер, а экспонированные куски плёнки проявляют в лаборатории. По характеру почернения плёнки можно сделать заключение о наличии или отсутствии раковин, трещин и других дефектов в подвергнутых просвечиванию заготовках или изделиях.

Особенно важно применение испускающих γ -лучи радиоактивных изотопов для проверки качества сварных швов. Места, подлежащие проверке, помечаются мелом и маркируются. Около тех мест сварного шва, которые желательно отметить, помещаются железные стрелки, как показано на рис. 15. Лаборант прикладывает к указанному месту кассету с рентгеноплёнкой, которая в случае сварки

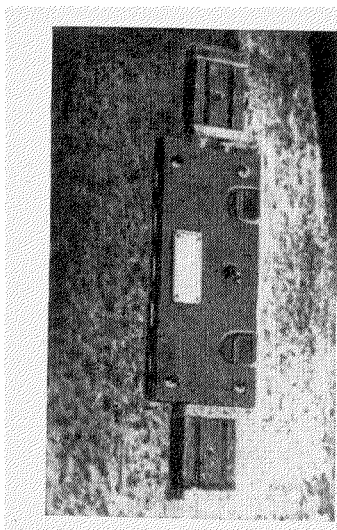


Рис. 16. Кассета с рентгеноплёнкой для гаммаграфии, прижатая к сварному шву во время экспозиции.

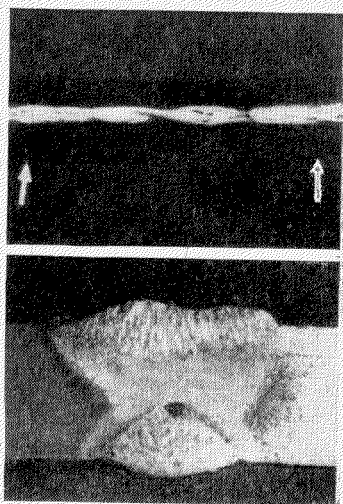


Рис. 17. Детали гаммаграммы сварного шва в большом масштабе.

железных конструкций притягивается к исследуемому месту при помощи постоянных магнитов (рис. 16). Радиоактивный изотоп Co^{60} помещают с другой стороны исследуемого сварного шва. После экспозиции, длительность которой зависит от толщины проверяемого изделия, активности Co^{60} и чувствительности рентгеноплёнки, последнюю проявляют в лаборатории. Гаммаграмма сварного шва

с дефектами изображена на рис. 17. На негативе видны изображения стрелок, по положению которых легко найти те места сварного шва, в которых обнаружены дефекты. В нижней части рис. 17 помещено увеличенное изображение того места гаммаграммы, на которой обнаружен непровар.

Гаммаграфия повсеместно применяется в нашей машиностроительной промышленности и, несомненно, должна найти широкое применение на строительных площадках.

IV. ПРОВЕРКА ВЕНТИЛЯЦИИ И ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При проверке работы вентиляции приходится определять действительный коэффициент обмена воздуха и его соответствие проектному заданию. Радиоактивные индикаторы позволяют чрезвычайно точно и быстро определить коэффициент обмена воздуха. Для этой цели обычно применяется какое-нибудь безвредное летучее вещество, в состав которого вводится радиоактивный изотоп⁴⁹. Одним из наиболее употребительных веществ является бромистый метил (CH_3Br), кипящий при температуре 4°C . В эту молекулу вводится радиоактивный изотоп Br^{82} . Если при выключенной вентиляции выпустить в исследуемое помещение небольшое количество бромистого метила и при помощи счётной установки измерять активность в различные моменты

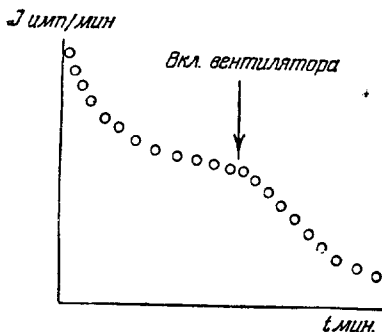


Рис. 18. Кривая падения активности в помещении после выпуска в воздух небольшой порции $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$. Стрелкой отмечен момент включения вентиляции.

времени, то можно заметить, что активность с течением времени постепенно уменьшается за счёт естественного обмена воздуха. Если включить вентиляцию, то наблюдается более быстрое падение активности, как показано на рис. 18.

Если коэффициент обмена воздуха обозначить k , то в случае полного перемешивания воздуха активность должна падать согласно уравнению:

$$- \frac{dJ}{dt} = kJ. \quad (18)$$

Интегрирование этого уравнения приводит к формуле

$$J = J_0 e^{-kt}. \quad (19)$$

Если экспериментальные точки изобразить в координатах $\lg J$ и t , то они должны лечь на прямую линию, по наклону которой можно определить коэффициент обмена воздуха k . Результаты измерений активности для определения k изображены на рис. 19. До включения вентиляции коэффициент естественного обмена воздуха был равен 3 час^{-1} , после включения вентиляции его значение повысилось до 5 час^{-1} .

Меченые атомы целесообразно применять для обнаружения течи в газопроводах и отопительных системах. При испытании газопроводов в них накачивается воздух с примесью радиоактивного изотопа Xe^{133} или паров $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$. В случае наружного газопровода при помощи обычного счётчика легко обнаружить место течи. В том случае, если газопровод проходит под землёй на глубине 1—2 метров радиоактивный газ, применяющийся для отыскания течи, должен

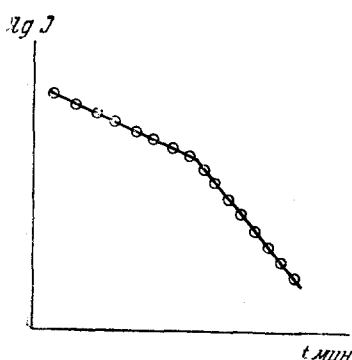


Рис. 19. Полулогарифмическая анаморфоза кривой рис. 18.

