УДК 666.9.017: 620.179

УТОЧНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК МЕЛИОРАТИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ

¹Семененко С.Я., ¹Марченко С.С., ^{1,2}Арьков Д.П., ¹Попов П.С.¹Поволжский научно-исследовательский институт эколого-мелиоративных технологий – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН», Волгоград, e-mail: pniiemt@yandex.ru;²ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград

Научными сотрудниками Поволжского научно-исследовательского института эколого-мелиоративных технологий при обследовании бетонных и железобетонных облицовок мелиоративных сооружений изучено влияние влажности, категории поверхности на результат измерения скорости прохождения ультразвуковых волн. На основе графической интерпретации и математического анализа полученных экспериментальных данных установлено влияние влажности, определяемое степенной функцией. Для корректного использования предлагаемой функции, посредством проведения опытов изучено, какое количество измерений серий образцов необходимо и достаточно для определения коэффициента фильтрации с коэффициентом обеспеченности $\alpha = 0,95$. Рассчитаны основные статистические величины, по которым можно судить об адекватности результатов, такие как среднеквадратичное отклонение скорости и коэффициента фильтрации, относительная погрешность определения скорости и коэффициента фильтрации. При анализе графиков было установлено, что после 6 серий измерений в результатах скорости ультразвуковых колебаний и коэффициента фильтрации наблюдается сходимость, достаточная для определения марки бетона по водонепроницаемости с требуемым коэффициентом обеспеченности. В работе также рассматривается влияние категории поверхности, как одной из составляющих, определяющих качество измерений скорости распространения УЗК, обеспечивающей акустический контакт, необходимый для передачи энергии ультразвуковых волн от преобразователя к бетону.

Ключевые слова: сходимость результатов, ультразвуковой контроль, коэффициент фильтрации, бетонные конструкции, облицовка мелиоративных сооружений, неразрушающие методы контроля

SPECIFICATION OF ELEMENTS OF ULTRASONIC TESTING METHOD FOR WATER RESISTANCE OF CONCRETE CLADDING OF RECLAMATION FACILITIES

¹Semenenko S.Ya., ¹Marchenko S.S., ^{1,2}Arkov D.P., ¹Popov P.S.¹Volga research Institute of ecological technology (branch FNTS agroekooogy RAS), Volgograd, e-mail: pniiemt@yandex.ru;²Volgograd State Agrarian University, Volgograd

The scientific staff of the Volga region research Institute of ecological and meliorative technologies at inspection of concrete and reinforced concrete facing of meliorative constructions studied influence of humidity, category of a surface on result of measurement of speed of passing of ultrasonic waves. On the basis of graphical interpretation and mathematical processing and analysis of the experimental data, the influence of humidity determined by the power function is determined, for the correct use of the proposed function, the number of measurements of the series of samples is enough to make the right decision with the security coefficient $\alpha = 0.95$. The basic statistical values by which it is possible to judge the adequacy of the results, such as the standard deviation of the speed and the filtration coefficient, the relative error in determining the speed and the filtration coefficient are calculated. After analyzing the graphs, it was noted that after 6 series of measurements in the results of the ultrasonic vibration speed and filtration coefficient, there is a convergence sufficient to determine the grade of concrete by water resistance with the required coefficient of security. In the work, the influence of the surface category as one of the components that determine the quality of the ultrasonic velocity measurements, providing acoustic contact necessary for the transmission of ultrasonic waves energy from the transducer to the concrete, is also considered.

Keywords: convergence, ultrasonic testing, coefficient of filtration, concrete construction, veneer reclamation constructions, nondestructive control methods

Одной из целей проведения экспериментов при исследовании объектов и процессов в области мелиоративного строительства и эксплуатации мелиоративных сооружений является получение математической модели, описывающей возможные состояния исследуемого объекта на всей области его определения [1, 2]. Для получения такой

математической модели требуется провести ряд экспериментов, в ходе которых измеряются основные параметры объекта исследования при всех интересующих исследователя режимах и условиях [3].

