

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ, НАХОДИВШИХСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ, УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2021 г. В.Н. Данилов^{1,*}, В.М. Ушаков^{1,**}, А.И. Рымкевич¹

¹АО «НПО «НИИТМАШ», Россия 115088 Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4
E-mail: *vadnicdan@yandex.ru; **ushvalmich@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.2021; после доработки 02.06.2021
Принята к публикации 15.06.2021

Представлены результаты первого этапа ультразвуковых исследований структуры металла трубопроводов тепловых электростанций, находившихся в эксплуатации. Испытаниям подвергался металл марок стали: 15X1M1Ф и Ст20 с различной наработкой (временем эксплуатации). Образцы металла подвергались металлографическому анализу, на основании данных которого (среднего размера зерна — \bar{D} , дисперсии распределения $\ln D$ — σ_D) проведен теоретический расчет параметров УЗ импульсов донного сигнала в металле. Получены количественные данные по влиянию толщины слоя контактной жидкости (зазора) между преобразователем и объектом контроля на рабочих частотах 5,0, 7,5 и 10 МГц для различных значений среднего размера зерна металла. Приведены примеры расчетных и экспериментальных импульсов и спектров сигналов для частоты 5 МГц.

Ключевые слова: трубопровод, ультразвук, структура металла, продольная волна, неразрушающий контроль, донный сигнал, импульс, спектр.

DOI: 10.31857/S0130308221080017

1. ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации тепломеханического оборудования атомных электростанций (АЭС) и тепловых (ТЭС) происходит деградация металла, которая сопровождается структурными изменениями, ухудшением механических свойств, накапливаются микрповреждения. Из микротрещин образуются недопустимые макротрещины. Традиционный неразрушающий контроль обеспечивает выявление сформировавшихся при эксплуатации дефектов: трещин различного происхождения, свищей и утонения за счет коррозии объектов контроля. Современные требования безопасности АЭС согласно нормам МАГАТЭ [1, 2] рекомендуется прогнозирование состояния металла, включая оценку структурных изменений, микрповреждений, ухудшения мехсвойств. Такой подход включает оценку несплошностей, а также определение прочностных характеристик металла и оценку изменений его структуры на основании, в том числе, результатов неразрушающего контроля [3—7, 17]. В настоящей статье рассмотрена теоретическая предпосылка возможностей использования ультразвукового метода для оценки состояния структуры металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации.

Исследованию подвергались образцы металла из стали 20, вырезанных из питательного трубопровода (рабочее давление 180 кГ/см² и температура 215°С) и стали 15X1M1Ф паропровода (рабочее давление 38 кГ/см² и температура 545°С). Время эксплуатации трубопроводов (наработка) составляла: для стали 20 — 155 000 и 190 000 ч, а для стали 15X1M1Ф — 208030 и 269386 ч соответственно. В испытаниях использовались также два образца из металла без наработки: один из стали 20 и один из стали 15X1M1Ф.

2. ЦЕЛЬ

Общая цель работы: оценка с помощью ультразвукового метода состояния структуры образцов металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации, на основе теоретико-экспериментальных исследований. Рассмотрен первый этап: теоретическое исследование возможностей ультразвукового метода структуроскопии.

В данной статье рассмотрены следующие задачи.

Выполнить металлографию образцов, оценить микроструктуру металла образцов, оценить средний размер зерна \bar{D} .

Провести теоретический расчет по определению влияния микроструктуры и качества шероховатости контактной поверхности на изменение параметров сигнала на частотах: 5,0; 7,5 и 10,0 МГц.

Оценить влияние толщины слоя контактной жидкости на характеристики эхосигнала на указанных частотах.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Металлографический анализ

Работу проводили следующим образом. Из трубопроводов вырезали заготовки, из которых выполнялись образцы в виде кубиков с шероховатостью контактной поверхности образцов — не хуже R_z 5 мкм, остальных поверхностей кубика — R_z 20. Исследования проводились в два этапа. На первом была выполнена металлография образцов с оценкой размера зерна по ГОСТ 5639—82 и микроструктуры по ГОСТ 5640—68 с использованием микроскопа Axiovert 40 MAT (Carl Zeiss, Германия). В табл. 1 представлены результаты металлографического анализа.

Таблица 1

Результаты металлографического анализа испытуемых образцов

Номер образца	Марка и наработка, тыс. ч	Микроструктура	Номер зерна	Оценочный размер зерна, мкм
1А	Ст20; 0 ч	Микрозернистый бейнит с карбидами по границе зерен	9, 10	12—8
1Б	Ст15Х1М1Ф 0 ч	Бейнит отпуска + феррит + карбиды	8, 7	17—20
2 и 3	15Х1М1Ф, 208033 и 269386	Бейнит отпуска + феррит + карбиды со сфероидизацией цементита на границах зерен	5, 6	50—40
4 и 5	Ст20 15500 и 190000	Феррит и пластинчатый перлит	7, 6	25—40

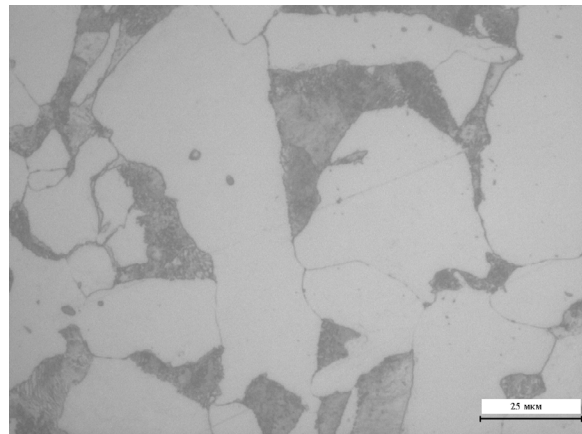
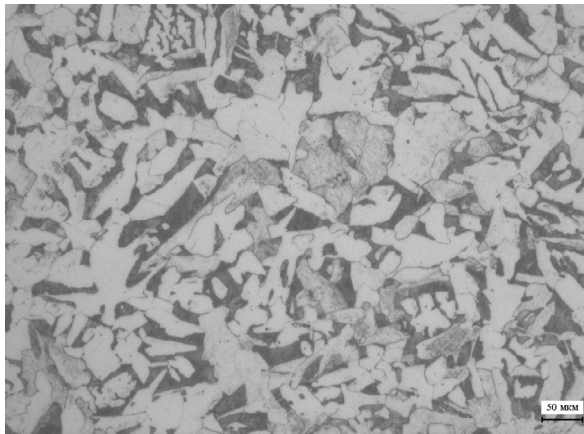


Рис. 1. Микроструктура образца № 5, Ст20 с наработкой 190 тыс. ч. Масштаб 50 мкм (слева), 25 мкм (справа). Увеличение 100×(слева) и 500× (справа).