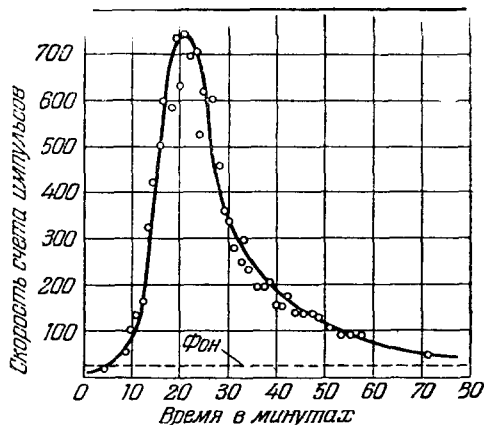


Рис. 20. Изменение активности со временем после выпуска порции Xe^{133} под слоем песка толщиной 35 см.

сравнительно быстро диффундировать через почву, но хорошо адсорбироваться в поверхностном слое, чтобы облегчить его обнаружение при помощи счётчика.

Специальные опыты, поставленные с изотопом Xe^{133} , небольшое количество которого было выпущено из вентиля под слоем уплотнённого песка толщиной 35 см, показали, что активность, измеряемая счётчиком на поверхности, изменяется со временем, как показано на рис. 20. Максимум активности наблюдается через 20 мин. после выпуска ксенона, но потом активность быстро падает до нуля, что свидетельствует о слабой адсорбции ксенона. Поэтому для обнаружения течи в трубах, проложенных под землёй, изотоп Xe^{133} мало пригоден. Для этой цели лучше употреблять пары $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$, которые сравнительно медленно диффундируют сквозь почву, но хорошо задерживаются поверхностным слоем.

Кривая активности, регистрируемой счётчиком на поверхности земли в случае утечки $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$ из трубопровода, проложенного на глубине 1,8 м, изображена на рис. 21. Как видно из рисунка, регистрируемая счётчиком активность возрастает в течение 40—50 часов, а потом остаётся приблизительно постоянной. Очевидно, что на

последнем участке убыль активности за счёт радиоактивного распада $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$ и десорбции $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$ компенсируется поступлением новых порций $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$, диффундирующего сквозь слой почвы. Ясно, что в зависимости от глубины укладки трубопровода обследование счётчиком трассы при поисках места утечки следует производить через 10—50 часов после нагнетания воздуха с примесью $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$.

Для нахождения течи в отопительных системах в последние вводятся радиоактивная поваренная соль Na^{24}Cl . В одном случае

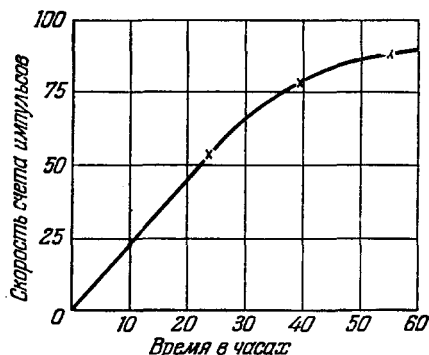


Рис. 21. Кривая изменения активности со временем в случае утечки $\text{CH}_3\text{Br}^{82}$ из трубопровода, проложенного на глубине 1,8 метра.

поисков течи в отопительной системе⁵⁰ радиаторы помещались под бетонным полом большого гаража площадью 1500 м². Введением в систему Na^{24}Cl и исследованием пола счётчиком удалось по проникающему излучению обнаружить место течи с точностью до 15 см и произвести ремонт, не прекращая работы гаража.

V. ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУНТА

Разработка наиболее простых и точных методов определения плотности и влажности грунтов представляет собой одну из важных задач в гидротехнике, дорожном и строительном деле. Плотность является исходной величиной для суждения о деформациях грунта и возникающих при этом внутренних напряжениях. В литературе описаны два метода измерения плотности грунта.

Первый метод основан на способности грунта поглощать γ -лучи. Если через вещество проходит параллельный монохроматический пучок γ -лучей, то его интенсивность уменьшается с увеличением толщины поглощающего слоя по закону:

$$I = I_0 e^{-\mu x}. \quad (20)$$

Здесь I_0 — интенсивность падающего пучка, I — интенсивность прошедшего пучка, x — толщина поглощающего слоя, μ — линейный коэффициент поглощения.

На практике часто пользуются так называемым массовым коэффициентом поглощения:

$$\mu' = \frac{\mu}{\rho}. \quad (21)$$

В этом случае уравнение (20) преобразуется к виду

$$I = I_0 e^{-\mu' \rho d}. \quad (22)$$

Следует отметить, что при энергии γ -квантов порядка 1 Мэв ослабление пучка γ -лучей в основном обусловлено их рассеянием (явление Комптона), причём массовый коэффициент поглощения пропорционален отношению $\frac{Z}{A}$ (A — атомный вес, а Z — порядковый номер элемента в таблице Менделеева). Поэтому для всех элементов, порядковый номер которых лежит в пределах от 2 до 30, значение μ' практически одинаково. Элементы с такими порядковыми номерами обычно встречаются в грунтах. Поэтому поглощение γ -лучей зависит не от химического состава грунта, а определяется только его плотностью.

На практике для определения плотности грунта удобнее пользоваться логарифмической формой уравнения (22):

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu' \rho d. \quad (23)$$

Последнее выражение показывает, что при $d = \text{const}$ величина $\ln \frac{I}{I_0}$ пропорциональна плотности ρ . Помещая на пути γ -лучей различные образцы грунта известной плотности и измеряя интенсивность прошедшего излучения, можно получить ряд значений $\ln \frac{I}{I_0}$, соответствующие определённым значениям плотности. Если результат эксперимента изобразить графически в координатах $\ln \frac{I}{I_0}$ и ρ , то получается прямая, наклон которой равен произведению $\mu' d$ и не зависит от химического состава грунта. Поэтому такая прямая может служить градуировочным графиком при измерении плотности различных грунтов по поглощению γ -лучей при условии $d = \text{const}$. В качестве источника излучения могут быть использованы различные искусственно-радиоактивные изотопы, например Co^{60} , Cs^{137} и т. д., испускающие γ -лучи достаточной энергии.

