Российская академия наук

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный Основан в феврале 1965 года Екатеринбург

№ 1 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

В.К. Качанов, И.В. Соколов, А.А. Самокрутов, В.П. Лунин, С.А. Федоренко. Измерение акустических характеристик компактных бетонных строительных конструкций с помощью импакт- эхометода	3			
М.И. Горлов, В.А. Сергеев. Диагностика полупроводниковых изделий по параметрам низкочастотного шума	13			
А.В. Мартыненко. К вопросу об интерпретации эхограмм при контактном способе акустического контакта				

Радиационные методы

Капиллярные методы

И.И. Кудинов, А.Н. Головков, П.А. Шишкин, Д.С. Скоробогатько, А.И. Андреев,	
А.С. Генералов. Оценка эффективности использования источников ультрафиолетового излучения при	
проведении капиллярного люминесцентного контроля	52
Информация	67

УДК 620.179.163, 624.155.15

ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНЫХ БЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДА

© 2022 г. В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, А.А. Самокрутов^{1, 2}, В.П. Лунин¹, С.А. Федоренко¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14 ²ООО «АКС», Россия 142712 Московская обл., промзона «Технопарк», ул. Восточная, вл. 12, стр. 1 ^{*}E-mail: kachanovvk@mail.ru

> Поступила в редакцию 08.10.2021; после доработки 08.12.2021 Принята к публикации 10.12.2021

Импакт-эхометодом, являющимся методом свободных колебаний, контролируют строительные конструкции из бетона, у которых измеряемая толщина H по крайней мере в шесть раз меньше иных габаритов, и не контролируют компактные изделия, у которых толщина H сопоставима с иными габаритами. Проблема контроля компактных объектов заключается в том, что на спектре компактного изделия невозможно однозначно определить искомую резонансную частоту $f_0 \sim 1/H$, определяемую толщиной изделия H, на фоне близко расположенных многочисленных резонансов, определяемых иными габаритами контролируемого объекта. Другая причина заключается в том, что из-за сильного влияния геометрической дисперсии скорости звука в компактных изделиях необходимо рассчитывать коэффициент кюррекции β для каждого нового компактного объекта контроля. В статье предлагается решение проблемы контроля, конторля компактных бетонных строительных конструкций с помощью мультипликативного импакт-эхометода, которые позволяют производить измерение скорости звука в компактных вариантов корреляционного импакт-эхометода, которые позволяют производить измерение скорости звука в компактных вариантов корреляционного импакт-эхометода, которые позволяют производить измерение скорости звука в компактных изделиях для последующего определять искомую резонансную частоту, а также с помощью различных вариантов корреляционного импакт-эхометода, которые позволяют производить измерение скорости звука в компактных изделиях для последующего определения прочности бетона как в процессе его застывания, так и в процессе эксплуатации строительных конструкций с целью прогнозирования безаварийного срока службы зданий и сооружений.

Ключевые слова: импакт-эхометод, строительная конструкция из бетона, компактное изделие, коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука.

DOI: 10.31857/S0130308222010018

введение

Одной из основных задач контроля строительных конструкций (СК) из бетона является измерение толщины СК, а также измерение скорости распространения акустических колебаний в бетоне, по которой судят о прочности бетона. Однако аномально высокое затухание ультразвука в бетоне не позволяет контролировать СК толщиной более 1,5 м с помощью ультразвуковых (УЗ) методов неразрушающего контроля [1]. Поэтому для контроля плоскопараллельных СК с толщиной 1,5 м и более используют акустические методы, основанные на анализе собственных частот: резонансный метод (метод вынужденных колебаний) или импакт-эхометод (метод свободных колебаний). В обоих случаях в бетонном изделии устанавливаются резонансные колебания, частота которых определяется толщиной изделия $f_0 \sim 1/H$. Так как при контроле изделий с большой толщиной частота резонанса невелика, то и ослабление акустического сигнала будет небольшим. По этой причине с помощью методов собственных частот удается контролировать СК, толщина которых достигает нескольких метров.

В настоящее время наибольшее распространение для контроля СК из бетона получил импактэхометод [2—5], при котором с помощью специального устройства (импактора) совершают короткий по длительности, но достаточный по силе механический удар (англ. — impact) по поверхности контролируемого изделия. Этот удар инициирует в объекте контроля (ОК) свободные акустические затухающие колебания, которые фиксируются приемным преобразователем (ПП), расположенным на небольшом расстоянии от импактора. Принятый акустический сигнал преобразуется в ПП в электрический, затем оцифровывается и поступает на устройство обработки, на выходе которого он представляется во временной и в частотной областях. Параметры ОК определяют по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), на которой фиксируют выраженный максимум резонансной частоты f_0 . В свою очередь, по максимуму оценивают толщину изделия $H \sim 1/f_0$.

Как известно, резонансные методы обеспечивают высокую точность измерения, и если затухание мало, то относительная погрешность измерения частоты не превышает 0,5 % [1]. Однако при использовании импакт-эхометода возникает дополнительная погрешность, из-за которой скорость акустической волны в реальных бетонных СК типа «плита» составляет примерно 96 % от скорости продольной волны C_p , то есть реальная скорость звука в плите составляет $C_{pp} = 0,96C_p$ [6]. Эта погрешность связана с геометрической дисперсией скорости звука [7]. Для устранения этой погрешности в ОК типа «плита» был введен эмпирический коэффициент $\beta = 0,96$ [6, 7]. Именно поэтому при контроле плит импакт-эхометодом необходимо использовать значение скорости C_{pp} , которое в плите определяется волной Лэмба [6]:

$$C_{PP} = 2f_0 H = \beta C_P, \tag{1}$$

где f_0 — максимальная по амплитуде частота в спектре; H — толщина контролируемого изделия; β — коэффициент, корректирующий влияние геометрической дисперсии скорости звука; C_p — скорость распространения продольных акустических колебаний в бетоне, рассчитанная для бесконечного полупространства.

В свою очередь, как известно, скорость продольной звуковой волны C_p в изделиях с неограниченными размерами типа бесконечного полупространства зависит только от свойств материала [1]:

$$C_{p} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}},$$
(2)

где *Е* — модуль Юнга; v — коэффициент Пуассона; р — плотность.

Однако коэффициент коррекции $\beta = 0.96$ считается известным и неизменным только для так называемых протяженных изделий типа «плита», у которых измеряемая толщина Н много меньше иных габаритов [7, 8]. Сам термин «протяженное изделие» был впервые введен в работе [8] с целью подчеркнуть различие с «компактными изделиями», у которых измеряемая толщина H сопоставима с другими габаритами. Компактные СК с помощью традиционного импакт-эхометода в условиях реального строительства не контролируются. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, на спектре компактного изделия невозможно однозначно определить искомую резонансную частоту f_0 на фоне близко расположенных многочисленных частотных пиков, определяемых иными габаритами [8]. Во-вторых, из-за сильного влияния геометрической дисперсии скорости звука в компактных ОК для каждого нового изделия необходимо рассчитывать свой коэффициент β [9]. В результате, в настоящее время импакт-эхометод активно развивается, однако развитие в основном связано с созданием новых алгоритмов обработки принимаемой информации с целью устранения стационарного влияния преобразования Фурье, применяя оконные функции или преобразования другого типа [10, 11], а также нивелированием субъективного фактора оценки результата контроля, используя автоматизированные системы и машинное обучение [12, 13]. Перечисленные же выше проблемы контроля компактных изделий не нашли своего полного решения [9, 14]. Именно по этой причине в настоящей работе ставится задача разработки исследовательской базы для импакт-эхометода контроля компактных изделий.

ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КОМПАКТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДОМ

Достоинством импакт-эхометода является не только возможность контролировать крупногабаритные СК толщиной свыше 1,5 м, но также простота применения, высокая производительность и относительная дешевизна устройств контроля. Именно поэтому импакт-эхометод получил распространение в развитых странах для контроля СК из бетона.

Измеренная с помощью импакт-эхометода резонансная частота f_0 позволяет определять скорость акустических колебаний в реальных бетонных СК по формуле (1) при условии, что известна толщина бетонного изделия *H*. Если заранее известна скорость распространения продольной звуковой волны в бетоне C_p , то с помощью импакт-эхометода легко определить толщину изделия *H*:

$$H = \frac{C_{PP}}{2f_0} = \frac{\beta C_P}{2f_0}.$$
 (3)

При этом, как уже отмечалось, коэффициент β постоянен только у протяженных изделий, а у компактных меняется в зависимости от ОК [9]. Резонансная частота f_0 также однозначно измеряется только у протяженных объектов. Вместе с тем, частота f_0 и коэффициент коррекции β достаточно просто определяются с помощью моделирования в компактных ОК с известными габари-

тами. Так, в [7] с помощью метода конечных элементов были рассчитаны резонансные частоты и значения коэффициентов коррекции для «полукомпактных» ОК, у которых толщина и ширина сопоставимы между собой, а длина много больше двух этих габаритов. В [9] же с помощью среды моделирования были рассчитаны коэффициенты β для более сложных по конфигурации ОК, у которых все три габарита сопоставимы между собой. Очевидно, что значения f_0 и β , полученные с помощью моделирования, не всегда совпадают с их значениями для реального бетонного изделия, так как при моделировании не учитывается степень неоднородности структуры бетона, наличие и размеры заполнителя (зерен гравия), неровность граней изделия со сложной конфигурацией и другие особенности СК. Поэтому возникает необходимость создания экспериментальных методов определения резонансной частоты f_0 и скорости звука в компактных СК.

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ РЕЗОНАНСА ТОЛЩИНЫ В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Если в протяженном изделии искомая частота резонанса $f_0 \sim 1/H$ определяется с помощью импакт-эхометода достаточно просто, то обнаружить искомый резонанс толщины на спектре компактного изделия не удается из-за присутствия большого числа частотных пиков, которые обусловлены сопоставимыми по размерам габаритами [8]. При этом зачастую амплитуды многочисленных резонансных пиков сравнимы с искомой амплитудой первой моды продольной волны. Этот эффект иллюстрируется на полученных в результате моделирования спектральных характеристиках для компактных плит с квадратным сечением на рис. 1.

Чтобы оценить степень различия компактных ОК с разными габаритами, было введено понятие «коэффициент компактности», который был обозначен как m. Он определяется отношением габаритных размеров a = b = D к толщине изделия H. Для рассматриваемых на рис. 1 симметричных ОК с квадратным сечением коэффициенты m = D/H соответственно равны 5, 4 и 3.



Рис. 1. Спектральные характеристики компактных плит толщиной 30 см: a — габариты плиты 150×150×30 см (m = 5), частота резонанса толщины $f_0 \approx 6425$ Гц; δ — габариты плиты 120×120×30 см (m = 4), частота резонанса толщины $f_0 \approx 6500$ Гц; e — габариты плиты 90×90×30 см (m = 3), частота резонанса толщины $f_0 \approx 6650$ Гц.

На рис. 1*а* показан спектр плиты с габаритами $150 \times 150 \times 30$ см, которую еще можно считать протяженной (*m* = 5). Поэтому на АЧХ этой плиты возможно однозначно определить искомую резонансную частоту $f_0 \sim 1/H$. По мере уменьшения *m* спектральная характеристика усложняется, и уже при *m* = 4 (рис. 16) довольно сложно однозначно выделить частоту первой моды продольной волны, по которой следует определять толщину компактного изделия. При *m* \leq 3, как это видно из

рис. 1*в*, однозначная интерпретация спектра вообще становится невозможной, растет вероятность ошибки при нахождении частоты резонанса первой моды продольной волны, что снижает достоверность результатов измерения. Тем самым результаты моделирования подтверждают невозможность достоверно определять искомую частоту резонанса толщины и определять коэффициент коррекции β в компактных СК, у которых *m* < 5.

Для решения проблемы однозначного определения искомой частоты резонанса f_0 в реальных бетонных компактных СК нами был предложен многоканальный мультипликативный метод (патент РФ на изобретение № 2354932), предполагающий, что контроль должен быть проведен в нескольких точках на поверхности СК с запоминанием результатов в памяти измерительного прибора с последующим перемножением парциальных АЧХ. Так как пик первой моды продольной волны присутствует на всех парциальных спектрах компактных изделий и местоположение этого пика неизменно, а амплитуды других пиков меняются в зависимости от положения ПП на поверхности СК, то перемножение спектральных характеристик приводит к выделению пика искомого резонанса и к подавлению прочих частотных пиков.

На рис. 2 приведен пример реализации мультипликативного метода определения резонансной частоты в компактном ОК с габаритами $40 \times 40 \times 30$ см. На рис. 2a - b показаны полученные с помощью моделирования спектральные характеристики ОК для трех положений ПП, расположенных на поверхности модельного блока вблизи осей симметрии, а также главной диагонали.



Рис. 2. Результат моделирования мультипликативного метода контроля компактного бетонного блока с габаритами 40×40×30 см при различных положениях ПП (*a*—*в*), а также результат их перемножения (*г*).

Как видно из рисунков, однозначная интерпретация спектра в случае одного измерения невозможна, однако после перемножения этих парциальных характеристик на итоговом спектре (рис. 2г) четко фиксируется резонансный пик, соответствующий искомой толщине компактного изделия.

Если для снятия экспериментальных АЧХ используется импакт-эхометод контроля, то такой многоканальный метод называется мультипликативным импакт-эхометодом. Если используется резонансный метод, то такой метод называется соответственно резонансно-мультипликативным методом.



Рис. 3. Схема резонансно-мультипликативного метода контроля компактного объекта.

Схема, иллюстрирующая резонансно-мультипликативный метод контроля компактных изделий из бетона с помощью четырех ПП, изображена на рис. 3. Там же показаны полученные экспериментально при разных положениях ПП спектры на входе перемножителя и АЧХ изделия после перемножения парциальных спектров, на которой однозначно определяется искомая резонансная частота $f_0 \sim 1/H$.

Особенностью и достоинством предложенного мультипликативного метода определения резонансной частоты является возможность его применения в плоскопараллельных компактных бетонных изделиях с произвольной конфигурацией.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Нахождение искомой резонансной частоты f_0 на спектре компактного изделия с помощью мультипликативного импакт-эхометода частично решает проблему контроля компактных СК, так как теперь становится возможным определить скорость акустических колебаний $C_{pp} = 2f_0H$ в компактных изделиях с большой толщиной H. Это, в свою очередь, позволяет решить задачу определения прочности бетона по скорости звука (ГОСТ 17624—2012) как в процессе изготовления крупногабаритных компактных СК из бетона, так и в процессе эксплуатации строительных сооружений с целью прогнозирования безаварийного срока службы зданий.

Однако в некоторых случаях при контроле реальных компактных бетонных изделий со сложной структурой и с нестандартной конфигурацией точность определения резонансной частоты f_0 с помощью мультипликативного метода может оказаться недостаточно высокой. Поэтому нами был разработан еще один способ экспериментального определения скорости C_{pp} в сложных по форме



Рис. 4. Спектральные характеристики бетонного блока 80×50×30 см: эксперимент (*a*, *б*: сплошная линия), расчет для скорости 3000 м/с (*a*: штриховая линия), расчет с наибольшей корреляцией (*б*: штриховая линия). Зависимость значения взаимной корреляции от расчетной скорости акустических колебаний в бетонном блоке (*в*).

компактных бетонных СК, все размеры которых известны (патент РФ на изобретение № 2397487). Суть этого способа поясняется на примере контроля несимметричного бетонного блока с габаритами $80 \times 50 \times 30$ см. Сначала с помощью одного из методов собственных частот снимается экспериментальная спектральная характеристика компактного бетонного блока (рис. 4a, сплошная линия), по которой достаточно трудно установить искомый резонанс на частоте $f_0 \approx 7500$ кГц. Затем с помощью моделирования рассчитывается АЧХ этого же изделия (рис. 4a, штриховая линия) при произвольно выбранном значении расчетной скорости звука $C_{\rm pacч} = 3000$ м/с, при которой расчетная АЧХ не совпадает с экспериментальной. Если бы значение взятой для расчета скорости продольных колебаний $C_{\rm pacч}$ соответствовало реальной скорости звука в компактном изделии C_{pp} , то расчетная и экспериментальная АЧХ совпали бы, что позволило бы определить точное значение корости расцетной скорости посредством масштабирования изделии из бетона. Поэтому на следующем этапе производится компьютерное вычисление набора расчетных АЧХ при различных значения скорости посредством масштабирования исходной расчетной характеристики по оси частот в ожидаемом диапазоне скоростей (в данном примере от 2000 до 5000 м/с) с шагом 10 м/с. Так, например, для того, чтобы получить характеристики, соответствующие скоростям 3000, 3010, 3020, 3030 м/с, необходимо умножить частотную ось исходной характеристики на коэффициент 1, 1,0033, 1,0066, 1,0100 соответственно. Затем среди всех расчетных АЧХ находится та расчетная характеристика, которая наиболее схожа с экспериментальной (рис. 4δ , штриховая линия). По ней и определяется скорость звука в бетоне $C_{pp} \approx 3765$ м/с.

Для более точного определения степени совпадения экспериментальной и расчетных характеристик с помощью специальной программы вычисляется коэффициент взаимной корреляции r экспериментальной АЧХ и всех расчетных, построенных для разных значений скорости $C_{\text{расч}}$. Далее определяется максимум рассчитанной корреляционной характеристики $r(C_{\text{расч}})$, по которому находится искомая скорость продольной звуковой волны (рис. 4*e*). В данном компактном бетонном блоке $C_{\text{расч макс}} = 3765 \text{ м/с}$.

Таким образом, предложенный корреляционный метод позволяет измерять скорость продольной акустической волны в компактных изделиях произвольной формы. Причем измерение скорости ведется во всем объеме СК, а не на каком-либо участке и, тем более, не на поверхности. При этом в корреляционном методе нет принципиальных ограничений на максимальную толщину изделия. К недостаткам данного метода можно отнести то, что для измерения скорости необходимо знать все размеры контролируемого изделия и с помощью моделирования проводить расчет АЧХ для каждого нового компактного объекта.

КОРРЕЛЯЦИОННО-МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В КОМПАКТНЫХ БЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

К сожалению, в некоторых компактных бетонных изделиях не всегда удается однозначно определить максимум на корреляционной характеристике $r(C_{\rm pacu})$ из-за того, что при моделировании не учитываются особенности структуры бетона и возможные неровности поверхностей контролируемых СК. Поэтому для повышения точности измерения скорости звука в бетоне нами был предложен корреляционно-мультипликативный метод измерения скорости, при котором с помощью импакт-эхометода определяются экспериментальные АЧХ, полученные в различных точках на поверхности изделия, с вычислением корреляционной характеристики $r(C_{\rm pacu})$ для каждого положения датчика парциальной и с последующим перемножением набора парциальных корреляционных зависимостей [14].



Рис. 5. Контроль бетонного блока аппаратурой, реализующей импакт-эхометод (*a*). Схема расположения импактора и ПП на поверхности блока (*б*).

На рис. 5 показан пример контроля компактного несимметричного бетонного блока размером $40 \times 30 \times 15$ см, выполненного из бетона с наполнителем относительно большого размера (средний диаметр частиц гравия около 20 мм). Вследствие наличия крупного наполнителя по корреляционной характеристике $r(C_{\rm pacч})$ достаточно сложно однозначно определить скорость звука в бетоне. Поэтому при контроле этого блока использовался корреляционно-мультипликативный импакт-эхометод измерения скорости. С этой целью с помощью аппаратуры Olson Instruments (рис. 5*a*), реализующей импакт-эхометод, снимались спектральные характеристики в четырех точках на поверхности блока (рис. 5*b*). Для этих же точек с помощью моделирования были построены АЧХ изделия и были вычислены функции взаимной корреляции $r(C_{\rm pacч})$ между экспериментальными и расчетными спектральными характеристиками. На рис. 6*a* показаны четыре зависимости $r(C_{\rm pacч})$ для четырех точек на поверхности контролируемого бетонного блока. Из графиков видно, что у всех корреляционных зависимостей положение максимумов различается, что позволяет определить



Рис. 6. Зависимости значения коэффициента взаимной корреляции расчетных и экспериментальных АЧХ от скорости акустических колебаний для четырех положений датчиков на поверхности контролируемого блока (*a*), а также результат их перемножения (б).

только приблизительное значение скорости в изделии. Для повышения точности измерения была проведена мультипликативная обработка парциальных корреляционных зависимостей. Результирующая характеристика (рис. 6δ) имеет один ярко выраженный максимум, по которому однозначно определяется значение скорости звуковой волны C_{pp} в бетоне: $C_{pp} = 3500$ м/с.

В дополнении к этому был проведен сравнительный эксперимент измерения скорости звука в бетонном блоке размером $40 \times 40 \times 30$ см в процессе его формования предлагаемым корреляционно-мультипликативным методом и стандартизированным (ГОСТ 17624—2012) ультразвуковым теневым методом. При этом с помощью корреляционно-мультипликативного метода рассчитывается скорость $C_{pp} = \beta C_p$, а с помощью теневого измерения, проведенного в нашем случае на частоте 100 кГц, именно скорость продольной звуковой волны C_p . Таким образом, чтобы сопоставить полученные разными методами значения скоростей нужно скорость C_{pp} разделить на соответствующий блоку $40 \times 40 \times 30$ см корректирующий коэффициент β , компенсирующий влияние геометрической дисперсии. Для данного блока $\beta \approx 1,41$, а скорость C_{pp} определяется волной Лэмба [9]. На рис. 7 показана совокупность характеристик $r(C^*_{pacy})$, полученных описанным выше корреляционно-мультипликативным методом в различные дни в процессе формования бетонного блока, где скорость C^*_{pacy} представляет собой приведенное к коэффициенту β значение. Данная зависимость отражает тенденцию набора прочности контролируемого бетонного блока при его затвердевании, что выражается в росте измеряемой в нем скорости звука. В свою очередь, по максимумам парциальных характеристик $r(C^*_{pacy})$ была определена зависимость изменения скорости продольной звуковой волны C_p в изделий от врети и формования бетона (линия 2 графика, показанного на рис. 8). Также на графике представляет собом прозвучивания, или ультразвуковым теневым методом (линия 1 графика, показанного на рис. 8). Результаты измерений методом сквозного прозвучивания, или ультразвуковым теневым методом (линия 1 графика, показанного на рис. 8). Результаты измерения различными совпадают, что подтверждает правильность предложенного



Рис. 7. Мультипликативно-корреляционные характеристики, полученные в различные дни в процессе формования бетонного блока в ходе сравнительного эксперимента.



Рис. 8. Сравнение результатов определения скорости продольной звуковой волны корреляционно-мультипликативным импакт-эхометодом и методом сквозного прозвучивания.

корреляционно-мультипликативного импакт-эхометода измерения скорости, позволяющего повысить точность определения прочности бетона в крупногабаритных компактных строительных конструкциях.

выводы

УЗ методы контроля не позволяют проводить измерения СК из бетона толщиной более 1,5 м вследствие высокого затухания ультразвука. Для контроля таких объектов нужно использовать акустические методы, основанные на анализе собственных частот контролируемого изделия: резонансный метод и рассматриваемый в статье импакт-эхометод. Основная погрешность импакт-эхометода связана с геометрической дисперсией скорости звука, которая компенсируется корректирующим коэффициентом β. При этом его значение известно и постоянно только для протяженных изделий типа «плита», у которых измеряемая толщина много меньше других габаритов. ОК, чьи габариты сопоставимы друг с другом, называемые компактными изделиями, в условиях реального строительства импакт-эхометодом не контролируются. Это обусловлено неоднозначностью АЧХ, когда на фоне множественных частотных пиков не удается выделить искомый резонанс толщины, а также сильным влиянием геометрической дисперсии вследствие которого для каждого нового компактного изделия необходимо рассчитывать свой собственный коэффициент β.

В статье предлагаются несколько способов решения обозначенных проблем контроля компактных изделий. Так, описанный мультипликативный импакт-эхометод позволяет экспериментальным путем в производственных условиях определять частоту резонанса толщины в компактных бетонных изделиях произвольной формы. Разработанный корреляционный метод измерения скорости акустических колебаний позволяет решить задачу определения прочности бетона по измеренной скорости как в процессе изготовления крупногабаритных компактных СК, так и в процессе эксплуатации зданий и сооружений с целью прогнозирования безаварийного срока службы. Кроме того, при необходимости возможно применение предложенного в статье корреляционномультипликативного импакт-эхометода измерения скорости звука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.

2. *Geetha, Praveen Kumar.* Thickness estimation and crack detection in concrete using impact-echo technique // International Research Journal of Engineering and Technology. 2018. V. 5. P. 2345—2348.

3. *Montiel-Zafra V., Canadas-Quesada F., Campos-Sunol M.J., Vera-Candeas P., Ruiz-Reyes N.* Monitoring the internal quality of ornamental stone using impact-echo testing // Applied Acoustics. 2019. V. 155. P. 180–189.

4. Dorafshan S., Azari H. Deep Learning Models for Bridge Deck Evaluation Using Impact Echo // Construction and Building Materials. 2020. V. 263.

5. Coleman Z., Schindler A., Jetzel C. Impact-Echo Defect Detection in Reinforced Concrete Bridge Decks without Overlays // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2021. V. 35.

6. *Carino N.J.* Impact-echo: the fundamentals // International Symposium on NDT in Civil Engineering. 2015. P. 1—18.

7. Sansalone M., Streett W.B. Impact-echo: nondestructive testing of concrete and masonry. Bullbrier Press, Jersey Shore, PA. 1997. 339 p.

8. Качанов В.К., Соколов И.В., Авраменко С.Л. Проблемы акустического контроля крупногабаритных строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2008. № 12. С. 12—22.

9. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Fedorenko S.Å. Procedure for Determining the Factor of Correction for Geometric Dispersion of Speed of Sound in Compact Concrete Products // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. Р. 299 [Качанов В.К., Соколов И.В., Федоренко С.А. Методика определения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука для компактных изделий из бетона // Дефектоскопия. 2020. № 4. С. 3—13.]

