

ЛОКАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОТ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБРАЗЕЦ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНТЕНН ИЗ ПЬЕЗО- И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

© 2022 г. Л.Н. Степанова^{1,*,**}, С.И. Кабанов^{1,**}, В.В. Чернова^{2,**}

¹ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина»,
Россия 630051 Новосибирск, ул. Ползунова, 21

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,
Россия 630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
E-mail: *aergroup@ngs.ru; **stepanova@stu.ru

Поступила в редакцию 18.02.2022; после доработки 09.03.2022

Принята к публикации 11.03.2022

Проведены сравнительные испытания, связанные с локацией сигналов акустической эмиссии (АЭ) от ударных воздействий на образец из углепластика T700. На образец были установлены пьезоэлектрические преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) и волоконно-оптические датчики (ВОД), образующие прямоугольные локационные антенны размерами 360×280 мм. Удары осуществлялись шариками массой 10 и 18,5 г. Были организованы антенны, состоящие из четырех датчиков ПАЭ и четырех датчиков ВОД, и антенны, состоящей из двух датчиков ПАЭ и двух датчиков ВОД. При использовании антенны, в которой находились четыре датчика ВОД, ударное воздействие на образец производилось грузом массой 530 г, сбрасываемым с высоты 400 мм.

Сигналы АЭ регистрировались системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции во время сброса шарика и при его повторных отскоках. Затем формировались кластеры из сигналов АЭ, зарегистрированных при ударных воздействиях грузов. Времена прихода сигналов АЭ на датчики антенн были рассчитаны пороговым методом, методом среднего квадратического отклонения (СКО) и двухинтервальным методом. Показано, что максимальная погрешность локации сигналов АЭ получена при сбросе стального шарика диаметром 16 мм с высоты 300 мм, а минимальная — при использовании электронного имитатора.

Ключевые слова: углепластик, статика, удар, дефект, акустическая эмиссия, локация, погрешность, пьезоэлектрический и волоконно-оптический датчики.

DOI: 10.31857/S0130308222040017, EDN: BLAONB

ВВЕДЕНИЕ

В процессе нагружения авиационных конструкций из композиционных материалов (КМ) исследуются влияния ударных повреждений, перегрузок, вызывающих их расслоение, ухудшение прочностных и жесткостных характеристик. Возникающие при этом дефекты могут приводить к внезапному разрушению материала углепластика. Опасность представляют собой даже относительно небольшие по мощности удары, не оставляющие видимых следов на поверхности композиционной конструкции, но приводящие к возникновению внутренних дефектов [1—3].

Мониторинг и оценка развития дефектов от ударов в элементах авиационных конструкций из углепластика требуют регистрации как процесса соударения, так и последующего контроля материала в области удара [4—5].

Для контроля конструкций из КМ применяются ультразвуковой (УЗ), рентгеновский, тепловизионный, оптический, акустико-эмиссионный (АЭ) и другие методы неразрушающего контроля (НК). Метод АЭ обладает высокой чувствительностью, позволяет определять степень опасности дефектов, в режиме реального времени локализует зону разрушения, может оценивать остаточный ресурс конструкции.

При контроле конструкций из углепластика необходимо учитывать влияние анизотропии на скорость распространения упругих волн от дефектов, что отражается на точности их локации. Наличие шумов от нагружающих устройств, сложности в получении оперативной информации об основных информативных параметрах сигналов АЭ, функционально связанных с процессами развития дефектов и разрушением конструкции — все это требует дальнейшего анализа и разработки методов контроля, позволяющих повышать точностные характеристики.

В результатах АЭ исследований, полученных NASA, отмечается, что при регистрации ударов в аэрокосмических конструкциях микроструктура композита оказывает влияние не только на его прочность и механические свойства, но и на структуру самих сигналов АЭ [6]. При решении задач локации дефектов это может приводить к снижению точностных характеристик, осложнять расшивку и обработку АЭ-информации. При разработке методик контроля, позволяющих опреде-

лять координаты, тип дефектов и степень их опасности в композиционных конструкциях, используются такие информативные параметры, как *MARSE*, структурный коэффициент, плоскостная локация, энергия удара, амплитудное распределение [7—11].