При обработке и анализе данных, получаемых экспериментально, актуальным является вопрос о количестве данных, обе-

спечивающих требуемую достоверность результата, т.е. какое количество измерений нужно произвести, чтобы обеспечить точность результатов, отражающих действительные закономерности объекта исследования. Чем больше в ходе эксперимента получено опытных данных, тем более подробно эмпирическая формула описывает объект. Это означает, что приближающая функция будет точнее соответствовать истинной. С другой стороны, увеличение объема выборки исходных данных может оказаться неоправданным, так как практически не сказывается на точности аппроксимации [4]. Кроме того, проведение экспериментов зачастую является дорогостоящей и затратной по времени процедурой. Поэтому необходимо выяснить, какое минимальное количество опытных данных обеспечивает статистически значимый результат [5].

В основе данной работы лежит гипотеза о том, что характеристика водонепроницаемости бетона и скорость распространения ультразвуковых волн, возбуждаемых передатчиком ультразвукового дефектоскопа, находятся во взаимосвязи, которую можно выразить простой функциональной зависимостью.

На скорость распространения ультразвука, кроме коэффициента фильтрации, оказывает влияние множество других факторов, причем степени влияния этих факторов неравнозначны [6, 7]. Выделить из множества факторов только один – степень фильтрации – можно путем создания специальных условий, при которых прочие влияния будут одинаковыми как при определении корреляционных зависимостей, так и при

непосредственных испытаниях. Это положение легло в основу разработки ультразвуковой методики. В разработке данной методики принимали участие С.Я. Семененко, С.С. Марченко, П.С. Попов, А.Н. Чушкин, Е.И. Чушкина, К.С. Никитин, Н.Н. Елатонцев, Е.А. Елатонцева и другие ученые и исследователи.

Цель исследования: определить необходимое количество измерений, а также влияние категории поверхности на результат определения скорости ультразвуковых колебаний, обеспечивающих сходимость результатов при ультразвуковом контроле коэффициента фильтрации бетонных облицовок мелиоративных сооружений

Материалы и методы исследования

Одним из факторов, существенно влияющих на скорость (V) ультразвука в бетоне, является его влажность ($w, \%$). В лаборатории ПНИЭМТ выполнены исследования по выявлению влияния влажности бетона на скорость ультразвука, ход выполнения подробно рассмотрено в работе [8], в общем виде описывается выражением

$$V = (V_0 - 332)w^{0,135}, \quad (1)$$

где V_0 – скорость распространения УЗК (м/с) в бетоне при $w = 0\%$ (в зависимости от состава бетона, для бетонов марок по водонепроницаемости W8 V_0 изменяется в пределах 4400–4420 м/с; W10 V_0 изменяется в пределах 4500–4520 м/с; W12 V_0 изменяется в пределах 4600–4620 м/с; 332 и 0,135 – эмпирические коэффициенты, полученные в результате математической обработки экспериментальных данных.

Регрессионные модели зависимостей «относительного параметра (V_0/V_j) скорости распространения ультразвука (УЗК) и влажности (w) для разных марок бетона по водонепроницаемости представлены на рис. 1.

Рис. 1. График зависимости относительного параметра (V_0/V_j) скорости распространения ультразвука (УЗК) в экспериментальных бетонных образцах от их влажности (V) для разных марок бетона по водонепроницаемости

Построенные кривые описываются уравнением степенной функции вида

$$V_j = V_0 + 1,11w^{-0,11}, \quad (2)$$

Полученная интегральная зависимость может использоваться при диагностировании состояния сооружений мелиоративных систем, а также служить дополнением к ГОСТ 17624-2012 [8].

$$\frac{v_i}{v_j} = 1 - 0,00069w^{3,1}, \quad (3)$$

где V_j – скорость распространения ультразвука в бетоне при соответствующей его влажности, м/с; 0,00069 и 3,1 – эмпирические коэффициенты, установленные в результате исследований.

Для возможности использования данного метода необходимо установить, какое количество измерений серий образцов достаточно для определения марки

бетона по водонепроницаемости с коэффициентом обеспеченности $\alpha = 0,95$.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты определения среднеквадратичного отклонения скорости и коэффициента фильтрации, относительной погрешности скорости и коэффициента фильтрации в графическом виде представлены на рис. 2 и 3.