В качестве примера на рис. 1 показана микроструктура образца № 5 с наработкой 190 тыс. ч.

3.2. Теоретический расчет параметров ультразвуковых эхосигналов

Дальнейшие исследования были ориентированы на проведение теоретического расчета формы и спектра УЗ эхоимпульсов продольных волн в среде с использованием коэффициента затухания, полученного в работе [10].

Следует отметить, что решение задачи структуроскопии ультразвуковым методом рассматривалось многими авторами (см., например, [8—12, 14, 17]). Исследования в данном направлении продолжаются, однако в силу сложности — проблема до конца не решена.

Металлографические исследования образцов металлов с разным временем наработки показали изменение размера зерен (кристаллитов): \bar{D} — среднего размера и среднеквадратичного отклонения σ_D нормального распределения величин $\ln D$ [8—10].

Согласно работам [11, 12], размер зерна оказывает очень большое влияние на коэффициент рассеяния ультразвуковых волн, поэтому структуру металлов целесообразно оценивать по затуханию упругих волн [11], причем одним из перспективных способов этого является исследование спектрального состава донного сигнала или сравнение амплитуд донного сигнала на различных частотах. Качество акустического контакта приводит к разбросу оценки коэффициента затухания, поэтому в теоретических расчетах приведена оценка влияния контакта на параметры эхосигнала.

Коэффициент затухания продольной волны δ_l определяется свойствами металла и складывается из коэффициентов поглощения δ_n и рассеяния δ_p [11, 12]:

$$\delta_l = \delta_n + \delta_p, \quad (1)$$

причем коэффициент затухания δ_n пропорционален частоте колебаний f_p , распространяющейся в среде ультразвуковой волны [11]:

$$\delta_n = A_n f_p. \quad (2)$$

Для малоуглеродистой стали в формуле (2) величина $A_n = 0,12 \times 10^{-3}$ Нп/(МГц мм) (значение коэффициента δ_n определяется в Нп/мм) [11].

Выражение коэффициента затухания продольных волн в поликристаллическом металле, учитывающее статистическое распределение зерен (кристаллитов) по размерам, имеет следующий вид [10]:

$$\delta_p = \frac{21}{40\pi^2} F_a \left(1 + \frac{3}{2} \frac{c_l^5}{c_t^5}\right) k_l \left\{ (k_l \bar{D})^3 \exp(3\sigma_D^2) \times \right. \\ \left. \times \Phi \left[\frac{\ln(D_R/\bar{D}) - 2,5\sigma_D^2}{\sigma_D} \right] + k_l \bar{D} \left(1 - \Phi \left[\frac{\ln(D_R/\bar{D}) - 0,5\sigma_D^2}{\sigma_D} \right] \right) \right\}, \quad (3)$$

где c_p, c_t — скорости продольной и поперечной волн в стали, определяемые по усредненным значениям постоянных Ламэ поликристалла [13, 14], $D_R = \frac{\lambda_l}{2\pi} = \frac{1}{k_l}$ (λ_l — длина продольной волны с волновым

числом k_l); F_a — коэффициент упругой анизотропии металла [10, 14]; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-0,5t^2) dt$ — нормальная функция распределения или $\Phi(x) = 0,5[1 + \operatorname{erf}(x/\sqrt{2})]$ ($\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок).

Первое слагаемое в фигурных скобках в (3) относится к коэффициенту затухания вследствие рэлеевского рассеяния, а второе — фазового [10, 13]; когда разброс размера зерен не учитывается

($\sigma_D \rightarrow 0$), $|x| \rightarrow \infty$ в (3) $\Phi(x) \rightarrow \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$. Согласно работе [14], для стали с относительным объ-

емным содержанием перлита P_n коэффициент анизотропии F_a может быть определен по формуле $F_a = P_n F_{a_n} + (1 - P_n) F_{a_\phi}$, где $F_{a_\phi} = 6,64 \times 10^{-3}$, $F_{a_n} = 1,66 \times 10^{-3}$ со средним значением при $P_n = 0,5 - F_a \cong 0,004$.

Формула (3) использовалась в работе [14] при количественной оценке структуры металла осей колесных пар.

Ниже приведены результаты расчетов донных сигналов моделей прямых преобразователей с номинальными частотами f_0 , равными 5, 7,5, 10 МГц для стали с различными параметрами \bar{D} и σ_D структуры, которые проводились с использованием компьютерной программы, являющейся модификацией программы, описанной в работе [15]; величина F_a имела значение 0,004 [14].

В моделях прямых преобразователей предполагалось, что пьезопластина диаметром 6 мм выполнена из пьезокерамики ЦТС-19, протектор — из минералокерамики с акустическим импедансом 25×10^6 кг/(м²с) [16] имеет толщину, равную 0,5 толщины пьезопластины, которая выбиралась размерами 0,36, 0,27 и 0,18 мм соответственно для частот 5, 7,5 и 10 МГц. В расчетах использовалось значение акустического импеданса демпфера, равное 11×10^6 кг/(м²с), соответствующее применявшемуся при расчетах в работе [16]; влияние электрической схемы включения преобразователя на форму импульса не учитывалось.

В ходе моделирования влияния затухания упругих продольных волн на характеристики донных сигналов комплексный частотный спектр импульса выбранной модели умножался на частотно зависимый множитель $\exp(-\delta_l 2h)$, характеризующий затухание различных составляющих спектра

сигнала, определяемого коэффициентом затухания $\delta_l(1)$ в зависимости от пройденного продольной волной расстояния h до отражающей поверхности. При этом, как показано в работе [15], на спектр и импульс сигнала заметное влияние оказывает толщина слоя контактной жидкости z_c между проектором преобразователя и контролируемой средой.

Расчеты проводились для стали со скоростью $c_l = 5,9$ мм/мкс продольной и $c_t = 3,23$ мм/мкс поперечной волн, расстояние h полагалось равным 30 мм. На рис. 2 приведены нормированные на максимальное значение частотные спектры $S^N(f)$ донного сигнала модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 5$ МГц, параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для нескольких значений толщины z_c (рис. 2а) и значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин размера \bar{D} (рис. 2б). Минимальная частота расчета составляла 0,1 МГц.