Известно, что АЭ-системы, в основном, работают с пьезоэлектрическими преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ). Однако в настоящее время как в нашей стране [8, 12—14], так и за рубежом [15—20] проводятся работы, в которых в антенны при АЭ-контроле включаются волоконно-оптические датчики (ВОД). Среди основных преимуществ датчиков ВОД (по сравнению с датчиками ПАЭ) следует отметить малые габариты и массу, нечувствительность к электромагнитным шумам и помехам, слабая чувствительность к вибрации, линейность амплитудно-частотной характеристики, возможность при многоточечных измерениях использовать одно оптическое волокно, организация на волокне различных типов датчиков, предназначенных не только для работы с акустическими сигналами, но и для измерения температуры и деформации [12].

Цель работы — анализ результатов локации сигналов АЭ, зарегистрированных в образце из углепластика от ударных нагрузок с использованием АЭ-системы, работающей с различными антеннами, состоящими из сочетания пьезо- и волоконно-оптических датчиков.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения испытаний использовался образец из углепластика T700 размером 800×450×1,2 мм, на который были установлены четыре пьезоэлектрических датчика ПК 01-07 и четыре датчика ВОД Фабри—Перо, образующих прямоугольные локационные антенны размерами 360×280 мм (рис. 1). При регистрации АЭ-информации в процессе ударного нагружения образца были организованы четыре вида антенн. Первая антенна состояла из четырех пьезоэлектрических датчиков ПАЭ. Вторая и третья антенны состояли из двух пьезоэлектрических датчиков ПАЭ и двух датчиков ВОД. В четвертой антенне были включены четыре датчика ВОД. В результате испытаний определялись погрешности локации сигналов АЭ в процессе сбросов и отскоках груза.

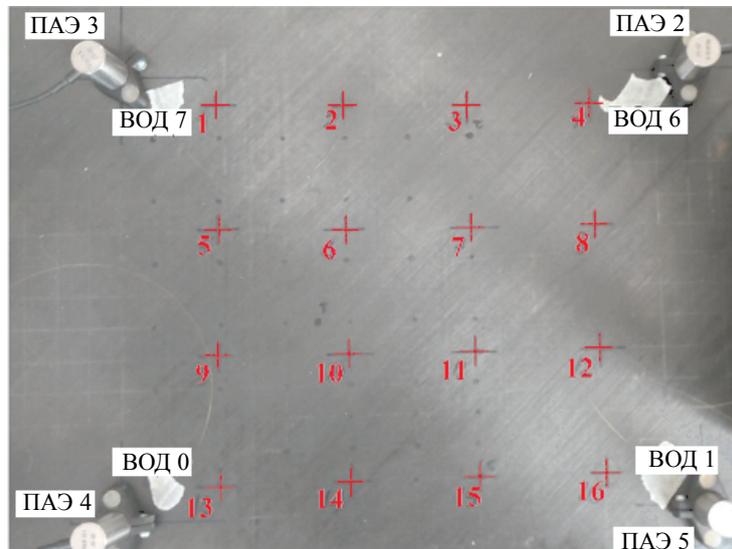


Рис. 1. Внешний вид локационной антенны с пьезоэлектрическими и волоконно-оптическими датчиками и отмеченными местами ударных воздействий на образце из углепластика.

Перед испытаниями в рабочей зоне образца были размечены 16 точек, расстояние между которыми составляло 80 мм (см. рис. 1). Сначала использовалась первая антенна, состоящая из четырех пьезоэлектрических датчиков ПАЭ, работающих в частотном диапазоне (100—700) кГц. Регистрация АЭ-информации осуществлялась АЭ-системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции (свидетельство Федерального агентства по техническому регули-

рованию и метрологии RU.C.27/ 007 А №40707, регистрационный номер в Государственном реестре средств измерений 45154—10).

Погрешности измерения координат дефектов в композиционных конструкциях, определяемые методом АЭ, зависят от погрешностей измерения времени прихода сигнала на датчики антенны и погрешности определения скорости звука в рабочей зоне [4, 5]. Для измерения скорости звука в углепластике Т700 была проведена автоматическая калибровка рабочей локационной зоны образца, при которой каждый датчик ПАЭ поочередно переводился в режим излучения, а оставшиеся три датчика антенны работали в режиме приема.

