

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ГАММАСКОПИИ

Л. Г. ПОЛОЗОВА,

кандидат географических наук

Р. П. РЕЙЗМАН,

кандидат технических наук

Знание закономерностей, которым подчиняются процессы миграции влаги в капиллярно-пористых коллоидных телах, является необходимым условием для решения ряда задач в теории сушки, строительной физике и некоторых других отраслях науки. Благодаря работам А. В. Лыкова и его школы [1], вопросы массообмена, частным случаем которых являются и процессы миграции влаги, теоретически достаточно хорошо разработаны для большинства наиболее важных задач, имеющих прикладное значение в технике.

Однако методика определения коэффициентов переноса влаги несовершенна и до сего времени основывается на определении влажности материала путем высушивания соответствующих проб до постоянного веса. Таким образом, необходимым условием измерения влажности материала в настоящее время является нарушение его целостности, что ведет к необходимости прекращения эксперимента с данным образцом материала и делает невозможным повторное проведение определений.

Отсутствие метода определения влажности материала, аналогичного, например, методам определения температуры тела термометрами или термопарами, т. е. без прекращения хода эксперимента и нарушения целостности образца, стало серьезным препятствием на пути познания закономерностей процессов массопереноса. Рекомендуемые в литературе [1, 2] методы определения количества влаги, перемещенной под действием температурного градиента, основаны на предположении о линейном изменении влажности вдоль исследуемого образца, что в ряде случаев, например при наличии в образце отрицательных температур, не соответствует действительности. Испробованные электрические методы дали положительные результаты только при температуре выше 0°C и не для всех материалов.

Ознакомление с методами гаммадефектоскопии металлов, получившими широкое распространение, позволило предположить, что идея этого метода применима и для определения влажности строительных материалов. Опубликованные вскоре работы об использовании гамма-излучения для определения влажности и плотности грунтов [3, 6] подтвердили правильность этих предположений.

В результате ряда поисковых работ авторами была выработана методика определения влажности строительных материалов без введения внутрь образцов каких-либо датчиков или взятия проб. Определение влажности может производиться без прекращения хода эксперимента, что позволит изучать и динамику процесса массообмена. Использование метода гаммаскопии основано на следующих предположках.

Как известно, распаду радиоактивных изотопов ряда элементов сопутствует так называемое гамма-излучение, представляющее собой поток фотонов жесткого электромагнитного излучения, подобного видимым и рентгеновским лучам, но обладающих более короткой длиной волны. Благодаря малой длине волны, γ -кванты обладают большой проникающей способностью и могут проходить через большие толщи материалов, измеряемые метрами. При столкновении γ -квантов с атомами вещества возникает вторичное, более мягкое γ -излучение, могущее в свою очередь вызвать третичное и последующие излучения, вплоть до полного поглощения энергии первичного фотона атомами вещества.

Если первичное излучение исходит непосредственно из массы радиоактивного вещества, то источником вторичного и последующих излучений

может быть любой атом предмета, на который попал первичный γ -квант. Поэтому все предметы, находящиеся вблизи от радиоактивного вещества, становятся практически источниками более мягкого, рассеянного γ -излучения, что необходимо учитывать при постановке эксперимента.

В тех случаях, когда счетчик γ -квантов защищен от рассеянного излучения и производит регистрацию только первичных фотонов, принято считать, что имеет место так называемый «узкий» пучок γ -квантов, в отличие от «широкого», когда на счетчик попадают не только первичное, но и последующие излучения.

Монохроматический узкий пучок γ -квантов, т. е. содержащий фотоны только одной энергии, при прохождении через вещество ослабляется по экспоненциальному закону, выражаемому формулой

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

где I_0 — интенсивность излучения, измеряемая счетчиком в отсутствие поглотителя;

I — то же, но после прохождения слоя поглотителя толщиной d см;

μ — линейный коэффициент ослабления интенсивности излучения;

e — основание натуральных логарифмов.