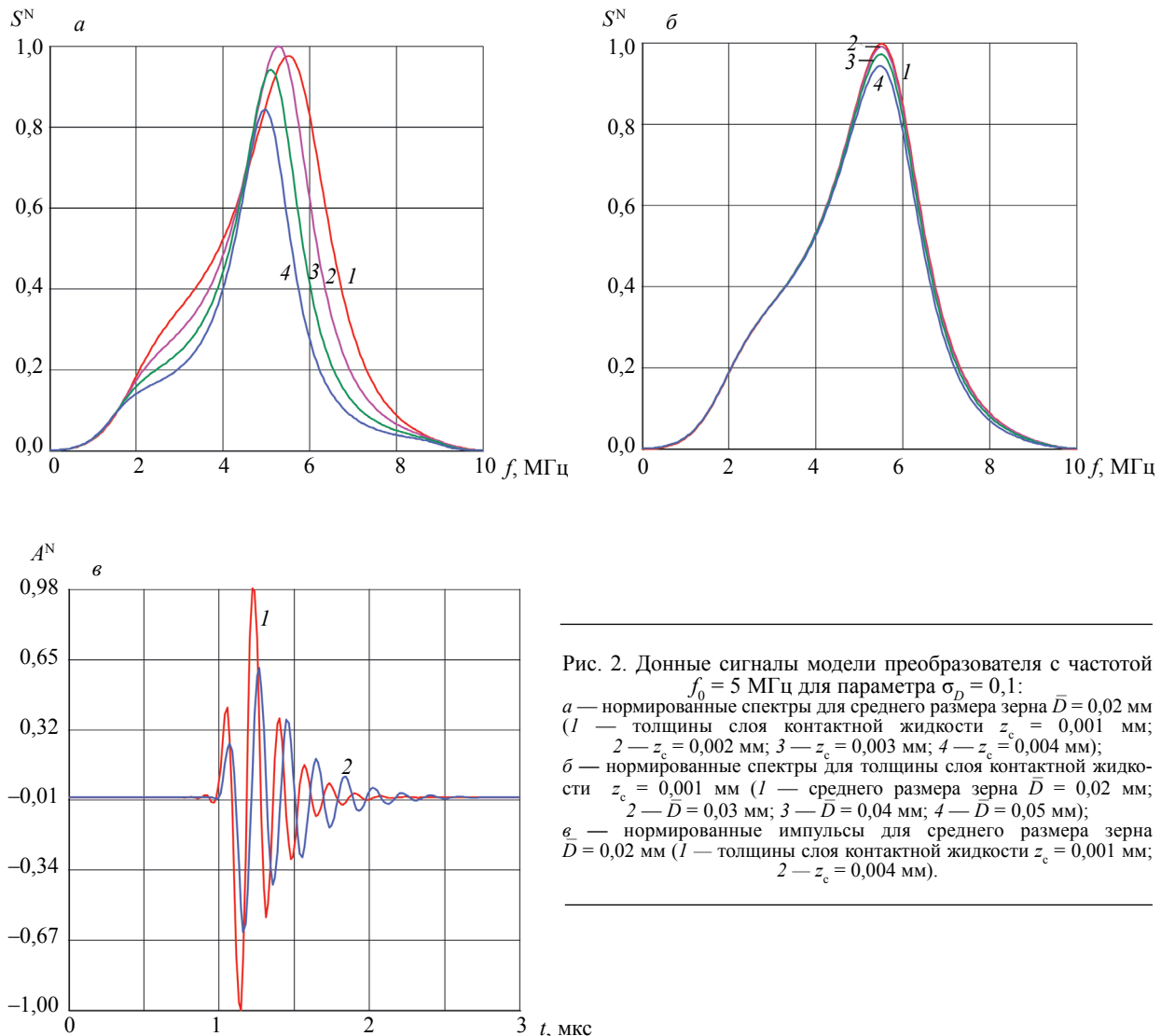


Рис. 2. Донные сигналы модели преобразователя с частотой $f_0 = 5$ МГц для параметра $\sigma_D = 0,1$:
 а — нормированные спектры для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,002$ мм; 3 — $z_c = 0,003$ мм; 4 — $z_c = 0,004$ мм);
 б — нормированные спектры для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм; 2 — $\bar{D} = 0,03$ мм; 3 — $\bar{D} = 0,04$ мм; 4 — $\bar{D} = 0,05$ мм);
 в — нормированные импульсы для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,004$ мм).

Из рис. 2а видно, что увеличение толщины z_c приводит к ограничению спектров сигналов со стороны высоких частот, при этом возрастание z_c от 0,001 до 0,004 мм приводит к уменьшению частоты максимума спектра примерно на 0,5 МГц и уменьшению его ширины. Для частоты модели преобразователя $f_0 = 5$ МГц и расстояния $h = 30$ мм влияние изменения размера зерна \bar{D} от 0,02 до 0,05 мм (см. табл. 1) достаточно мало и приводит к небольшому относительному уменьшению значения максимума спектра при незначительном понижении частоты максимума (рис. 2б). При этом изменение параметра σ_D от 0,1 до 0,7 на спектральные характеристики практически не сказывается.

Нормированные на общий максимум импульсы донного сигнала $A^N(t)$ модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 5$ МГц, размера зерна \bar{D} от 0,02 мм ($\sigma_D = 0,1$) и значений толщины слоя контактной жидкости z_c от 0,001 и 0,004 мм приведены на рис. 2в. Из этого рисунка видно, что увеличение z_c приводит к уменьшению амплитуды и возрастанию длительности импульса.

На рис. 3а приведен вид нормированного теоретического импульса ($f_0 = 5$ МГц) донного сигнала для параметров $\bar{D} = 0,02$ мм, $z_c = 0,003$ мм, на рис. 3б — экспериментального импульса для реального преобразователя П111-5,0-К6-002, отраженного от боковой поверхности стандартного образца СО-2 ($h = 30$ мм), полученного на компьютерной установке «Авгур» [11], а на рис. 3в — экспериментального спектра этого импульса (соответствующий теоретический спектр приведен на рис. 2а — см. зависимость 3). Ширина теоретического спектра на уровне 0,5 (–6 дБ) от максимума составляет примерно 1,7 МГц, а экспериментального — около 1,5 МГц; частота максимума экспериментального спектра ($\approx 4,9$ МГц) несколько ниже частоты максимума теоретического (5,1 МГц).