10. Xu J., Ren Q., Shen Z. Analysis Method of Impact-Echo Based on Variational Mode Decomposition // Journal of Vibroengineering. 2018. V. 20. P. 2593—2603.

11. Ni T., Li J. HHT-based CEEMD to Improve an Impact-Echo Test // Journal of Testing and Evaluation. 2019. V. 47.

12. Chou H. Concrete Object Anomaly Detection Using a Nondestructive Automatic Oscillating Impact-Echo Device // Applied Sciences. 2019. V. 9.

13. Sengupta A., Guler S., Shokouhi P. Interpreting Impact Echo Data to Predict Condition Rating of Concrete Bridge Decks: A Machine-Learning Approach // Journal of Bridge Engineering. 2021. V. 26.

14. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Kontsov R.V., Lebedev S.V., Fedorenko S.A. Ultrasonic wave velocity measurement in concrete using the impact-echo method // Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2019. V. 61. No. 1. P. 15—19.

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

© 2022 г. М.И. Горлов^{1,*}, В.А. Сергеев^{2,3,**}

¹Воронежский государственный технический университет, Россия 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84 ²УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Росссия 432073 Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2 ³Ульяновский государственный технический университет, Россия 432029 Ульяновск, ул. Серверный венец, 32 E-mail: *m-gorlov@inbox.ru; **sva@ulstu.ru

> Поступила в редакцию 07.12.2021; после доработки 17.12.2021 Принята к публикации 17.12.2021

Рассмотрена возможность и описаны практические способы диагностики и прогнозирования надежности полупроводниковых изделий как по параметрам только их собственного низкочастотного (НЧ) шума, так и по параметрам комбинированных испытаний, например, по результатам измерения НЧ шума при воздействии электростатического разряда и (или) термического отжига. Представлены оценки достоверности рассмотренных способов. Показано, что достоверность комбинированных испытаний приближается к единице.

Ключевые слова: интегральные схемы, качество, надежность, низкочастотный шум, диагностика, прогнозирование. **DOI:** 10.31857/S013030822201002X

введение

В семидесятые годы прошлого века Воронежский завод полупроводниковых приборов (ВЗПП) приступил к серийному производству интегральных микросхем (ИС) по технологии с оксидной изоляцией карманов серий 106, 134, получивших широкое применение в космическом приборостроении. Потребители ИС, как правило, проводили входной контроль полученных от ВЗПП ИС. При этом для повышения надежности аппаратуры потребители использовали расширенный входной контроль ИС. От одного из потребителей завод получил рекламацию и возврат партии ИС, которые имели большой разброс по уровню низкочастотного (НЧ) шума, что, по мнению потребителя, свидетельствовало о потенциальной ненадежности ИС. Представленные образцы ИС, которые по данным потребителя показывали большой уровень НЧ-шума, были поставлены на ВЗПП на испытания на долговечность в течение 5000 часов. Испытания этой партии закончились без отказов, но работа по повышению качества и надежности ИС на ВЗПП на этом не прекратилась. Этот случай послужил толчком для активных работ на предприятии по исследованию возможностей диагностики и прогнозирования надежности ИС по параметрам НЧ-шума.

В те годы исследования методов диагностики и прогнозирования надежности полупроводниковых изделий по параметрам НЧ-шума широко проводились в отечественных [1—4] и зарубежных [5] вузах и лабораториях. Наряду с фундаментальными исследованиями природы и характеристик НЧ-шума полупроводниковых изделий (ППИ) под руководством Н.Б. Лукьянчиковой [2], А.К. Нарышкина и А.С. Врачева [3], В. Жалуда и В.Н. Кулешова [4] и др. активно развивались и прикладные исследования [1, 6].

Прикладные исследования диагностических методов с использованием параметров НЧ-шума в качестве информативного параметра продолжаются и в настоящее время как в России [7], так и за рубежом [8].

Цель данной статьи — показать возможности и привести оценку эффективности разработанных, апробированных на практике и получивших дальнейшее развитие в последние годы в ВГТУ и УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН способов разделения ИС по надежности с использованием параметров НЧ шума и дополнительных воздействий.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕНАДЕЖНЫХ ИС ПО ПАРАМЕТРАМ СПЕКТРА НЧ-ШУМА

Первые работы по определению возможности индивидуального прогнозирования потенциально ненадежных ИС по критериям спектра НЧ-шума появились еще в семидесятые годы прошлого века. Как показали многочисленные исследования, частотная зависимость спектральной плотности мощности $S_{\rm m}(f)$ шумового напряжения у ИС различных классов и типов в диапазоне звуковых частот описывается выражением:

$$S_{\rm m}(f) = A/f^{-\gamma},\tag{1}$$

где *А* — параметр, характеризующий уровень шума; *γ* — показатель формы спектра; НЧ-шум называют еще 1/*f*-шумом или фликкер-шумом.

Измерив параметры спектра НЧ-шума на нескольких частотах, можно определить уровень шума на любых низких частотах и пробовать прогнозировать дрейф параметров ИС по величине и амплитуде шума [1, 8, 9]. Измерения, например, спектра шума аналоговых ИС типа 142EH1 (стабилизатор напряжения) на специализированной установке для измерения теплоэлектрических параметров интегральных схем показали [6], что разброс по уровню шума различных образцов ИС достигает двух порядков величины. Аналогичные спектральные характеристики наблюдались у НЧ-шума на выходе аналоговых операционных усилителей К153УД при номинальном напряжении питания.

Гистограммы распределения выборки ИС типа 142ЕН2 в количестве 130 шт. и выборки ИС типа К153УД в количестве 172 шт. по спектральной плотности мощности шума, измеренной при номинальном напряжении на частоте 300 Гц, приведены на рис. 1.



Рис. 1. Гистограммы распределения ИС типа К142ЕН2 (а) и типа К153УД (б) по уровню НЧ-шума.

На обеих гистограммах можно выделить группы ИС (вторые моды распределения) с аномально большим отклонением уровня шума от среднего значения. Эти группы ИС при ускоренных на надежность испытаниях отказывают с интенсивностью, превышающей среднюю интенсивность отказов примерно в 3-5 раз.

Однако простое измерение уровня шума ИС в номинальном режиме их работы является недостаточно информативным. Анализ спектрограмм НЧ-шума тонкопленочных резисторов, диодов, транзисторов и ИС показывает, что спектры таких флуктуаций занимают промежуточное положение между линейчатыми и сплошными спектрами [9]. Это позволяет предполагать наличие некоторой регулярности в процессах, приводящих к их появлению, и связи этих шумов с неоднородностями и дефектами изделий.

В подтверждение этой идеи были исследованы спектры НЧ-шума ИС серии 106 (биполярные ТТЛ ИС с диэлектрической изоляцией карманов). Для обоснования режимов и норм при измерении характеристик НЧ-шума были исследованы распределения уровня шума ИС для различных частот на разных партиях, зависимости уровня шума от величины нагрузки, величины входного напряжения, от температуры в диапазоне от –70 до +170 °С при определенном напряжении питания ИС.

При измерении шумов при различных температурах обнаружен довольно сильный разброс значений от образца к образцу (до 40 % от среднего значения). Рост шумов при нагревании до +170 °С незначителен. Несколько больше замечен рост шумов при охлаждении до -70 °С. Это подтверждает механизм возникновения шума типа 1/f при низких температурах, когда плотность поверхностных состояний возрастает к краю от зоны проводимости, что приводит к росту шума.

При постоянном напряжении питания $U_{\text{пит}}$ уровень шума ИС зависит от величины нагрузки и величины входного напряжения. Максимальное значение шумового напряжения на всех частотах данного эксперимента (160 Гц, 1 кГц, 20 кГц, 1 МГц, 5 МГц) обнаруживается при входных напряжениях 1,3 — 1,4 В при $U_{\text{пит}} = 4,5$ В и сопротивлении нагрузки 470 Ом (активная область передаточной характеристики). В этом режиме проходили и все дальнейшие исследования шумов ИС серии 106. В работах [10,11] показано, что для информативности достаточно ограничиться частотами 160 Гц и 1кГц.

Измерение мощности шума или среднего квадрата шумового напряжение ($\overline{U}_{\rm m}^2$) проводили на специализированной установке по методу прямого усиления с непосредственным отсчетом на ламповом вольтметре. Усилитель низкой частоты с набором Т-образных полосовых фильтров, настроенных на средние частоты 160 Гц и 1 кГц, имеет соответствующие коэффициенты усиления для этих частот. Питание установки и исследуемых ИС осуществляли от аккумуляторов, узлы установки тщательно экранировались. Измеряли шумовые характеристики ИС, их статические и динамические параметры в процессе длительной электротермотренировки (ЭТТ) для получения характера распределения отказов во времени от режима ЭТТ и связи этих параметров с шумовыми критериями. Интегральные распределения статических, динамических и шумовых параметров ИС в процессе различных внешних воздействий позволили выявить информативные электрические параметры, нестабильность которых сказывается на поведении шумовых характеристик. Ухудшение таких параметров схем, как U_{OL} , U_{OH} , $I_{\rm nur,cut}$, $I_{\rm nur,ct}$, вызывает ухудшение шумовых характеристик. В дальнейшем эти параметры были использованы для прогнозирования потенциально ненадежных ИС по критериям НЧ-шума.

Таблица 1

	Распределение ИС $\overline{U}^2_{ m u}, { m MB}^2,$ на частотах			Количество отказов при испытаниях на							
Отличительный признак	160	160 Гц 1 кГц		ЭТТ при 125 °С в течение, ч	безотказность при 125 °С и 50 Гц в течение, ч		надежность при 25 °C и 50 Гц в течение, ч				
	80–130	130–190	40-80	80–140	100	100	500	1000	2000	3000	4000
Недошлифовка карманов (21 шт.)	21	_	21	_	0	0	0	0	0	0	0
Зауженная металлизация (50 шт.)	50	_	50	_	0	0	0	0	0	0	0
Растравление оксида под металлизацией (25 шт.)	22	3	22	3	2	0	1	1	2	0	0
Локальная неравномерность оксида (28 шт.)	20	8	20	8	3	3	2	2	0	3	3
Дырки в оксиде и дефекты включения в SiO ₂ (20 шт.)	13	7	13	7	4	0	1	1	2	3	2
Бездефектные (50 шт.)	50	_	50	0	0	0	0	0	0	0	0

Виды дефектов и количества отказов ИС при испытаниях

Для исследования отбирались кристаллы ИС с определенными видами дефектов и рассматривалось влияние этих дефектов на электропараметры и шумы. Виды отказов и число отказов ИС показаны в табл. 1 [12]. Видно, что 10 % ИС из всех партий имеют уровень шума выше установленных критических значений $\overline{U}_{\rm m}^2 > 130 \text{ мB}^2$ на частоте 160 Гц и $\overline{U}_{\rm m}^2 > 80 \text{ мB}^2$ на частоте 1 кГц. Анализ причин отказов ИС при испытаниях показал, что являются недопустимыми в процессе производства и имеют связь с шумами типа 1/*f* следующие дефекты:

растравливание оксида под металлизацией;

растравливание оксида по дефекту фотошаблонов (локальная неравномерность) на элементы схемы;

дырки в оксиде, расположенные на *p*—*n*-переходах и вблизи *p*—*n*-перехода, приводящие к возникновению паразитных утечек или ухудшению изоляции схемы;

дефекты включения в оксид, расположенные в элементах ИС или на границе *p*—*n*-переходов.

ИС с допустимыми по технологическому циклу дефектами (недошлифовка, зауженная металлизация и др.) и уровнем шума ниже установленных критериев не имеют отказов при наработке до 15000 ч. При соответствующем режиме измерения уровень НЧ-шумов ИС характеризует основной механизм параметрических отказов ИС за счет поверхностных дефектов. Выявлено, что основным механизмом деградации кремниевого *p*—*n*-перехода является процесс инверсии поверхности, энергия активации которого мала. Это обстоятельство определяет выбор воздействующего фактора для быстрого выявления процесса инверсии какого-либо перехода в ИС. Таким эффективно воздействующим фактором является повышенное напряжение питания ИС (10 В), при котором процессы деградации проявляются в аномальных значениях уровня избыточных шумов, значительно превышающих уровни установленных критических значений. Критериями шумовых характеристик при отбраковке ИС серии 106 являются величины $\overline{U}_{\rm m}^2$, $S_{\rm m}$ на частоте 160 Гц ($\overline{U}_{\rm m1}^2 > 130$ мВ², $S_{\rm m1} > 1,3$ мкВ²/Гц) и на частоте 1кГц ($\overline{U}_{\rm m2}^2 > 80$ мВ², $S_{\rm m2} > 0,08$ мкВ²/Гц).

Таблица 2

ŀ	Количество факти	чески отказавших ИС при	испытаниях различ	ных видов

		Вид испытания						
Наименование этапов расчета	Обозначение	ЭТТ (ступен- чатый режим при 125 °С)	ЭТТ (ступен- чатый режим при 25 °С)	ЭТТ (форсиро- ванный режим при 125 °С)	ЭТТ (форсиро- ванный режим при 25 °C)	ЭТТ (режим ТУ при 125 °С)	Сводные данные по 5 партиям	
Количество схем	N	360	121	224	95	500	1300	
Количество отказов	N_1	41	7	10	3	1	62	
Процент отказов	$(N_1/N) \times 100$	11,4	5,8	4,46	3,16	0,2	4,8	
Количество отказов, прогнозир. по шумам	<i>n</i> ₁	32	6	8	3	1	50	
Количество годных схем, прогнозир. по шумам, как отказавших	<i>n</i> ₂	134	41	16	17	21	229	
Суммарное количество пргнозир. отказов	$(n_1 + n_2)$	166	47	24	20	22	279	
Процент прогнозир. отказов	$(n_1 + n_2) \times 100/N$	46,1	38,8	10,7	21,1	4,4	21,5	
Процент прогнозир. отказов по шумам	$N_1 \times 100/(n_1 + n_2)$	19,3	12,8	33,3	15	4,5	17	
Процент отказов не прогнозир. по шумам	$(N_1 - n_1) \times 100/$ $(N - n_1 + n_2)$	4,6	1,3	0,01	0	0	1,18	

Как видно из табл. 2 (сводные данные), процент фактически отказавших ИС равен 4,8 вместо 21,5 % (ожидаемого по прогнозу), что составляет всего 17,9 % отказавших ИС от числа прогнозируемых. В то же время отказало 1,18 % ИС, годных по шумовым критериям.

Поэтому, на наш взгляд, из-за малой достоверности методов, использующих шумовые критерии, они не могут быть рекомендованы в состав отбраковочных испытаний как методы индивидуального прогнозирования потенциально ненадежных ИС, но могут быть применены для сравнения различных технологических партий. Это мнение получило подтверждение в работе [13], где изложены результаты измерений шумовых характеристик кристаллов ИС на пластинах на специально разработанной авторами высокочувствительной установке. Эти измерения позволяют:

проводить отбраковку сильношумящих изделий прямо на пластине;

оперативно устанавливать источники и причины появления НЧ-шума в процессе изготовления изделий и вносить коррекции в соответствующие технологические режимы;

выяснить влияние операций резки, монтажа и сборки на шумовые характеристики изделий и отрабатывать их оптимальные режимы;

получать данные о степени неоднородности распределения шумовых характеристик на пластинах.

Измерение спектральной плотности шумового напряжения, приведенной к входу изделия (ИС, транзистора), показало совпадение уровней шума в ИС на пластине и в готовых изделиях. Это указывает на то, что операции сборки, выполняемые при изготовлении ИС из годных кристаллов на пластине, обычно не вносят дополнительного шума даже в тех случаях, когда шум схем весьма мал.

РАЗДЕЛЕНИЕ ИС ПО НАДЕЖНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ НЧ-ШУМА

Разработка и проверка первых трех методов проводились на ИС типа К137ЛЕ2 (2 элемента ЗИЛИ—НЕ в 14 выводном корпусе DIP, эмиттерно-связанная логика).

Для эксперимента было отобрано методом случайной выборки 20 ИС типа К137ЛЕ2. Измерение $U_{\rm m}^2$ проводилось для одного элемента ЗИЛИ—НЕ-схемы методом прямого измерения без подачи напряжения общего питания с заданием рабочего тока через выводы «вход — общая точка» от внешнего источника напряжения. Измерения $\overline{U}_{\rm m}^2$ проводилось в диапазоне частот 900—1100 Гц (центральная частота 1 кГц, полоса частот $\Delta f = 200$ Гц, время усреднения $\tau = 2$ с). **Первый способ** оценки надежности основан на анализе зависимости $\overline{U}_{\rm m}^2$ от тока для входных

выводов, полученной по результатам вышеописанного эксперимента (рис. 2).

Из рис. 2 для наихудшей (ИС № 2) и наилучшей (ИС № 4) зависимостей видно, что при значении тока до 8 мА зависимость $\overline{U}_{\rm m}^2$ от тока имеет вид прямой, а при значениях тока 10 мА у ряда схем значение $\overline{U}_{\rm m}^2$ резко возрастает, поэтому измерение $\overline{U}_{\rm m}^2$ проводили при двух значениях тока: 6 и 10 мА.



Рис. 2. Зависимость \overline{U}_{μ}^2 от тока по выводам «вход—общая точка».

В табл. 3 приведены значения $\bar{U}_{\rm m}^2$ при токах 6 и 10 мА и коэффициент их относительного изменения $\bar{U}_{\rm m}^2$: $K = \bar{U}_{\rm m10}^2 / \bar{U}_{\rm m6}^2$ с увеличением тока.

Таблица 3

No HC	Значения $\overline{U}_{\rm m}^2$,	$K = \overline{U^2} + \overline{U^2}$	
M MC	6	10	$K = U_{m10} / U_{m6}$
1	22	30	1,36
2	34	70	2,06
3	30	37	1,23
4	15	15	1,00
5	21	22	1,05
6	23	34	1,48
7	23	34	1,48
8	21	30	1,43
9	21	25	1,19
10	22	29	1,32
11	24	35	1,46
12	21	28	1,33
13	20	25	1,25
14	25	30	1,20
15	27	33	1,22
16	18	22	1,22
17	17	18	1,06
18	24	32	1,33
19	21	30	1,43
20	25	41	1,64

Уровень шума (\overline{U}_{u}^{2}) ИС типа К137ЛЕ2 при токах 6 и 10 мА и коэффициент их относительного изменения

Если выбрать критерий, что для надежных схем K < 1,5, то схемы $N \ge 2$, 20 по этому критерию будут потенциально ненадежными.

Второй способ является способом разделения ИС по надежности. Он основан на зависимости $\overline{U}_{\rm m}^2$ от напряжения питания. Результаты измерения уровня НЧ-шума 20 ИС при напряжении питания 2 В (значение критического напряжения питания для ИС данного типа) и 5 В (номинальное напряжение питания) представлены в табл. 4, где приведены также значения относительного увеличения интенсивности шума $K = \overline{U}_{\rm m5}^2/\overline{U}_{\rm m2}^2$.

Если выбрать критерий, что для надежных схем K < 2,8, то схемы № 2, 20 по этому критерию будут потенциально ненадежными. Можно разделить партию по надежности на три группы: ИС повышенной надежности, имеющие значение K < 2 (схемы № 3, 4, 9, 14, 15, 16, 17); ИС с надежностью, соответствующей техническим условиям, имеющие значения 2 < K < 2,8 (схемы № 1, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 18, 19) и ИС потенциально ненадежные, имеющие значение K > 2,8 (схемы № 2, 20).

Подтверждение разделения партии ИС на надежные и потенциально ненадежные было получено в результате испытаний на безотказность (500 ч, повышенная температура, максимально допустимая нагрузка), когда ИС № 2, 20 имели параметрический отказ.

Третий способ также является способом разделения ИС по надежности. Этот способ более достоверный, поскольку активация дефектов в структуре ППИ имеет температурную зависимость, но более трудоемкий. Он основан на зависимости \overline{U}_{m}^{2} от температуры. Прямой рабочий ток, проходя по структуре ИС, позволяет регистрировать \overline{U}_{m}^{2} , порожденный дефектами структуры, имеющими температурную зависимость [11]. Для каждой ИС по результатам измерений подсчитывался коэффициент *K* по формуле:

$$K = \frac{\left|\overline{U}_{m100}^2 - \overline{U}_{m25}^2\right| + \left|\overline{U}_{m25}^2 - \overline{U}_{m0}^2\right|}{\overline{U}_{m25}^2},\tag{2}$$

где $\bar{U}_{\rm m25}^2$, $\bar{U}_{\rm m0}^2$, $\bar{U}_{\rm m100}^2$ — значения уровня шума при температурах, соответствующих нормальной, нулевой и 100 °C.

Таблица 4

No HC	Значения $\overline{U}_{\mathrm{m}}^2$, мВ ² , при напр	Значения $ar{U}_{ m m}^2$, мВ², при напряжении питания, В			
J™ PIC	2	5	$K = O_{\text{III}5} / O_{\text{III}2}$		
1	52	130	2,50		
2	50	190	3,80		
3	77	148	1,92		
4	63	95	1,51		
5	52	110	2,12		
6	52	142	2,73		
7	55	143	2,60		
8	48	128	2,67		
9	59	112	1,90		
10	53	129	2,43		
11	58	147	2,53		
12	55	122	2,22		
13	53	112	2,11		
14	68	127	1,87		
15	78	141	1,81		
16	63	111	1,76		
17	59	97	1,64		
18	56	140	2,50		
19	50	128	2,56		
20	58	164	2,83		

Данные измерений и коэффициента K представлены в табл. 5. Если выбрать критерий для надежных схем K < 0.7, то схемы № 2, 5 будут потенциально ненадежными.

Таблица 5

Ma HC	No puporo	$ar{U}_{ m m}^2$, мВ	V		
	л⊻ вывода	0°C	25°C	100°C	K
1	3	27	22	28	0,5
	4	26	22	29	0,5
	5	25	21	26	0,43
2	3	43	34	56	0,91
	4	45	35	59	0,97
	5	42	33	54	0,91
3	3	36	31	40	0,45
	4	34	30	38	0,4
	5	35	30	37	0,4
4	3	17	15	20	0,47
	4	17	15	20	0,47
	5	16	15	18	0,27
5	3	28	20	27	0,75
	4	28	21	29	0,71
	5	30	22	30	0,73

Уровень НЧ-шума ИС типа К137ЛЕ2 при различных температурах

Четвертый способ — способ разделения ИС по надежности с использованием показателя формы спектра НЧ-шума апробирован на ИС типа КР537РУ13 (статическое ОЗУ, выполненное по

технологии КМОП, напряжение питания по ТУ 5 В ± 10 %). Методом случайной выборки было отобрано 10 ИС указанного типа, у которых методом прямого измерения измерялось значение $\overline{U}_{\mu\nu}^2$ по выводам «питание — общая точка» на частотах 200 Гц и 1 кГц, ширина полосы частот Δf — 200 Гц, время усреднения $\tau = 2$ с [14].

Для предварительной оценки были измерены зависимости $\overline{U}_{\rm m}^2$ на частоте 1000 Гц от напряжения питания на 5 ИС данного типа (рис. 3). Из рис. 3 видно, что при питании 5 В происходит более заметный разброс значений $\overline{U}_{\rm m}^2$ отдельных ИС. Именно это значение напряжения было выбрано для измерения шума на частотах 200 Гц и 1 кГц (табл. 6). Параметр показатель формы спектра γ определяли из выражения (1) по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{\lg(\bar{U}_{m200}^2/\bar{U}_{m1000}^2)}{\lg(1000/200)} = 1,43\lg(\bar{U}_{m200}^2/\bar{U}_{m1000}^2),$$
(3)

где \bar{U}_{m200}^2 и \bar{U}_{m1000}^2 — значения шума на частотах 200 и 1000 Гц соответственно.



Рис. 3. Зависимость уровня шума на выводах «питание — общая точка» от напряжения питания для ИС типа КР537РУ13.

Если выбрать критерий для надежных схем γ < 1,3, то схемы № 5, 8 будут потенциально ненадежными.

№ ИС	Значение шума $\overline{U}_{ m m}^2$, м	икВ ² , на частотах, Гц	~
	200	1000	Ŷ
1	439,9	68	1,16
2	553,8	79	1,21
3	203,3	42	0,98
4	394,5	64	1,13
5	786	97	1,3
6	419,7	67	1,14
7	201,6	43	0,96
8	833,4	98	1,33
9	303,5	56	1,05
10	534,3	75	1,22

Уровень НЧ-шума ИС типа К137ЛЕ2 на двух частотах

Можно разделить партию по надежности на три группы: ИС повышенной надежности, имеющие значение γ < 1 (схемы № 3, 7); ИС с надежностью, соответствующей техническим усло-

Таблица б

виям, имеющие значения $1 < \gamma < 1,3$ (схемы 9, 4, 6, 1, 2, 10), и ИС — потенциально ненадежные, имеющие значение $\gamma < 1,3$ (схемы № 5,8). При проведении испытаний на безотказность (500 ч, 85 °С) ИС № 5, 8 имели параметрические отказы.

Пятый способ — способ разделения ППИ по надежности с использованием параметров шума и воздействия электростатических разрядов (ЭСР), который заключается в том, что на партии ППИ проводят измерения уровня НЧ-шума при нормальных условиях, затем воздействуют 5—10 импульсами ЭСР обоих знаков допустимой по ТУ величины, проводят температурный отжиг при максимально допустимой по ТУ температуре кристалла прибора в течение 4—6 ч и вновь измеряют уровень шума при нормальной температуре. Определяют разность уровней шума при начальном замере и после отжига для каждого ППИ: $\Delta = (\overline{U}_{m\,\mu}^2 - \overline{U}_{m\,0T}^2)$. ППИ считается более надежным при выполнении критерия: $\Delta < A$. Величина A устанавливается по набору статистики для каждого типа приборов [14—16].