По результатам калибровки скорость звука быстрой моды S_0 , распространяющейся в направлении оси X между датчиками ПАЭ 4 и ПАЭ 5 (см. рис. 1), составила $V_x = 360 \text{ мм}/72 \text{ мкс} = 5,0 \text{ мм}/\text{мкс}$. Скорость распространения быстрой моды S_0 , проходящей вдоль оси Y от датчика ПАЭ4 к датчику ПАЭ3, была равна $V_y = 280 \text{ мм}/48 \text{ мкс} = 5,83 \text{ мм}/\text{мкс}$, и в направлении XY от датчика ПАЭ 4 к датчику ПАЭ 2 она составила $V_{xy} = 456 \text{ мм}/84 \text{ мкс} = 5,43 \text{ мм}/\text{мкс}$. Таким образом, для данного образца по скорости звука наблюдалась значительная анизотропия. По результатам автоматической калибровки были определены координаты датчиков ПАЭ в локационной зоне в единицах времени (мкс) для быстрой моды S_0 : ПАЭ4 (0 0); ПАЭ 5 (72,7; 0); ПАЭ2 (72,7; 48,5); ПАЭ3 (0; 48,5).

Перед началом ударных испытаний в каждую из 16 отмеченных точек на образце (см. рис. 1) вводились сигналы от имитатора. Использовались два типа имитаторов. При работе с имитатором Су—Нильсена в каждой точке выполнялись изломы грифеля карандаша твердостью 2Н, диаметром 0,5 мм, под углом 45° . При работе с электронным имитатором в каждую точку вводились электрические сигналы напряжением 80 В и длительностью 150 мкс. Сигнал с электронного имитатора поступал на пьезоэлектрический датчик ПАЭ и переводил его в режим излучения. После работы с имитаторами осуществлялся расчет погрешностей определения координат в каждой отмеченной точке образца.

Затем выполнялись удары, связанные со сбросом с высоты $h_1 = 300 \text{ мм}$ и $h_2 = 600 \text{ мм}$ стальных шариков в каждую отмеченную точку образца. Для испытаний использовались шарики диаметром $d_1 = 10 \text{ мм}$ и массой 4,5 г, диаметром $d_2 = 16 \text{ мм}$ и массой 18,5 г. Точный сброс шариков в каждую точку образца осуществлялся через трубу длиной 600 мм. Шарик диаметром $d_2 = 16 \text{ мм}$ сбрасывался с высоты $h_1 = 300 \text{ мм}$, а шарик диаметром $d_2 = 10 \text{ мм}$ — с высоты $h_2 = 600 \text{ мм}$.

Энергия удара определялась как [10]

$$E = mgh, \quad (1)$$

где m — масса груза, кг; g — ускорение свободного падения, м/с; h — высота падения груза, м.

Таким образом, энергия при сбросе шарика массой $m_1 = 4,5 \text{ г}$ с высоты $h_2 = 600 \text{ мм}$ определялась по формуле (1) и составила $E_{12} = 0,026 \text{ Дж}$. Энергия удара при сбросе шарика массой $m_2 = 18,5 \text{ г}$ с высоты $h_1 = 300 \text{ мм}$ составила $E_{21} = 0,055 \text{ Дж}$.

Сигналы АЭ регистрировались системой как после сброса шарика, так и во время его повторных отскоков. Затем формировались кластеры из сигналов АЭ, зарегистрированных при ударных воздействиях в каждую точку образца [21]. Было сформировано 16 кластеров и для каждого из них определялись координаты центра как среднее значение координат всех сигналов в кластере. Для определения координат отмеченных точек на образце выполнялась локация сигналов АЭ. Случайная составляющая погрешности координат рассчитывалась по средним квадратическим отклонениям (S_{x_i} , S_{y_i}) в каждом кластере [22].

При расчете систематическая составляющая погрешности координаты X , Y центра кластера определялась в единицах разности времен прихода (РВП) в микросекундах и умножалась на скорость быстрой моды S_0 по осям X (5,0 мм/мкс) и Y (5,83 мм/мкс). Координаты центра локации определялись в миллиметрах как [22]

$$X_i = x_{\text{РВП}} \times V_x; \quad Y_i = y_{\text{РВП}} \times V_y,$$

где i — номер точки ударного воздействия (кластера); $x_{\text{РВП}}$, $y_{\text{РВП}}$ — координаты датчиков во временной области, мкс; X_i , Y_i — измеренные координаты источника по осям X , Y , мм; V_x , V_y — скорости распространения быстрой моды S_0 по осям X , Y , мм/мкс.