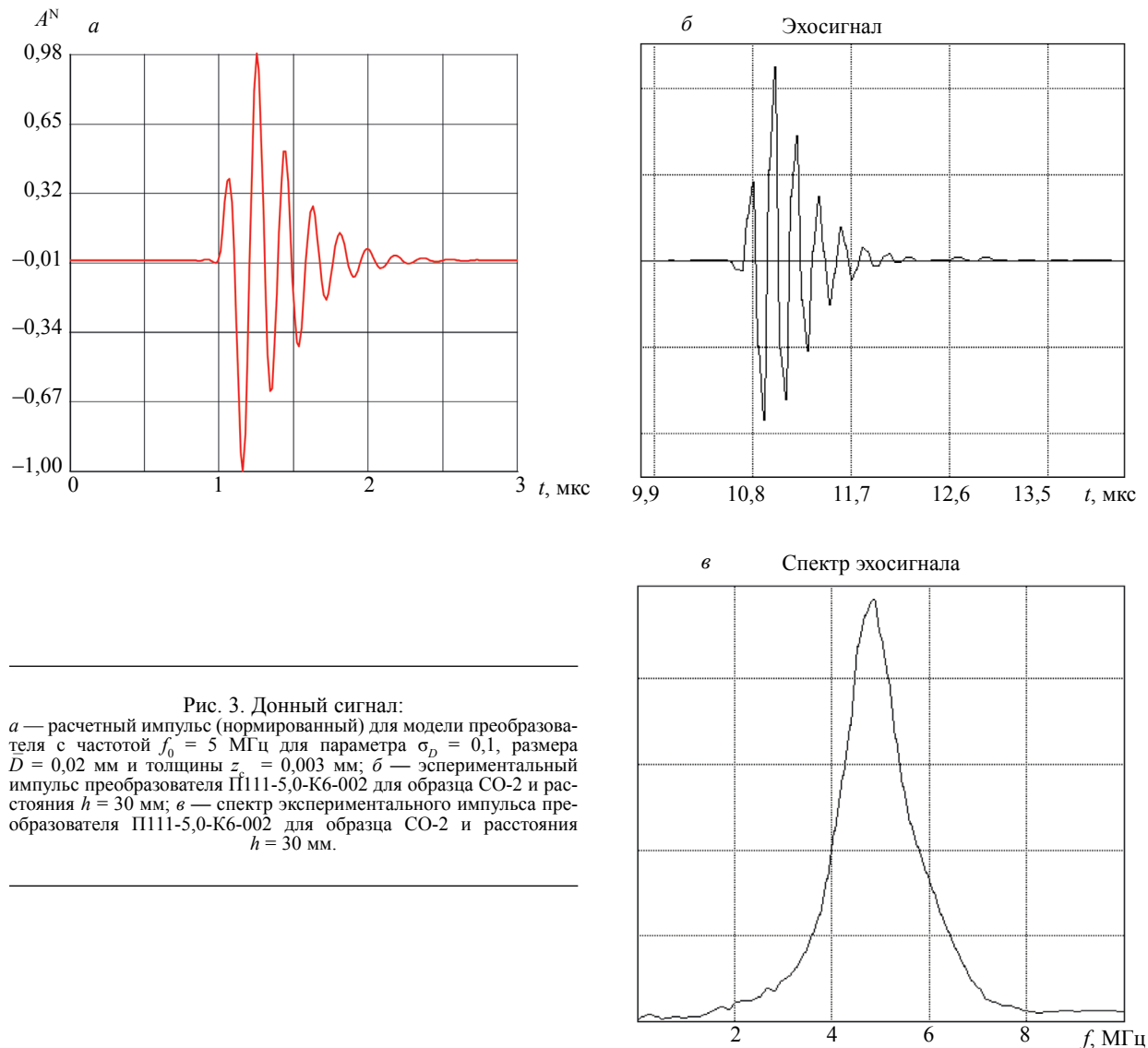


Рис. 3. Донный сигнал:

а — расчетный импульс (нормированный) для модели преобразователя с частотой $f_0 = 5$ МГц для параметра $\sigma_D = 0,1$, размера $\bar{D} = 0,02$ мм и толщины $z_c = 0,003$ мм; б — экспериментальный импульс преобразователя П111-5,0-К6-002 для образца СО-2 и расстояния $h = 30$ мм; в — спектр экспериментального импульса преобразователя П111-5,0-К6-002 для образца СО-2 и расстояния $h = 30$ мм.

Для значения толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,003$ мм формы теоретических и экспериментальных импульсов и спектров наиболее похожие, а их имеющиеся различия могут быть объяснены как ограничениями принятой расчетной модели, в том числе приближенным заданием параметров, определяющих затухание продольных волн в среде, так и возможными отличиями характеристик реального преобразователя и использованных в расчетах.