Пример осуществления способа приведен в работе [17]. На 23 полупроводниковых резисторах интегральной схемы типа КА1034НРЗ были измерены значения уровня шума до, после воздействия пятью импульсами ЭСР напряжения амплитудой ± 800 В и после отжига при температуре 100 °C в течение четырех часов и представлены в табл. 7.

Таблица 7

No may fono		$A \sim D^2$		
л⊴ приоора	начальное	после ЭСР	после отжига	Δ, MD ⁻
1	1,9	2,8	1,9	0
2	1,8	2,6	1,9	0,1
3	1,95	2,7	2,0	0,05
4	2,05	3,8	2,05	0
5	3,00	4,8	2,8	0,2
6	1,98	2,7	1,98	0
7	2,15	3,9	2,25	0,1
8	1,2	4,0	2,4	0,2
9	2,58	4,0	2,68	0,1
10	2,35	4,2	2,45	0,2
11	1,98	2,8	1,98	0
12	2,5	3,9	2,7	0,2
13	2,32	3,5	2,4	0,08
14	2,4	3,7	2,6	0,2
15	3,2	5,0	3,6	0,4
16	2,6	4,2	2,7	0,1
17	2,9	4,7	3,1	0,2
18	2,8	4,8	3,0	0,2
19	2,0	3,0	2,0	0
20	2,1	3,4	2,2	0,1
21	1,95	2,6	1,95	0
22	2,35	3,7	2,55	0,2
23	2,19	2,9	2,22	0,03

Значения уровня шума ИС типа КА1034НРЗ до, после воздействия ЭСР и после изотермического отжига при температуре 100 °С в течение четырех часов

Получены следующие данные по величине $\Delta = (\overline{U}_{m\,\mu}^2 - \overline{U}_{m\,\text{orm}}^2)$: 6 приборов имели разность уровня шумов до и после воздействия, равную 0 мВ²; 8 приборов < 0,1 мВ²; 8 приборов < 0,2 мВ²; 1 прибор < 0,4 мВ².

Если принять для данного типа приборов критерий для более надежных приборов < 0,1 мВ², то приборы № 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 13, 16, 19, 20, 21, 23 будут более надежными, чем приборы № 5, 8, 10, 12, 14, 15, 17, 18, 22.

Шестой способ. Способ разделения ИС по надежности с помощью НЧ-шумов и термоциклирования.

С целью повышения достоверности термоциклирования и повышения его функциональных возможностей проводится измерение НЧ-шума до термоциклирования и после. Проведение составных испытаний «контроль уровня шума + термоциклирование + контроль уровня шума» позволит рассматривать поведение каждого изделия, его предрасположенность к ранним или поздним отказам.

Термоциклирование проводят в диапазоне крайних температур, допустимых по техническим условиям на изделие. Количество термоциклов не менее десяти.

Для достаточной выборки ППИ из партий одного типа находят коэффициент увеличения значений НЧ-шума после термоциклирования в сравнении с начальным значением. Выбирается критерий увеличения шума. ИС, у которых коэффициент увеличения шума будет больше установленного критерия, считается потенциально ненадежным [18].

В качестве примера проведен эксперимент на 12 ИС — операционных усилителей ОРА735 (выполненных по технологии КМОП) с диапазоном значений напряжения питания по ТУ 2,7 — 12 В) в 8 выводном корпусе DIP. Среднеквадратичное напряжение шума $\overline{U}_{\rm m}^2$ измерялось методом прямого измерения по выводам «питание—общая точка» на частоте 1000 Гц после проведения каждого термоцикла (0—100°С с выдержкой при каждой температуре 30 мин). Схема включения ИС — повторитель (инвертирующий вход соединен с выходом) с заземленным неинвертирующим входом. Напряжение питания выбрано 8 В, так как при этом значении наблюдается середина участ-ка постоянного значения $\overline{U}_{\rm m}^2$.

Результаты измерений при составных испытаниях «контроль уровня НЧ-шума + термоциклирование + контроль уровня НЧ-шума», а также значения относительного изменения шума $N = \overline{U}_{m10\,\tau\eta}^2 / \overline{U}_{m\,Hav}^2$, где $\overline{U}_{m\,Hav}^2$ и $\overline{U}_{m10\,\tau\eta}^2$ — значение шума до термоциклирования и после 10 термоциклов соответственно, когда происходит достаточно большой разброс значений шума ИС в партии по сравнению с исходным значением, представлены в табл. 8 [19].

Значение $\bar{U}_{\rm m}^2$, мкВ², в цепи питания ИС типа ОРА735 при термоциклировании

Таблица	8

№ИС		N					
	0	2	4	6	8	10	IN
1	2,50	2,55	2,65	2,68	2,82	2,88	1,15
2	2,69	2,97	3,03	3,08	3,24	3,28	1,22
3	2,49	2,58	2,62	2,63	2,80	2,89	1,16
4	2,54	2,70	2,74	2,82	2,88	2,93	1,15
5	2,31	2,37	2,41	2,43	2,48	2,49	1,08
6	2,53	2,70	2,75	2,82	2,91	2,99	1,18
7	2,51	2,66	2,72	2,77	2,84	2,86	1,14
8	3,13	3,31	3,59	3,76	3,86	3,88	1,24
9	2,71	2,93	3,04	3,06	3,12	3,16	1,16
10	2,41	2,52	2,57	2,65	2,69	2,72	1,13
11	2,61	2,80	2,91	2,99	3,02	3,06	1,17
12	2,53	2,65	2,74	2,79	2,84	2,91	1,15

Установив коэффициент N < 1, 2 для надежных ИС, можно сказать, что схемы № 2, 8 будут потенциально ненадежными. Для проверки данного вывода все ИС были подвергнуты 200 термоциклам. Схемы № 2, 8 показали снижение электрического параметра — частоты единичного усиления ниже нормы, установленной техническими условиями, а значение тока покоя в цепи питания у данных схем увеличилось в 2-3 раза, в то время как у остальных схем осталось практически без изменений.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ

Эффективность диагностических методов прогнозирования надежности определяется степенью корреляционной связи между данными диагностических методов и результатами испытаний на надежность в течение 1000 ч. Представим результаты разбраковки ППИ каждым из диагностических методов в виде двух уровней надежности в числовой форме: потенциально менее надежные изделия символом «–1», приборы средней надежности «0» [20, 21].

Получим совокупность значений параметров по исследуемому методу разбраковки ППИ $X = (X_1, ..., X_n)$, где n — количество изделий в рассматриваемой выборке, и по методу, взятому за эталон (в нашем случае эталонным методом является испытание на надежность), $Y = (Y_1, ..., Y_n)$. Коэффициент корреляции β между совокупностями данных X и Y будет иметь вид [22]:

$$\rho = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X}) (Y_i - \overline{Y})}{\sigma_X \sigma_Y}, \qquad (4)$$

где \overline{X} и \overline{Y} — математические ожидания, рассчитываемые по формулам:

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_{i} \quad \text{if } \overline{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Y_{i},$$
(5)

а σ_v и σ_v — среднеквадратичные отклонения, рассчитываемые по формулам:

$$\sigma_{X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X})^{2}}; \quad \sigma_{Y} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - \overline{Y})^{2}}.$$
 (6)

Таблица 9

N⁰	Название способа	Количество ИС	Результаты		Результаты на надежность (2000 ч)		Коэффициент
метода	надежности		критерий	забракованные схемы №	критерий	забракованные схемы №	корреляции р
1	Способ с использованием зависимости НЧ-шума от тока	110	<i>K</i> ≤ 1,5	21, 37, 51, 53			1,0000
2	Способ с использованием зависимости НЧ-шума от напряжения питания	110	<i>K</i> ≤ 1,75	21,37, 51,53	$U_0 \ge 4,85$	21,37, 51,53	1,0000
3	Способ с использованием зависимости НЧ-шума от температуры	110	<i>F</i> ≤ 0,45	21, 23, 37, 53			0,7406
4	Способ с использованием показателя формы спектра НЧ-шума	110	$\gamma \le 1,00$	14, 1, 23, 37, 53			0,6571
5	Способ с использованием НЧ-шумов и воздействия ЭСР	110	<i>M</i> ≤ 0,30	21, 37, 51,53			1,0000
6	Способ с использованием НЧ-шумов и термоциклирования	110	<i>N</i> ≤ 1,20	21, 37, 51,53			1,0000

Коэффициент корреляции для диагностических методов разделения ИС по надежности

Полученные коэффициенты корреляции, рассчитанные по вышеприведенным формулам, для всех рассматриваемых диагностических методов представлены в табл. 9 [7] на примере испытаний двух партий ИС типа К142ЕН5А (стабилизатор напряжения с фиксированным выходным напряжением), выпускаемых ВЗПП совместно с заводом «Транзистор» (г. Минск).

Из таблицы видно, что наибольшую корреляцию показали способы с комбинацией воздействий. Если между переменными отсутствует корреляция, на выборке одного размера почти всегда будет рассматриваться ненулевой коэффициент корреляции. Поэтому нужно провести тест на значимость. Расчет коэффициента значимости для коэффициента корреляции показал, что с достоверной вероятностью 0,95 можно сказать, что сильная корреляционная зависимость существует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены различные способы разделения ИС по надежности с использованием только параметров НЧ-шума и с использованием параметров НЧ-шума в комбинации с различными видами воздействий.

Представленные результаты показывают, что все комбинированные диагностические методы с использованием НЧ-шумов имеют высокую достоверность, практически равную испытаниям на надежность в течение 1000 ч, что делает данные методики более привлекательными с точки зрения их применения.

Еще одним важным моментом является правильность выбора размера выборки и критерия годности. В рассматриваемых методиках критерий годности устанавливается индивидуально для каждого типа приборов на основе статистики, полученной априори на представительной выборке. В идеальном случае необходимо разработать методику определения критерия для отбраковки потенциально ненадежных приборов, обеспечивающего высокий уровень достоверности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пряников В.С.* Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1978. 112 с. 2. *Лукьянчикова Н.Б.* Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах.

М.: Радио и связь, 1990. 225 с.

3. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотного шума. М.: Энергия, 1972. 153 с.

4. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. М.: Сов. радио, 1977. 465 с.

5. Jones B.K., Xu Y.Z. Excess Noise as an Idicator of Digital Integrated Circuit Reliability // Microelectronic Reliability. 1991. V. 31. No. 2/3. P. 351—361.

6. Разработка методики и аппаратуры контроля качества интегральных микросхем: отчет о НИР (заключ.): 13-63/82 / Ульянов. политехн. ин-т; рук. Афанасьев Г.Ф.; исполн.: Дулов О.А. и др. Ульяновск, 1984. 81 с. № ГР 0182.0076278. Инв. № 0285.0037307.

7. Горлов М.И., Сергеев В.А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий / Под научным ред. М.И. Горлова. Ульяновск: УлГТУ, 2020. 470 с.

8. Claeys C., Simoenl E., Agopian P.G.D., Martino J.A., M. Aoulaiche, B. Cretus, Fang W., Rooyackers R., Vandooren A., Veloso A., Jurczak M., Collaertl N., Thean A. The Smaller the Noisier? Low Frequency Noise Diagnostics of Advanced Semiconductor Devices / August Conference: 2015 30-th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro). DOI: 10.1109/SBMicro.2015.7298104

9. Горлов М.И., Ерохин В.С., Некрасов В.А., Чернышев В.В. Характер изменения шумовых свойств интегральных схем типа ДТЛ от вида испытаний / Сб. трудов по полупроводниковым материалам, приборам и их применению. Воронеж: ВПИ, 1971. С. 182—188.

10. Некрасов В.А., Горлов М.И. Исследование шумовых свойств низкочастотного спектра ИС как одного из методов неразрушающего контроля // Электронная техника. 1975. Сер. 8. Вып. 1. С. 32—35.

11. Некрасов В.А., Горлов М.И., Маковий А.И., Голомедов А.В. О возможности прогнозирования потенциально ненадежных микросхем ТТЛ по шумовым критериям низкочастотного спектра // Электронная техника. Сер. 8. 1975. Вып. 2. С. 70—72.

12. *Некрасов В.А., Горлов М.И., Дурнин И.Д.* Выборочный неразрушающий контроль качества интегральных схем с ТТЛ-логикой в ходе серийного изготовления // Электронная техника. Сер. 8. 1977. Вып. 2. С. 66—69.

13. Гарбер Н.П., Лукьянчинова Н.Б., Абру У.Р., Жариков В.А., Кропман Д.И. Установка для измерения шумовых характеристик микросхем и дискретных транзисторов на пластинах // Электронная промышленность. 1991. Вып. 7. С. 27—29.

14. Горлов М.И., Жарких А.П., Емельянов А.В. Шумы полупроводниковых изделий и возможность прогнозирования их качества и надежности // Петербургский журнал электроники. 2005. № 1. С. 54—61.

15. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Жарких А.П., Смирнов Д.Ю. Влияние электростатических воздействий на интегральные схемы типа КА1034HP3 / Межв. сб. науч. трудов «Твердотельная электроника и микроэлектроника». Воронеж: ВГТУ, 2003. С. 74—78.

16. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Жарких А.П., Смирнов Д.Ю. Способ разделения полупроводниковых приборов по надежности / Патент РФ № 2258234. Опубл. 10.08.2005. Бюл. № 22. 17. Горлов М.И., Жарких А.П., Шишкин И.А., Смирнов Д.Ю. Использование шумовых параметров и воздействия электростатических разрядов для разделения полупроводниковых приборов по надежности / Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докл. науч.техн. семинара. М.: МЭИ, 2005. С. 14—16.

18. Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Сегал Ю.Е., Емельянов А.В. Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании // Известия вузов. Электроника. 2005. № 6. С. 89—92

19. Горлов М.И., Козьяков Н.Н., Смирнов Д.Ю. Диагностика надежности ИС по НЧ-шуму с использованием термоциклирования // Известия вузов. Электроника. 2007. № 4. С. 89—91.

20. Бордюжа О.Л. Диагностический контроль качества и надежности кремниевых биполярных интегральных схем / Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 1998. 163 с.

21. Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Козьяков Н.Н. Достоверность диагностических методов исследования на основе анализа низкочастотных шумов // Известия вузов. Электроника. 2009. № 1. С. 79—86.

22. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.

К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭХОГРАММ ПРИ КОНТАКТНОМ СПОСОБЕ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

© 2022 г. А.В. Мартыненко^{1,*}

¹АО «НИИ НПО «ЛУЧ», Россия 142103 Подольск, ул. Железнодорожная, 24 *E-mail: atilla123@ya.ru

Поступила в редакцию 24.09.2021; после доработки 30.12.2021 Принята к публикации 10.01.2022

Эхограмма ультразвукового импульсного дефектоскопа, при контактном способе акустического контакта, рассмотрена как свертка при приеме преобразователем с протектором, согласованным с контактной средой, акустического импульса, излученного им же через контактную среду в нагрузку, отраженного от нее и от этого преобразователя. Предлагается методика расчета эхограмм для изделий, преобразователей, контактных слоев из любых материалов, с любой величиной контактного слоя при условии известных акустических сопротивлений используемых материалов. Предложен метод компенсации мешающих отражений для преобразователя, согласованного с контактной средой.

Ключевые слова: УЗ преобразователь, свертка, реконструкция, интерференция, чувствительность, разрешение, протектор, контактный способ.

DOI: 10.31857/S0130308222010031

Известны иммерсионный и контактный способы обеспечения контакта пьезоэлектрического преобразователя с объектом контроля при ультразвуковом контроле. В обоих способах ввод ультразвуковых колебаний в контролируемое изделие осуществляется через слой вещества — акустическую контактную среду. В качестве материала слоя вещества чаще всего используют воду, и в этом случае его величина для контактного способа на частоте 3,9 МГц может составлять 0,19 мм или менее [1]. Исходя из идентичности контактной среды, а также при прочих равных условиях, чувствительность обоих способов также должна быть близка. В подтверждение этого в работе [2] показана возможность «получить в иммерсионном варианте чувствительность, большую, чем в контактном, даже при контроле хорошо обработанных изделий». С другой стороны, в работах [3, 4] авторы считают, что «иммерсионный способ обеспечивает высокую стабильность акустического контакта, однако его чувствительность в 10-100 раз ниже, чем при контактном контроле».

Такое положение приводит зачастую к необоснованному выбору способов и, как следствие, к недоиспользованию их возможностей.

Из литературы известно, что анализ процесса интерференции ультразвуковых волн в слое контактной среды, который чаще называют как слой контактной жидкости, основывается на простой модели акустического тракта, в которой этот слой находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением. Такими материалами могут быть: металлическое изделие и протектор преобразователя из минералокерамики, металлическое изделие и призма преобразователя, металлическое изделие и пьезоэлемент преобразователя [2, 4—6]. В работе [5] автор объясняет, что «при прохождении импульса через слой контактной жидкости образуются импульсы...его многократных отражений от границ слоя..., все эти импульсы интерферируют, то есть складываются с учетом разности фаз, образуя один импульс, амплитуда полуволн которого зависит от толщины слоя» и «наблюдаются следующие эффекты: осцилляция амплитуд полуволн результирующего импульса в зависимости от фазы, то есть от толщины слоя контактной жидкости и сдвиг результирующего импульса». Также автор отмечает, что «причина осцилляций — гашение полуволн при их сложении в противофазе и усиление их при сложении в фазе; чем больше произведение коэффициентов отражения волн от границ слоя контактной жидкости и количество импульсов участвующих в интерференции, тем больше размах осцилляций».

Известно использование для контактного способа преобразователя с протектором из минералокерамики или совсем без протектора. Однако в [7] отмечается, что «при использовании преобразователя с твердым протектором или совсем без протектора, наблюдаются большие осцилляции чувствительности и ухудшение лучевой разрешающей способности».

Известны работы [3, 8, 9] по «выяснению возможности создания конструкции прямого преобразователя, который можно было бы применять как для иммерсионного, так и для обычного способов контроля». Однако результаты экспериментальных исследований [8] для прямого преобразователя, состоящего из пьезопластины с демпфером и протектора из минералокерами-

ки, для иммерсионного способа показали, что длительность импульса составляет более 12 полупериодов, а «амплитуда импульса более чем на 20 дБ ниже, чем для просто демпфированной пьезопластины», что на 35 дБ хуже, чем для преобразователя с протектором и согласованного с иммерсионной средой [10]. Такая же длительность для преобразователя с четвертьволновым протектором получена в [9], где авторы утверждают, «что применение протекторного слоя в четверть длины волны зачастую бывает необоснованным», а «расчетно-теоретическое исследование, осуществленное в широком диапазоне значений удельных акустических импедансов материалов протекторного слоя, позволило установить, что преобразователь с протектором указанной волновой толщины позволяет получать короткие акустические импульсы лишь для случаев относительно небольших волновых толщин внешнего контактного слоя». Дополнительно [11] «в работе показано, что слой контактной жидкости с характеристическим импедансом, соизмеримым с импедансом протектора, также может влиять на положение и амплитуду максимумов частотной характеристики, то есть на форму импульса излучаемого сигнала». И даже в [12] «слой контактной жидкости (толщиной, малой по сравнению с длиной волны в нем) может привести к появлению высокочастотных локальных максимумов, обусловленных колебаниями четвертьволновой протектор-слой, и осцилляциям огибающих импульсов. Согласование протектора по импедансу, согласно формуле (13) (среднегеометрическому между импедансами соседних сред — прим. автора), не приводит к существенному улучшению характеристик эхоимпульсов».

Интересны вопросы: из работы [2], где автор отмечает, что «нестабильность акустического контакта (изменение чувствительности) при контактном способе контроля тем больше, чем меньше шероховатость поверхности контролируемого изделия, и может достигать 20 дБ»; из работы [3] — «явления существенного уменьшения частоты максимума спектра эхосигнала при нагружении прямого преобразователя на иммерсионную среду по сравнению с нагружением на сталь».

Стоит отметить и то, что как показывает практика [13], «основанием для применения является довольно высокая стабильность контакта преобразователя с изделием, обеспечивающая удобство контроля», а «изготовление преобразователей с такими протекторами (на основе эпоксидной смолы с наполнителями) привлекает своей достаточной простотой и использованием доступных материалов».

Можно предположить, что преобразователи из представленных работ не согласованы с контактной средой, на что указывает «спектр экспериментального импульса донного сигнала, полученного при нагрузке преобразователя с протектором из минералокерамики на иммерсионный слой (вода)», подобные спектры приведены в [7, 8, 12—14] и который присущ спектрам преобразователей с толщиной протектора большей, чем четверть длины волны (из-за чего спектр «линейчатый»). Другой пример из работ [9, 11], в которых приведен «импульс продольной волны, излучаемый преобразователем с протектором..., демпфером с наполнителем и слоем контактной жидкости» с характерными биениями, обусловленными неполным согласованием протектора с преобразователем и со слоем контактной жидкости. Поэтому, из-за несогласованности преобразователя с контактной средой, возможно и выводы, сделанные авторами представленных работ (см. выше), соответствуют выбранной конструкции преобразователя.

Отметим некоторые недостатки в вышеупомянутых работах:

представлен анализ процессов интерференции эхоимпульсов в квазигармоническом режиме для простой модели, в которой слой контактной жидкости находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением;

в некоторых случаях [4, 8] модель не учитывает влияния клеевого соединения с малым акустическим сопротивлением, разделяющее протектор с пьезоэлементом преобразователя;

формы представленных в статьях эхоимпульсов и их математическое представление в работах, например [5] и [15], отличаются;

необходимо учитывать то, что интерференция происходит с излученным преобразователем акустическим импульсом, форма которого существенно отличается от формы эхограммы (эхоимпульса), используемой для анализа в вышеназванных работах;

рассматриваемые выше преобразователи не согласованы оптимально с материалом слоя контактной жидкости;

не рассмотрена модель, не предложен расчет процесса интерференции «коротких» излученных ультразвуковых импульсов в трех слоях: контактной среды, протектора и пьезоэлемента преобразователя, оптимально согласованного с контактной средой, и на основании расчета не предложена форма эхограммы, наблюдаемая на экране дефектоскопа в виде эхоимпульса.

Автором данной статьи решен вопрос создания конструкции иммерсионного пьезоэлектрического преобразователя, оптимально согласованного со слоем вещества, или коротко — оптимального преобразователя [10, 15—18]. Рассмотрен режим излучения и приема. Решена прямая задача, приведена математическая модель эхограммы, форма которой наблюдаема на экране ультразвукового импульсного дефектоскопа. Предложено решение обратной задачи. Показано, что преобразователь с протектором можно оптимально согласовать со слоем вещества, при этом длительность эхоимпульса минимальна и составляет три длины волны (3 периода колебаний в эхоимпульсе) при значительной чувствительности 22,5 дБ, что меняет мнение о чувствительности иммерсионного способа относительно контактного способа контроля [3, 4]. Из проведенных автором экспериментов видно, что преобразователи с протектором из минералокерамики при сравнении с предложенным автором согласованным преобразователем проигрывают в чувствительности, стабильности акустического контакта. Необходим сильный прижим контактного преобразователя к изделию, заметна зависимость показаний от прижима. С другой стороны, предложенный преобразователь, прижатый через контактный слой к изделию, и далее без посторонней помощи держит данный контакт, обеспечивая стабильность эхограммы (чувствительность и разрешение) даже при перемещении по изделию без прижима. Чувствительность согласованного преобразователя (импульсный коэффициент преобразования), измеренная по [19] как для контактного преобразователя, составила (-40) дБ, в то время как для контактного преобразователя 5-К6 А-001 — (-47) дБ при сильном прижатии. Для любого преобразователя расчетные потери на прохождение поверхности ввода стальной акустической нагрузки составляют (-17,5) дБ, то есть чувствительность согласованного преобразователя предсказуема и складывается из вышеназванной чувствительности в -22,5 дБ и потерь на прохождение поверхности ввода (-17,5) дБ. Однако применимость такого согласованного преобразователя для контактного способа контроля была бы интересна и востребована, судя по публикациям.

Также в настоящей работе сделана попытка проанализировать процесс интерференции ультразвуковых «коротких» импульсов, излучаемых преобразователем, оптимально согласованным со средой, для простой или однослойной модели контактного способа, в которой слой находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением; для более сложной, многослойной модели, в которой контактный слой находится между материалом с большим акустическим сопротивлением и последовательными слоями материалов протектора, пьезоэлемента, демпфера преобразователя, оптимально согласованного с контактной средой. Это позволит прояснить вопрос формирования эхограммы контактного способа, искажений, привносимых в эхограмму интерференцией в слое контактной жидкости, их влияние на характеристики способа контроля и можно ли скомпенсировать искажения при сохранении чувствительности и разрешения? Эти вопросы, по мнению автора, недостаточно изучены.

Для целей данной статьи необходимо разделить понятие импульс, который трактуется как «электрический или ультразвуковой сигнал малой длительности» [1], на два понятия: эхограмма как запись электрического напряжения эхосигнала в функции времени, развиваемое пьезоэлектрическим преобразователем (то есть на выходе преобразователя), нагруженным акустически на нагрузку, а электрически — на дефектоскоп и акустический импульс как ультразвуковой (акустический) сигнал малой длительности. Понятие эхосигнала в функции времени, развиваемое пьезоэлектрический) сигскопа электрическое напряжение эхосигнала в функции времени, развиваемое пьезоэлектрическим преобразователем, нагруженным акустически на нагрузку, а электрически — на дефектоскоп. Также будет использоваться понятие акустический эхоимпульс как отражение акустического импульса от границы раздела сред.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В данной работе предлагается методика расчета эхограмм (решение прямой задачи) для изделий, преобразователей, контактных слоев из любых материалов, с любой величиной контактного слоя при условии знания акустических сопротивлений используемых материалов. Область применения: дефектоскопия, медицина, гидролокация.

Методика состоит из двух частей.