Результат измерения с учетом правил представления результатов измерений можно записать в виде

$$V = (4618 \pm 25,35) \text{ м/с}; \delta_V = 0,55\%; \alpha = 0,95;$$

$$K_{\phi} = (2,17\text{E-}10 \pm 3,16\text{E-}11) \text{ см/с};$$

$$\delta_{K\phi} = 15,39\%; \alpha = 0,95.$$

Рис. 2. График изменения относительной погрешности определения скорости ультразвуковых колебаний от количества измерений n

Рис. 3. График изменения относительной погрешности определения коэффициента фильтрации от количества измерений n

Одним из важных элементов, определяющих качество измерений скорости распространения УЗК, является обеспечение акустического контакта, необходимого для передачи энергии ультразвуковых волн от преобразователя к бетону, зависящего от состояния поверхности, на которой производят измерения.

Согласно [9] в зоне контакта ультразвуковых преобразователей с поверхностью бетона не должно быть раковин и воздушных пор глубиной более 3 мм и диаметром более 6 мм, а также выступов более 0,5 мм, данные требования соответствуют категориям поверхности С1, С2, С3. Поэтому в дальнейших исследованиях были рас-

смотрены бетонные образцы соответствующих категорий по [10], основные дефекты поверхности соответствующих категорий представлены в табл. 1.

Влияние категории поверхности на результат измерения скорости ультразвуковых колебаний характеризует среднее отклонение фактических значений в совокупности измерений от среднего значения скорости, измеренной в серии образцов и характеризуется средним квадратическим отклонением, расчет которого представлен в табл. 2.

Разброс вариаций измерения скорости ультразвуковых колебаний для категорий бетонной поверхности С2, С3 для наглядности представлен в виде графиков на рис. 4 и 5.

Таблица 1

Категория бетонной поверхности

Категория бетонной поверхности конструкции	Диаметр или наибольший размер раковины	Высота местного наплыва (выступа) или глубина впадины
С1	Глянцевая (по эталону)	
С2	1	1
С3	4	2

Таблица 2

Расчет коэффициента вариации категории поверхности

№ серии	Категория поверхности, С	V – скорость ультразвука, м/с	V _{ср} – средняя скорость ультразвука в серии, м/с	a – среднее линейное отклонение	S _т – ср.кв. отклонение, скорости ультразвука от средней по серии	Коэф. вариации, категории
07.01.23.08	С2	4801,4	4727,57	63,04	76,26	2 %
07.02.23.08	С2	4657				
07.03.23.08	С2	4609				
07.04.23.08	С2	4776				
07.05.23.08	С2	4763				
07.06.23.08	С2	4759				
02.01.06.12	С1	3596	3713	46	72,44	2 %
02.02.06.12	С1	3822				
02.03.06.12	С1	3725				
02.04.06.12	С1	3705				
02.05.06.12	С1	3730				
02.06.06.12	С1	3700				
13.01.13.03	С1	4900	4900,67	38	59,34	1 %
13.02.13.03	С1	4922				
13.03.13.03	С1	4788				
13.04.13.03	С1	4956				
13.05.13.03	С1	4900				
13.06.13.03	С1	4938				
07.01.23.03	С2	4288	4358,83	89,83	105,55	2 %
07.02.23.03	С2	4488				
07.03.23.03	С2	4226				
07.04.23.03	С2	4462				
07.05.23.03	С2	4293				
07.06.23.03	С2	4396				

Окончание табл. 2						
№ серии	Категория поверхности, С	V – скорость ультразвука, м/с	V _{ср} – средняя скорость ультразвука в серии, м/с	a – среднее линейное отклонение	S _r – ср. кв. отклонение, скорости ультразвука от средней по серии	Коэф. вариации, категории
25.10.17-1	C3	4185	4200,5	10	14,200	1,42
25.10.17-2	C3	4219				
25.10.17-3	C3	4202				
25.10.17-4	C3	4196				
25.10.17-5	C3	4349	4313,2	23,84	28,65	1,2
25.10.17-6	C3	4281				
25.10.17-7	C3	4303				
25.10.17-8	C3	4296				
25.10.17-9	C3	4337	4358,83	30	40,92	1,36
25.10.17-10	C3	4193				
25.10.17-11	C3	4281				
25.10.17-12	C3	4213				
25.10.17-13	C3	4197	4533	26,4	33,955	1,29
25.10.17-14	C3	4554				
25.10.17-15	C3	4520				
25.10.17-16	C3	4546				
25.10.17-17	C3	4565				
25.10.17-18	C3	4480

Рис. 4. Разброс вариаций при измерении скорости ультразвуковых колебаний (V), на поверхности класса C2

Учитывая суммарные погрешности, в процессе исследования на графиках 4 и 5 представлены значения средних скоростей ультразвуковых колебаний для серий образцов, выделены области максимальных, средних и минимальных значений для всей совокупности.