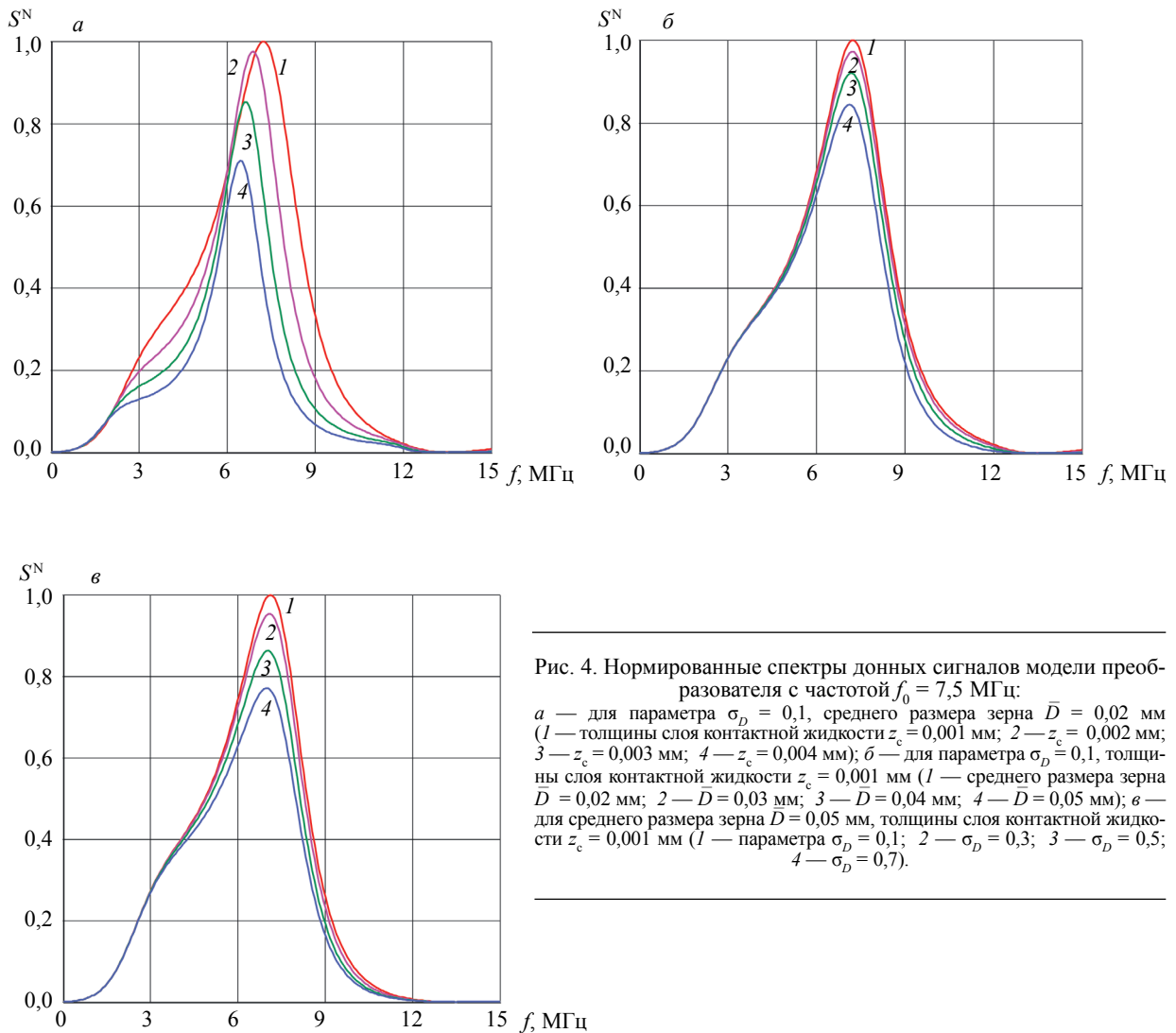


Рис. 4. Нормированные спектры донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц:

a — для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,002$ мм; 3 — $z_c = 0,003$ мм; 4 — $z_c = 0,004$ мм); *б* — для параметра $\sigma_D = 0,1$, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм; 2 — $\bar{D} = 0,03$ мм; 3 — $\bar{D} = 0,04$ мм; 4 — $\bar{D} = 0,05$ мм); *в* — для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,05$ мм, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — параметра $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\sigma_D = 0,3$; 3 — $\sigma_D = 0,5$; 4 — $\sigma_D = 0,7$).

На рис. 4 приведены нормированные на максимальное значение частотные спектры $S^N(f)$ донного сигнала модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 7,5$ МГц, параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для нескольких значений толщины z_c (рис. 4а); значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин размера \bar{D} (рис. 4б); размера $\bar{D} = 0,05$ мм, значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин параметра σ_D (рис. 4в).

Сравнение рис. 4а и б соответственно с рис. 2а и б показывает заметное возрастание влияния изменения параметров z_c и \bar{D} на форму спектра и его значение в максимуме. Изменение величины z_c от 0,001 до 0,004 мм приводит к уменьшению частоты максимума спектра примерно на 0,8 МГц (рис. 4а). Для частоты $f_0 = 7,5$ МГц на значении максимума спектра заметно сказывается и разброс размера зерен, характеризуемый параметром σ_D (см. рис. 4в).

Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (параметр $\sigma_D = 0,1$) и 0,05 мм (параметр $\sigma_D = 0,1, 0,7$) приведены на рис. 5. Форма импульсов 1 — 3 почти не меняется, однако различие их амплитуд весьма заметно. Так, максимум положительной огибающей импульса 3 ($\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$) на треть меньше, чем для импульса 1 ($\bar{D} = 0,02$ мм, $\sigma_D = 0,1$).

На рис. 6 приведены нормированные на максимальное значение частотные спектры $S^N(f)$ донного сигнала модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 10$ МГц, параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для нескольких значений толщины z_c (рис. 6а); параметра $\sigma_D = 0,1$, величины $z_c = 0,001$ мм для нескольких значений размера \bar{D} (рис. 6б); размера $\bar{D} = 0,05$ мм, значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин параметра σ_D (рис. 6в).

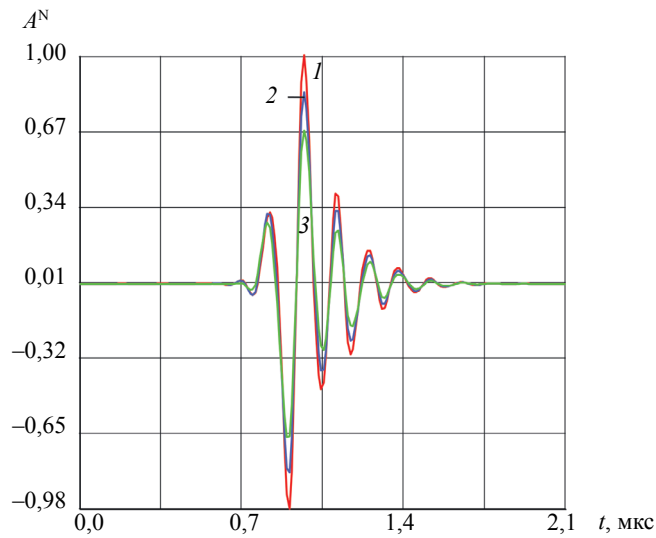


Рис. 5. Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм:

1 — средний размер зерна $\bar{D} = 0,02$ мм, параметр $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,1$; 3 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$.