Первая часть посвящена расчету во временной области формы излученного импульса и получению эхограммы для любого преобразователя с любым протектором или без него в иммерсионном варианте, то есть через слой жидкости, толщиной больше пространственной длительности акустического импульса. Эта часть методики позволяет для согласованного преобразователя определить форму эхограммы (эхоимпульса) от поверхности ввода как свертки импульсной характеристикой согласованного преобразователя с излученным акустическим импульсом, отраженным от поверхности ввода. Вторая часть посвящена расчетам эхограмм контактного способа для однослойной и многослойной моделей для любого преобразователя. Расчеты эхограмм, экспериментальные эхограммы приводятся для согласованного преобразователя.

Расчеты имеют особенности.

Определение формы эхограммы для моделей контактного способа основано на расчете интерференции на рабочей поверхности преобразователя как суммы многократных отражений излученного акустического импульса от границ слоев преобразователя с учетом их амплитуд и фаз. Форма эхограммы определяется как свертка импульсной характеристики преобразователя с результатом интерференции.

Другая особенность заключается в том, что для того, чтобы сравнивать экспериментальные и теоретические данные, выбран экспериментальный донный эхоимпульс. Как показали эксперименты, проведенные автором, донный эхоимпульс идентичен по форме эхоимпульсу от поверхности ввода изделия, не считая начальной фазы и небольшого, в несколько процентов, изменения в соотношении амплитуд. Дополнительно, эхоимпульс от поверхности ввода при малом контактном слое сильно искажается зондирующим импульсом и экспериментально проверить правильность расчетов не удается.

Расчет и экспериментальное оборудование позволяют менять величину контактного слоя, вводить временную задержку между многократными отражениями и их эхограммами соответственно, что позволяет проверять форму акустических эхоимпульсов, их наложения, форму эхограмм.

В приведенном расчете используются следующие акустические сопротивления согласованного преобразователя: пьезоэлемента — 27, протектора и демпфера — 5, иммерсионная среда (вода) — 1,5, металлический отражатель (изделие) — 45. В данной статье далее по тексту (для лучшего восприятия) единица измерения акустического сопротивления (МПа·с/м) приводиться не будет. Пьезоэлемент выполнен из керамики ЦТС-19, его диаметр составляет 15 мм, толщина — 0,5 мм. Электрическое согласование (добавление внешних электрических элементов) во всех экспериментах не использовалось. Эхоимпульс с выводов преобразователя поступал на вход дефектоскопа USD-60 производства фирмы «Кропус», в котором он преобразовывался в цифровой код, который затем поступал в среду программы «Маthcad», где и осуществлялись необходимые преобразования.

РАСЧЕТ ИЗЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСА И ЕГО ЭХОГРАММЫ

В [16] приведена методика расчета импульсной характеристики или излученного ультразвукового импульса иммерсионного ультразвукового преобразователя с протектором. Излученный акустический импульс, полученный в соответствии с нижеприведенным расчетом, идентичен импульсу на рис. 8*a* из работы [16] и приведен на рис. 1, кривая *1*.



Рис. 1. Формирование излученного импульса (кривая 1) преобразователя с протектором как суммы импульсов: кривая 2 — излученного пьезоэлементом; кривые 3 и 4 — первое и второе отражение в протекторе; кривые 5 и 6 первое и второе отражение от демпфера.



Рис. 2. Схема формирования излученного акустического импульса согласованным преобразователем.

Расчет в работе [16] основан на суммировании амплитуд полуволновых импульсов, возникших на границах пьезоэлемента, с учетом времени пробега, фазы и потерь на отражения от границ слоев преобразователя. Однако для данной работы, в которой расчеты будут выполняться в среде «Маткад», удобнее воспользоваться наработками из работы [15], в которой используется не один полуволновый импульс, а получена редвудовская серия целиком, излучаемая демпфированным пьезоэлементом без протектора (см. рис. 9 из [15] и она же приведена на рис. 1, кривая 2). Эта серия, излученная из пьезоэлемента, пройдя протектор, частично излучается в контактную среду (см. цифру 1 со временем $t_0 = 0$ на рис. 2), давая первый импульс, который обозначим как R(t), в состав интерференционной суммы импульсов, представляющей излученный импульс, частично z3 — акустические сопротивления воды как контактной или иммерсионной жидкости, протектора, пьезоэлемента, демпфера соответственно. Это отражение добавляется к вышеозначенной сумме каждый раз через время двойного прохода через протектор с учетом корректировки амплитуды на коэффициент $q^n \cdot v^n$, где v = (z2-z1)/(z1+z2) — коэффициент отражения от границы протектор пьезоэлемент, *n* — номер отражения. Время двойного прохода через четвертьволновой протектор составит $t_1 = d/c = \lambda/2c$, где d, c, λ — толщина, скорость звука и длина волны в пьезоэлементе соответственно.

Многократность времени двойного прохода можно обозначить как $t_n = n \cdot \lambda/2c = n \cdot T$. Тогда второй акустический импульс, второе слагаемое в интерференционную сумму, обозначенное цифрой 2 на рис. 2, через время $t_1 = \lambda/2c$ будет иметь вид $q \cdot v \cdot R(t)$, третье слагаемое, обозначенное цифрой 3 на рис. 2, через время $t_2 = \lambda/c$ будет иметь вид $q^2 \cdot v^2 \cdot R(t)$. Четвертое слагаемое, обозначенное цифрой 4 на рис. 2, через время $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ будет иметь вид $q^3 \cdot v^3 \cdot R(t)$ и так далее. На рис. 1 под номерами 3 и 4, а на рис. 2 под номерами 2, 3, 4 приведены импульсы для отражений n = 1, 2, 3. Дополнительно, часть амплитуды импульса $q \cdot R(t)$, прошедшая в пьезоэлемент и отражения от демпфера (на рис. 2 движение этого импульса обозначенной сумме через время $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ и далее через время $k \cdot \lambda/2c$, с учетом корректировки амплитуды на соответствующие коэффициенты отражения от воды, протектора, пьезоэлемента, границы пьезоэлемент — демпфер — w, то есть с учетом коэффициента $q^k \cdot v^{(k-1)} \cdot w$, где k — номер отражения от демпфера. Тогда пятый акустический импульс, пятое слагаемое слагаемое в интерференционную картину, обозначенное цифрой 4 на рис. 2, через время $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ будет иметь вид $q \cdot v \cdot R(t)$ и так далее. На рис. 1 под номерами 2 в раз время $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ и далее через время $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ учетом корректировки амплитуды на соответствующие коэффициенты отражения от воды, протектора, пьезоэлемента, границы пьезоэлемент — демпфер — w, то есть с учетом коэффициента $q^k \cdot v^{(k-1)} \cdot w$, где k — номер отражения от демпфера. Тогда пятый акустический импульс, пятое слагаемое в интерференционную картину, обозначенное цифрой 4 на рис. 2, через время $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$ будет иметь вид $q \cdot w \cdot R(t)$, шестое слагаемое через время $t_4 = 2 \cdot \lambda/c$ будет иметь вид $q^2 \cdot v \cdot w \cdot R(t)$ и так далее. На рис. 1 под номерами 5 и 6 приведены эти импульсы для k = 1 и k = 2. Приведем интерференционный импульс $I_4(t)$ для времени от $t_0 = 0$ до $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$, то есть для цифры 4

$$I_4(t) = R(t_0 = 0) + q \cdot v \cdot R(t_1 = \lambda/2c) + q^2 \cdot v^2 \cdot R(t_2 = \lambda/c) + q^3 \cdot v^3 \cdot R(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c) + q \cdot w \cdot R(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c).$$

В скобках указан временной сдвиг (задержка) соответствующего импульса. Для рис. 1: $R(t_0 = 0)$ соответствует кривой 2, $q \cdot v \cdot R(t_1 = \lambda/2c)$ — кривая 3, $q^2 \cdot v^2 \cdot R(t_2 = \lambda/c)$ — кривая 4, $q \cdot w \cdot R(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c)$ — кривая 5, $q^2 \cdot v \cdot w \cdot R(t_4 = 2 \cdot \lambda/c)$ — кривая 6.

В общем виде излученный импульс *I*(*t*) в части отражений можно представить как

$$I(t) = q \cdot I(t=0) + \sum_{n=1}^{\infty} (q \cdot v)^n \cdot I[t-nT] + \sum_{n=3}^{\infty} w \cdot q^{(n-2)} \cdot v^{(n-3)} \cdot I[t-nT] + \sum_{n=4}^{\infty} w \cdot q^{(n-2)} \cdot v^{(n-3)} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=5}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-6)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \right\} \cdot I[t-nT] + \left\{ \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-v) \cdot q^{(n-4)} \cdot v^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \cdot D$$

где $D = 4z1 \cdot z2/(z1 + z2)^2$ — коэффициент прозрачности границы *v*.

В итоге, осуществив с учетом задержки суммирование 18 вышеописанных и переотраженных внутри пьезоэлемента протектора импульсов получаем искомый излученный акустический импульс согласованного преобразователя I(t), например, для n = 6 и k = 4, приведенный на рис. 1 (кривая 1). Из анализа кривых рис. 1 понятно, что акустический импульс (кривая 1) является результатом интерференции, наложения множества акустических импульсов со своей амплитудой, временем прихода, начальной фазой (полярность первого полупериода). Хорошо видно, что первые три полупериода кривой *I* имеют одинаковую фазу с импульсами кривых 2, 3, 4 и поэтому суммируются, давая увеличение амплитуды, а следующие полупериоды не имеют одинаковую фазу и поэтому происходит постепенная их взаимная компенсация, приводящая к укорочению длительности акустического импульса или кривой 1. Также из рис. 1 понятно, что любое отличие от предложенной модели по рис. 2, будь то материалы, размеры приведет к другой интерференционной картине, то есть к изменению формы импульса. Например, изменение границы q по рис. 2 в сторону увеличения приведет к временному смещению в сторону увеличения ряда импульсов, связанных с этой границей, что повлечет за собой уменьшение амплитуды и увеличение длительности, а в дальнейшем появление биений или второго импульса, вызывающего «двугорбый» спектр. В результате, как показано в начале статьи, это приводит к другим результатам и к другим выводам.

Рассмотрим далее. Излученный акустический импульс I(t), отраженный от металлического изделия как от отражателя, вновь поступает на вход согласованного преобразователя. Его автосвертка и будет эхограммой (см. рис. 3, кривая I), то есть записью того, что мы видим на экране дефектоскопа в виде эхоимпульса. На рис. 3 приведены теоретическая (кривая I) и экспериментальная (кривая 2, взята из работы [10], рис. 7a) эхограммы. Заметим хорошее совпадение эхограмм, что подтверждает правильность расчетов. В данном и в последующих рисунках для лучшего восприятия эхограммы могут быть сдвинуты по временной или амплитудной осям друг относительно друга.



Рис. 3. Теоретическая (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) эхограммы.

РАСЧЕТ ЭХОГРАММЫ КОНТАКТНОГО СПОСОБА

Расчет эхограммы для модели акустического тракта, в которой слой контактной среды находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением

В [4, 5, 20] рассмотрено прохождение и отражение импульса через плоский слой или слой контактной жидкости. В работах «приведены общие выражения для отраженного и прошедшего сигналов при нормальном падении акустического импульса» на плоский слой. Реализуем рекомендации данных работ, для конкретного случая, при этом устанавливаем слой минимальным, а для расчетов «падающим импульсом» будет излученный акустический импульс I(t). Падающий импульс многократно отражается в слое и эти отражения добавляются к нему каждый раз через время $T_0 = 2l/c_{\rm B}$ двойного прохода слоя толщиной l, со скоростью звука в нем $c_{\rm B}$, с учетом корректировки амплитуды на соответствующие коэффициенты отражения q и границы вода—отражается (металлическое изделие) j, то есть с учетом коэффициента $q^{(n-1)} \cdot j^n$. Или в общем виде, используя [20, 21], с учетом коэффициента $q^{(n-1)} \cdot j^n$ отраженный импульс ID(t) можно представить как

$$ID(t) = \sum_{n=1}^{\infty} q^{(n-1)} \cdot j^n \cdot I[t - (n-1)T_0] \cdot \exp\{j\omega[t - (n-1)T_0]\}.$$

Приведем часть импульса ID(t) для n = 1, 2, 3, 4 и для времени от $t_1 = T_0$ до $t_4 = 4 \cdot T_0$ соответственно:

$$ID_4(t) = j \cdot I(t_0 = T_0) + q \cdot j^2 \cdot I(t_1 = 2 \cdot T_0) + q^2 \cdot j^3 \cdot I(t_2 = 3 \cdot T_0) + q^3 \cdot j^4 \cdot I(t_3 = 4 \cdot T_0).$$

Далее осуществляется свертка импульса ID(t), например при n = 6, с импульсной характеристикой преобразователя I(t). Полученная теоретическая эхограмма представлена на рис. 4 (кривая I), при сравнении которой с экспериментальной (кривая 2) видно их хорошее совпадение. Однако результаты дальнейших экспериментов показали несостоятельность данного подхода для согласованного преобразователя. Во-первых, в большинстве случаев экспериментальная эхограмма отличается от приведенной на рис. 4. Такая эхограмма чаще присуща изделиям с шероховатой поверхностью. Во-вторых, не учтены отражения от границы пьезоэлемент—демпфер—w. В-третьих, при увеличении толщины контактного слоя растет задержка T_0 между отражениями от границ слоя и эхограммы по рис. 4 «разделяются» на большее число импульсов их составляющих, что и показано на рис. 5.



Рис. 4. Сравнение теоретической (кривая 1) и экспериментальной (кривая 2) эхограмм при минимальном контактном слое.



Рис. 5. Сравнение экспериментальной (кривая 1) и теоретической (кривая 2) эхограмм при увеличенном контактном слое.

На рис. 5 представлены экспериментальная (кривая 1) и теоретическая (кривая 2) эхограммы, при этом преобразователь находится на некотором расстоянии от изделия, то есть при увеличенном контактном слое. Для теоретической кривой введена меньшая задержка T_0 , имитирующая расстояние от преобразователя до изделия, для лучшей наглядности. По рис. 5 на каждой эхограмме можно заметить по два импульса, где импульс слева назван «Донный», так как это донный эхоимпульс металлического изделия, и импульс справа, обозначенный как «Отражение», образованный донным эхоимпульсом, однократно отраженным от преобразователя и изделия. По времени импульсы «Отражение» кривых 1 и 2 совмещены.

Видно по рисунку, что импульсы «Донный» на эхограммах идентичны, следовательно, их расчет осуществлен верно, а импульсы «Отражение» не совпадают, следовательно, расчет импульса «Отражение» проведен неверно. Как показывают эксперименты, проведенные автором, это связано с более сложным отражением от многослойной структуры согласованного преобразователя с протектором, формирование которого не рассмотрено в известной литературе. Вышеприведенный расчет применим для модели акустического тракта, в которой слой контактной среды находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением. Такими материалами может быть металлическое изделие и призма преобразователя, металлическое изделие и пьезоэлемент преобразователя.

Расчет отражения от преобразователя. Многослойная модель

Приведем упрощенный расчет акустического импульса отражения от согласованного преобразователя для суммарного импульса, учитывающего только первые пять импульсов. Остальные импульсы рассчитываются по аналогии с учетом отражений и переотражений от границ раздела сред.

Расчет схож с приведенным выше расчетом излученного акустического импульса для согласованного преобразователя с протектором. Однако необходимо учитывать отличия. В данном случае, без учета потерь на прохождение сред и отражения от границы воздух — донная поверхность металлического изделия (отражателя) с акустическим сопротивлением материала ZM, на преобразователь через контактную среду поступает донный акустический эхоимпульс I(t), обозначенный стрелкой с цифрой 0 на рис. 6, а согласованный преобразователь рассматривается как двухслойная структура, где первый слой состоит из материала протектора, дающий полуволновую задержку, второй — из материала пьезоэлемента, создающий задержку в длину волны. За слоем материала пьезоэлемента расположен материал демпфера. Сумма отражений от этой двуслойной структуры, которую обозначим как I'(t), создает акустическое отражение от преобразователя.



Рис. 6. Схема формирования акустического импульса отражения от согласованного преобразователя.



Рис. 7. Формирование в виде кривой 7 отражения от преобразователя как суммы импульсов: *I* — отражения от протектора; *2* и *3* — переотражений в протекторе; *4* и *5* — отражений от границы пьезоэлемент — демпфер; *6* — переотражений в пьезоэлементе.

Рассмотрим подробнее по рис. 6 и рис. 7, как формируется акустическое отражение от преобразователя. Донный акустический эхоимпульс I(t), обозначенный стрелкой с цифрой 0 (см. рис. 6), пройдя контактную среду, частично отражается от протектора, давая первый импульс $q \cdot I(t)$ для I'(t), частично поступает в протектор. На рис. 6 импульс $q \cdot I(t)$ обозначен стрелкой с цифрой 1 при $t_0 = 0$, а на рис. 7 — это кривая 1. Затем I(t), прошедший в протектор, отраженный от границы v, как $v \cdot I(t)$, вновь добавляется к I'(t). Этот импульс для n = 1, $t_1 = \lambda/2c$ приведен на рис. 7 под номером 2, а на рис. 6 он обозначен стрелкой с цифрой 2. Далее он добавляется к I'(t) через время $t_2 = \lambda/c$ для n = 2 как $q \cdot v^2 \cdot I(t)$ и показан под номером 3 на рис. 7, а на рис. 6 он обозначен стрелкой с цифрой 4 на рис. 6. Таким образом, с учетом отражений от границ q и v импульс I(t) добавляется к I'(t) каждый раз через время двойного прохода через протектор, равное $n \cdot \lambda/2c$, с учетом корректировки амплитуды на соответствующий коэффициент $q^{n-1} \cdot v^n$. Вторым импульсом, пришедшим в это же

время $t_3 = 3\lambda/2c$ и который тоже обозначен цифрой 4 на рис. 6, является часть импульса I(t), прошедшая через протектор в пьезоэлемент, отраженная от границы w (пьезоэлемент—демпфер) (на рис. 6 штрихпунктирная линия в материале пьезоэлемента) и равная $w \cdot I(t)$. Этот импульс под номером 4 приведен на рис. 7.

Через время $\lambda/2c$ появится импульс второго отражения k = 2 от границы w и равный $q \cdot v \cdot w \cdot I(t)$, который приведен на рис. 7 под номером 5. Таким образом, подобные импульсы отражения от границы w появляются через время $t_{(2+k)} = \lambda/c + k \cdot \lambda/2c$ с учетом корректировки амплитуды на коэффициент $q^{(k-1)} \cdot v^{(k-1)} \cdot w$. Также необходимо учитывать отражения, происходящие между слоями. На рис. 7 кривая 6 учитывает отражение от границ w и v. Приведем интерференционный импульс отражения от согласованного преобразователя I'(t) для времени от $t_0 = 0$ до $t_3 = 3 \cdot \lambda/2c$, то есть для цифры 4 по рис. 2, и учитывающий 5 импульсов:

$$I'(t) = q \cdot I(t_0 = 0) + v \cdot I(t_1 = \lambda/2c) + q \cdot v^2 \cdot I(t_2 = \lambda/c) + q^2 \cdot v^3 \cdot I(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c) + w \cdot I(t_3 = 3 \cdot \lambda/2c).$$

В общем виде излученный импульс I(t) в части отражений можно представить как

$$I'(t) = q \cdot I(t=0) + \sum_{n=1}^{\infty} q^{(n-1)} \cdot v^n \cdot I[t-nT] + \sum_{n=3}^{\infty} w \cdot (q \cdot v)^{(n-3)} \cdot I[t-nT] + \sum_{n=4}^{\infty} w \cdot (q \cdot v)^{(n-3)} \cdot I[t-nT] + \sum_{n=5}^{\infty} w^2 \cdot (-q) \cdot (q \cdot v)^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot (-q) \cdot (q \cdot v)^{(n-5)} + \sum_{n=6}^{\infty} w^2 \cdot q^{(n-5)} \cdot D^{(n-5)} \bigg] \cdot I[t-nT] \bigg\}.$$

Импульс отражения от преобразователя I'(t), рассчитанный для времени от $t_0 = 0$ до $t_3 = 7 \cdot \lambda/2c$ и учитывающий 18 импульсов, приведен на рис. 7 (кривая 7). Из рисунка видно, что импульс отражения от преобразователя (кривая 7) существенно отличается от падающего на преобразователь импульса (кривая 1, также см. рис. 1, кривая 1) по форме, длительности. Это показывает, что для согласованного преобразователя нельзя пользоваться расчетом эхограммы для модели акустического тракта, в которой слой контактной среды находится между двумя материалами с большим акустическим сопротивлением.

Для получения эхограммы отражения от преобразователя необходимо осуществить свертку интерференционного импульса I'(t), рассчитанного для времени, например, от $t_0=0$ до $t_3 = 7 \cdot \lambda/2c$ с импульсом I(t).

АНАЛИЗ ЭХОГРАММ

На согласованный преобразователь от металлического изделия поступает серия отраженных импульсов через временные промежутки $T_0 = 2l/c_{\rm B}$ для толщины контактного слоя l. Ограничимся первыми двумя, как наибольшими по амплитуде импульсами и названными выше «Донный» или I(t) и «Отражение» или $j \cdot I'(t)$ с задержкой T_0 . Напомним что, импульс «Отражение» образовался в результате отражения «Донного» от преобразователя став импульсом I'(t) и от изделия с соответствующим временным сдвигом T_0 . Происходит наложение импульсов, что позволяет вычислять итоговый импульс I''(t) как сумму всех импульсов, распространяющихся в данной среде или I''(t) = I(t) + I'(t) с учетом задержки T_0 .

Эхограммы для различных толщин контактного слоя как свертки импульсной характеристики преобразователя I(t) с импульсом I''(t) с соответствующим T_0 приведены на рис. 8, где кривые I — расчетные, а кривые 2 — экспериментальные эхограммы. На рис. 8*a* представлены эхограммы, где экспериментальная кривая 2 повторяет кривую 1 из рис. 5, при этом преобразователь находится на некотором расстоянии от изделия и поэтому импульсы «Донный» и «Отражение» разделены. Импульсы «Отражение» кривых 1 и 2 по времени совмещены, а теоретический «Донный» импульс смещен по времени для лучшей наглядности. Нетрудно заметить хорошее совпадение эхограмм 1 и 2, что подтверждает правильность вышеприведенных расчетов.

Для рис. 86 расстояния между изделием и преобразователем уменьшено до 0,1 мм, происходит наложение импульсов и амплитуда итогового импульса I''(t), а также в какой-то мере эффективная частота, конечно, зависят от совпадения по фазе импульсов при наложении. Понятно, что максимум амплитуды I''(t) достигается при синфазном наложении и минимум при противофазном. Но так как импульс «Отражение» относительно мал по амплитуде, особенно в его начальной части для времени от $t_0 = 0$ до $t_3 = 2 \cdot \lambda/c$ по рис. 7, то существенное его влияние на импульс I''(t) не прослеживается. Для теоретической кривой I расчетное расстояние между изделием и преобразователем



Рис. 8. Теоретическая (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) эхограммы для расстояния от преобразователя до изделия: a - 2,2 мм; б - 0,1 мм; в - вплотную.

составляет 0,108 мм. При установке преобразователя вплотную с изделием происходит близкое к максимальному наложение и при этом эхограммы также идентичны и приведены на рис. 8*в*. Изменение величины контактного слоя [20], влияние хорошей поверхности изделия (Ra = 0,65) [3] на нестабильность акустического контакта (изменение чувствительности) не отмечено.

На рис. 9 представлены амплитудно-частотные характеристики тракта (далее — AЧХ) для согласованного преобразователя, нагруженного: *1* — на иммерсионную среду (использовалась эхограмма из рис. 3, кривая 2); 2 — на контактный слой толщиной 0,1 мм (использовалась эхограмма из рис. 8*б*, кривая 2); 3 — на сталь (использовалась эхограмма из рис. 8*6*, кривая 2).

Рис. 9. АЧХ для согласованного преобразователя, нагруженного: *I* — на иммерсионную среду; *2* — на контактный слой в 0,1 мм; *3* — на сталь.

Как видно из рис. 9 (кривая 1, по сравнению с кривыми 2 и 3), «явления существенного уменьшения частоты максимума спектра эхосигнала при нагружении прямого преобразователя на иммерсионную среду по сравнению с нагружением на сталь» [3] не происходит. «Двугорбость» АЧХ (см. рис. 9, кривая 2) объяснено в [10, 15] и это связано с образованием линейчатого спектра из-за наличия «отдельного» импульса «Отражение» (см. рис. 86, кривые 1, 2). Далее, при уменьшении контактного слоя импульс «Отражение» смещается по времени к импульсу «Донный», происходит их наложение, образующее «единый» итоговый импульс большей длительности (см. рис. 86, кривые 1, 2), что и приводит к сужению АЧХ (кривая 3). Кроме того, большая длительность импульса «Отражение», как показано выше, образуется из-за множественности отражений в многослойной структуре — контактный слой, протектор, пьезоэлемент, демпфер.


Рис. 10. АЧХ и ФЧХ при нагрузке преобразователя на контактный слой толщиной: 1 — 2,2 мм; 2 — 0,1 мм; 3 — вплотную.

На рисунке представлены АЧХ (рис. 10*a*) и фазочастотные характеристики тракта (далее — ФЧХ) (рис. 10*б*) для согласованного преобразователя, нагруженного на контактный слой толщиной: *1* — 2,2 мм (использовалась эхограмма из рис. 8*a*, кривая 2); *2* — 0,1 мм (использовалась эхограмма из рис. 8*b*, кривая 2); *3* — вплотную (использовалась эхограмма из рис. 8*b*, кривая 2).

Кривые 1 и 2 по рис. 10a — это АЧХ, представляющие собой линейчатые спектры, образованные от двух импульсов «Донный» и «Отражение» (см. рис. 8a и 8b), где временное расстояние между ними определяет частотную разницу между пиками спектра АЧХ и фазовый сдвиг кривых ФЧХ 1 и 2 по рис. 10b. Кривая 3 на рис. 10a — это сплошной спектр «единичного» импульса (см. рис. 8b), однако влияние второго импульса «Отражение» еще сказывается в «выпуклости» правой части АЧХ.