Схема установки, разработанной К. В. Юрьевым, для измерения плотности песчаного грунта⁵² изображена на рис. 22. Парал-

лельный пучок γ -лучей проходит через грунт определённой толщины и фокусируется с помощью свинцовой диафрагмы с узким отверстием на два расположенных последовательно счётчика Гейгера — Мюллера, регистрирующих интенсивность проходящего излучения. Счётчики включены «на совпадения» для уменьшения влияния фона. В качестве источника излучения использовался препарат ^{87}Cs радиоактивного ксбальта. Расстояние от источника

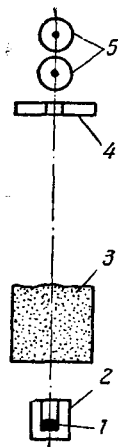


Рис. 22. Схема установки для определения плотности грунта по поглощению γ -лучей. 1 — источник γ -излучения, 2 — свинцовый контейнер, 3 — поглотитель, 4 — свинцовая диафрагма, 5 — счётные трубки.

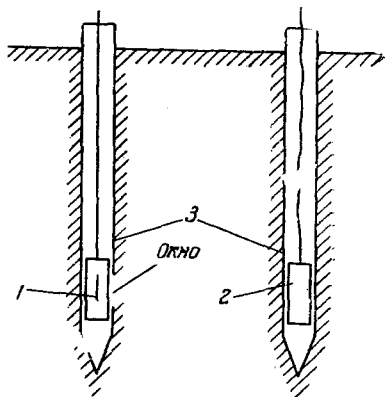


Рис. 23. Расположение приборов при изучении плотности грунта в полевых условиях. 1 — источник, 2 — ионизационная камера, 3 — стальные трубы.

до нижнего счётчика равнялось 60 см. При выбранных условиях удавалось обнаружить изменение плотности грунта с точностью до 1%. Аналогичные результаты получены Д. Е. Польшиным и С. И. Носаль⁷⁴ при измерении плотности глинистого ила, каолинового ила и песка.

Для измерения плотности грунтов по поглощению γ -лучей в полевых условиях необходимо пробурить две параллельные скважины на некотором расстоянии друг от друга (рис. 23). В одну из скважин помещается металлическая труба, в которой укреплен источник γ -лучей, а в другую — труба со счётчиком или ионизационной камерой, которая соединяется кабелем с измерительным прибором. Величина электрического тока, возникающего в ионизационной камере, зависит от расстояния между скважинами и плотности грунта. Шкалу измерительного прибора удобно предварительно прокалибровать в единицах плотности. Важным преимуществом этого метода является возможность измерения плотности

грунта без нарушения структуры, соответствующей естественным условиям залегания.

Другой метод измерения плотности грунта основан на рассеянии γ -лучей^{53, 54, 55, 56}.

Если пучок γ -лучей, испускаемых источником, направить на исследуемое вещество, то γ -лучи будут рассеиваться вследствие взаимодействия с электронами атомов, входящих в состав данного вещества. При этом рассеяние будет изменяться в зависимости от числа электронов в атомах. Так как в хорошем приближении для грунтов число электронов пропорционально плотности, то по рассеянию γ -лучей грунтом можно делать заключение о его плотности.

Прибор, применяемый для таких измерений, изображён на рис. 24. В нижней части металлической трубы укрепляется источник γ -лучей 1, а в верхней — счётчик Гейгера — Мюллера 2, соединённый кабелем с усилителем и механическим регистратором импульсов (не показаны на рисунке). Свинцовый экран 3 защищает счётчик от прямого попадания γ -лучей непосредственно от источника. Металлическая труба с прибором вставляется в исследуемый образец грунта. γ -лучи, посылаемые источником, проходят в грунт, рассеиваются и попадают в счётчик. Интенсивность излучения, падающего на счётчик, зависит от плотности грунта.

На рис. 25 изображена градуировочная прямая, позволяющая по числу импульсов, регистрируемых счётчиком, определить плотность окружающего грунта. Как видно из рисунка, экспериментальные точки, полученные для различных грунтов, вполне удовлетворительно укладываются на одну прямую, что доказывает справедливость вышеизложенных соображений и возможность применения этой градуировочной прямой для исследования различных типов грунтов.

Для измерения плотности грунта в полевых условиях достаточно прорубить одну скважину, в которую вставляют трубу ($d = 32$ мм) с приборами. Опуская прибор на различные расстояния от поверхности, можно определить плотность на разной глубине. По данным Бельчера⁵⁴ подсбные измерения дают среднее значение плотности для слоя, окружающего грунт, радиус которого не превышает 23 сантиметров. Точность определений плотности составляет $\pm 2\%$. С помощью рассматривае-

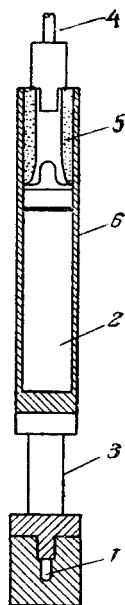


Рис. 24. Схема прибора для определения плотности грунта по рассеянию γ -лучей. 1—источник, 2—свинцовая защита, 3—счётная трубка Гейгера—Мюллера, 4—кабель к регистрирующему прибору, 5—изолятор, 6—металлическая трубка.

мого метода можно быстро и надёжно определять плотность без нарушения структуры грунта.

Аналогичный метод с успехом может быть использован для быстрого определения плотности бетона при его твердении.

Определение содержания влаги в грунтах представляет собой важную задачу в строительстве при проектировании и при изучении состояния дорог.

Метод определения влагосодержания грунта по рассеянию быстрых нейтронов описан в ряде работ⁵³⁻⁵⁸. Как известно, нейтроны,

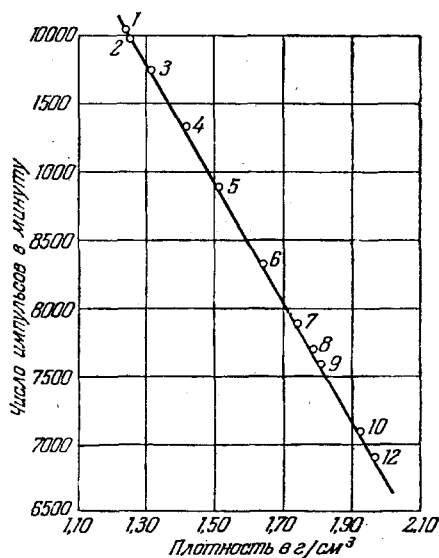


Рис. 25. Градуировочный график для измерения плотности грунта. Цифрами обозначены точки, полученные для различных грунтов.