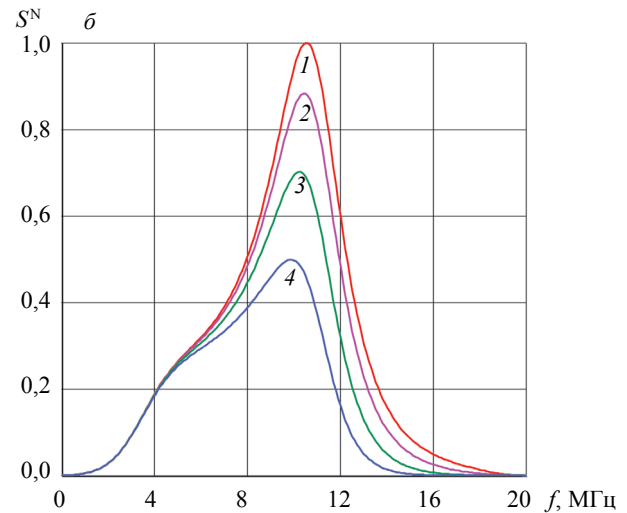
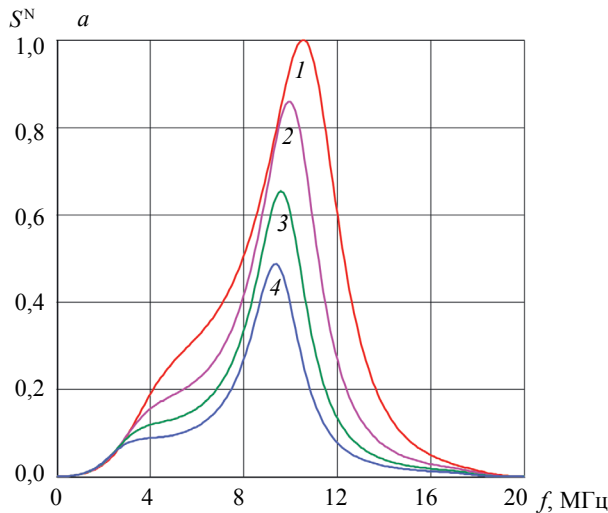
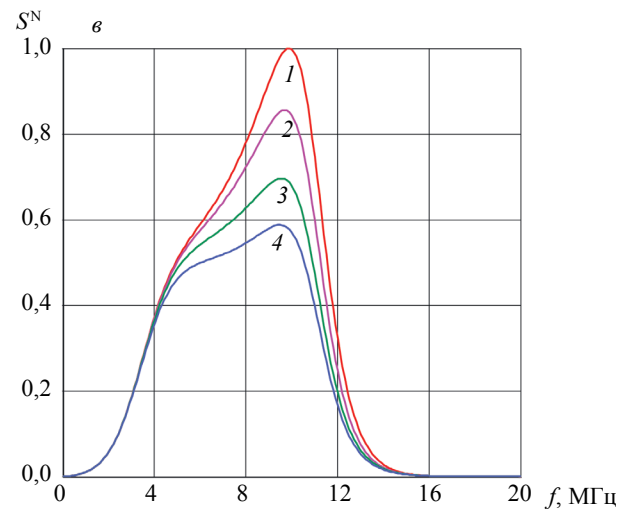


Рис. 6. Нормированные спектры донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц:

a — для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,002$ мм; 3 — $z_c = 0,003$ мм; 4 — $z_c = 0,004$ мм); *б* — для параметра $\sigma_D = 0,1$, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм; 2 — $\bar{D} = 0,03$ мм; 3 — $\bar{D} = 0,04$ мм; 4 — $\bar{D} = 0,05$ мм); *в* — для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,05$ мм, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — параметра $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\sigma_D = 0,3$; 3 — $\sigma_D = 0,5$; 4 — $\sigma_D = 0,7$).



Из сравнения рис. 4а и 6а видно существенное увеличения влияния изменения толщины контактной жидкости z_c как на форму спектра, так на положение частотного максимума и его величину. Увеличение значения z_c от 0,001 мм до 0,004 мм приводит к уменьшению частоты максимума спектра на 1,2 МГц примерно (рис. 6а, $f_0 = 10$ МГц), что на 0,4 МГц больше, чем для частоты $f_0 = 7,5$ МГц (см. рис. 4а); относительная величина максимума S^N для $f_0 = 10$ МГц для $z_c = 0,004$ мм составляет 0,5 примерно (см. зависимость 4 на рис. 6а), а для $f_0 = 7,5$ МГц — $\approx 0,7$ (см. зависимость 4 на рис. 4а).

Влияние изменения размера зерна \bar{D} на спектр S^N для модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц (см. рис. 6б) гораздо более выражено, чем для модели $f_0 = 7,5$ МГц. При увеличении значения \bar{D} от 0,02 до 0,05 мм уменьшение частоты максимума спектра составляет, примерно 0,15 МГц для модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц и 0,6 МГц для модели с $f_0 = 10$ МГц, а соответствующее относительное значение смещения максимума спектра составляет $\approx 0,85$ и 0,5. Влияние разброса размеров зерен (параметра σ_D) на форму и максимум спектра для модели с $f_0 = 10$ МГц гораздо более выражено, чем для модели с $f_0 = 7,5$ МГц (ср. зависимости с одинаковыми номерами на рис. 4в и 6в).

Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для значений толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм и 0,003 мм приведены на рис. 7а, на котором видно значительное изменение формы импульса и уменьшение максимума огибающей импульса 2 ($z_c = 0,003$ мм) относительно такого максимума импульса 1 ($z_c = 0,001$ мм) в 3 раза.