На поверхности класса C2 более высокий результат определения скорости распространения, чем на поверхности класса

C3, что отчетливо наблюдается из представленных графиков по концентрации значений вблизи средней линии, на поверхности класса C2 диаметр и наибольший размер раковин не превышает 1 мм, этим можно объяснить меньшее влияние на прохождения скорости ультразвуковых колебаний по поверхности образцов, для класса C3 наблюдается снижение общей совокупности значений ближе с минимальным.

Рис. 5. Разброс вариаций при измерении скорости ультразвуковых колебаний (V), на поверхности класса С3

Выводы

Анализируя построенные графики, можно выделить, что после 6 серий измерений в результатах скорости ультразвуковых колебаний и коэффициента фильтрации наблюдается сходимость, достаточная для определения марки бетона по водонепроницаемости с коэффициентом обеспеченности 0,95. Категории поверхности С1, С2, С3 по [10] соответствующие требованиям [9], а именно – в зоне контакта ультразвуковых преобразователей с поверхностью бетона не должно быть раковин и воздушных пор глубиной более 3 мм и диаметром более 6 мм, а также выступов более 0,5 мм, несущественно влияют на результат измерения скорости ультразвуковых колебаний.

Считаем необходимым использовать результаты данных исследований при применении методики ультразвукового контроля водонепроницаемости бетонных облицовок мелиоративных сооружений, представляющей практический интерес для работников эксплуатирующих и проектных организаций при проведении обследования сооружений.

Список литературы

1. Фейгенбаум Ю.М., Миколайчук Ю.А., Метелкин Е.С. Методика проведения исследований по оценке надежности выявления поверхностных дефектов при визуальном контроле конструкции, подготовка и проведение тестирования // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 13 (324). С. 21–28.

2. Косиченко Ю.М., Михайлов Е.Д., Баев О.А. Экспериментальные исследования водослива с широким порогом резервного водосброса // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 3 (20). С. 73–81.

3. Евстифеева О.М., Игнатьев С.В. Сравнительный анализ различных методов обработки экспериментальных данных для оценки характеристик точности волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2006. № 2 (53). С. 96.

4. Плетнев П.М., Стариков Е.И. Измерение физических величин. Обработка экспериментальных данных. Новосибирск: Сиб. гос. ун-т путей сообщ., 2004. 74 с.

5. Кондакова И.Ю. Использование факторного анализа при исследовании надежности гидротехнических сооружений // Развитие технических наук в современном мире: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. (Воронеж, 08 декабря 2015 г.). Воронеж, 2015. С. 119–121.

6. Кровопускова В.Н. Неразрушающие методы исследования технического состояния гидротехнических сооружений // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сборник материалов международной научно-технической конференции. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2016. С. 49–54.

7. Шигаев Д.Т., Кайранбаева А.Б., Нуракунов С.М., Калдыбаев А.А. Неразрушающий метод исследования Капчагайского гидротехнического сооружения // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием. 2016. С. 196–199.

8. Семенов С.Я., Арьков Д.П., Марченко С.С. Проверка и практическое внедрение метода диагностики марки по водонепроницаемости бетонных конструкций мелиоративных сооружений // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2018. № 1 (49). С. 254–262.

9. ГОСТ 17624-12 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности – взамен ГОСТ 17624-87; Введ. с 01.01.2014. М.: Изд-во Стандартинформ, 2014. 20 с.

10. ГОСТ 13015-2012 Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения – взамен ГОСТ 13015-2003; Введ. с 01.01.2014. М.: Изд-во Стандартинформ, 2014. 40 с.