Графически зависимость в координатах «толщина поглотителя» (ось абсцисс) — «натуральный логарифм интенсивности излучения после прохождения через поглотитель» (ось ординат) для монохроматического излучения выражается прямой линией.

Если же пучок γ -квантов, испускаемых радиоактивным веществом, состоит из нескольких монохроматических пучков, то поглощение каждого из них подчиняется этому же экспоненциальному закону. На графике в осях координат «толщина поглотителя — натуральный логарифм интенсивности излучения» зависимость между этими величинами для полихроматического узкого пучка будет выражаться кривой линией, что и является наиболее простым признаком, позволяющим отличать монохроматический пучок от полихроматического.

Величина линейного коэффициента ослабления для данного вещества зависит только от энергии γ -излучения и может быть определена экспериментально или же взята из соответствующих таблиц, приводимых в литературных источниках [3].

При прохождении узкого пучка γ -лучей через несколько слоев различных веществ закономерность ослабления пучка при прохождении через первый слой вещества может быть выражена формулой (1).

Как показывают эксперименты, при прохождении этого же, но уже ослабленного пучка через слой другого вещества закономерность ослабления пучка также может быть выражена — с достаточной для практических целей точностью — аналогичной формулой

$$I_2 = I_1 e^{-\mu_2 d_2};$$

при прохождении через слой третьего вещества соответственно

$$I_3 = I_2 e^{-\mu_3 d_3} \text{ и т. д.}$$

Тогда суммарное ослабление узкого пучка γ -лучей при прохождении через n слоев различных веществ может быть выражено формулой

$$I_n = I_0 e^{-\mu_1 d_1 - \mu_2 d_2 - \mu_3 d_3 \dots - \mu_n d_n}, \quad (2)$$

где d_n — толщина слоя поглощающего вещества;

μ_n — линейный коэффициент ослабления интенсивности излучения для вещества данного слоя;

I_0 — интенсивность излучения, измеряемая счетчиком при отсутствии поглотителя;

I_n — то же, но после прохождения через n слоев различных веществ.

При проведении экспериментов не было обнаружено влияния взаимного расположения слоев вещества на уменьшение интенсивности излучения, в связи с чем коэффициент линейного ослабления интенсивности излучения для данного вещества можно считать величиной постоянной.

Это позволяет полагать, что при прохождении узкого пучка γ -лучей через увлажненное вещество ослабление интенсивности излучения будет таким же, как если бы пучок лучей прошел сначала через слой сухого вещества, а затем через слой воды, соответствующий количеству влаги во влажном материале. Таким образом, коэффициент линейного ослабления для воды и для сухого вещества практически есть величина постоянная, не зависящая от взаимного положения атомов и молекул этих веществ, но зависящая от энергии γ -квантов. Тот же вывод был получен и другими исследователями.

Из вышеизложенного следует, что, зная ослабление интенсивности узкого пучка γ -квантов после прохождения его через сухое вещество, выражаемое зависимостью

$$I_{\text{сух}} = I_0 e^{-\mu_{\text{сух}} d_{\text{сух}}} \quad (3)$$

и ослабление интенсивности после прохождения пучка лучей через влажное вещество, выражаемое зависимостью *

$$I_{\text{вл}} = I_0 e^{-\mu_{\text{сух}} d_{\text{сух}} - \mu_{\text{воды}} d_{\text{воды}}}, \quad (4)$$

можно (при известной величине линейного коэффициента поглощения для воды и $\mu_{\text{сух}}$ из первого определения) рассчитать толщину слоя воды, эквивалентного количеству содержащейся в материале влаги, т. е. определить влажность материала.

Возможно и более простое решение задачи по формуле

$$I_{\text{вл}} = I_{\text{сух}} e^{-\mu_{\text{воды}} d_{\text{воды}}}. \quad (5)$$

В последнем случае $I_{\text{сух}}$ можно определить путем гаммаскопии высушенного после окончания опытов образца или — при однородных материалах — на основании гаммаскопии образца-близнеца. Значение μ для воды обычно принимается по литературным данным равным 0,063 1/см.