ВАРИАНТ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В результате разработки методики получена возможность для контактного способа прогнозировать эхограмму, форма которой наблюдается на экране ультразвукового импульсного дефектоскопа, а также форму импульсов ее составляющих. Это открывает новые возможности, например, компенсации мешающих, неинформативных импульсов. Предложим несколько вариантов, например: реконструкция полученной эхограммы по рекомендациям из [15, 18] с вычитанием из полученного реконструированного акустического импульса расчетного (от времени от $t_0 = 0$ до $t_3 = 7 \cdot \lambda/2c$) акустического импульса I'(t); проведение свертки импульсов I'(t), I(t) с вычитанием ее из эхоимпульса; спектральные методы. На рис. 11 представлен второй вариант по улучшению разрешающей способности, как пример, для контактного или щелевого способов контроля, позволяющий устранить влияние контактного слоя на разрешающую способность.

Преобразователь через дистанционирующее кольцо выбранной толщины устанавливается на изделие. Для данной толщины контактного слоя и согласованного преобразователя рассчитывается компенсирующая эхограмма, которая приведена на рис. 11 (кривая I) как свертка отражения от преобразователя I'(t) с импульсной характеристикой преобразователя I(t). Отметим, что для преобразователя необходимо знание действительных акустических сопротивлений протектора, пьезоэлемента, демпфера [15]. Далее, из полученной от преобразователя эхограммы (рис. 11, кривая 2) вычитается расчетная компенсирующая эхограмма (кривая I), что и позволяет получить только один «Донный» импульс в виде кривой 3. Таким образом, показана возможность устранения влияния контактного слоя на разрешающую способность, на «мертвую» зону контактного способа.



Рис. 11. Компенсация отражений для выбранной толщины слоя: *I* — расчетное отражение от преобразователя или компенсирующая эхограмма; *2* — эхограмма, *3* — эхограмма после компенсации.

выводы

Предложен метод расчета акустического тракта иммерсионного, щелевого, контактного способов контроля для согласованного с контактной средой преобразователя, позволяющий повысить разрешающую способность при сохранении чувствительности.

По результатам расчета для проектируемого акустического тракта можно спрогнозировать форму эхограммы, которая будет наблюдаться на экране дефектоскопа, определить методы по минимизации мешающих факторов, связанных с отражением от согласованного преобразователя при щелевом и контактном способов контроля.

Показано, что для согласованного с контактной средой преобразователя чувствительность иммерсионного способа не хуже чувствительности контактного способа контроля, при этом не отмечено наличие таких негативных факторов как нестабильность акустического контакта, явления существенного уменьшения частоты максимума спектра эхосигнала при нагружении прямого преобразователя на иммерсионную среду по сравнению с нагружением на сталь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 5577—2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. М.: Стандартинформ, 2011. 27 с.

2. Яблоник Л.М. Оценка чувствительности контактного и иммерсионного методов контроля // Дефектоскопия. 1967. № 1. С. 12—17.

3. Данилов В.Н. К вопросу о выборе параметров преобразователя при иммерсионном ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2007. № 5. С. 76—87.

4. Коровин В.М., Брезгин С.Н., Харланов А.И. Метод расчета чувствительности ультразвукового преобразователя с учетом интерференции в слое контактной жидкости // Дефектоскопия. 1987. № 1. С. 15—21.

5. Гмырин С.Я. К вопросу об интерференции ультразвуковых волн при прохождении плоского слоя контактной жидкости // Дефектоскопия. 1992. № 3. С. 59—67.

6. Левитан Л.Я., Шарко А.В. Оценка влияния колебаний толщины контактного слоя на результат акустических измерений прочностных свойств стали // Дефектоскопия. 1988. № 1. С. 3—8.

7. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Изд-во Машиностроение, 1981. 240 с.

8. Данилов В.Н., Артемьев С.А., Захаров А.Ф. Исследование работы модели прямого ультразвукового преобразователя для иммерсионного и обычного способов контроля // Дефектоскопия. 2007. № 6. С. 3—19.

9. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.

10. *Мартыненко А.В.* Иммерсионный пьезоэлектрический преобразователь с улучшенными характеристиками // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 3—13.

11. Данилов В.Н. О влиянии толщины слоя контактной жидкости на характеристики упругих волн, излучаемых прямым преобразователем // Дефектоскопия. 1996. № 6. С. 23—29.

12. Данилов В.Н. К вопросу об использовании четвертьволновых согласующих протекторов в прямых преобразователях // Дефектоскопия. 2008. № 5. С. 69—75.

13. Данилов В.Н., Королев В.Д. К вопросу о выборе параметров протекторов прямых совмещенных преобразователей // Дефектоскопия. 2002. № 1. С. 71—77.

14. Данилов В.Н., Воронков В.А., Изофатова Н.Ю. Исследование амплитудно-частотной характеристики акустического тракта прямого преобразователя в режиме излучения // Дефектоскопия. 1996. № 3. С. 37—45.

15. Мартыненко А.В., Ермаченко В.П. К вопросу об интерпретации эхограмм ультразвукового импульсного дефектоскопа // Дефектоскопия. 2021. № 8. С. 24—36.

16. *Мартыненко А.В.* К вопросу о возможности повышения чувствительности и разрешения иммерсионного пьезоэлектрического преобразователя // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 3—12.

17. *Мартыненко А.В.* Способ акустического согласования пьезоэлемента иммерсионного ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя с контролируемой средой / Патент на изобретение № 2561778 от 05.08.2015, МПК⁸G01N 29/00.

18. *Мартыненко А.В., Ермаченко В.П.* Способ ультразвукового контроля материалов и изделий / Заявка на выдачу патента на изобретение № 2021114521 от 21.05.2021, МПК⁸G01N 29/00.

19. ГОСТ 23702—90. Контроль неразрушающий / Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. М.: Госстандарт СССР, 1991. 57 с.

20. Могильнер Л.Ю., Сахранов А.В., Урман Н.С. Прохождение ограниченного ультразвукового пучка через плоский слой контактирующей жидкости при наклонном падении и импульсном режиме излучения // Дефектоскопия. 1986. № 1. С. 70—80.

21. *Меркулов Л.Г., Веревкин В.М.* Прохождение и отражение ультразвукового импульса для плоскопаралельной пластины в жидкости // Дефектоскопия. 1965. № 5. С. 13—21.

Дефектоскопия № 1 2022

УДК 620.179.15

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ, СОДЕРЖАЩЕЙ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. В.А. Удод^{1,*}, С.П. Осипов^{2,**}, С.Ю. Назаренко²

¹Томский государственный университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 36 ²Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30 E-mail: *pr.udod@mail.ru; **osip1809@rambler.ru

Поступила в редакцию 03.12.2021; после доработки 21.12.2021 Принята к публикации 24.12.2021

Приводится описание предлагаемого нами алгоритма для статистического оценивания погрешности метода дуальных энергий, порождаемой квантовой природой излучения, применительно к системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы. Продемонстрировано его действие на конкретном примере. Даны рекомендации по дальнейшему использованию алгоритма, в частности, для оптимизации структурных элементов сэндвич-детекторов излучения.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, алгоритм, сэндвич-детектор, метод дуальных энергий, распознавание материалов, атомный номер.

DOI: 10.31857/S0130308222010043

введение

Угроза совершения террористических актов послужила основанием к решению проблемы по созданию комплекса условий для обеспечения транспортной безопасности в сфере авиа и железнодорожных перевозок. Как следствие этого к настоящему времени разработан целый ряд методов обнаружения опасных грузов и недозволенных вложений. Одним из таких методов является метод дуальных энергий (МДЭ) [1—6]. Он позволяет распознавать различные материалы по их атомному номеру (эффективному атомному номеру), на основании чего делается заключение о принадлежности исследуемого предмета к классу опасных или безопасных предметов [4, 7, 8].

Современные рентгеновские системы, использующие МДЭ при проведении досмотрового контроля, можно условно разделить на несколько основных типов. В системах первого типа объект контроля (OK) подвергается просвечиванию два раза — двумя сканирующими пучками излучения с разными максимальными энергиями (иными словами — при двух разных рабочих напряжениях, устанавливаемых для генерации рентгеновских лучей на рентгеновской трубке) [4]. При этом максимальные энергии (напряжения) подбирают так, чтобы при первом просвечивании ОК основным процессом взаимодействия излучения с радиационно-чувствительными элементами детекторов был фотоэффект, а при втором просвечивании — комптон-эффект. Такую схемную реализацию МДЭ можно условно назвать традиционной (классической).

В системах второго типа ОК просвечивается один раз, но при этом используется импульсный источник рентгеновского излучения, который в определенной последовательности создает импульсы с двумя разными максимальными энергиями [9]. Схемную реализацию МДЭ такого вида можно условно назвать схемой с «дуальным» (биэнергетическим) источником излучения.

В системах третьего типа ОК просвечивается один раз, но при этом для регистрации излучения используются сэндвич-детекторы. Структурно такие детекторы представляют собой многослойное образование. Чаще всего это композиция из двух детекторов, которые отстоят друг от друга по ходу падающего излучения и дополнительно разделены между собой поглотителем (фильтром), который устанавливается с целью усиления спектральных различий излучения, падающего на первый (по ходу распространения пучка) и второй детекторы [1, 4, 10—12]. Такую схемную реализацию МДЭ можно условно назвать схемой с «дуальным» (биэнергетическим) детектором излучения.

Точность (эффективность) МДЭ зависит от множества факторов, в том числе — от шумов выходных сигналов детекторов, которые вызваны квантовой природой рентгеновского излучения (квантовые шумы) [1, 4, 12, 13].

В [13] был разработан алгоритм для статистической оценки погрешности МДЭ, обусловленной квантовыми шумами, применительно к классической схеме реализации МДЭ. В настоящей работе предложен аналогичный алгоритм, но только применительно к схеме реализации МДЭ на основе использования сэндвич-детекторов излучения. Насколько нам известно, такие исследования, т.е.

разработка указанного алгоритма, в отечественной и зарубежной научно-технической литературе ранее не проводились.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Алгоритм представлен последовательностью следующих шагов.

Шаг 1. Задается максимальная энергия E_0 квантов, испускаемых источником рентгеновского излучения — рентгеновским аппаратом, применяемым для просвечивания ОК (что равносильно заданию максимального напряжения на рентгеновской трубке).

Шаг 2. Задается числовой (т. е. по числу квантов) энергетический спектр $g(E, E_0)$ излучения, генерируемого рентгеновским аппаратом.

Шаг 3. Задаются материалы и параметры отдельных компонент сэндвич-детектора, имеющего структуру вида: передний детектор, т.е. первый по направлению падающего излучения детектор; промежуточный фильтр; задний детектор, т.е. второй по направлению падающего излучения детектор.

Шаг 4. Задаются минимальное Z_{\min} и максимальное Z_{\max} значения атомного номера (эффективного атомного номера) Z материала ОК, подлежащего распознаванию.

Шаг 5. Задаются минимальное d_{\min} и максимальное d_{\max} значения радиационной прозрачности ОК.

Шаг 6. Задается множество допустимых решений, т.е. задается множество контролируемых объектов, исследование которых с помощью МДЭ может быть обеспечено физико-техническими возможностями системы контроля:

$$D(Z,\rho H) = \{ (Z,\rho H) | Z_{\min} \le Z \le Z_{\max}; \quad d_{\min} \le d_{t1}(Z,\rho H) < d_{t2}(Z,\rho H) \le d_{\max} \}.$$
(1)

Здесь р — плотность материала ОК, г/см³; H — толщина ОК, см; рH — массовая толщина ОК, г/см²; $d_{t1}(Z,\rho H)$, $d_{t2}(Z,\rho H)$ — теоретические значения радиационной прозрачности ОК, соответствующие первому (т.е. переднему) и второму (т.е. заднему) детекторам, которые вычисляются по формулам [14]:

$$d_{t1}(Z,\rho H) = \frac{\int_{0}^{E_0} g(E,E_0) \exp(-m(E,Z)\rho H) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE}{\int_{0}^{E_0} g(E,E_0) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1(E) dE};$$
(2)

$$d_{t2}(Z,\rho H) = \frac{\int_{0}^{E_{0}} g(E,E_{0}) \exp(-m(E,Z)\rho H - m(E,Z_{1})\rho_{1}H_{1} - m(E,Z_{f})\rho_{f}H_{f})\overline{E}_{ab2}(E)\varepsilon_{2}(E)dE}{\int_{0}^{E_{0}} g(E,E_{0})\exp(-m(E,Z_{1})\rho_{1}H_{1} - m(E,Z_{f})\rho_{f}H_{f})\overline{E}_{ab2}(E)\varepsilon_{2}(E)dE},$$
(3)

где m(E, Z) — массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения для материала ОК, см²/г; $\overline{E}_{ab}(E)$ — среднее значение поглощенной детектором энергии, соответствующее одному зарегистрированному кванту с энергией E, МэВ; $\varepsilon(E)$ — эффективность регистрации излучения детектором; нижний индекс «1» в формулах (2) и (3) означает, что соответствующий параметр относится к первому детектору (аналогично этому индекс «2» означает соответствие второму детектору, а индекс «f» — промежуточному фильтру).

Из (1) следует, что для определенного значения параметра Z минимальное $(\rho H)_{min}(Z)$ и максимальное $(\rho H)_{max}(Z)$ значения параметра ρH находятся из уравнений:

$$d_{t1}(Z,(\rho H)_{\max}(Z)) = d_{\min}, \ d_{t2}(Z,(\rho H)_{\min}(Z)) = d_{\max}.$$
(4)

Шаг 7. Задается множество тестовых ОК:

$$D_t(Z_t,(\rho H)_t) = \left\{ (Z_t,(\rho H)_t) \in D(Z,\rho H) \, \middle| \, Z_t \in M_t(Z); d_{t2}(Z_t,(\rho H)_t) = d_{s2}; d_{s2} \in P(d_{t2}) \right\}$$

Дефектоскопия № 1 2022

Здесь индекс «t» означает «тестовый»; M₁(Z) — задаваемое множество тестовых материалов; $P(d_{t2})$ — задаваемое множество значений теоретической радиационной прозрачности d_{t2} для второго детектора (заметим, что в данном контексте прозрачность d_{t2} выступает как самосто-ятельный физический параметр); d_{s2} — определенное значение (уровень) прозрачности d_{t2} , которое в силу (1) должно удовлетворять неравенству $d_{min} < d_{s2} \le d_{max}$. Как следует из описания множества $D_t(Z_t, (\rho H)_t)$, массовая толщина (ρH), тестового OK, матери-

ал которого имеет атомным номер Z, выбирается из условия:

$$d_{t2}(Z_t,(\rho H)_t) = d_{s2}$$

Такой выбор массовых толщин тестовых ОК объясняется тем, что объекты с теми или иными близкими свойствами распознать сложнее. В данном случае в роли такового свойства выступает равенство теоретических радиационных прозрачностей объектов для второго детектора.

Шаг 8. Вычисляется для каждого тестового ОК, т.е. для каждой пары (Z, (рH),), прозрачность $d_{ti}(Z_{t}, (\rho H)_{t})$, соответствующая первому (переднему) детектору.

Шаг 9. Из множества $D_t(Z_t, (\rho H)_t)$ тестовых ОК выбирается один элемент и условно называется «базовым» (основным), а соответствующие ему параметры обозначаются через Z_{tb} и $(\rho H)_{tb}$.

Шаг 10. Выбирается значение $\sigma_b(\Phi_2)$ среднеквадратического отклонения (СКО) шума Φ_2 , который соответствует прозрачности $d_{i2}(Z_{ib}, (\rho H)_{ib})$. Назовем его базовым СКО. Шаг 11. Рассчитывается, используя соответствующие формулы из [14], значение СКО $\sigma(\Phi_2)$

шума Φ_2 , который соответствует прозрачности $d_{\rho}(Z_i, (\rho H)_i)$:

$$\sigma(\Phi_{2}) = \frac{\sigma(\Phi_{2})}{\sigma_{b}(\Phi_{2})} \sigma_{b}(\Phi_{2}) = \frac{\sqrt{\int_{0}^{E_{0}} g(E, E_{0}) \exp(-m(E, Z_{t})(\rho H)_{t} - m(E, Z_{1})\rho_{1}H_{1} - m(E, Z_{f})\rho_{f}H_{f})\overline{E_{ab2}^{2}}(E)\varepsilon_{2}(E)dE}{\sqrt{\int_{0}^{E_{0}} g(E, E_{0}) \exp(-m(E, Z_{tb})(\rho H)_{tb} - m(E, Z_{1})\rho_{1}H_{1} - m(E, Z_{f})\rho_{f}H_{f})\overline{E_{ab2}^{2}}(E)\varepsilon_{2}(E)dE}} \cdot \sigma_{b}(\Phi_{2}).$$

Здесь $\overline{E_{ab2}^2}(E)$ — средний квадрат поглощенной вторым детектором энергии для одного зарегистрированного кванта с энергией E, MэB².

Шаг 12. Рассчитывается, используя соответствующие формулы из [14], значение СКО $\sigma(\Phi_1)$ шума Φ_1 , соответствующего прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t)$:

$$\sigma(\Phi_{1}) = \frac{\sigma(\Phi_{1})}{\sigma_{b}(\Phi_{2})} \sigma_{b}(\Phi_{2}) = \frac{\sqrt{\int_{0}^{E_{0}} g(E, E_{0}) \exp(-m(E, Z_{t})(\rho H)_{t}) \overline{E_{ab1}^{2}}(E) \varepsilon_{1}(E) dE}}{\sqrt{\int_{0}^{E_{0}} g(E, E_{0}) \exp(-m(E, Z_{tb})(\rho H)_{tb} - m(E, Z_{1})\rho_{1}H_{1} - m(E, Z_{f})\rho_{f}H_{f}) \overline{E_{ab2}^{2}}(E) \varepsilon_{2}(E) dE}} \times \frac{\int_{0}^{E_{0}} g(E, E_{0}) \exp(-m(E, Z_{1})\rho_{1}H_{1} - m(E, Z_{f})\rho_{f}H_{f}) \overline{E_{ab2}}(E) \varepsilon_{2}(E) dE}{\int_{0}^{E_{0}} g(E, E_{0}) \overline{E_{ab1}}(E) \varepsilon_{1}(E) dE} \times \sigma_{b}(\Phi_{2}).$$

Здесь $\overline{E_{ab1}^2}(E)$ — средний квадрат поглощенной первым детектором энергии для одного зареги-стрированного кванта с энергией *E*, MэB².

Шаг 13. Разыгрываются значения шумов Φ_1 и Φ_2 . Как и в [13], для этого полагаем:

$$\Phi_1 \in N(0, \sigma(\Phi_1)); \Phi_2 \in N(0, \sigma(\Phi_2)).$$

Наряду с этим считаем, что Φ_1 и Φ_2 являются независимыми случайными величинами. Такое допущение следует из результатов корреляционного анализа выходных сигналов сэндвич-детектора [14]. Заметим также, что СКО $\sigma(F_1)$ и СКО $\sigma(F_2)$ могут быть соответственно интерпретированы как уровни квантового шума для первого и второго детекторов.

Шаг 14. Рассчитываются фактические (реальные) радиационные прозрачности для каждого тестового ОК:

$$d_1(Z_t, (\rho H)_t) = d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t) + \Phi_1;$$

$$d_2(Z_t, (\rho H)_t) = d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t) + \Phi_2.$$

Шаг 15. Получаем для каждого тестового ОК оценки его параметров Z_t и (ρH)_t как решение относительно ($Z, \rho H$) $\in D(Z, \rho H)$ системы уравнений:

$$\begin{cases} d_{11}(Z,\rho H) = d_1(Z_1,(\rho H)_1) \\ d_{12}(Z,\rho H) = d_2(Z_1,(\rho H)_1) \end{cases}$$

Шаг 16. Действия, описанные на шагах 13—15, воспроизводятся *n* раз подряд, т.е. осуществляется *n* однотипных моделирований. В итоге формируется и сохраняется в памяти набор данных $(Z_i, (\rho H)_i)$ (i = 1, 2, ..., n), где Z_i и $(\rho H)_i$ — оценки параметров Z_i и $(\rho H)_i$, тестового ОК, полученные в результате *i*-го моделирования (i = 1, 2, ..., n).

Шаг 17. Для каждого тестового ОК рассчитываются среднее значение Z_m , среднеквадратическая m_z и относительная среднеквадратическая δ_z погрешности оценки Z_i :

$$Z_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i, \ m_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i)^2}, \ \delta_Z = \frac{m_Z}{Z_i} \cdot 100 \%.$$

Принципиальное отличие вышеописанного алгоритма от его прообраза — алгоритма из [13] заключается в содержании шагов (этапов) 1—3. Кроме того, между ними имеется существенная разница и для шагов 6, 8, 11, 12, 15. Она обусловлена тем, что теоретические радиационные прозрачности ОК здесь и в [13] вычисляются по значительно отличающимся формулам, что вполне закономерно, т.к. классическая схемная реализация МДЭ сильно отличается от схемной реализации МДЭ с применением сэндвич-детекторов.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА

Шаг 1. Положим максимальную энергию $E_0 = 160$ кэВ, что достаточно типично для ряда досмотровых систем [13].

Шаг 2. Числовой энергетический спектр излучения зададим по аналогии с [13] следующим образом:

$$g(E, E_0) = C \frac{E_0 - E}{E} \exp(-m(E, Z_g)(\rho H)_g).$$

Здесь *С* — постоянный множитель (согласно формулам, представленным на шагах 6, 11 и 12, можно считать, что *C* = 1); $m(E, Z_g)$ — МКО излучения для поглотителя в виде выходного окна рентгеновской трубки толщиной 1,5 мм, изготовленного из силикатного стекла (SiO₂ [15]) с массовой толщиной (ρH)_{*a*}.

Шаг 3. В работе [1] представлен сэндвич-детектор вида: первый детектор из иодида цезия (CsI) толщиной 0,3 мм; промежуточный фильтр в форме пластины из меди (Cu) толщиной 0,7 мм; второй детектор из иодида цезия (CsI) толщиной 5 мм.

Нами были проведены предварительные расчеты, в ходе которых было установлено, что эффективность регистрации квантов излучения в диапазоне энергий от 0 до 125 кэВ для второго детектора — 5 мм CsI составляет не менее 95 % и это значение плавно уменьшается до 81 % в диапазоне энергий от 130 до 160 кэВ. Поэтому для моделирования будем предполагать, что второй (задний) детектор характеризуется полным поглощением падающего излучения (детектор полного поглощения), т.е.

$$\varepsilon_2(E) = \overline{E}_{ab2}(E) / E = \overline{E_{ab2}^2}(E) / E^2 = 1.$$

Добавим к этому, что такое предположение вполне естественно, т.к. в этом случае происходит максимальное использование прошедшего через ОК излучения. Предположим также, по аналогии с [8], что преобладающим процессом взаимодействия излучения с первым (передним) детектором является фотоэффект, а значит

$$\overline{E}_{ab1}(E)/E = 1$$

Таким образом, для проведения моделирования относительно сэндвич-детектора будем полагать, что он представляет собой композицию вида: первый детектор 0,3 мм CsI (с преобладающим процессом взаимодействия с излучением в виде фотоэффекта); промежуточный фильтр 0,7 мм Cu; второй детектор есть детектор полного поглощения.

Шаг 4. Значения Z_{min} и Z_{max} зададим по аналогии с [13]:

$$Z_{\min} = 3(\text{Li}), Z_{\max} = 30(\text{Zn}).$$

Шаг 5. Значения d_{\min} и d_{\max} зададим по аналогии с [13]:

$$d_{\min} = 1/2^{16} \approx 1,526 \cdot 10^{-5}; d_{\max} = d_{t2}(Z_{Fe},(\rho H_{\min})_{Fe}) = d_{t2}(26;0,063) = 0,96894.$$

Здесь 2¹⁶ — число уровней квантования аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с разрядностью m = 16, которые используются в структуре измерительных каналов системы контроля (заметим, что применение АЦП с разрядностью m = 16 является достаточно типичным для многих досмотровых систем); $Z_{\rm Fe} = 26$ — атомный номер железа; ($\rho H_{\rm min}$)_{Fe} = 0,063 г/см² — массовая толщина ОК в виде стальной проволоки диаметром ($H_{\rm min}$)_{Fe} =0,08 мм (такая проволока характеризует разрешение досмотрового интроскопа конвейерного типа TC-СКАН 6040, описанного в [16]).

Шаг 6. Формируем в соответствии с (1) множество допустимых решений:

$$D(Z,\rho H) = \{ (Z,\rho H) | 3 \le Z \le 30; 1,526 \cdot 10^{-5} \le d_{t1}(Z,\rho H) < d_{t2}(Z,\rho H) \le 0,96894 \}.$$
(5)

Для проведения численного моделирования использовали дискретизацию множества (5). Для параметра Z, изменяющегося в диапазоне от 3 до 30, был выбран шаг дискретизации равный 0,1. Для параметра ρH , изменяющегося в диапазоне от (ρH)_{min}(Z), до (ρH)_{max}(Z), шаг дискретизации составил 0,1 г/см². При этом (ρH)_{min}(Z) и (ρH)_{max}(Z) находились, в соответствии с (4), а также с заданными на шаге 5 минимальным и максимальным значениями радиационной прозрачности ОК, из следующих уравнений:

$$d_{t^2}(Z,(\rho H)_{\min}(Z)) = 0,96894; d_{t^2}(Z,(\rho H)_{\max}(Z)) = 1,526 \cdot 10^{-5}.$$

Для полноты описания множества допустимых решений (5) на рис. 1 приведены графики функций (ρH)_{min}(Z) и (ρH)_{max}(Z), рассчитанные в системе MathCad по таблице целочисленных и некоторых нецелочисленных значений Z.

