

## К ТЕОРИИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ТЕЛ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ ТИПА БЕТОНА

В. А. ВОРОБЬЕВ, Ю. Д. ГАВКАЛОВ

(Представлена объединенным научным семинаром секторов ДСМ и МРД).

Повышение экономической эффективности строительства с использованием сборных железобетонных конструкций определяет необходимость разработки теории и техники неразрушающих методов контроля применительно к неоднородным материалам типа бетона. Одним из таких методов является просвечивание изделий тормозным излучением бетатрона. Как показали исследования [1], созданные в Томском политехническом институте переносные, передвижные и стационарные бетатроны успешно могут быть применены для выявления несплошностей и элементов армирования и скрытых коммуникаций в бетонных изделиях толщиной до 2 м. В настоящей статье рассматриваются основные положения теории радиационной дефектоскопии неоднородного материала типа бетона и методики экспериментального исследования выявляемости несплошности в бетоне.

Общим условием обнаружения дефекта в прямых методах регистрации информации при просвечивании изделий является

$$\Delta U = \kappa \delta_U, \quad (1)$$

где  $\Delta U$  — величина сигнала на выходе регистрирующей системы, вызванного дефектом,

$\delta_u$  — приведенные к выходу среднеквадратичные шумы, обусловленные различными случайными процессами всей системы в целом (в предположении отсутствия их корреляций),

$\kappa$  — коэффициент вероятности обнаружения.

В отличие от системы с однородным поглотителем при просвечивании бетона преобладающими по уровню шумов являются флуктуации интенсивности излучения  $\delta J$ , за слоем бетона вызванные неоднородностью его структуры.

При случайном гауссовском распределении мелких воздушных пор, мелкого заполнителя (песка) по объему обусловленные последним флуктуации  $\delta J$  имеют порядок статистических флуктуаций поглощения излучения слоем однородного материала. Поэтому вся величина  $\delta J$  определяется неравномерным распределением крупного заполнителя (гравия, щебня) в квазиоднородной среде (вода + цемент + песок) [2].

В интервале энергии гамма-излучения  $E_\gamma = 0,5 \div 30$  Мэв отличие массовых коэффициентов ослабления  $\mu_p$  крупного заполнителя и среды

(химический состав взят из [3]) для обычного бетона не превышает 1,5%, т. е.  $\Delta\mu\rho \simeq 0$ , откуда

$$\Delta\mu = \mu \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления бетона,  
 $\Delta\rho$  — разность плотности крупного заполнителя и среды,  
 $\rho$  — плотность бетона.

Значение  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  достигает для обычного бетона 30%. Однако для энергии тормозного излучения  $\geq 6$  Мэв и слоя обычного бетона  $> 10$  см подобного изменения  $\mu$  недостаточно для выявления отдельного зерна заполнителя и флуктуации интенсивности  $\delta_I$  обусловлены флуктуациями распределения крупного заполнителя по всей толщине слоя бетона.

Интенсивность излучения за поглотителем составляет первичное излучение  $I$  и рассеянное  $I_p$ . В общем случае изменением  $I_p$  за счет дефекта можно пренебречь [3], аналогично показанному во [2], можно пренебречь флуктуациями рассеянного излучения  $\delta_{I_p}$ , обусловленными неоднородной структурой бетона. Тогда изменение интенсивности излучения, обусловленное дефектом типа воздушной полости диаметром  $\Delta x$ , равно

$$\Delta I = I\mu\Delta x, \quad (3)$$

а среднеквадратичные флуктуации интенсивности равны

$$\delta_I = I\Delta\mu\delta_h = I \frac{\Delta\rho}{\rho} \mu\delta_h, \quad (4)$$

где  $\delta_h$  — среднеквадратичные флуктуации суммарной длины  $h$  отрезков луча излучения через крупный заполнитель.

Согласно (1), из (3) и (4) получаем условие выявляемости воздушной полости

$$|\Delta x| \leq \Delta x \geq \kappa \frac{\Delta\rho}{\rho} \delta_h, \quad (5)$$

где  $[\Delta x]$  — выявляемость в слое однородного материала тождественной слою бетона толщины и с тождественным ослабляющим излучением свойством.

При энергии излучения, когда становится возможным выявление отдельного зерна крупного заполнителя ( $E_\gamma \leq 1$  Мэв) и когда детектором регистрируется и рассеянное излучение (например, рентгенография), ввиду намного лучшей выявляемости дефектов, прилегающих к детектору (примерно в  $B$  раз, где  $B$  — фактор накопления), условие (5) принимает вид

$$\Delta x = \kappa \frac{\Delta\rho}{\rho} (\delta_h + h_0), \quad (6)$$

где  $h_0 = h_0(E_\gamma)$  и по величине порядка диаметра крупного заполнителя.

Значения  $\delta_h$  могут быть определены расчетным путем посредством моделирования распределения зерен в ограниченном объеме или экспериментально

$$\delta_h = \delta_n \frac{\rho}{\Delta\rho} K, \quad (7)$$

где  $K = \frac{|\Delta x|}{\Delta D}$ , или  $K = \frac{|\Delta x|}{\Delta U}$ ,

$\Delta D, \Delta U$  — изменение оптической плотности снимка дефектом при радиографии и сигнала на выходе электронной схемы при радиометрическом методе регистрации соответственно,

$\Delta x$  — толщина эталона, имеющего плотность бетона,

$\delta_n$  — равны  $\delta_D$  или  $\delta_u$  — среднеквадратичные флуктуации оптической плотности снимка или сигнала с радиометрической схемы.