На основании вышеизложенных теоретических соображений была собрана установка для определения влажности материала путем гаммаскопии, изображенная схематически на рис. 1.

Источник γ -излучения помещается в свинцовый цилиндр («пушку»). Толщина стенок пушки выбирается в зависимости от активности источника и должна обеспечивать защиту исследователя от излучения. При применявшемся источнике Co^{60} активностью около 7 милликюри стенки пушки имели толщину 4—6 см.

Счетчик γ -квантов (использовались обычные счетчики типа АММ-4, МС-7, СТС-5) помещается для уменьшения фона и снижения влияния рассеянного излучения в свинцовый домик с каналом для приема пучка γ -лу-

* Зависимость (4) составлена на основании выражения (2).

чей. Счетчик через обычный усилительный блок типа БГС присоединяется к стандартной пересчетной установке типа ПС-64, достаточно подробно описанной в литературе [7].

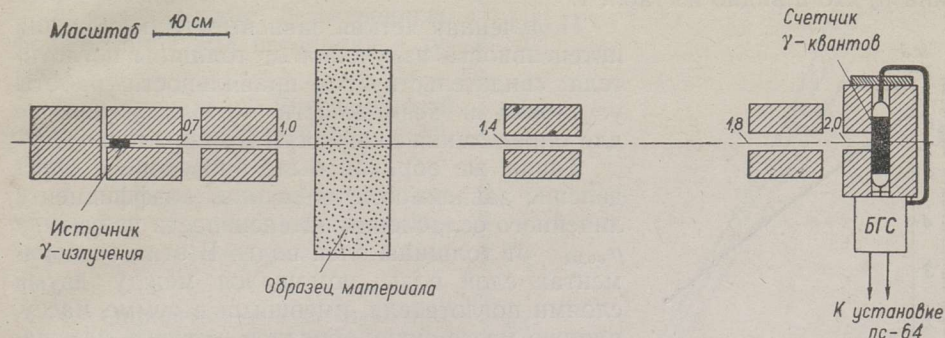


Рис. 1. Схема установки для определения влажности материалов методом гаммаскопии.

Расположение счетчика вдоль или поперек пучка излучения заметного влияния на точность эксперимента не оказывало.

Для получения узкого пучка γ -квантов на пути их распространения устанавливаются свинцовые диафрагмы. Отверстия диафрагм, равно как и каналы пушки и домика, соответствуют выделяемому пучку γ -лучей, имеющему, вследствие различия диаметров источника и счетной трубки, конусообразную форму.

Как показали опыты, наличие трех свинцовых диафрагм толщиной 9—10 см практически полностью защищает счетчик от рассеянного излучения и является обязательным для успеха эксперимента.

Исследуемый образец помещается ближе к источнику излучения, чем к счетчику. При таком положении образца диафрагмы лучше защищают счетчик от вторичного рассеянного излучения, возникающего в образце. Расстояние между источником γ -излучения и счетчиком не должно быть слишком малым во избежание чрезмерно большой коничности пучка γ -лучей. В описываемых опытах вполне удовлетворительные результаты были получены при расстояниях между источником и счетчиком в 1 м. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к уменьшению числа регистрируемых γ -квантов (пропорционально квадрату расстояния) и вместе с тем не повышает в сколько-нибудь заметной степени точность получаемых результатов.

При указанных условиях естественный фон для счетчика типа МС-7 составлял 10 импульсов в минуту и для счетчика СТС-5 — 4 имп/мин. Интенсивность пучка γ -лучей в отсутствие поглотителя* (I_0) составляла 500—600 импульсов в минуту и зависела от положения препарата Co^{60} в пушке и ряда других, главным образом геометрических факторов.

Для проверки правильности работы установки была произведена гаммаскопия стальных пластин в количестве 1, 2, 3, 4 и 5 штук, сложенных пакетом. На основании полученных результатов (табл. 1) найдена зависимость изменения интенсивности γ -излучения от толщины поглотителя (стальных пластин), представленная графически на рис. 2.