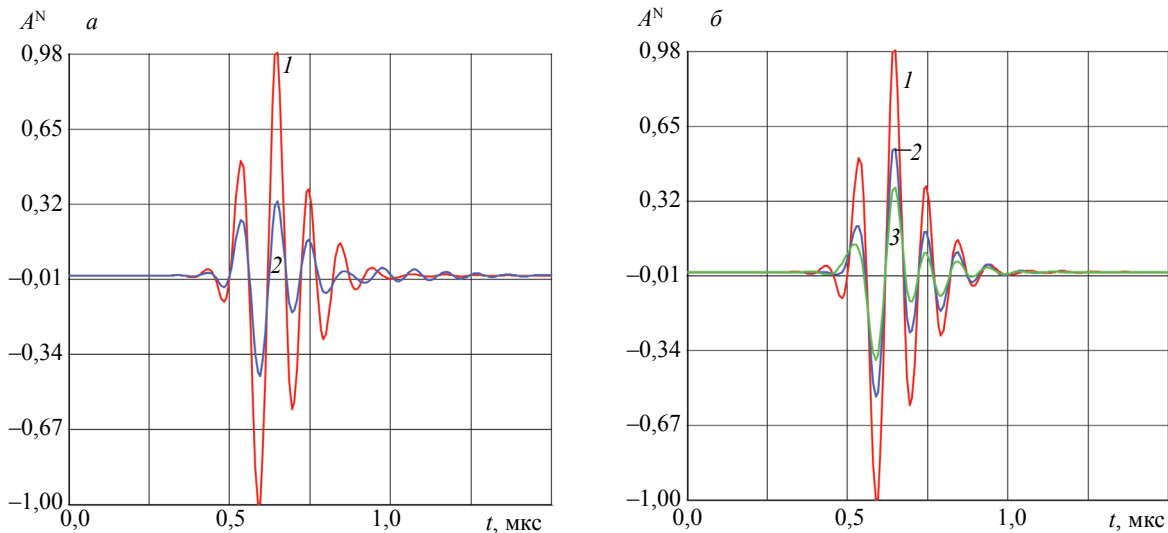


Рис. 7. Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц: а — для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,003$ мм); б — для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм, параметра $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,1$; 3 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$).

На рис. 7б приведены нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с $f_0 = 10$ МГц для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (параметр $\sigma_D = 0,1$) и 0,05 мм (параметр $\sigma_D = 0,1, 0,7$). Можно отметить некоторое изменение формы импульсов 1 — 3 и весьма существенное различие их амплитуд. Максимум положительной огибающей импульса 3 ($\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$) составляет 0,37 от такого максимума импульса 1 ($\bar{D} = 0,02$ мм, $\sigma_D = 0,1$), а аналогичный максимум импульса 2 ($\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,1$) — 0,55. Для модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц (см. рис. 5) соответствующие значения относительных максимумов огибающих импульсов 3 и 2 составляют 0,84 и 0,67.

В табл. 2—4 приведены значения отношений максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$ (в дБ) для моделей прямых преобразователей с номинальными частотами $f_0 = 5, 7,5, 10$ МГц для различных значений среднего размера зерна \bar{D} и параметра σ_D соответственно для толщины $z_c = 0,001, 0,002$ и 0,003 мм (расстояние $h = 30$ мм). Значения $A_{0\max}$ (опорных донных сигналов) определялись для фиксированных параметров $\bar{D} = 0,02$ мм и $\sigma_D = 0,1$ для каж-

Таблица 2

Отношения максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$ (в дБ) для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм

σ_D	\bar{D} , мм	$f_0 = 5$ МГц	$f_0 = 7,5$ МГц	$f_0 = 10$ МГц
0,1	0,03	-0,09	-0,26	-0,96
	0,04	-0,25	-0,74	-2,66
	0,05	-0,52	-1,50	-5,06
0,3	0,03	-0,12	-0,36	-1,31
	0,04	-0,33	-0,96	-3,37
	0,05	-0,66	-1,89	-6,02
0,5	0,03	-0,21	-0,61	-2,10
	0,04	-0,54	-1,47	-4,52
	0,05	-0,97	-2,64	-7,25
0,7	0,03	-0,41	-1,05	-3,07
	0,04	-0,86	-2,14	-5,65
	0,05	-1,41	-3,46	-8,34

Таблица 3

Отношения максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$ (в дБ) для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,002$ мм

σ_D	\bar{D} , мм	$f_0 = 5$ МГц	$f_0 = 7,5$ МГц	$f_0 = 10$ МГц
0,1	0,03	-0,06	-0,21	-0,90
	0,04	-0,18	-0,59	-2,46
	0,05	-0,37	-1,12	-4,72
0,3	0,03	-0,08	-0,29	-1,22
	0,04	-0,24	-0,74	-3,11
	0,05	-0,48	-1,41	-5,72
0,5	0,03	-0,15	-0,50	-1,96
	0,04	-0,39	-1,12	-4,29
	0,05	-0,77	-2,02	-7,10
0,7	0,03	-0,30	-0,84	-2,92
	0,04	-0,67	-1,67	-5,48
	0,05	-1,19	-2,73	-8,33

дой модели преобразователя. Из табл. 2—4 видно монотонное убывание значения $A_{\max}/A_{0\max}$ при возрастании величины среднего размера зерна \bar{D} и частоты f_0 модели преобразователя. Увеличение параметра σ_D приводит к смещению диапазонов изменения значения отношений максимумов $A_{\max}/A_{0\max}$. Так, например, для значения $\sigma_D = 0,1$ и размера зерна $\bar{D} = 0,05$ мм отношение $A_{\max}/A_{0\max}$ при возрастании частоты f_0 от 5 до 10 МГц изменяется от -0,52 до -5,06 дБ (см. табл. 2), а для $\sigma_D = 0,7$ и того же размера \bar{D} аналогичное изменение составляет уже от -1,41 до -8,34 дБ. Возрастание толщины слоя контактной жидкости z_c приводит в ряде случаев к некоторому уменьшению величин отношений максимумов огибающих импульсов донных сигналов при сохранении общей тенденции их убывания с ростом значений \bar{D} и f_0 .

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Металлографический анализ показал, что средний размер зерна \bar{D} испытываемого металла, находившегося в эксплуатации (с наработкой), увеличился с 25 до 50 мкм по сравнению металлом без наработки (в этом случае наибольший размер \bar{D} равен примерно 20 мкм (0,02 мм), см. табл. 1). Указанные значения \bar{D} и дисперсии σ_D обуславливали выбор рабочих частот от 5,0 до 10,0 МГц.