попадающие в вещество, взаимодействуют с ядрами атомов этого вещества. При этом может произойти ядерная реакция, приводящая к образованию нового ядра. Наряду с этим наблюдается также рассеяние нейтронов⁵⁹.

При упругом рассеянии средняя потеря энергии нейтроном равна:

$$\frac{\Delta E_n}{E_n^0} = \frac{2mm_n}{(m + m_n)^2}. \quad (24)$$

Следовательно, при столкновении нейтрона с протоном ($m = m_p = m_n$) его энергия уменьшается приблизительно в два раза, а при столкновении с более тяжёлыми ядрами энергия нейтрона изменяется мало.

Поэтому наиболее эффективными замедлителями нейтронов являются вещества, содержащие водород, например вода, парафин и различные углеводороды. Поэтому при попадании нейтронов в грунт они будут лучше замедляться и рассеиваться водой, чем веществами, не содержащими водорода. При этом рассеяние не будет зависеть от агрегатного состояния воды. Прибор для измерения содержания влаги по рассеянию нейтронов был сконструирован и испытан Бельчером и Спинксом^{54, 57}. Схема прибора Бельчера изображена на рис. 26. Источник быстрых нейтронов 1 помещается в алюминиевую трубу. Вблизи источника укрепляется детектор медленных нейтронов — родиевая фольга 2. Труба погружается в исследуемый образец грунта. Быстрые нейтроны, испускаемые источником, выходят в окружающий грунт, где они рассеиваются

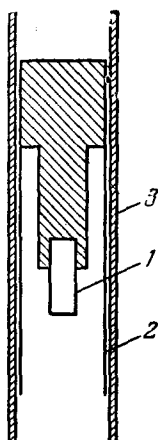


Рис. 26. Схема прибора для измерения содержания влаги по рассеянию быстрых нейтронов. 1 — источник, 2 — фольга, 3 — металлическая труба.

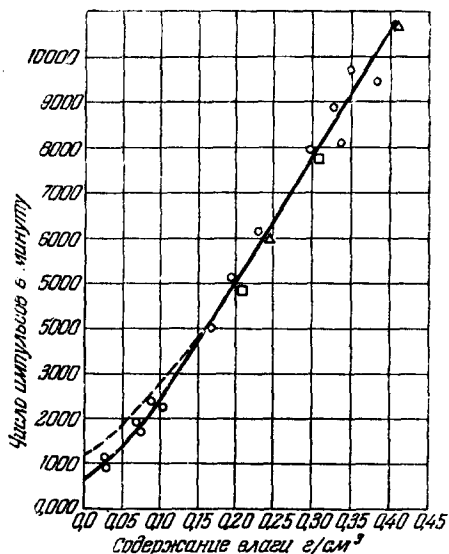


Рис. 27. Градуировочный график для определения содержания влаги в грунте.

и замедляются ядрами атомов водорода. Число образовавшихся медленных нейтронов будет пропорционально содержанию воды в грунте. Часть медленных нейтронов возвращается к месту расположения фольги и взаимодействует с ядрами атомов родия. При этом образуется изотоп родия с массовым числом 104, который затем распадается, испуская γ -лучи. После экспозиции в течение определённого времени активность родиевой фольги измерялась с помощью счётчика Гейгера — Мюллера. Параллельно влажность грунта определялась обычным весовым методом. По полученным

данным был построен градуировочный график, изображённый на рис. 27. Из рисунка видно, что активность родиевой фольги в сильной степени зависит от содержания влаги в грунте.

Специальные опыты, проведённые с различными образцами, показали, что при влажностях, превышающих $0,15 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, увеличение диаметра образца грунта сверх 22 см не влияет на активность родиевой фольги. Однако в случаях низких влажностей при увеличении диаметра образца грунта сверх 22 см активность фольги

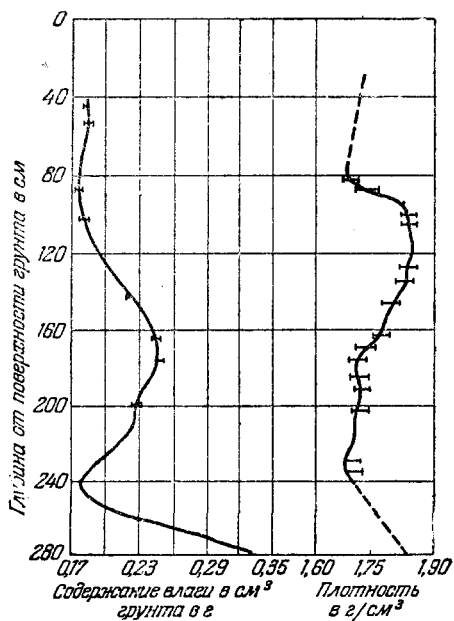


Рис. 28. Результаты параллельных измерений плотности и влажности грунта на различной глубине.

слабо возрастала. Поэтому для определения плотности в полевых условиях, где грунт не ограничен, нужно пользоваться исправленной градуировочной кривой, изображённой на рис. 28 пунктирной линией.

По данным Бельчера подобные измерения дают среднее значение влажности для слоя толщиной 10—12 см, радиус которого равен 15 см при высокой влажности и 38 см при низкой влажности. Точность определения около 1%. Преимуществом метода является то, что он позволяет производить измерения без нарушения структуры грунта. Помещая прибор в трубе на различных расстояниях

от поверхности грунта, можно измерять влажность грунта на различных глубинах.

При пользовании радий-бериллиевым нейтронным источником вследствие интенсивного γ -излучения радия нельзя было поместить счётчик в трубу рядом с фольгой. Поэтому приходилось фольгу переносить в лабораторию, что вызывало увеличение времени измерения. Авторами были проведены специальные опыты, в которых в качестве источника нейтронов использовалась смесь $\text{Po} + \text{Be}$. В этом случае γ -излучение практически отсутствует. Поэтому счётчик можно было поместить в трубе около родиевой фольги и осуществлять непрерывное измерение содержания влаги в грунте.