Как видно из рисунка, линия, отражающая зависимость между толщиной поглотителя и натуральным логарифмом интенсивности ослабленного пучка γ -лучей, не есть прямая. Это объясняется тем, что пучок γ -квантов,

* Поглощение воздухом настолько незначительно, что им обычно пренебрегают.

испускаемых Co^{60} , состоит из двух линий с энергиями соответственно равными 1,17 Мэв и 1,33 Мэв, т. е. не является монохроматическим. Благодаря этому с изменением толщины поглотителя должна изменяться и величина μ , что и видно из табл. 1.*

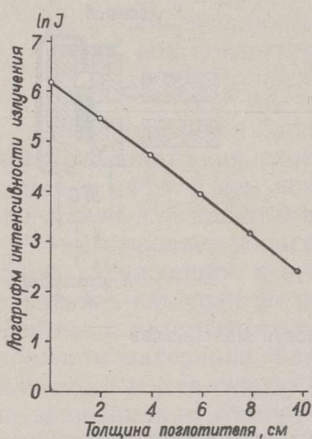


Рис. 2. Зависимость ослабления интенсивности γ -излучения Co^{60} от толщины поглотителя (сталь).

Полученная четкая зависимость ослабления интенсивности излучения от толщины поглотителя свидетельствует о правильности работы установки и возможности использования ее для определения влажности материалов.

Таким же образом было проведено и определение зависимости величины коэффициента линейного ослабления интенсивности излучения $\mu_{\text{воды}}$ от толщины слоя воды. В этих экспериментах слой воды помещался между двумя слоями поглотителя, имевшими в сумме массу, равную массе сухих образцов, которые намечались к испытанию. В результате нескольких определений (около 15) было установлено, что величина $\mu_{\text{воды}}$ может быть принята равной 0,063 1/см**. Эта величина хорошо согласуется с литературными данными [3, 4].

На рис. 3 в полулогарифмических координатах графически изображена зависимость между относительной интенсивностью излучения и толщиной слоя воды для пучка γ -лучей, прошедших также и через слой поглотителя. Нуль оси абсцисс на графике соответствует ослаблению γ -лучей сухим материалом.

Таблица 1

Поглотитель	Толщина, см	Коэффициент поглощения μ , 1/см
Пластина I	1,95	0,374
Пластины I + II	3,93	0,375
" I + II + III	5,92	0,382
" I + II + III + IV	7,92	0,385
" I + II + III + IV + V	9,92	0,382

На графике нанесены результаты трех серий опытов, в которых геометрия установки несколько различалась, благодаря чему изменялась и интенсивность излучения. Наиболее достоверными являются данные кривой 3, полученные при наилучшей геометрии установки. Изображенные на графике кривые всех трех серий имеют незначительную кривизну вследствие уже указанных при анализе рис. 2 причин. Поскольку изменение величины линейного коэффициента поглощения в зависимости от толщины поглотителя при немонохроматическом пучке γ -лучей Co^{60} не выходит за пределы ошибок определений, этим изменением можно пренебречь и считать зависимость линейной.

Определение по этому графику толщины слоя воды (или влажности материала) не представляет затруднений и производится на основании полученной из опыта величины отношения $I_{\text{вл}}/I_{\text{сух}}$.

* Следует, однако, отметить, что изменения величины μ не выходят за пределы вероятной ошибки определений, составляющей 0,5%.

** В отдельных случаях наблюдались колебания в пределах от 0,060 до 0,067 1/см за счет ошибок измерения.

Методика проведения опыта по определению влажности материала сводится к следующим операциям:

1. Определение естественного фона в отсутствие источника γ -лучей;

2. Определение интенсивности излучения I_0 в отсутствие поглотителя;

3. Определение интенсивности излучения $I_{\text{сух}}$ при пропускании пучка γ -лучей через сухой образец; *

4. Определение $I_{\text{вл}}$ при пропускании пучка γ -лучей через увлажненный образец;

5. Для контроля работы установки — определение I_0 в отсутствие поглотителя;

6. Определение естественного фона в отсутствие источника γ -лучей.