Отношения максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$ (в дБ) для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,003$ мм

σ_D	\bar{D} , мм	$f_0 = 5$ МГц	$f_0 = 7,5$ МГц	$f_0 = 10$ МГц
0,1	0,03	-0,06	-0,14	-0,84
	0,04	-0,18	-0,42	-2,29
	0,05	-0,38	-0,89	-4,04
0,3	0,03	-0,09	-0,20	-1,14
	0,04	-0,24	-0,55	-2,90
	0,05	-0,49	-1,15	-5,39
0,5	0,03	0,15	-0,35	-1,83
	0,04	-0,39	-0,90	-4,06
	0,05	-0,77	-1,74	-6,90
0,7	0,03	-0,30	-0,66	-2,78
	0,04	-0,68	-1,44	-5,33
	0,05	-1,19	-2,46	-8,30

Теоретический расчет формы донного эхосигнала и его спектра показал следующее: влияние изменения толщины z_c контактного слоя от 0,001 до 0,004 мм сопоставимо с влиянием структуры со средним размером \bar{D} зерна от 20 до 50 мкм (от 0,02 до 0,05 мм) на спектр эхоимпульса, распространяющегося в испытуемом металле образцов. При этом указанное влияние увеличивается с увеличением рабочей частоты от 5,0 до 10 МГц. В частности, на частоте 5,0 МГц такое изменение величин z_c и \bar{D} лишь незначительно смещает частотное положение максимума спектра и несколько уменьшает его амплитуду. На частоте 10 МГц для максимальных значений z_c и \bar{D} наблюдается гораздо более существенное уменьшение амплитуды максимума и его смещения в сторону низких частот. Расширяется также полоса пропускания на уровне 6 дБ от максимума (см. рис. 6а и б). Например, уменьшение амплитуды максимума спектра составляет примерно 6 дБ (ср. кривые 4 на рис. 6а и б). Форма и длительность импульса эхосигнала менее подвержена изменениям, чем его спектр за счет влияния толщины слоя контактной жидкости и среднего размера зерна металла, т.е. спектр сигнала является более информативной характеристикой структуры металла.

Важный для практики ультразвуковой структуроскопии вывод состоит в необходимости учета строго заданной шероховатости поверхности объекта испытаний. Влияние указанной шероховатости можно исключить при нормировке по образцу с заданным размером зерна, т.е. получить исходный спектр сигнала, аналогичный, например, кривой 4 на рис. 6а.

В процессе оценки структуры необходимо обеспечить одинаковость шероховатости поверхности и силы прижатия преобразователя по аналогии с исходным состоянием (т.е. при нормировке). Таким образом, процедура измерения шероховатости поверхности объекта контроля становится обязательной. Допуск на шероховатость может быть определен на основании теоретического расчета.

Данные табл. 2—4 по существу показывают уменьшение чувствительности контроля при увеличении толщины слоя контактной жидкости z_c от 0,001 до 0,004 мм. Указанное уменьшение для использовавшегося в расчетах значения глубины донного сигнала h не превышает 9 дБ. Однако приведенные данные требуют экспериментального подтверждения в зависимости от величины шероховатости поверхности испытуемого металла.

На втором этапе работ по данной теме предполагается проведение экспериментов на образцах металла, представленных в табл. 1.

5. ВЫВОДЫ

На основе металлографического анализа металла трубопроводов марок стали Ст20 и 15Х1М1Ф, находившихся в эксплуатации, определены значения среднего размера зерна. Полученные значения 20—50 мкм (0,02—0,05 мм) использованы в теоретическом расчете параметров эхосигнала: эхоимпульсов донных сигналов и их спектра.

Установлено равнозначное влияние толщины z_c слоя контактной жидкости в пределах от 0,001 до 0,004 мм и среднего размера \bar{D} (0,02—0,05 мм) зерна металла на спектр импульсов в диапазоне рабочих частот 5,0—10,0 МГц. Получены количественные данные изменения спектра (смещения максимума спектра и ширины полосы) для различных значений z_c и \bar{D} .

Показано, что спектр сигнала является более информативной характеристикой структуры металла по сравнению с формой и длительностью эхоимпульсов.

Полученные теоретические результаты требуют экспериментального подтверждения в зависимости от величины z_c и среднего размера зерна \bar{D} для рабочих частот от 5,0 до 10,0 МГц.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Д.М. Давыдову за подготовку образцов металла к металлографическому исследованию и к.т.н. А.С. Гуденко за проведение работ по металлографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы МАГАТЭ по безопасности SSG — 48. Управление старением и разработка программы долгосрочной эксплуатации атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности №SSG-48. МАГАТЭ. Вена. 2018.
2. Нормы безопасности МАГАТЭ. Периодический анализ безопасности атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности №SSG-25. МАГАТЭ. Вена. 2013.
3. Щербинский В.Г. Ультразвуковая структуроскопия и тензометрия металлов: обзор // Тяжелое машиностроение. 2016. № 3—4. С. 2—8.
4. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Муравьев В.В., Фальмер С.В. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической спектроскопии // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 44—51.
5. Тютин М.Р., Ботвина Л.Р., Левин В.П., Ефимов А.Г., Кузелев Н.Р. Исследование механических свойств конструкционных сталей акустическими и магнитными методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 7. С. 44—48.
6. Муравьев В.В., Злобин Д.В., Ленков С.В., Зверев Н.Н. Прибор для измерений скорости акустических волн в металлах и сплавах // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 142—146.
7. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Gabbasova M.A., Buldakova I.V., Sokov M.Yu. Analysis of Reflected Signals in Testing Cylindrical Specimens by the Multiple Reflection Echo-Shadow Method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. V. 52. No. 4. P. 1—7.
8. Меркулова В.М. Влияние распределения размеров зерен на затухание ультразвуковых волн // Дефектоскопия. 1970. № 2. С. 111—113.
9. Кеслер Н.А., Шрайфельд Л.И. Исследование рассеяния ультразвука с учетом статистики распределения величины зерен поликристаллических металлов // Дефектоскопия. 1975. № 1. С. 95—100.
10. Данилов В.Н. К расчету коэффициента затухания упругих волн при рассеянии в поликристаллических средах // Дефектоскопия. 1989. № 8. С. 18—23.
11. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник в 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2008. 864 с.
12. Ермолов И.Н. Контроль ультразвуком (краткий справочник). М.: НПО ЦНИИТМАШ, 1992. 86 с.
13. Меркулов Л.Г., Меркулова В.М. Лекции по теории ультразвука. Таганрогский радиотехнический институт, 1976. 71 с.
14. Дымкин Г.Я., Кадикова М.Б. Ультразвуковой метод количественной оценки структуры металла осей колесных пар // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 27 — 36.
15. Данилов В.Н. Программа компьютерного моделирования работы электроакустических трактов дефектоскопов «Импульс +» // Дефектоскопия. 2006. № 3. С. 37—43.
16. Данилов В.Н., Воронкова Л.В. Исследование возможностей ультразвукового контроля чугуна с пластинчатым графитом с использованием стандартных прямых преобразователей // Контроль. Диагностика. 2020. № 1. С. 4—18.
17. Велев Б., Иванов И., Каменов В. Автоматизированная система комплексного неразрушающего контроля структуры и механических свойств материалов машиностроения // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 17—25.