Шаап⁵⁸ для измерения содержания влаги использовал пропорциональный счётчик нейтронов, наполненный фторидом бора. Источник нейтронов $\text{Ra} + \text{Be}$ и счётчик нейтронов укреплялись в алюминиевой трубе, которая вводилась в исследуемый грунт. Часть рассеянных и замедленных в грунте нейтронов попадала в трубу и регистрировалась нейтронным счётчиком. Применение нейтронного счётчика позволило резко снизить активность используемого источника, что способствовало созданию безопасных условий работы и повысило чувствительность прибора.

Если скомбинировать в одном приборе источник нейтронов, γ -излучатель и счётчики нейтронов и γ -лучей, то, опуская такой прибор в скважину, можно одновременно определять влажность и плотность грунта. Пример результатов, полученных при параллельных измерениях влажности и плотности грунта до глубины 2,8 м, приведён на рис. 28.

Рассмотренный метод может быть использован для осуществления контроля влажности бетонных сооружений и для определения влажности в бетономешалках.

Метод рассеяния нейтронов может быть с успехом применён для определения битумов в асфальте. Для этой цели может быть использован один из описанных выше приборов. Предварительно необходимо по известным образцам асфальта построить графики зависимости активности, регистрируемой счётчиком, от процентного содержания битумов в асфальте.

При бурении глубоких скважин ценные сведения о характере залегания слёсов и об их природе можно получить, опуская в скважину заэкранированный свинцом нейтронный источник и ионизационную камеру или нейтронный счётчик^{60, 61, 62}. Нейтроны попадают в прилегающий слой, отражаются и частично поглощаются, причём в слое образуются различные радиоактивные изотопы. Отражённые нейтроны регистрируются нейтронным счётчиком, а от интенсивности радиоактивных излучений (γ -лучей и β -частиц) зависит величина тока в ионизационной камере. Как показали исследования, выполненные в Ленинградском университете⁶³, сила тока в ионизационной камере зависит от химического состава слоя, около которого нахо-

дится опущенный в скважину прибор. Таким методом удаётся отличать друг от друга известняки, сланцы, глину, песок и некоторые другие породы.

На рис. 29 изображены кривые (1, 2 и 3), полученные при помощи вышеописанного прибора при исследовании трёх скважин, расположенных на расстояниях около 100 м друг от друга. Кривые

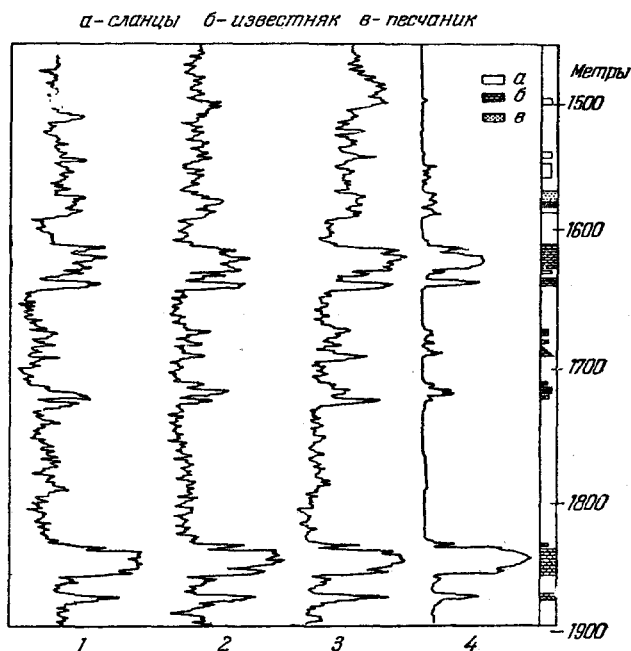


Рис. 29. Кривые, зарегистрированные при нейтронном кароттаже 3-х скважин (кривые 1, 2 и 3) и при электрокароттаже (кривая 4) на глубине от 1500 до 1900 м.

почти в точности повторяются, что свидетельствует о горизонтальном расположении слоёв на глубине от 1500 до 1900 м. Результаты исследования при помощи нейтронного источника хорошо совпадают с кривой 4, показывающей, как изменяется электросопротивление слоёв на различной глубине.

Оказывая серьёзную помощь при поисках нефти, описанный метод может в некоторых случаях оказаться полезным и при исследовании структуры грунта перед производством строительных работ.

Радиоактивные изотопы могут также применяться в ряде работ по исследованию химических или физико-химических свойств грунта. Так, например, вопрос об относительном количестве свободной

и связанной воды в грунте может быть решён путём изучения скорости обмена этой воды с водой, меченной тритием или дейтерием. Аналогичным методом можно исследовать отношение количеств воды и льда при различных температурах в образцах почв из зоны вечной мерзлоты.

Радиоактивные изотопы можно применять для «метки» движущихся подземных слоёв в тех случаях, когда желательно определить направление движения плывунов.

Радиоактивные изотопы применялись также для исследования износа асфальтовых дорог под действием воды⁶⁴. Для этой цели небольшое количество хлористого кальция, меченного изотопом Ca^{45} , наносилось на поверхность раздроблённого щебня до покрытия его асфальтом. После этого асфальт подвергался действию воды. Радиоактивность полученного таким образом раствора затем измерялась с помощью счётчика Гейгера — Мюллера. Оказалось, что количество хлористого кальция, перешедшего в раствор, пропорционально величине износа асфальтовой дороги.

VI. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ

Радиоактивные изотопы применяются для определения скорости движения воздуха⁶⁵. Основная часть используемого для этой цели прибора — два расположенных на небольшом расстоянии друг от друга электрода, между которыми создаётся разность потенциалов. Если на один из электродов нанесён слой, содержащий радиоактивное вещество, испускающее α -частицы, то величина ионизационного тока, измеряемого гальванометром, зависит от скорости струи воздуха, текущего в направлении, перпендикулярном к электродному промежутку, как это видно из рассмотрения кривой, изображённой на рис. 30. Ясно, что такой прибор после градуировки может применяться для определения скорости движения воздуха.