Время определения величины I выбирается в соответствии с желаемой точностью получения результатов на основании известной формулы [7]

$$A = \frac{N}{t} \pm \frac{\sqrt{N}}{t}, \quad (6)$$

где N — число сосчитанных импульсов;
 t — время определения числа импульсов;
 A — число импульсов в минуту.

Общее число сосчитанных импульсов рекомендуется выбирать в пределах 10—20 тысяч. В этом случае ошибка в подсчете импульсов вследствие флюктуаций будет менее 1—2%.

Вероятная ошибка при определении числа импульсов определяется выражением

$$F_{\text{вер}} = \pm 0,67\sqrt{N}. \quad (7)$$

Фактическая ошибка измерения принимается в соответствии с вычисленной по формуле

$$F_{\text{факт}} = \pm \sqrt{\frac{\sum(a - a_{\text{ср}})^2}{n(n-1)}}, \quad (8)$$

где n — число измерений (в тех случаях, когда проводилось, например, 10 измерений в течение 5 минут каждое);

a — число импульсов в минуту в каждом отдельном измерении;

$a_{\text{ср}}$ — среднее число импульсов в минуту для всех измерений.

Для повышения точности полученных результатов необходимо отбрасывать число импульсов, приходящихся на естественный фон.

Проведенные методом гаммаскопии определения влажности образцов

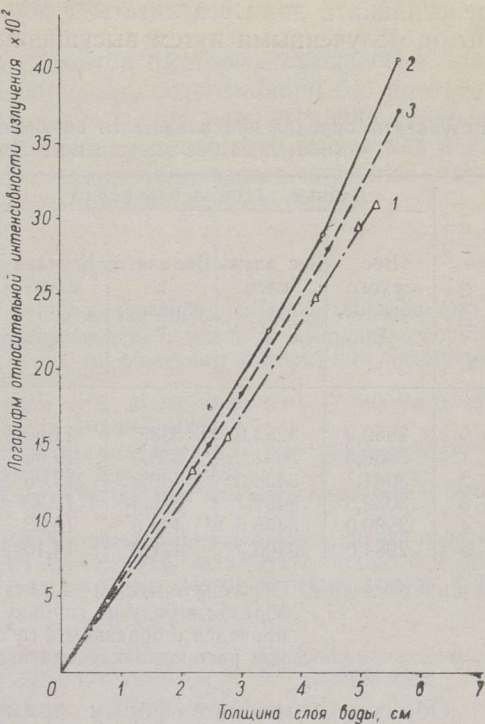


Рис. 3. Зависимость ослабления интенсивности γ -излучения от толщины слоя воды.

* В случае необходимости определение $I_{\text{сух}}$ может производиться и после окончания эксперимента.

пеносиликата дали результаты (табл. 2), хорошо согласующиеся с данными, полученными путем высушивания образцов.

Таблица 2

Результаты определения влажности образцов пеносиликата размером $10 \times 10 \times 30$ см (объемный вес высушенного при 105° материала 1000 кг/м^3)

№ опыта	Данные весовых измерений				Данные гаммаскопии		Разность между весовой влажностью, определенной взвешиванием и методом гаммаскопии, %
	Вес сухого образца, г	Вес влажного образца, г	Вес влаги в образце, г	Весовая влажность, %	Вес влаги в образце, определенный путем расчета, г	Весовая влажность, %	
0	2950,0	3283,0	333,0	11,30	390	13,21	+ 1,91
1	3056,5	3641,5	585,0	19,00	535	17,52	- 1,48
2	3064,7	3434,0	369,3	12,05	370	12,08	+ 0,03
3	3032,6	3402,1	370,5	12,23	375	12,35	+ 0,12
4	2989,0	3465,6	476,6	15,93	390	13,04	- 2,89
5	2984,0	3405,2	421,2	14,10	429	14,36	+ 0,26

Примечание. Образцы опытов 0—4 увлажнялись путем погружения торцевой части образца в воду на глубину 2—3 см (капиллярная диффузия). Опыт 5 проведен с образцом 4-го опыта, имевшим после пропарки равномерное распределение влаги.