Проверим теперь взаимную однозначность отображения пар (Z, ρH) в пары (d_{t1} , d_{t2}), т.е. проверим взаимную однозначность отображения R множества допустимых решений $D(Z, \rho H)$ во множество теоретических прозрачностей:

$$Q(d_{t1}, d_{t2}) = \{ (d_{t1}, d_{t2}) | 1,526 \cdot 10^{-5} \le d_{t1} < d_{t2} \le 0,96894 \}.$$

Такая проверка необходима для того, чтобы быть уверенным (в последующем), что именно квантовые шумы приводят к погрешности в оценке атомного номера, а не систематические погрешности, вызванные неоднозначностью данного отображения.



Рис. 1. Зависимости минимального р*H*_{min} и максимального р*H*_{max} значений массовой толщины ОК от эффективного атомного номера *Z*.

С этой целью следует вычислить и исследовать якобиан *J* преобразования переменных (*Z*, ρH) в переменные (d_{i1}, d_{i2}) :

$$J = \frac{\frac{\partial d_{t1}(Z,\rho H)}{\partial Z}}{\frac{\partial d_{t2}(Z,\rho H)}{\partial Z}} \frac{\frac{\partial d_{t1}(Z,\rho H)}{\partial (\rho H)}}{\frac{\partial d_{t2}(Z,\rho H)}{\partial (\rho H)}}.$$

Однако вычисление данного якобиана крайне затруднительно ввиду сложности аналитических зависимостей (2), (3), описывающих величины $d_{1}(Z, \rho H)$ и $d_{2}(Z, \rho H)$ как функции от переменных Z и ρH , и учитывая тот факт, что МКО излучения задаются не аналитически, а в дискретной форме — таблично. Вследствие этого оценим взаимную однозначность отображения R с помощью линий уровня.

Формирование линий уровня можно осуществлять в равной степени на основе функций $d_{t1}(Z, \rho H)$ или $d_{t2}(Z, \rho H)$. Для определенности будем использовать функцию $d_{t1}(Z, \rho H)$, т.е. теоретическую прозрачность ОК для первого детектора.

В аналитической форме линия уровня функции $d_{t1}(Z, \rho H)$ имеет вид:

$$L(d_{10}) = \{ (Z, \rho H) \in D(Z, \rho H) | d_{11}(Z, \rho H) = d_{10} \},\$$

где d_{10} — некоторый уровень теоретической прозрачности ОК для первого детектора. Задавая разные значения параметра d_{10} будем получать разные линии уровня функции $d_{t1}(Z, \rho H)$. Далее, для всех элементов линии уровня $L(d_{10})$ вычисляются значения функции $d_{t2}(Z,\rho H)$ (теоретической прозрачности ОК для второго детектора). Эти значения символически обозначим так: $d_{t2}(Z|L(d_{10}))$.

На рис. 2 в качестве примера приведена линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,00002$ (рис. 2*a*), рассчитанная в системе MathCad, и соответствующие ей значения прозрачности $d_{c2}(Z|L(d_{10}))$ (рис. 2*б*).

На рис. 3—5 приведены графики функции $d_{l2}(Z|L(d_{10}))$ (от переменной Z) для различных линий уровня $L(d_{10})$. При этом уровень d_{10} изменялся дискретно от значения 0,00002 (что близко к минимальному значению прозрачности $d_{\min} = 1/2^{16} \approx 1,526 \cdot 10^{-5}$) до значения 0,75 (что близко к значению прозрачности $d_{l1}(26;0,063) = 0,779$ для первого детектора для ОК из железа с массовой толщиной (ρH_{\min})_{Fe} = 0,063 г/см²).

Как видно, графики на рис. 3—5 носят монотонный характер, что свидетельствует о взаимной однозначности отображения R множества допустимых решений $D(Z, \rho H)$ во множество теоретических прозрачностей $Q(d_{i1}, d_{i2})$.

Шаги 7, 8. Зададим следующее множество тестовых материалов $M_t(Z) = \{6;13;26\}$, т.е. в качестве таковых, по аналогии с [13], выберем углерод (С), алюминий (Al) и железо (Fe). Соответствующие этим материалам массовые толщины (ρH)_t и прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t)$ для первого детектора приведены на рис. 6.



Рис. 2. Линия уровня $L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,00002$ (*a*); значения прозрачности $d_{i2}(Z|L(d_{10}))$ для данной линии уровня (*б*).



Рис. 3. Графики функции $d_{l2}(Z|L(d_{10}))$ при $d_{10} = 0,00002; 0,00005; 0,0002; 0,0005.$



Рис. 4. Графики функции $d_{i2}(Z|L(d_{10}) \text{ при } d_{10} = 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,05.$

Заметим, что все тестовые ОК включаются как отдельное подмножество во множество допустимых решений $D(Z,\rho H)$. Заметим также, что тестовый ОК может быть описан не только как пара $(Z_t, (\rho H)_t)$, но и как пара (Z_t, d_{s2}) . При этом монотонное уменьшение массовой толщины $(\rho H)_t$ эквивалентно монотонному увеличению радиационной прозрачности d_{s2} .

живалентно монотонному увеличению радиационной прозрачности d_{s2} . **Шаг 9.** В качестве базового тестового ОК выберем углерод ($Z_{tb} = 6$) с массовой толщиной (ρH)_{tb}=15,042 г/см², которая соответствует базовому значению теоретической радиационной прозрачности для второго (заднего) детектора равному $d_{b2} = 0,1$.

Шаг 10. Положим $\sigma_b(\Phi_2) = 0,0025; 0,005; 0,01; 0,03.$



Рис. 5. Графики функции $d_{l2}(Z|L(d_{10})$ при $d_{10} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75.$



Рис. 6. Зависимость массовой толщины (ρH), тестового ОК от радиационной прозрачности d_{s^2} для разных тестовых ОК (*a*); зависимость прозрачности $d_{l1}(Z_{\rho}(\rho H)_{l})$ тестового ОК от радиационной прозрачности d_{s^2} для разных тестовых ОК (*b*).

Шаги 11, 12. В табл. 1 представлены результаты вычисления значений СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых ОК для всех выбранных (на шаге 10) базовых значений $\sigma_b(\Phi_2)$ СКО шума Φ_2 .

Шаги 13—17. Выполнение шагов 13—17 проводились с помощью математического программного обеспечения «MathCad» для n = 10000 моделирований. Соответствующие результаты отображены в табл. 2, а также на рис. 7.

Из этих результатов следует, что погрешность оценки атомного номера для разных материалов имеет сильную зависимость от квантовых шумов. Вместе с тем указанная погрешность:

строго возрастает при возрастании уровней шумов (что естественно и вполне закономерно);

для ОК из материала с низким атомным номером (углерод) имеет максимальное значение при минимальной массовой толщине ОК (что равносильно максимальному значению радиационной прозрачности ОК);

для ОК из материала со средним (алюминий) или высоким (железо) атомным номером имеет максимальное значение при максимальной массовой толщине ОК (что равносильно минимальному значению радиационной прозрачности ОК);

увеличивается при увеличении атомного номера материала ОК.

Таблица 1

СКО шумов Ф ₁ и Ф, для тестовых ОК при разных базовых значениях СКО	шума Ф),
--	--------	----

7	(4.)	CIKO				d	s2				
		$_{b}(\Phi_{2})$ CKO	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
6	0,0025	σ(Φ ₂)	0,0025	0,0035	0,0043	0,0049	0,0055	0,006	0,0065	0,007	
	0,005		0,005	0,007	0,0086	0,0099	0,011	0,0121	0,013	0,0139	
	0,01		0,01	0,0141	0,0172	0,0198	0,0221	0,0242	0,0261	0,0278	
	0,03		0,03	0,0422	0,0515	0,0594	0,0663	0,0725	0,0782	0,0835	
	0,0025		0,0009	0,0014	0,0017	0,002	0,0023	0,0026	0,0029	0,0031	
	0,005	- (D)	0,0018	0,0027	0,0035	0,0041	0,0047	0,0052	0,0057	0,0062	
	0,01	$O(\Psi_1)$	0,0037	0,0055	0,0069	0,0082	0,0093	0,0104	0,0114	0,0124	
	0,03		0,0111	0,0164	0,0207	0,0245	0,028	0,0312	0,0343	0,0372	
	0,0025		0,0026	0,0036	0,0044	0,005	0,0056	0,0061	0,0066	0,007	
		0,005		0,0051	0,0072	0,0087	0,01	0,0111	0,0122	0,0131	0,014
	0,01	σ(Φ ₂)	0,0102	0,0143	0,0174	0,02	0,0223	0,0243	0,0262	0,0279	
	0,03		0,0307	0,043	0,0523	0,0601	0,0669	0,073	0,0786	0,0838	
15	0,0025	σ(Φ ₁)	0,0007	0,0011	0,0014	0,0017	0,002	0,0022	0,0025	0,0028	
	0,005		0,0014	0,0022	0,0028	0,0034	0,0039	0,0045	0,005	0,0056	
	0,01		0,0029	0,0043	0,0056	0,0067	0,0078	0,009	0,0101	0,0113	
	0,03		0,0086	0,013	0,0167	0,0202	0,0235	0,0269	0,0303	0,0339	
	0,0025		0,0027	0,0037	0,0045	0,0051	0,0057	0,0062	0,0066	0,007	
	0,005	-(A)	0,0054	0,0074	0,009	0,0103	0,0114	0,0124	0,0133	0,0141	
	0,01	$\sigma(\Psi_2)$	0,0107	0,0149	0,018	0,0205	0,0228	0,0247	0,0265	0,0282	
26	0,03		0,0321	0,0446	0,0539	0,0616	0,0683	0,0742	0,0796	0,0845	
20	0,0025		0,0006	0,0009	0,0011	0,0014	0,0016	0,0019	0,0022	0,0025	
	0,005	- (((((()))	0,0012	0,0018	0,0023	0,0028	0,0033	0,0038	0,0043	0,005	
	0,01	$o(\Psi_1)$	0,0023	0,0035	0,0046	0,0056	0,0065	0,0076	0,0087	0,01	
	0,03		0,007	0,0106	0,0137	0,0167	0,0196	0,0227	0,0261	0,0299	

Из табл. 2 и рис. 7 вместе с тем вытекает, что погрешность m_z (как и δ_z) является немонотонной зависимостью от массовой толщины (радиационной прозрачности) ОК.

Аналогичная немонотонность оказалось присущей и для традиционной (классической) схемы реализации МДЭ, что объясняется, главным образом, поведением обратной зависимости $Z = Z(d_{11}, d_{12})$, т.е. зависимости атомного номера от радиационных прозрачностей ОК [13].

Таблица 2

7	σ(Φ)		d_s2								
	$O_b(\Phi_2)$		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
		Z_m	5,99	5,99	5,99	5,96	5,85	5,98	6	5,99	
	0,0025	m _z	0,3	0,24	0,23	0,41	0,77	0,31	0,3	0,42	
		δ_,%	4,95	3,94	3,78	6,93	13,21	5,15	5,05	6,94	
		Z_m	5,97	5,99	5,97	5,96	5,87	5,98	5,97	5,95	
	0,005	m_z	0,62	0,5	0,51	0,55	0,8	0,54	0,62	0,88	
(δ _z , %	10,45	8,3	8,54	9,29	13,57	9	10,41	14,75	
6		Z_m	5,89	5,91	5,93	5,94	5,85	5,91	5,87	5,8	
	0,01	m _z	1,32	1,05	1	0,98	1,11	1,13	1,35	1,82	
		δ _z , %	22,34	17,83	16,83	16,58	19	19,11	23	31,45	
		Z_m	6,16	6	5,95	5,91	5,91	6,01	6,1	6,6	
	0,03	m _z	3,17	2,64	2,49	2,49	2,6	2,88	3,44	4,7	
		δ _z , %	51,5	44	41,8	42,07	44,02	47,87	56,32	71,1	
		Z_m	13,01	13,01	13,01	13,01	13	13	13,01	13,03	
	0,0025	m _z	0,54	0,38	0,32	0,29	0,29	0,3	0,33	0,43	
		δ _z , %	4,12	2,95	2,48	2,25	2,19	2,28	2,55	3,31	
		Z_m	13,06	13,02	13,02	13,01	13,01	13,02	13,02	13,05	
	0,005	mz	1	0,71	0,6	0,56	0,55	0,59	0,65	0,84	
10		δ _z , %	7,69	5,48	4,59	4,27	4,2	4,53	5,01	6,44	
13	0,01	Z_m	13,24	13,09	13,05	13,07	13,06	13,04	13,09	13,17	
		mz	2,2	1,47	1,2	1,1	1,09	1,15	1,35	1,79	
		δ _z , %	16,62	11,25	9,17	8,4	8,34	8,8	10,32	13,56	
		Z_m	15,12	14,09	13,72	13,59	13,67	13,77	13,75	14,03	
	0,03	mz	7,98	5,73	4,49	3,88	4	4,13	4,45	5,19	
		δ _z , %	52,75	40,68	32,73	28,57	29,25	29,97	32,33	36,96	
		Z _m	26,3	26,17	26,17	26,05	25,66	26,58	24,53	24	
	0,0025	m _z	2,53	1,86	1,65	1,23	1,14	0,85	0,92	1,12	
		δ_,%	9,64	7,09	6,32	4,71	4,43	3,21	3,74	4,66	
		Z_m	26,39	26,41	26,48	25,98	25,45	26,12	24,61	23,53	
	0.005	m _z	4	3,27	3	2,17	1,81	1,82	1,57	1,62	
•	0,005	δ _z , %	15,15	12,4	11,34	8,37	7,09	6,96	6,38	6,87	
26		Z_m	25,91	26,28	26,36	25,66	25,05	25,65	24,38	22,84	
	0,01	m_z	5,63	4,76	4,42	3,36	2,95	3,18	2,55	2,34	
		δ_, %	21,74	18,11	16,78	13,08	11,78	12,39	10,46	10,26	
		Z _m	23,66	24,69	24,89	23,96	24,08	24,41	22,82	20,93	
	0,03		9,01	7,72	7,09	5,75	5,84	5,99	4,92	4,26	
		δ _z , %	38,09	31,26	28,48	24,01	24,24	24,54	21,56	20,35	

Среднее значение Z_m , погрешности m_z и δ_z оценки атомного номера для разных тестовых ОК в зависимости от базового значения $\sigma_b(\Phi_2)$ СКО шума Φ_2



Рис. 7. Среднеквадратические погрешности m_z оценок атомных номеров материалов для разных тестовых ОК $(a - Z_t = 6, \delta - Z_t = 13, s - Z_t = 26)$: $- - d_{s2} = 0,1; - - - d_{s2} = 0,3; \cdots - d_{s2} = 0,6; - \cdots - - d_{s2} = 0,8.$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований представлены аналитические описания множества допустимых решений и множества тестовых объектов контроля для метода дуальных энергий применительно к рентгеновским системам досмотрового контроля с сэндвич-детекторами излучения. Для данных систем создан алгоритм оценки погрешностей определения атомного номера, порожденных квантовым шумом, при распознавании материалов на основе метода дуальных энергий и проиллюстрировано его действие на конкретном примере.

Созданный алгоритм может быть использован в дальнейшем, в частности, для оптимизации сэндвич-детекторов излучения из условия минимума погрешности распознавания материалов, порожденной квантовым шумом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rebuffel V., Dinten J.M.* Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits // Insight-nondestructive testing and condition monitoring. 2007. V. 49. No. 10. P. 589—594. https://doi.org/10.1784/ insi.2007.49.10.589

2. *Chang C.H., Ni Y.C., Tseng S.P.* Calculation of effective atomic numbers using a rational polynomial approximation method with a dual-energy X-ray // Journal of X-Ray Science and Technology. 2021. V. 29. No. 2. P. 317—330. https://doi.org/10.3233/xst-200790

3. Duvillier J., Dierick M., Dhaene J., Van Loo D., Masschaele B., Geurts R., Hoorebeke L.V., Boone M.N. Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements // NDT & E International. 2018. V. 94. P. 120—125. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.01.002

4. Огородников С.А. Распознавание материалов при радиационном таможенном контроле на базе линейного ускорителя электронов / Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2002. 121 с.

5. Гаврии Ю.Н., Бердников Я.А., Спирин Д.О., Передерий А.Н., Сафонов М.В., Романов И.В. Программный комплекс для восстановления интроскопических изображений с использованием метода дуальной энергии // Problems of atomic science and technology. 2010. № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54). Р. 123—125. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/17029 6. *Gil Y., Oh Y., Cho M., Namkung W.* Radiography simulation on single-shot dual-spectrum X-ray for cargo inspection system // Applied Radiation and Isotopes. 2011. V. 69. No. 2. P. 389—393. https://doi.org/10.1016/j. apradiso.2010.11.011

7. Osipov S.P., Udod V.A., Wang Y. Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 8. P. 568—587. https://doi.org/10.1134/S1061830917080058 [Ocunos C.II., Vdod B.A., Ван Я. Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // Дефектоскопия. 2017. № 8. C. 33—56.]

8. Osipov S.P., Usachev E.Y., Chakhlov S.V., Shchetinkin S.A., Kamysheva E.N. Selecting parameters of detectors when recognizing materials based on the separation of soft and hard X-ray components // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 11. P. 797—810. https://doi.org/10.1134/ S1061830918110074 [Ocunos C.II., Vcaчes E.Ю., Чахлов С.В., Щетинкин С.А., Камышева Е.Н. Выбор параметров детекторов в методе распознавания материалов на основе разделения мягкой и жесткой составляющих рентгеновского излучения // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 60—71.]

9. Свистунов Ю.А., Ворогушин М.Ф., Петрунин В.И., Сидоров А.В., Гавришин Ю.Н., Фиалковский А.М. Развитие работ по созданию рентгеновских и ядерно-физических инспекционных комплексов в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова // Problems of atomic science and technology. 2006. No. 3. P. 171—173. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/111427

10. *Fredenberg E*. Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 878. P. 74—87. https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.044

11. Iovea M., Neagu M., Duliu O.G., Oaie G., Szobotka S., Mateiasi G. A Dedicated on-board dual-energy computer tomograph // J. Nondestruct Eval. 2011. V. 30. P. 164—171. https://doi.org/10.1007/s10921-011-0104-x

12. *Khan S.U., Khan I.U., Ullah I., Saif N., Ullah I.* A review of airport dual energy X-ray baggage inspection techniques: Image enhancement and noise reduction // Journal of X-Ray Science and Technology. 2020. V. 28. No. 3. P. 481—505. https://doi.org/10.3233/xst-200663

13. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. https://doi.org/10.1134/S1061830918080077 [Удод В.А., Осипов С.П., Ван Я. Оценка влияния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 50—65.]

14. Udod V.A., Vorobeichikov S.E., Nazarenko S.Y. Mathematical models of radiation transparency of test objects when using sandwich X-ray radiation detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 161—170. https://doi.org/10.1134/S1061830920020096 [Vdod B.A., Воробейчиков С.Э., Назаренко С.Ю. Математические модели радиационных прозрачностей объекта контроля при использовании сэндвич-детекторов рентгеновского излучения // Дефектоскопия. 2020. № 2. С. 31—41.]

15. Евстропьев К.С. Химия кремния и физическая химия силикатов. М.: Промстройиздат, 1956. 124 с.

16. Открытый обзор продукции российских производителей специальных средств и техники для обеспечения общественной безопасности / Научно-технический информационный сборник. Вып. 1. М.: ФКУ НПО «СТиС» МВД России, 2018. 103 с.

УДК 620.179.111

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИЛЛЯРНОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. И.И. Кудинов^{1,*}, А.Н. Головков^{1,*}, П.А. Шишкин^{2,**}, Д.С. Скоробогатько^{1,*}, А.И. Андреев³, А.С. Генералов^{1,*}

 ¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ), Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17 ² Общество с ограниченной ответственностью «АРИОН» (ООО «Арион»),
 Россия 603093 Нижегородская обл., Нижний Новгород, ул. Родионова, 134, литер А, помещение 3 ³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)),
 Россия 127994 Москва, ГСП-4, г. ул. Образцова, 9, стр. 9 E-mail: *viamlab622@gmail.com; **info@ari-on.ru

> Поступила в редакцию 29.12.2021; после доработки 17.01.2022 Принята к публикации 17.01.2022

Предложен комплексный подход по оценке эффективности различных источников ультрафиолетового излучения, используемых при проведении капиллярного люминесцентного метода неразрушающего контроля. Приведены спектральные характеристики излучения современных отечественных и зарубежных УФ-облучателей, используемых при контроле деталей и узлов авиационной техники в авиационной отрасли. Определены основные параметры, позволяющие наиболее полно оценить ультрафиолетовые источники на соответствие требованиям отечественных и зарубежных нормативных документов по энергетическим характеристикам источников на этапе осмотра технологического процесса капиллярного контроля. Показано влияние использования УФ-источников различного типа на результаты контроля образцов и деталей с различными конструктивными особенностями, содержащих производственные и эксплуатационные дефекты различного размера. Установлено, что для оценки различных УФ-облучателей характеристик, указанных в их технической документации (паспортах), для дефектоскописта недостаточно. Данный подход позволит оценить и выбрать современные источники УФ-излучения с учетом требований стандартов, действующих на предприятиях.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, ультрафиолетовое излучение, источник ультрафиолетового излучения, пенетрант, спектр люминесценции, спектр поглощения.

DOI: 10.31857/S0130308222010055

введение

Одним из основных методов неразрушающего контроля, применяемым для оценки качества продукции при производстве и эксплуатации деталей и узлов авиационной техники, как простой, так и сложной конфигурации, является метод капиллярного контроля, позволяющий выявлять на поверхности несплошности материала различного размера. Данный метод позволяет регистрировать дефекты за счет формирования индикаторного рисунка в местах расположения несплошностей материала, размеры которого значительно превышают ширину раскрытия дефекта. Самым контрастным и, соответственно, самым чувствительным методом капиллярного контроля является люминесцентный, обнаруживающий поверхностные дефекты шириной раскрытия 1 мкм и менее. Основным отличием данного метода является то, что осмотр контролируемых поверхностей деталей на наличие дефектов проводится в затемненных помещениях с использованием источника ультрафиолетового излучения ближнего диапазона (УФ-А), позволяющего визуально регистрировать яркие и контрастные индикаторные рисунки с максимумом спектра излучения, соответствующим максимальной чувствительности зрительной системы человека над несплошностями материала различного размера. Эффективность обнаружения дефектов при проведении капиллярного люминесцентного контроля зависит от размера индикаторного следа, его цветовой или яркостной контрастности по отношению к фону, полученному на поверхности. При регистрации индикации обычно учитывают три взаимосвязанные субъективные характеристики, такие как оттенок цвета, его контрастность и яркость. Восприятие цвета наблюдаемого флуоресцентного свечения от индикации дефекта зависит от многих факторов: формы и размера индикации; фотолюминесцентных характеристик красителей, входящих в состав используемых дефектоскопических материалов (спектра поглощения и люминесценции), их концентрации; спектрального распределения и интенсивности излучения УФ-источников; цвета, яркости и размеров фона наблюдения (цветовой контраст). Обязательно необходимо отметить, что характеристики фона зависят от шероховатости поверхности, наличия или отсутствия проявителя, его типа, а также от источника УФ-излучения.

В настоящее время одной из перспективных задач капиллярного неразрушающего контроля является повышение минимального размера обнаруживаемого дефекта с целью обеспечения высоких требований к выпускаемой продукции ответственного назначения [1, 2]. Существует множество путей решения данной задачи, одним из которых является увеличение яркости и контрастности индикаторного рисунка дефекта за счет максимального согласования физических и оптических свойств дефектоскопических материалов и спектральных и энергетических характеристик УФ-облучателей [3].

Объем заполнения полости дефекта, очищенной от различных видов загрязнений [4], проникающей жидкостью и степень ее извлечения проявляющими составами являются одними из самых важных характеристик наборов дефектоскопических материалов, влияющих на достижение порогового значения люминесценции для используемой многокомпонентной системы, содержащей люминофор с физической точки зрения, а с практической — на обнаружение дефектов зрительной системой человека [5, 6]. Еще одной важной характеристикой наборов дефектоскопических материалов является спектральное распределение энергии излучения люминесценции проникающих жидкостей в УФ-свете, которая в свою очередь зависит от спектрального распределения энергии поглощения данной проникающей системы и величины интенсивности падающего на нее излучения.

Среди основных факторов, учитывающих оптические свойства дефектоскопических материалов, используемых при капиллярном люминесцентном контроле, позволяющих достичь высокой доли обнаружения дефектов, необходимо выделить:

необходимость использования люминесцентных красителей, входящих в состав проникающих жидкостей, с заданными оптическими свойствами:

 а) имеющих характерный максимум спектра поглощения в сложной многокомпонентной системе, близкий к максимуму спектра ультрафиолетового излучения УФ-облучателей, применяемых при проведении капиллярного люминесцентного контроля;

 б) имеющих спектр излучения в области максимальной чувствительности (на кривой видности) зрительной системы человека при практически полном отсутствии дневного освещения;

необходимость проведения осмотра с использованием специальных источников, имеющих строго ограниченный узкополосный эмиссионный спектр в области диапазона УФ-А (от 315 до 400 нм) с максимумом спектра на длине волны 365±5 нм и с заданной интенсивностью при минимальной доле в области излучения, которая граничит с видимым диапазоном.

необходимость использования проявляющих жидкостей, создающих при нанесении на поверхности контролируемых деталей белую или серо-белую пленку, эффективно извлекающие пенетрант из полостей дефектов, с особыми оптическими свойствами, позволяющими частично поглощать и рассеивать ультрафиолетовое излучение, формируя равномерный фон без бликов при осмотре деталей в УФ-свете, обеспечивая максимальный контраст между индикацией дефекта и фона.