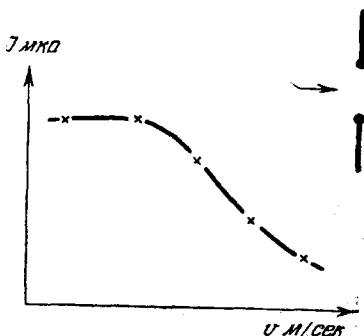


Рис. 30. Градуировочная кривая для определения скорости струи воздуха по ионизационному току.

Для измерения скорости движения воды в определённый момент времени в неё вводится радиоактивное вещество⁶⁶. Отмечается момент времени, когда счётчик, расположенный ниже по течению вблизи от поверхности воды, регистрирует максимум активности. Зная расстояние между местом введения радиоактивности и местоположением счётчика и время, потребовавшееся для прохождения этого расстояния,

легко определить скорость течения воды. Может быть построен прибор, автоматически измеряющий и записывающий скорость течения воды через определённые интервалы времени. Недавно был разработан метод изучения турбулентного течения воды при помощи радиоактивных изотопов.

При проектировании строительства гидросооружений большую роль играет вопрос о направлениях и скорости фильтрации воды через почву. Проверка теоретических расчётов фильтрации производится обычно на моделях. Применение при моделировании радиоактивных изотопов в ряде случаев может упростить экспериментирование и ускорить получение необходимых результатов. Распределение радиоактивных изотопов в различные моменты времени при проведении подобных опытов может быть исследовано при помощи счётчика или методом радиографии.

В некоторых случаях речная вода полностью или частично уходит под землю, причём направление её течения и место выхода на поверхность бывает затруднительно определить⁶⁷. В таких случаях введение в воду радиоактивных изотопов позволяет проверить правильность предположения о месте выхода воды на поверхность.

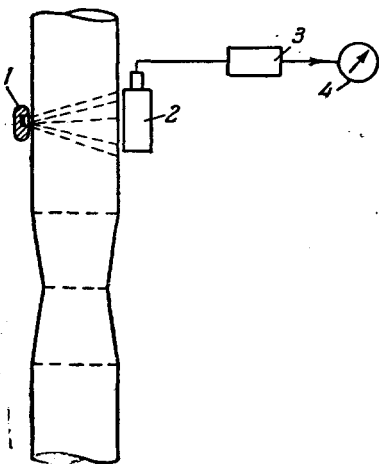


Рис. 31. Схема прибора для измерения процентного содержания грунта в пульпе. 1 — источник γ -лучей, 2 — труба, 3 — ионизационная камера, 4 — усилитель тока и измерительный прибор.

В гидротехническом строительстве, ведущемся в СССР в больших масштабах, широкое применение нашли земснаряды. Для контроля работы и повышения производительности земснаряда необходимо знать содержание грунта в водногрунтовой смеси в пульпе, проходящей по трубопроводу. Возникла задача разработать быстрый и надёжный метод определения концентрации грунта в пульпе. Эта задача была успешно решена Е. Г. Кардаш⁶⁸ в Научно-исследовательской лаборатории Коллоидзора и независимо С. В. Стародубцевым с сотрудниками⁶⁹ в Ленинградском физико-техническом институте.

На рис. 31 изображена схема прибора для определения плотности пульпы. Источник γ -лучей 1 — Co^{60} в свинцовом контейнере — помещается с одной, а ионизационная камера 2 с другой стороны трубопровода. γ -лучи проходят стенки трубы, слой пульпы толщиной x и попадают в ионизационную камеру. Электрический ток, возникаю-

ший в ионизационной камере, усиливается специальным усилителем 3 и измеряется стрелочным измерительным прибором 4, шкала которого проградуирована в процентах содержания грунта в пульпе.

Интенсивность γ -лучей, попадающих в ионизационную камеру, зависит от интенсивности падающих на трубу лучей, поглощения стенками трубы, пульпой и расстояния x . Как известно, энергия параллельного монохроматического пучка ослабляется по экспоненциальному закону. Поэтому интенсивность γ -лучей, прошедших через пульпу, определится уравнением

$$I = I_0 e^{-(\mu'_0 x + \mu_1 d)}. \quad (25)$$

Здесь I — интенсивность пучка, прошедшего через пульпу, I_0 — интенсивность пучка, падающего на пульпу, μ'_0 и μ_1 — коэффициенты поглощения воды и материала стенки, δ — плотность пульпы, d — толщина стенок трубы.

В случае заполнения трубы чистой водой интенсивность пучка I_1 , падающего в ионизационную камеру, равна:

$$I_1 = I_0 e^{-(\mu'_0 x + \mu_1 d)}. \quad (26)$$

Подставляя значение I_1 в уравнение (25), получим следующее выражение:

$$I = I_1 e^{[(\delta - 1) \mu_0 x]}. \quad (27)$$

Из формулы (27) следует, что интенсивность γ -лучей, попадающих в ионизационную камеру, убывает при возрастании плотности пульпы. Прибор позволяет измерять плотность пульпы от 1,5 до 1,9 с относительной ошибкой около 3%.

Вес прибора можно было бы уменьшить, если бы удалось снизить активность источника γ -лучей, что одновременно облегчило бы выполнение требований техники безопасности. С. В. Стародубцев построил переносный прибор, вес которого значительно снижен. Источником γ -излучения в этом приборе является радиоактивный кобальт. Для регистрации γ -лучей применяется счётчик с интегрирующей схемой и микроамперметром. Этот прибор предназначен для отыскания пробок, образуемых грунтом в трубопроводе.

Аналогичный метод был недавно применён для определения концентрации ила на дне рек и озёр⁷⁰. Так как концентрация ила сравнительно мала, то для её измерения нужно пользоваться мягкими γ -лучами с энергией около 50 кэв. Обычно используемые радиоактивные изотопы испускают γ -лучи большой энергии, а те изотопы, которые испускают γ -лучи малой энергии, распадаются слишком быстро. В связи с этим применение последних для решения данной задачи исключено. Поэтому в приборах для определения концентрации ила используется радиоактивный изотоп Sr^{90} со сравнительно тонким свинцовым экраном. Испускаемые изотопом β -частицы попадают в сви-

нец и вызывают образование в последнем тормозного рентгеновского излучения с энергией около 50 кэв. Эти лучи и используются для определения концентрации ила на установке, схема которой изображена на рис. 32. Прибор погружается в воду с судна, которое медленно движется в определённом направлении. Измерительный прибор, находящийся на судне, позволяет определить концентрацию ила вдоль трассы судна на различной глубине.