Образцы, имеющие форму прямоугольных призм, просвечивались узким пучком γ -лучей в 7 точках, расположенных на равных расстояниях в плоскости симметрии образца. Просвечивание производилось в сухом и увлажненном состоянии образца.

При вычислении влажности образцов [по формуле (1)] значение коэффициента поглощения для воды ($\mu_{\text{воды}}$) принималось равным $0,063 \text{ 1/см}$, а также предполагалось, что распределение влажности материала в просвечиваемом сечении равномерно. Общее влагосодержание образца определялось планиметрированием на основании полученных данных о толщине слоя в каждом сечении. Наибольшее расхождение в данных, полученных взвешиванием и методом гаммаскопии, не превосходит 3% весовой влажности. Такой результат следует считать вполне удовлетворительным.

При измерении малых влажностей материалов в вычислениях приходится сталкиваться со следующим обстоятельством.

Преобразовывая формулу (5) в удобный для вычисления вид, имеем:

$$\ln \frac{I_{\text{вл}}}{I_{\text{сух}}} = - \mu_{\text{воды}} d_{\text{воды}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{вл}}$ и $I_{\text{сух}}$ мало отличаются друг от друга по величине, что (при неизбежных ошибках счета числа импульсов вследствие флуктуаций) должно снижать точность определений.

Если же вместо Co^{60} ($\mu_{\text{воды}} = 0,063 \text{ 1/см}$) применять другие радиоактивные изотопы с более мягким излучением, например цезий Cs_{55}^{137} (энергия излучения $0,663 \text{ Мэв}$) или европий Eu_{63}^{155} (энергия излучения $0,100 \text{ Мэв}$), то для них, согласно данным работы [3], значения $\mu_{\text{воды}}$ будут соответственно равны $0,085 \text{ см}^{-1}$ и $0,165 \text{ см}^{-1}$. Таким образом, при одинаковом слое воды, в выражении (9) величина соотношения $\ln \frac{I_{\text{вл}}}{I_{\text{сух}}}$ увеличится соответственно в 1,3 и 2,6 раза, т. е. значительно повысится точность определений.

Заклучение

Разработан достаточно надежный метод быстрого определения влажности строительных материалов в образцах, позволяющий без прекращения хода эксперимента и разрушения образца или введения в образец каких-либо датчиков следить за изменением влажности материала в данном сечении. Этим в значительной степени облегчается изучение закономерностей миграции влаги и массопереноса в твердых телах.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лыков, Явления переноса в капиллярно-пористых телах, Москва, 1954.
2. И. И. Бабьев, Коэффициенты переноса тепла и влаги в капиллярно-пористых коллоидных телах (новый метод определения), Автореферат диссертации, Москва, 1954.
3. А. В. Бибергаль, У. Я. Маргулис, Е. И. Воробьев, Защита от рентгеновых и гамма-лучей, Медгиз, Москва, 1955.
4. М. И. Побединский и А. И. Старшинин (ред.), Лечебное применение радиоактивного кобальта, Медгиз, Москва, 1955.
5. А. И. Данилин, Измерение влажности почвы при помощи гамма-лучей, Почвоведение, № 7, 1956.
6. П. И. Кодочигов, К. В. Юрьев, К определению плотности грунта просвечиванием гамма-лучами, Изв. АН СССР, Отд. технических наук, № 8, 1955.
7. И. Н. Верховская, Н. А. Габелова и др., Метод меченых атомов в биологии, Изд. МГУ, 1955.

Институт строительства и строительных материалов
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
31 VII 1956

MATERJALIDE NIISKUSE MÄÄRAMINE GAMMASKOOPIA ABIL

L. Polozova,
geograafiateaduste kandidaat

R. Reisman,
tehniliste teaduste kandidaat

Resümee

Niiskuse migratsiooni uurimisel tahketes kehaes, antud juhul ehitusmaterjalides, määrati seni materjalide niiskus vastavatest katsekehast proovide võtmise ja kuivatamise teel. Sealjuures purustati katsekehad ja katse kordamine osutus võimatuks.