Согласно закону С.И. Вавилова, энергетический выход люминесценции растет пропорционально длине волны возбуждающего света, поэтому для каждого люминофора (красителя), входящего в состав набора дефектоскопических материалов, такая закономерность справедлива до определенной длины волны. На всем участке спектра с коротковолновой стороны до этого значения сохраняется постоянство квантового выхода, цвета и спектра люминесценции и описывается в виде зависимости [7]:

$$\Phi = (\lambda_a / \lambda_a) \cdot Q, \tag{1}$$

где Φ — энергетический выход; Q — квантовый выход; λ_a — длина волны поглощенного излучения; λ_a — длина волны испускаемого излучения (λ_e = const при $\lambda_a \rightarrow \lambda_e$ и $\lambda_a / \lambda_e \rightarrow 1$).

Таким образом, повысить энергетический выход люминесценции в капиллярной дефектоскопии при обнаружении дефектов (особенно малых размеров) возможно только при согласованном выборе набора дефектоскопических материалов и источников УФ-облучения.

В зарубежных литературных источниках подробно описаны оптические фотолюминесцентные характеристики красителей входящих в состав современных зарубежных дефектоскопических материалов, влияющих на обнаружение дефектов. Показаны основные факторы, влияющие на яркость и контрастность индикаторных рисунков, сформированных над дефектом при проведении капиллярного люминесцентного контроля при осмотре в УФ-свете [8—14], однако спектральных и энергетических характеристик многокомпонентных проникающих систем в полном объеме авторами статьи не приведено.

Для капиллярного люминесцентного контроля разработано большое количество разнообразных типов источников ультрафиолетового облучения разной мощности. Большое многообразие современных источников вводит специалистов в затруднение при их выборе. Характеристик, приведенных в паспортах или руководствах по эксплуатации, недостаточно для определения эффективности их использования с точки зрения выявляемости дефектов и установления соответствия требованиям отечественных и зарубежных стандартов, без проведения дополнительных экспериментальных измерений и полученных в ходе их обработки ряда параметров. Как правило, в паспортах содержатся следующие основные технические характеристики источников УФ-освещения: тип источника; потребляемая мощность; входное напряжение питания; номинальное напряжение аккумуляторной батареи (при наличии); длина волны максимума излучения; величина ультрафиолетовой облученности на расстоянии L (325, 380, 400 или 500 мм) от источника; размер области контроля; доля видимого света в режиме УФ и др. Из приведенных параметров видно, что они необходимы для оценки качества ламп и их соответствия установленным требованиям технической документации, действующей на предприятиях в области охраны труда и требований техники безопасности.

Среди отечественных литературных источников необходимо выделить статью [15], содержащую описание особенностей применения различных типов современных УФ-источников, используемых на этапе осмотра при проведении капиллярного контроля, и сравнительный анализ их технических параметров. Также в данной статье приведены экспериментальные исследования результатов капиллярного контроля, при использовании различных облучателей (ртутных, светодиодных и эксиламп), но без указания значений величин энергетической освещенности, создаваемой на поверхности рассматриваемыми источниками на заданном расстоянии.

Особое внимание стоит обратить на доклад зарубежных специалистов, в котором содержаться зарегистрированные на фото результаты контроля образцов с трещинами малоцикловой усталости при различной ультрафиолетовой освещенности, создаваемой различными типами источников излучения [16].

Для сравнения и оценки технологий, оборудования и наборов, используют вероятностную оценку обнаружения дефектов, как эффективный и наглядный инструмент [17—19]. Так, в статье [20] проведена оценка вероятности обнаружения различных дефектов при использовании в процессе осмотра ртутной УФ-лампы, для различной облученности контролируемых поверхностей — 400 и 1200 мкВт/см². Работ по сравнению ультрафиолетовых источников различного типа по критерию вероятности обнаружения дефектов не было найдено.

По итогам проведенного литературного анализа во всех источниках подтверждается, что повышение интенсивности ультрафиолетового излучения (при соблюдении всех мер техники безопасности при работе с УФ-источниками излучения) является благоприятным фактором и приводит к росту контраста между индикацией дефекта и фоном (сигнал/шум).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение оптических свойств современных проникающих многокомпонентных жидкостей

За последнее время для капиллярного люминесцентного контроля разработано большое количество проникающих люминесцентных жидкостей как отечественного, так и зарубежного производства. Все проникающие люминесцентные жидкости разрабатываются с учетом требований к УФ-источникам, применяемым при проведении капиллярного контроля, установленным в отечественных [21] и зарубежных стандартах [22]. Производители наборов дефектоскопических материалов используют в составе пенетрантов различные люминесцентные красители. Поэтому все проникающие вещества могут иметь разные, но близкие оптические свойства.

Для определения спектров поглощения современных дефектоскопических материалов отечественного и зарубежного производства, применяемых при люминесцентном контроле деталей и узлов авиационной техники, был использован двулучевой спектрофотометр с диапазоном измерений от 200 до 900 нм. Получены спектры поглощения различных пенетрантов в диапазоне от 310 до 450 нм (рис. 1).



Рис. 1. Спектры поглощения проникающих жидкостей отечественного и зарубежного производства.

Из полученных зависимостей видно, что спектры поглощения всех выбранных проникающих жидкостей, входящих в наборы дефектоскопических материалов с особо высоким уровнем чувствительности включают в себя установленный в нормативной документации максимум спектра излучения УФ-источников 365 нм, что способствует эффективному поглощению возбуждающего излучения и эффективному увеличению энергетического выхода люминесценции.

Как отмечено ранее, вторым оптическим свойством, обеспечивающим визуальную регистрацию индикаторного рисунка, является характеристический спектр излучения (люминесценции) многокомпонентной жидкости, который должен соответствовать максимуму «функции спектральной чувствительности» зрительной системы человека. Для определения спектров люминесценции дефектоскопических материалов отечественного и зарубежного производства был использован люминесцентный спектрофотометр с высокой чувствительностью и диапазоном измерений от 200 до 900 нм. Получены спектры люминесценции различных пенетрантов в диапазоне от 400 до 700 нм, возбуждаемых монохроматическим излучением 365 нм заданной интенсивности, соответствующего требованиям к максимуму спектров излучения УФ-облучателей (рис. 2).

Из полученных распределений видно, что максимумы спектров излучения всех современных проникающих многокомпонентных систем, входящих в набор дефектоскопических материалов с особо высоким уровнем чувствительности, имеют характерный максимум спектра люминесценции в диапазоне от 502 до 528 нм, что соответствует области максимальной чувствительности (на кривой видности) человеческого глаза в затемненном помещении (около 510 нм). На поверхности контролируемой детали в местах несплошностей материала, при использовании разных наборов, цвет индикаторного рисунка может меняться от голубовато-зеленого до желто-зеленого. Следует отметить, что кривая видности человеческого глаза при недостаточной освещенности, в сумеречном свете, смещается в сторону коротковолновой области (эффект Пуркине) [23].

Из полученных выше результатов (см. рис. 1 и 2) видно, что все рассматриваемые дефектоскопические материалы практически в равной степени создают необходимые условия для обеспечения максимальной чувствительности. Поэтому повысить размер минимально обнаруживаемого дефекта для определенного набора, с учетом только оптических свойств, возможно за счет увеличения энергетического выхода, а именно за счет увеличения облученности ультрафиолетовым излучением контролируемой поверхности.



Рис. 2. Спектры люминесценции проникающих жидкостей отечественного и зарубежного производства.

Определение технологических параметров источников ультрафиолетового излучения

Как показывает опыт эксплуатации различных УФ-источников на авиационных предприятиях, яркость индикации дефекта и фона на поверхности изменяются в зависимости от типа источника, а также наличия или отсутствия светофильтра на лампе, то есть от энергетических характеристик спектра УФ-излучения.

Для оценки влияния различных типов УФ-источников на результаты капиллярного люминесцентного контроля образцов и деталей с производственными и эксплуатационными дефектами были рассмотрены передвижные, переносные и стационарные источники ультрафиолетового излучения различного типа (ртутные и светодиодные) со светофильтром и без, такие как Magnaflux ZB100F, КД-33Л, Labino-Torch-Light-UVG2 Floodlight (без светофильтра), ATG UV 400 DF (без светофильтра), а также УФ-источник с возможностью регулирования интенсивности излучения Элитест УФС-12 Black Light.

С целью определения не указанных в паспорте характеристик были получены энергетические спектры исследуемых ламп в диапазоне длин волн 305—425 нм. Результаты распределения интенсивности излучения по длинам волн для всех исследуемых источников показаны на рис. 3. Все спектры получены с использованием оптоволоконного спектрометра с выносным полихроматическим датчиком при заданном уровне УФ-облученности (≈3000 мкВт/см²).

Из полученных данных видно, что спектры излучения всех ртутных облучателей имеют узкополосный эмиссионный спектр, с характерным пиком в диапазоне длин волн от 365 до 370 нм. Для диодных облучателей спектр широкополосный с максимумом в том же диапазоне.

Спектры излучения от ртутных газоразрядных ламп КДЗЗЛ и UV 400 DF помимо основного имеют дополнительные пики, в том числе в области видимой части спектра с максимумом 405 нм, но по величине значительно меньшей, чем полезный характерный эмиссионный пик. Наличие дополнительного характерного пика в области видимой части спектра (405 нм) обуславливает появление паразитного излучения, которое необходимо учитывать при контроле. Согласно колориметрической системе координат цветности, длина волны 405 нм соответствует фиолетовой области видимой части спектра. Поэтому для данных ламп особенно стоит учитывать возможность появления фиолетового фона на поверхности контролируемой детали при осмотре. Установленные спектральные характеристики показаны в табл. 1.



Рис. 3. Вид спектров излучения УФ-облучателей отечественного и зарубежного производства.

Таблица 1

C	пектральные	параметры	УФ-источников
---	-------------	-----------	---------------

Наименование УФ-источников излучения	Максимум излучения на длине волны, нм	Ширина спектра на полувысоте, нм				
Переносные	и передвижные источники					
Magnaflux ZB100F	365,83	1,46				
КД-33Л	365,83	1,47				
Labino-Torch-Light-UVG2 Floodlight	369,56	9,75				
Элитест УФС-12 Black Light	367,55	9,44				
Стационарные источники						
ATG UV 400 DF	365,54	1,61				

Из рис. 3 и табл. 1 видно, что ширина полезного эмиссионного спектра светодиодных ламп значительно превышает ширину спектра ртутных ламп, поэтому стоит учитывать, что с увеличением интенсивности излучения доля видимого света для светодиодных ламп будет расти быстрее, чем от ртутных при отсутствии в них паразитных эмиссионных пиков.

При контроле деталей сложной конфигурации в авиационной отрасли используются в основном переносные или передвижные источники УФ-облучения. Для более детального рассмотрения границ индикации дефектов, труднодоступных мест деталей или зон, где необходим направленный контроль, контролер визуально проводит осмотр данных участков с расстояния ≈ 200 мм (как показывает опыт), а иногда и ближе с использованием луп, при этом, уменьшив расстояние от источника излучения до ОК, чтобы избежать прямого попадания излучения в глаза. Обеспечить требования стандартов в части, касающейся энергетической освещенности поверхности на таких расстояниях, возможно не для всех УФ-ламп. С этой целью был определен диапазон расстояний от источника излучения до исследуемой поверхности, при которых обеспечиваются требования, установленные Российскими [21] и Международными [22] нормативными документами, назовем



Рис. 4. Вид полученных экспериментальных зависимостей E(r) для всех рассматриваемых УФ-облучателей.

его диапазоном рабочих расстояний (R). Измерения максимальной величины энергетической освещенности (E) различных УФ-облучателей в диапазоне от 500 до 6000 мкВт/см² проводились на различных расстояниях (r) с использованием аттестованного ультрафиолетового радиометра. Результаты измерений показаны на рис. 4 и в табл. 2 в виде экспериментальных зависимостей ультрафиолетовой облученности от расстояния E(r) для всех типов УФ-облучателей.

Из данных зависимостей определен диапазон рабочих расстояний $R_{2000-3000}$ и $R_{1000-5000}$ соответствующих требованиям по облученности, установленным ГОСТ 18422 от 2000 до 3000 мкВт/см² для наборов с особо высокой и высокой чувствительностью и ISO 3059 от 1000 до 5000 мкВт/см² (см. табл. 2).

Таблица 2

Наименование УФ-источника	<i>R</i> _(2000—3000) , мм	<i>R</i> _(1000—5000) , мм	E(r)
Элитест УФС-12 Black Light	a = 255—950	a' = 185—1378	$Emin = 20\ 729\ 093,7 \cdot r^{-1,59532}$ $Emax = 710\ 946\ 955,6 \cdot r^{-1,86395}$
ATG UV 400 DF	b =595—775	b'=427—1215	$E = 55\ 469\ 495, 8 \cdot r^{-1,53775}$
Labino Torsh Light UVG 2 Floodlight	c = 730—929	c' = 539—1400	$E = 197\ 074\ 350, 6 \cdot r^{-1,68266}$
Magnaflux ZB100F	d = 369 - 462	d' = 277—680	$E = 117\ 918\ 392,3 \cdot r^{-1,79023}$
КД-33Л	f = 362—445	f' = 280—632	$E = 336\ 973\ 515,5 \cdot r^{-1,973756}$

Диапазон рабочих расстояний (R) для УФ-облучателей, при которых обеспечиваются требования по облученности, установленные ГОСТ 18442 и ISO 3059

Из рис. 4 и табл. 2 видно, что максимальный диапазон рабочих расстояний и минимально возможное расстояние (с учетом требований стандартов) при осмотре обеспечивается облучателем

Элитест УФС-12 Black Light, оснащенным устройством регулировки интенсивности излучения (энкодером).

В директивах и технических спецификациях зарубежных передовых компаний, таких как Rolls-Royce или Airbus [24], установлено, что величина УФ-облученности на расстоянии 15 inches (38 см) не должна превышать значений 5000 мкВт/см². Анализируя рис. 4, можно установить, что не все УФ-облучатели, например Labino Torch Light UVG 2 Floodlight, ATG UV 400 DF и не весь диапазон УФ-лампы с энкодером типа Элитест УФС-12 Black Light, возможно использовать при контроле деталей, выпускаемых по данным спецификациям.

Существует техническая спецификация, в которой допускается облученность свыше 5000 мкВт/ см² на расстоянии 15 inches. Из рис. 4 видно, что УФ-лампы Magnaflux ZB100F и КД-33Л не обеспечат таких условий осмотра.

Следует также отметить, что для мощных УФ-облучателей (особенно без энкодера), при соблюдении требований по облученности, обеспечивается расстояние при контроле от источника излучения до ОК, достаточно неудобное при осмотре дефектоскопистами деталей, что может привести к нарушению условий охраны труда, а именно, к прямому попаданию УФ-излучения в глаза человека. Данное условие, даже при наличии защитных очков, может быть мешающим фактором при осмотре и привести к пропуску дефекта.

От рабочего расстояния также зависит еще одна важная величина, необходимая для дефектоскописта при контроле — это диаметр пятна (D). В некоторых паспортах указывается размер диаметра пятна, но без учета действующих требований по облученности, установленных в действующих стандартах. Для этого был определен диаметр пятна, при котором обеспечиваются требования, установленные ГОСТ 18442 и ISO 3059 для различных типов УФ-источников. Назовем его «рабочим диаметром пятна». Определение данного экспериментального параметра проводилось по результатам оценки размеров облучаемых ультрафиолетовых полей на плоскости, с последующим построением распределения УФ-облученности. Примеры результатов построения распределений при установленном значении УФ-облученности ~3000 мкВт/см² в центре фокусного пятна показаны на рис. 5 для ртутной и для светодиодных ламп.



Рис. 5. Примеры полученных распределений УФ-облученности ртутной Magnaflux ZB100F (*a*) и светодиодных Labino Torch Light UVG 2 Floodlight (*б*), УФС-12 Black Light УФ-ламп (*в*).

Из распределений получены экспериментальные усредненные значения рабочего диаметра пятна, в пределах которого величина интенсивности ультрафиолетового излучения менялась от 2000 до 3000 мкВт/см² в соответствии с требованиями ГОСТ 18442. Аналогичным образом получены данные диаметра пятна, в пределах которого величина интенсивности ультрафиолетового излучения менялась от 1000 до 5000 мкВт/см² в соответствии с требованиями ГОСТ 18442. Аналогичным образом получены данные диаметра пятна, в пределах которого величина интенсивности ультрафиолетового излучения менялась от 1000 до 5000 мкВт/см² в соответствии с требованиями ISO 3059. Результаты показаны в табл. 3

Для ртутной лампы КД-33Л не удалось корректно определить размер диаметра пятна, так как фокусное пятно было ассиметрично, с трудно определяемыми границами и смещено относительно геометрического центра источника (рис. 6).

Все типы ультрафиолетовых ламп генерируют помимо ультрафиолетового излучения небольшое количество света в видимом спектральном диапазоне. Практически все УФ-источники, используемые для неразрушающего контроля, имеют соответствующие светофильтры, внутренние или внешние по отношению к источнику света, для того чтобы свести к минимуму

Таблица 3

Значения рабочего диаметра пятна, в пределах которого величина интенсивности ультрафиолетового излучения соответствует требованиям ГОСТ 18442 и ISO 3059

	Рабочий диаметр пятна, мм					
Диапазон УФ-облученности, мкВт/см ²	Magnefluy ZD100E	Labino Tarah Light UVC 2	Элитест УФС-12 Black Light			
	Magnallux ZB100F	Floodlight	Режим min облученности	Режим тах облученности		
D ₍₁₀₀₀₋₅₀₀₀₎	170	107	150	403		
D _(2000—3000)	70	65	93	275		



Рис. 6. Вид фокусного пятна от УФ-облучателя КД-33Л.

выход видимого света, который является мешающим фактором в процессе люминесцентного контроля, по возможности с минимальной потерей полезной энергии излучения. Эти фильтры также блокируют вредное излучение (излучение с длиной волны менее 320 нм). В соответствии с требованиями ГОСТ 18442 и ISO 3059, при осмотре контролируемой поверхности с использованием УФ-облучателей доля видимого света на исследуемом участке не должна превышать 30 и 20 лк соответственно. Так как величина интенсивности как от ультрафиолетового, так и от видимого света регулируется различными нормативными документами при осмотре на контролируемой поверхности, она также должна быть установлена для каждой лампы в разрешенном диапазоне УФ-облучения. С увеличением облученности доля видимой составляющей в спектре линейно возрастает. В литературных источниках и в паспорте на УФ-лампы данная информация (для всего разрешенного диапазона интенсивности) в соответствии с требованиями НД отсутствует.

С этой целью была определена доля видимого света для всех рассматриваемых типов источников в зависимости от величины облученности, создаваемой УФ-лампами. Измерения величины освещенности видимой части спектра (*I*) различных УФ-облучателей проводились при различной энергетической освещенности от 1000 до 6000 мкВт/см² с использованием аттестованного люксметра.

Современные люксметры обеспечивают надлежащий диапазон чувствительности только для определенных длин волн, имеют неравномерный по чувствительности диапазон измерений освещенности от 380/400 до 760 нм с максимальной чувствительностью к излучению с длиной волны 555 нм и с минимальной по границах видимого диапазона. Проводя измерения люксметром доли видимого излучения при высокой интенсивности УФ-излучения, авторы понимают,

что проводят измерения с минимальной чувствительностью и получают минимально возможные определяемые значения с низкой точностью измерения соответственно. Для качественного сравнения различных УФ-облучателей на наличие электромагнитного излучения в области видимого света в большей или меньшей степени полученных экспериментальных данных достаточно и очень наглядно при выборе источников. Результаты измерений показаны на рис. 7 и в табл. 4 в виде линейных экспериментальных зависимостей освещенности видимого света от ультрафиолетовой облученности I(E) для всех типов рассматриваемых УФ-облучателей.



Рис. 7. Вид полученной линейной экспериментальной зависимости I(r).

Таблица 4

Доля видимой части света от УФ-облучателей при интенсивности освещения, установленной согласно требованиям ГОСТ 18442 и ISO 3059

Наименование УФ-источника	I _(2000—3000 мкВт/см²) , лк	I _(1000—5000 мкВт/см²) , ЛК	I(r)	Доля видимого излучения в УФ-спектре, %
ATG UV 400 DF	8,4—12,6	4,2-21,0	$I = 0,0042 \cdot r$	28,3
Labino Torsh Light UVG 2 Floodlight	6,4—9,6	3,2—16,0	$I = 0,0032 \cdot r$	10,5
Элитест УФС-12 Black Light	6,2—9,3	3,1—15,5	$I = 0,0031 \cdot r$	3,7
КД-33Л	5,4—8,1	2,7—13,5	$I = 0,0027 \cdot r$	12,1
Magnaflux ZB100F	5,2—7,8	2,6—13,0	$I = 0,0026 \cdot r$	1,3

В табл. 4 из спектральных характеристик ламп получены более точные значения в процентах доли видимого излучения в эмиссионном спектре УФ-источника, а именно как отношение площади излучаемого спектра в диапазона УФ-А-источника к площади излучения в видимом диапазоне.

Дефектоскопия № 1 2022

Из рис. 7 и табл. 4 видно, что наибольшее количество энергии в видимой области спектра при заданной облученности излучается УФ-лампой ATG UV 400 DF, а наименьшее количество излучается УФ-лампой Magnaflux ZB100F и Элитест УФС-12. Стоит отметить, что рабочий диапазон УФ-облученности (20 лк) для УФ-лампы ATG UV 400 DF содержит долю видимой части света, превышающую 20 лк.

Качественная оценка результатов люминесцентного контроля

Для оценки полученных выше энергетических и спектральных характеристик источников УФ-облучения проведены экспериментальные исследования по обнаружению производственных и эксплуатационных дефектов на этапе осмотра результатов люминесцентного контроля поверхностей образцов и деталей с использованием набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 1 — OB.

Для данных исследований были подобраны образцы [25, 26] и детали с различными конструктивными особенностями и типами дефектов на их поверхности, такие как:

№ 1 — плоский образец с эксплуатационными дефектами типа трещина малоцикловой усталости (МЦУ);

№ 2 — плоский образец с производственными дефектами типа неметаллическое включение и пора;

№ 3 — образец сварного шва, полученный с использованием АрДЭС, с производственными дефектами типа горячая трещина и пора;

№ 4 — лопатка ГТД с эксплуатационной трещиной в замковой части;

№ 5 — проушина с окружной трещиной в отверстии;

№ 6 — образец с отверстием диаметром 6,5 мм с трещиной МЦУ на внутренней поверхности;

№ 7 — образец с отверстием диаметром 11,0 мм, содержащим трещину МЦУ на внутренней поверхности.

При выполнении работ использовалось оборудование, в том числе ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ». Контроль образцов и деталей проводился по технологическим режимам, приведенным в ОСТ 1 90282. Результаты контроля оценивали различные дефектоскописты в соответствии с требованиями по освещенности ГОСТ 18422 для наборов по 1-му классу чувствительности с использованием различных передвижных и переносных УФ-облучателей. Результаты регистрировали с использованием фоторегистрирующего устройства при фиксированном угле съемки относительно оси ультрафиолетового потока с интенсивностью излучения в местах расположения дефекта на поверхности образца около 3000 мкВт/см². Баланс цветопередачи, при фиксации результатов капиллярного люминесцентного контроля с использованием различных источников, не изменялся. Результаты контроля показаны в табл. 5. Дефекты, обнаруженные дефектоскопистами, обведены пунктиром.

Анализ полученных результатов показал:

при осмотре поверхностей образцов № 2 и № 3 и деталей в УФ-свете с использованием всех ртутных и светодиодных ультрафиолетовых источников производственные дефекты обнаружены в полном объеме.

при осмотре поверхностей образцов и деталей в УФ-свете с использованием светодиодных источников трещины МЦУ различного размера (длиной от 0,5 мм) выявлены в полном объеме. А при осмотре с использованием ртутных газоразрядных ламп поверхностей плоских образцов № 1 и внутри отверстия № 7 не обнаружены трещины МЦУ длиной от 0,5 до 2,0 мм.

Дефектоскопистами было отмечено что:

при использовании лампы КД-33Л зафиксирован неравномерный фиолетовый фон, который приводил к затруднению при расшифровке и регистрации дефектов;

при использовании светодиодных ламп Элитест и Labino индикации от всех дефектов были более яркие и контрастные при наличии незначительного равномерного темно синего фона, который дефектоскописты посчитали за благоприятный и удобный фактор;

при использовании лампы Magnaflux на исследуемой бездефектной поверхности регистрируется самый темный «бархатный» фон;

при использовании лампы Labino для обеспечения требуемой освещенности, дефектоскопистам было неудобно держать данный источник на расстоянии ≈ 925 мм до ОК, чтобы обеспечить заданную освещенность.

Таблица 5

63

	УФ-облучатели						
Объект контроля	КД-33Л	Элитест УФС-12 Black Light	Magnaflux ZB100F	Labino Torch Light UVG 2 Floodlight			
№ 1	Фиолетовый фон			000			
№ 1		000	0	000			
№ 2							
№ 3							
№ 4				0			
№ 5		O					

Результаты капиллярного контроля образцов и деталей с различными дефектами

Окончание табл. 5



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя полученные экспериментальные результаты контроля, а также энергетические и спектральные характеристики, можно установить, что все источники обеспечивают выявление дефектов с шириной раскрытия 1 мк, но наихудшие результаты, как и следовало ожидать, получены при наличии значительной доли видимой части спектра в УФ-излучении лампы КД-33Л, сформированной, в том числе, в отдельном характерном эмиссионном пике.

Обеспечить оптимальное расстояние, при котором электромагнитное излучение напрямую не будет попадать в глаза контролера (для переносных и передвижных от 30 до 40 мм, а для стационарных от 40 до 50 мм) при осмотре в УФ-свете деталей, возможно не для всех УФ-облучателей с обеспечением требований по освещенности, установленной стандартами ГОСТ 18442 и ISO 3059, а именно Labino Torch Light UVG 2 Floodlight и ATG UV 400 DF.