При проектировании водохранилищ, каналов, бассейнов для очистки воды и других гидротехнических сооружений важно знать, как

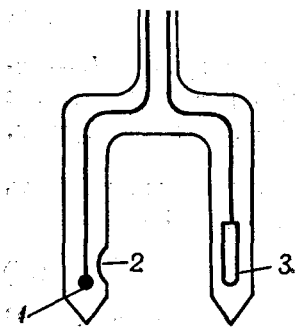


Рис. 32. Схема прибора для определения концентрации ила на дне рек и озёр. 1 — источник β-лучей, 2 — свинцовая пластинка, 3 — счётчик.

вливают очертания берегов, способ подачи и отвода воды и другие характеристики сооружений на распределение скоростей движения воды на различных глубинах и в различных направлениях. Для решения этой задачи целесообразно применять радиоактивные изотопы, характеризующиеся небольшим периодом полураспада, например бром (Br^{82}).

Этим методом⁷¹ было изучено распределение водных потоков в отстойном бассейне. Загрязнённая вода поступала по трубе в центр бассейна и медленно двигалась по радиусам, переливаясь через отстойную стенку. Твёрдые частицы, взвешенные в воде, медленно оседали на дно бассейна. В различных местах бассейна на различной глубине были размещены счётчики Гейгера — Мюллера. В трубу, по которой поступала вода, вводилось небольшое количество раствора бромистого натрия (NaBr^{82}). Далее записывалось изменение со временем активности, регистрируемой счётчиками. По полученным таким образом кривым зависимости активности от времени в различных местах бассейна была определена картина распределения потоков воды. Струи воды двигались от центра к периферии вдоль дна бассейна, а в верхних слоях наблюдались завихрения, что не способствовало нормальному осаждению загрязнений. Изменение профиля дна и формы трубы, подающей воду, привело к устранению завихрений. Исследование счётчиками изменения активности со временем по окружности бассейна позволило доказать, что скорости движения воды по различным радиусам отличались друг от друга. В другом отстойном бассейне, как было определено опытами с применением радиоактивного брома, потоки воды равномерно распределялись по всей окружности.

Недавно был разработан метод определения профиля фронта текущей жидкости при помощи радиоактивных изотопов⁷² без взятия проб. Методика сводится к заполнению части трубы жидкостью,

в которой растворено небольшое количество вещества, содержащего радиоактивный изотоп, испускающий γ -лучи. Другая часть трубы заполнена немеченым раствором. Как известно, при движении жидкости её скорость v зависит от расстояния y от стенки. В случае ламинарного потока в трубе с круглым сечением эта скорость определяется формулой

$$\frac{v}{v_0} = 4 \left[\frac{y}{d} - \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right], \quad (28)$$

где v_0 — максимальная скорость в центре трубы, а d — диаметр трубы.

Рядом с трубой устанавливается сцинтилляционный счётчик так заэкранированный свинцом, что он регистрирует только импульсы, испускаемые из сравнительно тонкого слоя жидкости. Можно показать, что скорость счёта I в момент времени t и скорость счёта I_0 до начала движения жидкости, когда всё сечение трубы заполнено меченым раствором, связаны формулой

$$\frac{I}{I_0} = 4 \left[\frac{y}{d} - \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right]. \quad (29)$$

Производя измерения скорости счёта в различные моменты времени, можно при помощи уравнений (28) и (29) рассчитать распределение скоростей жидкости в трубе. Для таких измерений в качестве радиоактивного изотопа удобно применять Na^{24} .

Можно не сомневаться, что радиоактивные изотопы найдут применение также для решения ряда других важных задач в гидротехническом строительстве.

В приведённом выше кратком обзоре применения радиоактивных изотопов в строительной промышленности освещён ряд результатов, полученных в СССР и за рубежом. Эти результаты уже в настоящее время позволяют улучшить контроль и удешевить проведение строительных работ. Однако работы в этой области начались только несколько лет тому назад. Дальнейшее развитие этих методов и внедрение радиоактивных изотопов в практику исследовательской и производственной работы в строительной промышленности, несомненно, дадут много новых результатов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Б. Нейман и Ан. Н. Несмеянов, Успехи химии 17, 401 (1948).
2. М. Б. Нейман, Химия в школе, № 4, 20 (1953).
3. Сборник «Применение меченых атомов в аналит. химии» под ред. А. П. Виноградова, изд. АН СССР, М., 1955.
4. И. Н. Верховская, Успехи совр. биологии 21, 677 (1948).
5. О. Хан, Терапевтическое применение радиоактивных изотопов, ИЛ, М., 1948.
6. И. Г. Петренко, Изв. АН, Отд. техн. наук, № 1, 34 (1953).
7. Г. П. Миклухин и А. Ф. Ракашева, Хим. пром., № 2, 15 (1952).