Kirjanduses soovitatud meetodid niiskuse hulga liikumise määramiseks temperatuuri gradiendi mõjul põhinevad oletusel, et niiskuse muutumine on lineaarne piki katsekeha. Ehitusmaterjalide suhtes aga vastab see harva tõelususele. Instituudis katsetatud mitmesuguste ehitusmaterjalide niiskuse määramise meetodid, mis põhinevad materjali oomilise takistuse või dielektrilise konstandi mõõtmisel, osutusid väga keerulisteks ja mittesobivateks.

Metallide γ -defektoskoopia meetodiga tutvumine ja rida sel alal tehtud rekognosseeriva iseloomuga töid võimaldasid välja töötada ehitusmaterjalide niiskuse määramise meetodika, mis põhineb radioaktiivsete isotoopide γ -kiirgusel. Nimelt on radioaktiivsete isotoopide γ -kiirgusel omadus nõrgeneda mingisuguse keskkonna läbimisel.

Materjalides niiskuse suurenemisel nõrgeneb ahendatud γ -kiirte vihu intensiivsus tuntud eksponentsiaalseaduse järgi:

$$I_n = I_k e^{-\mu_{\text{vesi}} d_{\text{vesi}}}$$

Kindlaks määrates ahendatud γ -kiirte vihu intensiivsuse, mis läbib kuiva (I_k) ja niisket (I_n) keha, ning teades vee lineaarset neeldumise koefitsienti (μ_{vesi}), võib leida veekihi (d_{vesi}) paksuse antud lõikes, s. o. kindlaks määrata materjali niiskust.

γ -kiirte intensiivsuse määramiseks kasutatakse standardset impulsside lugemise seadet (tüüp B).

Ülalkirjeldatud meetod võimaldab pidevalt vaadelda niiskuse muutumist materjalis ja soodustab edaspidist niiskuse ülekande protsesside uurimist.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Ehituse ja Ehitusmaterjalide Instituut

Saabus toimetusse
31. VII 1956

BESTIMMUNG DER FEUCHTIGKEIT DER MATERIALIEN VERMITTELST DER GAMMASKOPIE

L. Polozova, R. Reisman

Zusammenfassung

Es ist eine Methode ausgearbeitet worden, die es erlaubt, den Feuchtigkeitsgrad der Baumaterialien bequem und zuverlässig zu bestimmen. Dabei ist es nicht nötig, das Probestück zu zerstören oder Fremdkörper in sein Inneres einzuführen.

Die Methode beruht auf der Fähigkeit der Gammastrahlen radioaktiver Isotopen, beim Durchdringen verschiedener Stoffe eine verschiedenartige Abschwächung zu erfahren.

Mit zunehmender Feuchtigkeit des Materials nimmt die Intensität eines schmalen Bündels von Gammastrahlen nach folgender Gesetzmässigkeit ab:

$$I_{\text{feucht}} = I_{\text{trocken}} \cdot e^{-\mu_{\text{Wasser}} \cdot d_{\text{Wasser}}}.$$

Die Stärke der Wasserschicht (d), also auch die Feuchtigkeit des Materials, kann berechnet werden, wenn die Intensität der Gammastrahlen beim Durchdringen des trockenen Stoffs (I_{trocken}) und des feuchten (I_{feucht}) ermittelt worden und der Koeffizient der linearen Absorption für Wasser (μ_{Wasser}) bekannt ist.

Die Methode erlaubt es, Veränderungen im Feuchtigkeitsgrad der Materialien ständig zu überwachen und erschliesst weite Perspektiven für Forschungsarbeiten im Gebiet der Feuchtigkeitsübertragung.

Institut für Bauwesen und Baumaterialien
der Akademie der Wissenschaften der Estnischen SSR

Eingegangen
am 31. Juli 1956