Коэффициент  $K$  в (7) в общем случае зависит от энергии излучения и толщины слоя бетона.

В каждом сечении блока бетона плоскостью, параллельной плоскости облучения бетона, распределение зерен в конкретном случае может быть различным, например, из-за наличия включений, из-за недостаточно равномерного уплотнения и т. д. Однако для общего анализа основных характеристик функции  $h(z, y)$  от энергии излучения, толщины слоя бетона и его технологического состава можно принять, что  $h(\vec{r})$  обладает эргодическим свойством, т. е. ее вероятностные характеристики не зависят от направления  $\vec{r}$  ( $Z, Y$  — плоскость поглотителя, противоположная облучаемой).

Нами были исследованы характеристики флуктуаций оптической плотности рентгеновских снимков при просвечивании блоков бетона тормозным излучением бетатронов.

Определялись

1. Математическое ожидание

$$\langle D \rangle \simeq \frac{1}{R} \int_0^R D(r) dr. \quad (8)$$

2. Среднеквадратичное изменение

$$\delta_D = \sqrt{\frac{1}{R} \int_0^R [D(r) - \langle D \rangle]^2 dr}. \quad (9)$$

3. Корреляционная функция

$$K_D(r) = \frac{1}{R-r} \int_0^{R-r} [D(\xi) - \langle D \rangle][D(\xi+r) - \langle D \rangle] d\xi, \quad (10)$$

где  $D(r)$  — определялось как изменение  $D$  вдоль произвольной линии на плоскости негатива,

$R$  — отрезок прямой линии на негативе, равный или больший  $10 r_0$ , а  $r_0$  определяется из условия  $K(r_0) \leq 0,1 K(0)$

Экспозиции при просвечивании подбирались достаточными для получения  $D = 1,5 \pm 0,2$  единиц. Негатив фотометрировался по произвольно выбранному направлению при площади развертывающего пучка света  $0,2 \times 0,2$  мм<sup>2</sup>.

Из полученных данных следует, что интервал корреляции  $t = 2r_0$  зависит от технологического состава бетона. В интервале толщин слоя обычного бетона 10—30 см  $t$  изменяется на 15% при отклонении количества крупного заполнителя на 30%. С увеличением энергии излучения (от 6 Мэв до 30 Мэв) интервал корреляции остается постоянным, изменяются только среднеквадратичные флуктуации  $\delta_D$ , что подтверждает отмеченный выше вывод о независимости  $\delta_I$  от величины рассеянного излучения.

Расчетным условием выявляемости несплошности на фоне флуктуаций почернения негатива, обусловленных конгломератной структурой бетона, наряду с (5) или (6) может быть

$$\Delta D = \kappa \delta_D, \quad (11)$$

где  $\Delta D$  — изменения оптической плотности дефектом для однородного материала ( $\Delta D = K^{-1} \Delta x$ ; (7)). Подставляя значение  $\Delta D$  и коэффициента  $K$  в (II), получим

$$\Delta x = K \kappa \delta_D = \frac{2,3B \cdot \kappa \cdot \delta_D}{g \cdot \mu}, \quad (12)$$

где  $g$  — градиент контрастности рентгеновской пленки,  
 $B$  — фактор накопления.

Таким образом, если известны  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  и  $\delta_h$  или  $\delta_D$  и  $\mu$ ,  $g$ ,  $B$ , то выявляемость воздушной полости может быть рассчитана по (5) или (12).

Экспериментальная проверка расчетных значений выявляемости воздушной полости, выполненных нами по (12), проведена при просвечивании образцов тормозным излучением малогабаритного бетатрона. Поскольку  $\Delta D$  является четной функцией от  $\Delta x$  (на линейном участке характеристической кривой) в качестве эталона использовались специально подобранные зерна гравия, имеющие диаметр 5—20 мм. Излучение бетатрона направлялось вверх, и на подставке устанавливалась тонкая алюминиевая пластина, на которую укладывались случайным образом зерна, а затем на них образцы бетона и кассета с пленкой. Если по двум снимкам оказывалось возможным обнаружить 9 зерен из 10, зерно считалось выявленным. Получено в пределах 20% соответствие с расчетными значениями выявляемости воздушной полости, которые составили 7,8 и 10 мм для 10, 20 и 40 см обычного бетатона соответственно. Это составляет выявляемость в 4—2,5% для основной массы выпускаемых заводами элементов бетонных строительных конструкций.

Представленные в статье данные могут служить основой для составления методики и проектирования радиационной дефектоскопии железобетонных конструкций в заводских условиях и на строительно-монтажных площадках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Воробьев. Труды 4-й Международной конференции по бетатронам. 332, Прага, 1966.
2. В. А. Воробьев, Ю. Д. Гавкалов, Г. П. Тарасов. В сб.: «Физика», доклады XXVI научной конференции ЛИСИ, 48, Л., 1968.
3. Неразрушающие испытания. Справочник под ред. Р. Мак-Мастера, изд. «Энергия», М.—Л., 1965.