8. И. Аладьин и Н. Добротин, Газета «Известия» за 1 авг. 1953.
9. G. H. Guest, *Radioisotopes-Indust. Applications*, Pitman, 1951.
10. М. Б. Нейман, Природа, № 10, 17—27 (1954).
11. М. Б. Нейман, Вестник машиностроения, № 4, 34 (1954).
12. Сборник «Применение радиоактивных изотопов в металлургии», Гос. научно-техн. изд. литературы по чёрной и цветной металлургии, М., 1955.
13. Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии 1—5 июля 1955 г.; заседания Отд. техн. наук, изд. АН СССР, М., 1955.
14. Сборник «Применение метода меченых атомов в физике и технике» под ред. В. Г. Васильева, ИЛ, М., 1955.
15. Н. И. Штейнбок, УФН 54, № 2, 131 (1954).
16. М. Б. Нейман, Измерительная техника, № 1, 14 (1955).
17. М. Б. Нейман, Станки и инструмент 26, № 4, 1 (1955).
18. J. W. Spinks, H. W. Baldwin, T. Thorwaldsen, *Canad. Journ. of Technology* 30, № 2—3, 20 (1952).
19. L. H. Gevartman, D. Sam, *Canad. Journ. of Technology* 33, № 2, 122 (1955).
20. А. А. Лбов, УФН 42, 409 (1950).
21. Л. А. Шварцман, П. П. Грузин, С. А. Печенев, Сборник «Проблемы металловедения и физики металлов», Гос. научно-техн. изд. литературы по чёрной и цветной металлургии, М., 1952.
22. Г. И. Логгинов, Т. Ю. Любимова и М. А. Шашковская, ДАН 100, 247 (1954).
23. U. Brune, R. Lindner, *Arkiv for Kemi* 5, № 3, 277 (1953).
24. F. W. Kittrell, *Journ. Amer. Concrete Inst.* 25, № 5, 393 (1954).
25. А. М. Смирнова и П. А. Ребиндер, ДАН 96, № 1, 107 (1954).
26. L. H. Campbell, L. R. Snoko, J. D. Struthers, *Bell Laboratories Record* 28, № 6, 249 (1950).
27. J. Martelli, P. Sue, *Bull. Soc. Chim. France* 157, 103 (1946).
28. M. Ardenne, F. Bernhard, *Zeits. f. Phys.* 122, 740 (1944).
29. J. Curie, *J. Phys. et Radium* 13, 497 (1952).
30. Ан. Н. Несмеянов, Сборник «Радиохимия», Изд. МГУ, 83 (1952).
31. М. Б. Нейман и В. Б. Миллер, УФН 50, 93 (1953).
32. P. Z. Pinnote, D. E. Hull, E. J. Mc Langlin, *Quart., Trans. S. A. E.*, June 4, 52 (1949).
33. Ю. С. Заславский, Г. И. Шор, Ф. Б. Лебедева, Изв. АН СССР, Отд. техн. наук, № 11, 1598 (1953).
34. Д. В. Высотский, В. С. Забельский, Автомобильная и тракторная промышленность, № 9, 11 (1953).
35. H. Jackson, F. Burk, L. Test, A. Cowell, S. A. E., *Quart. Trans.* 3 (1952).
36. Ю. С. Заславский, Г. И. Шор, Изв. АН СССР, Отд. техн. наук, № 4, 43 (1955).
37. Ю. С. Заславский, Г. И. Шор, Ф. Б. Лебедева, Известия АН СССР, Отд. техн. наук, № 1, 54 (1954).
38. Г. В. Акимов, Основы учения о коррозии и защите металлов, Металлургиздат, 1946.
39. J. Bardeen, W. H. Brattain, W. Shokly, *J. Chem. Phys.* 14, 714 (1946).
40. М. Б. Нейман, Наука и жизнь, № 6, 28 (1951).
41. E. Clarke, J. R. Carlin, W. E. Barbour, *Electr. Eng.* 70, 35 (1951).
42. L. R. Zimmwalt, *Nucleonics* 12, № 1, 55 (1954).
43. N. F. Mott, *Proc. Roy. Soc. A* 135, 429 (1932).
44. *Atomics* 2, № 4, 112 (1951).

45. А. В. Бибергаль, В. В. Бочкарёв, Б. М. Исаев, У. Я. Моргулис, Г. М. Франк, Применение радиоактивного кобальта для целей гамма-дефектоскопии, изд. АН СССР, 1951.
46. С. В. Румянцев, Ю. А. Григорович, Контроль качества металлов гамма-лучами, Металлургиздат, М., 1954.
47. Л. К. Таточенко, С. В. Медведев, Промышленная гамма-дефектоскопия, Металлургиздат, 1955.
48. E. J. Duffy, Trans. Inst. Eng. and Shipbuilders 96, № 2, 34 (1953).
49. J. Gueron, Nucleonics 9, № 5, 53 (1951).
50. J. L. Putman, S. Jefferson, Application of radioisotopes to leakage and hydraulic problems, Доклад на Женевской конференции, 1955.
51. R. K. Bernhard, D. Berdan, Nucleonics 8, № 4, 78 (1951).
52. П. Н. Кодочигов и К. В. Юрьев, Изв. АН СССР, Отд. техн. наук, № 8, 148 (1955).
53. D. J. Belcher, T. R. Cuykendall, H. S. Sack, Nucleonics 8, № 4, 78 (1951).
54. J. Belcher, Frost in Soil A, Symposium, Washington, 1952.
55. D. A. Lane, B. V. Torchinsky, J. W. T. Spinks, The Engineering Journ. Canada 36, № 1, 1 (1953).
56. Civil Engineering 48, № 564, 551 (1953).
57. J. W. T. Spinks, D. A. Lane, B. V. Torchinsky, Canad. Journ. of Technology 29, № 7, 371 (1951).
58. J. Scharpe, Brit. Journ. Appl. Phys. 4, № 3, 93 (1953).
59. В. Н. Кондратьев, УФН 34, 169 (1948).
60. Н. А. Перьков, Разведка недр 2, 59 (1946).
61. Г. В. Горшков, Н. М. Лятковская, ДАН СССР 55, № 7, 607 (1947).
62. Ю. П. Булашевич, Изв. АН, серия географич. и геофизич. 12, 155 (1948).
63. Г. В. Горшков, Н. М. Лятковская, Вестник Ленинград. ун-та, № 2, 51 (1946).
64. Chem. Eng. News 29, 2914 (1951).
65. W. Fuchs, Zeits. f. angew. Phys. 4, 51 (1952).
66. E. V. Roberts, L. E. Schilberg, Journ. Appl. Phys. 22, 233 (1951).
67. О. Хан, Прикладная радиохимия, Госхимиздат, 1947.
68. Е. Г. Кардаш, В. С. Соколов, Электрические станции, № 2, 18 (1954).
69. Е. Черевков, Огонёк, № 12, 13 (1955).
70. Nucleonics 12, № 10, 72 (1954).
71. A. Montens, Radioisotope Conference, 1954, т. II, London, Butterworths Scient. Publ., стр. 169.
72. F. M. Richardson, J. K. Ferrell, H. A. Lamonds, K. O. Beatty, Nucleonics 13, № 7, 21 (1955).
73. Г. И. Логгинов и О. М. Хусаинова, Информационный сборник НИИ Цемента, № 27 (1956).
74. Д. Е. Польшин и С. И. Носаль, Научно-технический бюллетень НИИ-100, № 16 (1955).