Наличие незначительного количества доли видимого излучения в спектре УФ светодиодных ламп приводит к формированию темно-синего равномерного «бархатного» фона, что благоприятно сказывается на обнаружении дефектов, имеющих маленькую протяженность.

Наличие регулировки интенсивности УФ-излучения в облучателе Элитест УФС12 Black Light позволяет значительно увеличить диапазон рабочих расстояний, одновременно обеспечивая требования как отечественных, так и зарубежных стандартов.

Рабочие диаметры пятна всех УФ-источников обеспечивают контроль оптимального размера участка. Наибольший размер данного параметра получен с использованием лампы УФС12 Black Light, что является важной характеристикой, влияющей на производительность контроля.

выводы

Показан новый подход оценки современных ультрафиолетовых источников излучения, используемых при проведении люминесцентного капиллярного контроля на этапе осмотра исследуемых поверхностей в УФ-свете на наличие дефектов с учетом установленных требований зарубежными и отечественными стандартами.

Установлено, что для сравнения различных УФ-облучателей их характеристик, указанных в технической документации (паспортах или руководствах по эксплуатации) для определения эффективности их использования с точки зрения выявляемости дефектов, для дефектоскопистов недостаточно.

Для оценки эффективности использования современных источников УФ-излучения в соответствии с требованиям по ультрафиолетовой облученности, установленными в нормативнотехнических документах, необходимо проведение дополнительных экспериментальных измерений, таких как:

энергетические и спектральные характеристики источников УФ-облучения (форма спектральной кривой от 320 до 410 нм, ширина спектра на полувысоте, доля видимого излучения в УФ-спектре, наличие дополнительных характерных пиков и др.);

граничные условия осмотра — диапазон рабочих расстояний (R) и рабочий диаметр пятна (D); зависимости энергетической освещенности ультрафиолетового излучения от расстояния E(r) в оптимальном диапазоне от 500 до 6000 мкВт/см²;

зависимости освещенности видимой света от ультрафиолетовой облученности *I*(*E*) в оптимальном диапазоне от 500 до 6000 мкВт/см².

Установлено, что светодиодные УФ-лампы со светофильтром и регулировкой интенсивности излучения обеспечивают наилучшие условия контроля и обнаружения дефектов.

Полученные результаты могут быть полезны не только для дефектоскопистов, но и для производителей УФ-источников, применяемых при капиллярном контроле, которые могут их учитывать в паспортных данных или руководствах по эксплуатации как характеристики, показывающие их конкурентное преимущество.

Данный подход позволит сформировать для дефектоскопистов недостающие характеристики по всем используемым источникам УФ-облучения, необходимые для оптимального выбора УФ-ламп и обеспечения максимальной чувствительности обнаружения дефектов при осмотре в УФ-свете с учетом требований нормативных документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33

2. Каблов Е.Н., Шевченко Ю.Н., Кожевников А.Н. Отраслевые стандарты — основа качества авиационной техники // Сталь. 2008. № 8. С. 121—122.

3. DOT/FAA/AR-01/95 Study of the Factors Affecting the Sensitivity of Liquid Penetrant Inspections: Review of Literature Published from 1970 to 1998. January 2002. 51 p.

4. Скоробогатько Д.С., Головков А.Н., Кудинов Й.И., Куличкова С.И. К вопросу подготовки поверхности в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (обзор)» //Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн. 2021. № 4. Ст. 11. URL: http://www.journal. viam.ru (дата обращения 24.12.2021) DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106

5. Кудинов Й.И., Головков А.Н, Куличкова С.И., Скоробогатько Д.С. Оценка эффективности применения различных способов интенсификации процесса капиллярного контроля с применением отечественного набора дефектоскопических материалов // Дефектоскопия. 2019. № 11 С. 59—66. DOI: 10.1134/S0130308219110071

6. Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Kulichkova S.I., Skorobogatko D.S. Research of Defectoscopic Properties of Powder Compositions for Increasing Efficiency and Reliability of Penetrant Testing of Complex Shaped Parts // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 3. P. 291–297. DOI: 10.1134/S1061830920030079

7. *Карякин А.В., Боровиков А.С.* Люминесцентная и цветная дефектоскопия М.: Машиностроение, 1972. 239 с.

8. *Gram B.* Mechanisms Contributing to Fluorescence and Visibility of Penetrants / Proceedings of the Fifth International Conference on Nondestructive Testing. May 1967. P. 225–233.

9. Глазков Ю.А. Оценка качества материалов для капиллярной дефектоскопии по видимости индикаторных рисунков дефектов // Дефектоскопия. 2012. № 4. С. 17—29

10. *Alburger J.R.* Dimensional Transition Effects in Visible Color and Fluorescent Dye Liquids / Proceedings, 23rd Annual Conference, Instrument Society of America. V. 23. Part I. P. 564.

11. *Alburger J.R.* Signal-to-Noise Ratio in the Inspection Penetrant Process // Materials Evaluation. 1974. September. P. 193—200.

12. *Alburger J.R.* Fluorescent Brightness Measurement // Materials Evaluation. 1966. November. No. 11. V. 24. P. 624—630.

13. Holmgren V., Sebring P., Robinson S. Measuring Fluorescent Brightness. Then and Now. ASNT Fall Conference and Quality Testing Show Paper Summaries, Pittsburgh, Pennsylvania, October, 1997. P. 120–122.

14. Sebring P. Fluorescent Spectrophotometers for Measuring Penetrant Brightness / presented at the ASNT Fall Conference and Quality Testing Show Paper Summaries, Pittsburgh, Pennsylvania, October, 1997.

15. Калиниченко А.Н., Соснин Э.А., Авдеев С.М., Калиниченко Н.П., Истомин К.А. Особенности применения эксиламп в люминесцентном методе капиллярного контроля // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 51—56.

16. Lee John, Piotrowski David, Loggins Brad, Talbott Scott. Delta TechOps Investigation of High Intensity UV Lights on FPI and MPI, 2014, September 24.

17. Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3. С. 65—79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79

18. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В. Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // Дефектоскопия. 2021. № 1. С. 64—71. DOI: 10.31857/S0130308221010073

19. MIL-HDBK-1823A «Nondestructive evaluation system reliability assessment» / Департамент обороны США, 2009 г.

20. *Rummel W.D.* Probability of Detection as a Quantitative Measure of Nondestructive Testing End-To-End Process Capabilities // Materials Evaluation. 1998. January. P. 35.

21. ГОСТ 18442—80 «Неразрушающий контроль. Капиллярные методы». Издательство стандартов. 1987. 24 с.

22. ISO 3059:2001 Non-destructive testing — Penetrant testing and magnetic particle testing — Viewing condition. 2011. 12 p.

23. Демин В.В., Половцев И.Г. Фотометрия и ее применения. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2017. 344 с.

24. What-is-ASTM-É3022-18-and-why-do-we-need-it https://www.google.com/url?sa=t&source=web&r ct=j&url=https://labino.com/wp-content/uploads/2020/05/What-is-ASTM-E3022-18-and-why-do-we-need-it. pdf&ved=2ahUKEwiIINug4fv0AhVeSPEDHa6bDnQQFnoECAkQAQ&usg=AOvVaw2rX9ZQRRdnbTdRC 7WWSU0n (дата обращения 10.12.2021).

25. Головков А.Н., Куличкова С.И., Кудинов И.И., Скоробогатько Д.С. Анализ существующих контрольных образцов для проверки чувствительности дефектоскопических материалов при проведении капиллярного неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. № 11. Ст. 95. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения 01.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103

26. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. C. 460—468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468

Поздравляем Клюева Владимира Владимировича с 85-летием!

2 января 2022 г. академику Владимиру Владимировичу Клюеву исполнилось 85 лет!

РОНКТД поздравляет крупнейшего в области неразрушающего контроля и технической диагностики ученого С Днем рождения!

В день 85-летия руководство и члены РОНКТД сердечно поздравляют Владимира Владимировича Клюева с Днем Рождения и желают ему и его близким здоровья, успехов и благополучия!

Владимир Владимирович Клюев родился 2 января 1937 года в Москве.

В 1960 году окончил машиностроительный факультет МВТУ им. Н.Э. Баумана по специальности инженер-механик. В 1960— 1964 гг. — младший научный сотрудник кафедры М-8 МВТУ. Далее с 1964 года практически весь свой трудовой путь прошел в Научно-исследовательском институте интроскопии, НИИИН (в 1975 году переименован в Московское НПО «Спектр», в 1988 году восстановлено прежнее название НИИИН): старший научный сотрудник, зав. лабораторией, зав. отделом, с 1970 года — директор НИИН, с 1976 года — генеральный директор НПО «Спектр». С 1988 года — директор НИИН,



с 2001 года — президент ассоциации «Спектр-групп», директор ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр».

В 1986—1988 гг. — первый секретарь Ленинского райкома партии Москвы.

Член-корреспондент АН СССР с 1987 года, академик РАН с 2006 года — Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления.

Академик В.В. Клюев — выдающийся учёный, имеющий мировую известность и признание, организатор науки и общественный деятель, лидер советской, а затем российской школы неразрушающего контроля и технической диагностики, специалист в области технологий испытаний и контроля качества объектов машиностроения.

В.В. Клюев — автор многих основополагающих исследований и созданных на их основе высоких технологий. Провел теоретические и экспериментальные исследования вторичных магнитных полей рассеяния, акустической томографии, вихретоковой виброметрии и тепловидения, что получило реализацию в создании виброизмерительной вихретоковой техники, радиационной вычислительной томографии, теории электромагнитного контроля движущихся изделий, магнитной модуляционной дефектоскопии.

Под руководством В.В. Клюева и при его непосредственном участии в НИИИН проведены исследования и получены масштабные результаты в разработке новых методов и прогрессивных технологий неразрушающего контроля металлов и неметаллов, сварных соединений, крупных технически сложных сооружений и конструкций — тем самым В.В. Клюев внес большой вклад в научно-технический прогресс, в решение проблем безопасности на сложных промышленных объектах, на транспорте и в других отраслях промышленности России.

Особая благодарность В.В. Клюеву у многочисленных коллег за создание РОНКТД — Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, которая под его руководством консолидировала многотысячную армию специалистов в интересах укрепления промышленного потенциала страны.

В 1963 году защитил кандидатскую диссертацию, в 1973 году защитил докторскую диссертацию — обе по вихретоковой виброметрии, с 1974 года — профессор.

В.В. Клюев — руководил разработкой установок внутритрубной диагностики газопроводов, первых отечественных рентгеновских микротомографов, кроулеров для контроля сварных соединений, исследованиями в области акустической томографии.

Под руководством В.В. Клюева были созданы первые отечественные базовые модели рентгеновских вычислительных томографов промышленного назначения, радиационные малодозовые интроскопы с усилителями рентгеновского изображения, вихретоковые системы оценки вибросостояния и виброзащиты технологического и энергетического оборудования, магнитные и магнитопорошковые дефектоскопы контроля горячекатаных труб и холоднокатаных листов, тепловизионные приборы контроля тепловых полей техногенных объектов, акустические дефектоскопы композиционных материалов и конструкций.

В.В. Клюевым была организована и проведена в короткие сроки работа по стандартизации методов и средств неразрушающего контроля, позволившая наладить в стране выпуск первых серийных приборов. Благодаря этому стал возможен стопроцентный контроль проката, труб, проволоки и другой массовой металлопродукции, а также изделий ответственного назначения.

В последние десятилетия в круг научных интересов В.В. Клюева вошла проблема оценки остаточного ресурса и риска эксплуатации сложных технологических объектов. Одним из первых он начал и развил исследования комплексных методов диагностики технических объектов, определения напряженно-деформированного состояния сложных конструкций для предотвращения аварий и катастроф.

В.В. Клюев создал мощный научно-производственный холдинг, который стал становым хребтом в отрасли — на протяжении четырех десятилетий он возглавлял ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр». В СССР тематика Института была на две трети директивной или секретной тематикой Госплана: диагностирование подводных лодок, военной техники и т.д. Начало постсоветской эпохи — это были самые трудные годы ломки всей научной базы: произошёл разрыв производственных связей между предприятиями и отраслями образовавшихся государств-членов СНГ. В сочетании с обвальной приватизацией промышленных предприятий это привело к развалу отрасли по производству аппаратуры неразрушающего контроля (НК) как единой структуры и, как следствие, к падению производства и потребления соответствующей продукции.

Однако В.В. Клюеву с коллегами удалось выдержать эти колоссальные финансовые и организационные трудности и сохранить основной костяк научных кадров, разработать и создать много новых приборов. Сумели развернуть широкую программу исследований и работ коллектива по всем методам неразрушающего контроля, сформировать научный профиль Института, обеспечить ему высокую репутацию, вывести на орбиту международных научных связей. На сегодня произошло почти полное возрождение данной отрасли в России.

В настоящее время МНПО «Спектр» является крупным научно-производственным объединением, продукция которого востребована и в России, и за рубежом. Это — крупнейшее в мире предприятие, занимающееся разработкой и изготовлением приборов и систем контроля качества промышленной продукции, основанных на неразрушающих методах. Здесь выпускаются более 100 типов приборов по таким направлениям, как акустический и звуковой контроль, рентгеновская диагностика и компьютерная томография, магнитный и электромагнитный контроль, средства медицинской рентгеновской и ультразвуковой диагностики и др. В МНПО «Спектр» расположена штаб-квартира Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, действует Международный учебно-научный центр. Созданы совместные предприятия с фирмами Англии, Германии, Франции, США. Маркетингом продукции объединения занимаются 20 региональных представителей в России, СНГ, стран Балтии.

В настоящее время Институт является головным предприятием в стране по направлениям — техногенная, антитеррористическая, экологическая и медицинская рентгеновская диагностика. Институт разработал более 770 типов диагностических приборов и установок для всех отраслей народного хозяйства, опубликовал более 620 монографий, 3300 научных статей, сотрудниками получено более 5100 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

НИИИН МНПО «Спектр» решает важнейшие прикладные задачи — такие, как контроль качества продукции, изделий, узлов, агрегатов, диагностика потенциально опасных объектов, экологический мониторинг. В рамках проекта «Здоровье» в лечебные учреждения страны поставлено и введено в эксплуатацию более 580 рентгеновских аппаратов. В сфере обеспечения личной безопасности специалистами института созданы портативный двухканальный поисководосмотровый прибор «Спрут», прибор для обнаружения скрытых телевизионных систем наблюдения «Гранат», рентгеновский сканер скрытых полостей «Ватсон» и др.

Создан двухканальный диагностический модуль, который предназначен для оснащения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолетного и вертолетного типов в целях дистанционного обзора земной и водной поверхности в заданном районе с помощью видео-, тепловизионной, навигационной и служебной информации. Он обеспечивает возможность наблюдения и охраны различных участков местности, акватории или участков железной дороги протяженностью от 20 до 100 км посредством их облета на высоте от 80 м до 2 км. Создается аппаратура, обеспечивающая дистанционное выявление людей с повышенной температурой тела в местах массового скопления для дистанционной регистрации признаков изменения психофизиологического состояния человека по тепловизионному и видеоизображению лица. И — многое, многое другое.

НИИИН МНПО «Спектр» сотрудничает с предприятиями и учеными более чем тридцати стран США, Европы, Азии, Австралии, Африки, принимает участие в работе всех международных организаций по неразрушающему контролю EFNDT, ICNDT, Международной академии по НК и др. Как член оргкомитетов самых престижных национальных и международных конференций, В.В. Клюев достойно представляет Россию на международном уровне.

По инициативе В.В. Клюева более чем в 5 вузах страны были открыты кафедры по подготовке инженеров по НК, организована и отлажена трехуровневая система сертификации специалистов НК в учебных центрах, обеспеченных соответствующими приборами, учебнометодической литературой, справочниками и монографиями по НК и технической диагностике. В.В. Клюев создал научную школу по неразрушающему контролю и технической диагностике — его ученики и последователи работают в различных научных и технических областях, многие добились выдающихся результатов в науке и бизнесе в России и во многих странах.

Из интервью В.В. Клюева: «Неразрушающий контроль особенно важен при создании и эксплуатации жизненно важных изделий, компонентов и конструкций, выявлении различных изъянов, таких как изменение напряженного состояния, образование ржавчины, растрескивание объекта в процессе эксплуатации и др. Техническая диагностика — это область знаний теории, методов и средств определения технического состояния объектов, в том числе остаточного ресурса и риска эксплуатации. Она должна быть главной частью технического обслуживания. Основные задачи технического диагностирования — обеспечение безопасности, функциональной надежности и эффективности работы технического объекта, а также сокращение затрат на его техническое обслуживание и уменьшение потерь от простоев по причине отказов и преждевременных выводов в ремонт.

Что недооценивается сегодня и на что нужно уделить особое внимание, в первую очередь Правительству России. К сожалению, в нашей стране уровень практического применения НК и ТД нельзя оценить положительно из-за нерешенных финансовых, организационных, интеллектуальных и других проблем предприятий промышленности и науки. На мой взгляд, мы живем по принципу Wait, т.е. надеемся, что ничего плохого не произойдет, тогда как практически ежедневно возникают аварийные ситуации по причине отсутствия элементарной диагностики и прогностики. Никогда ранее у нас не было такого малого количества заказов на поставку средств НК и ТД от предприятий ОПК, как сейчас, поскольку они в настоящее время также испытывают финансовые и кадровые трудности.

Больной вопрос национальной безопасности, как известно, начинается с диагностики — тут и предотвращение национальных катастроф, пожаров, оценка ресурсов жизненно важных объектов, и не только атомных станций, выявление террористов и бандитов на значительных расстояниях.

Реформа Академии наук РФ через 290 лет ее высокорезультативной работы, передача управления государственными научными учреждениями, академическими архивами, библиотеками, музеями, издательствами, межведомственным суперкомпьютерным центром грубейшая ошибка, поставившая отечественную науку в тяжелейшее положение, результатом которого является деградация и разрушение». Он — автор более 360 научных работ, в том числе 18 монографий, выступает инициатором издания и переиздания справочников, монографий, методических материалов по методам НК и ТД. Под редакцией В.В. Клюева вышли из печати 8 томов справочника «Неразрушающий контроль», серия из 20 книг «Диагностика безопасности» по основным видам НК, а также 4 тома справочника «Неразрушающий контроль и диагностика» на английском языке. Имеет 120 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Главный редактор журналов «Ќонтроль. Диагностика» и «Территория NDT», член редколлегии журналов «Дефектоскопия», «Заводская лаборатория», «Приборы», «Диагностика материалов», председатель редакционного совета журнала «Ремонт. Восстановление. Модернизация».

Председатель Научного совета РАН по автоматизированным системам диагностики и испытаний, входящего в состав Объединенного научного совета РАН по комплексной проблеме «Машиностроение», участвует в работе Координационного совета по техническим наукам и Бюро ОЭММПУ РАН, Рабочей группы при президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности.

Член Совета директоров Европейской федерации неразрушающего контроля, член Европейской академии, председатель Международного комитета по стандартизации, по неразрушающему контролю и технической диагностике, вице-президент Международной Академии неразрушающего контроля.

Награжден орденом Дружбы народов, дважды — орденом Трудового Красного Знамени, медалью «Ветеран труда».

Лауреат премии Совета Министров СССР, лауреат Государственной премии РФ, лауреат премии Правительства РФ.

Информация взята с сайта https://ronktd.ru



Уважаемые коллеги!

ПРИГЛАШАЕМ ВАС ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ И ВЫСТУПИТЬ С ДОКЛАДОМ на ХХІV Петербургской научно-технической конференции

«Инновационные средства и технологии УЗ контроля и диагностики» УЗДМ-2022

(24 – 27 мая 2022 г., Санкт-Петербург)

ОРГАНИЗАТОРЫ УЗДМ-2022

- Научно-исследовательский институт мостов и дефектоскопии
- Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- Секции «Физические неразрушающие методы контроля» научного совета по физике конденсированных сред Российской академии наук
- Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике
- Национального Агентства Контроля Сварки
- Объединения производителей железнодорожной техники

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ ВЗНОС (без учета НДС):

для участников – 29 000 руб. для аспирантов – 12 000 руб. для сопровождающих (без участия в работе конференции) – 6000 руб.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ЯЗЫК КОНФЕРЕНЦИИ русский

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ ОРГКОМИТЕТА

E-mail: uzdm2022@yandex.ru

телефон: +7 921 9384313

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

 Новые принципы и технические решения электроакустических преобразователей, характеристики поля, примеры применения

2. Высокоинформативные автоматизированные средства ультразвукового контроля. Структура, алгоритмы обработки сигналов, новые технологические возможности

3. Технологии и опыт применения инновационных средств ультразвукового контроля металлов, перспективных материалов и соединений

4. Ультразвуковой контроль в задачах диагностики

5. Стандартизация и метрологическое обеспечение ультразвукового контроля

Терминология ультразвукового контроля (круглый стол)

6. Обучение, подтверждение квалификации, аттестация и сертификация персонала

ФОРМЫ РАБОТЫ:

- пленарные и секционные доклады;
- СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ;
- круглые столы;
- демонстрация оборудования

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

прием заявок до 15.02.2022 г.
 прием тезисов докладов до 01.04.2022 г.
 рассылка пригласительных билетов и программ до 05.05.2022 г.

Для оперативного и надежного информирования о ходе подготовки **УЗДМ-2022** просим Вас, подтвердить Ваш интерес, произведя электронную регистрацию на страничке **УЗДМ-2022** на сайте: <u>www.ndt.sp.ru</u>

С уважением и надеждой на Ваше участие в УЗДМ-2022

Оргкомитет УЗДМ-2022

ХХХІІІ Уральская конференция с международным участием «ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)»

19-20 апреля 2022 г.



Партнеры



Информационная поддержка: журналы «Дефектоскопия/Russian Journal of Nondestructive Testing», «Сварка и диагностика», «Территория NDT».



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас принять участие в XXXIII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», которая будет проходить 19-20 апреля 2022 г. на базе Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18). Формат проведения – очный и дистанционный (online). В один из дней конференции будет проходить молодежная секция, участниками которой смогут стать студенты профильных кафедр, аспиранты, молодые специалисты и ученые (возрастом до 35 лет включительно).

РАЗДЕЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

- 1. Физические основы неразрушающего контроля и диагностики.
- 2. Методы и средства измерения физических полей. Новые средства и системы контроля.
- 3. Контроль труб и диагностика трубопроводов.
- 4. Контроль сварных соединений.
- 5. Методы и средства контроля напряженно-деформированного состояния изделий и объектов.
- 6. Опыт практического применения физических методов и средств контроля.
- 7. Стандартизация и метрологическое обеспечение средств НК.
- 8. Квалификация и подготовка персонала в области НК.

Участие в конференции – бесплатное. Язык конференции: русский, английский.

Порядок проведения конференции будет сообщен дополнительно.
Министерство науки и высшего образования РФ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина Институт машиноведения УрО РАН Институт физики металлов УрО РАН XXVI Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов»



Посвящена 150-летию со дня рождения С.С. Штейнберга

07—11 февраля 2022 года Екатеринбург, Россия

Второе информационное сообщение

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Сергей Самойлович Штейнберг являлся организатором и вдохновителем Уральской школы металловедов-термистов. С 1925 года он заведовал кафедрой металловедения и термической обработки Уральского политехнического института в Свердловске. Одновременно в 1926—1930 годах он руководил основанным им Уральским отделением Института металлов, а с 1932 года работал в Уральском филиале АН СССР, где с 1939 года возглавлял Институт металлургии, металловедения и физики металлов. В 1930 году он возглавил работы по производству высококачественной электротехнической стали на Верх-Исетском металлургическом заводе.

Уральская школа металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» проводится в Уральском регионе один раз в два года в феврале месяце. Основными организаторами школы являются Уральский федеральный университет (кафедра термообработки и физики металлов), Институт физики металлов УрО РАН (лаборатория физического металловедения) и Институт машиноведения УрО РАН.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ УРАЛЬСКОЙ ШКОЛЫ МЕТАЛЛОВЕДОВ-ТЕРМИСТОВ:

- Фазовые и структурные превращения в сталях и сплавах.
- Термическая обработка сталей и сплавов.
- Термомеханическая и поверхностная обработка металлических материалов.

• Эволюция структуры металлов и сплавов при пластической деформации и внешних воздействиях.

- Современные методы исследования структуры и свойств металлических материалов.
- Перспективные материалы и технологии обработки.
- Физические методы диагностики и материаловедения.
- Вычислительное материаловедение.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДОКЛАДОВ

Правила оформления докладов доступны по ссылке http://tofm-urfu.ru/ural school/.

ВАЖНЫЕ ДАТЫ

20 декабря 2021 года — срок окончания регистрации и принятия материалов доклада.

07 февраля 2022 года — заезд и начало работы школы

07 — 11 февраля 2022 года – работа школы

ОРГВЗНОС И УСЛОВИЯ ПРОЖИВАНИЯ

Организационный взнос, за одного участника Школы составляет 4000 руб. для очных участников, 2000 руб. (для очных участников не старше 35 лет) и 1000 руб. для заочных.

Организационный взнос включает:

организованную доставку на базу отдыха, расходы, связанные с опубликованием материалов докладов, предоставлением «папки участника» и кофе брейков.

Участники будут работать и проживать в комфортных условиях на одной из загородных баз отдыха Свердловской области.

ВНИМАНИЕ!

Стоимость проживания составляет от 2500 руб/сутки за одного участника (при двухместном размещении).

Договора, реквизиты для оплаты оргвзноса будут рассылаться индивидуально каждому участнику после приема тезисов.

РЕГИСТРАЦИЯ УЧАСТНИКОВ

Регистрация на XXVI Уральскую школу металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» осуществляется только на сайте http://tofm-urfu.ru/ ural school/.

Контакты:

Почта конференции conf@tofm-urfu.ru

Телефон: (343) 375-46-95 (УрФУ).

Более подробную информацию о школе можно найти на сайте http://tofm-urfu.ru/ в разделе конференции.