Для определения погрешностей времен прихода сигналов АЭ на датчики ПАЭ проведены расчеты при использовании порогового метода, метода среднего квадратического отклонения (СКО) и двухинтервального метода [7, 10].

Время прихода по пороговому методу рассчитывалось по моменту превышения сигналом АЭ некоторого уровня, который определялся шумом в его предыстории. При этом вводилось автоматическое определение порогового уровня, в котором порог задавался как [7]

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{шум}} + U_{\text{доб.ш}}$$

где $U_{\text{шум}}$ — уровень шума, рассчитанный в области предыстории сигнала; $U_{\text{доб.ш}}$ — добавка к уровню шума.

При использовании метода СКО применялось временное «окно» длительностью в несколько микросекунд, которое накладывалось на оцифровку сигнала АЭ. В «окне» рассчитывался некоторый параметр, реагирующий на локальное изменение структуры сигнала. Данный алгоритм значительно повышает степень достоверности определения времен прихода сигналов АЭ по сравнению с методом, основанном на пороговой дискриминации [7]. При передвижении «окна» по оцифровке для параметра структуры сигнала выбиралось СКО, которое характеризовало уровень энергии [7, 9]:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=T_1}^{i=T_2} (x_i - x_{\text{cp}})^2}{T_2 - T_1 - 1}},$$

где T_1, T_2 — номера отсчетов, выполняемых аналого-цифровым преобразователем и соответствующих моментам начала и окончания временного «окна»; x_{cp} — среднее значение реализации сигнала АЭ в «окне»; i — номер точки в массиве СКО.

Преимущество метода проявляется при обработке сложных многомодовых сигналов, когда в оцифровке присутствует несколько мод акустической волны. Подбором порогового уровня удается настроиться на определение начала сигнала в выбранной моде [7].

Двухинтервальный метод позволяет определять время прихода сигнала АЭ, совпадающее с моментом изменения его мощности. Параметр структуры $A(t)$ сигнала АЭ записывается в виде [7]:

$$A(t) = \int_t^{t+T_{\text{ок}}} |U(t)| \cdot dt,$$

где $U(t)$ — электрический сигнал АЭ; $T_{\text{ок}}$ — размер «окна» для расчета мощности сигнала.

Время прихода сигнала АЭ соответствует максимальному значению модифицированного двухинтервального коэффициента $K(t)$, который находится как [8]

$$K(t) = \frac{A(t + T_{\text{ок}}) - A(t - T_{\text{ок}})}{A(t - T_{\text{ок}})}.$$

Преимущество использования двухинтервального метода состоит в том, что суммирование параметров структуры сигналов АЭ во временном «окне» практически исключает случайные выбросы. Это позволяет более точно определять время прихода t_0 сигнала АЭ на соответствующий датчик ПАЭ, а, следовательно, уменьшить разброс координат дефектов и определять их автоматически [8].

Рассчитанные случайные составляющие погрешности для каждой точки ударного воздействия (см. рис. 1) определялись по формулам [10, 22]:

$$S_{x_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{cp}})^2}{(n-1)}}; \quad S_{y_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{\text{cp}})^2}{(n-1)}},$$

где n — число отсчетов; x_i, y_i — измеренные значения по осям X, Y ; $x_{\text{cp}}, y_{\text{cp}}$ — средние значения по осям X, Y .

Результирующая случайная погрешность S_{xyi} для каждой точки образца находится как [22]

$$S_{xyi} = \sqrt{(S_{xi}^2 + S_{yi}^2)},$$

где S_{xi} , S_{yi} — рассчитанные СКО координат по осям X , Y , мм.

Систематическая составляющая погрешности по каждой координате оценивалась как модуль разности координат центра кластера (X_i , Y_i) и координат X_{i0} , Y_{i0} , измеренных поверенной линейкой:

$$\Delta X_i = |X_i - X_{i0}|;$$

$$\Delta Y_i = |Y_i - Y_{i0}|,$$

где i — номер точки ударного воздействия (кластера); X_i , Y_i — измеренные координаты источника, мм.

Суммарная систематическая погрешность в каждой точке образца определялась по формуле [22]:

$$\Delta XY_i = \sqrt{(\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2)},$$

где ΔX_i , ΔY_i — рассчитанные систематические составляющие погрешности по осям X , Y , мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Систематическая и случайная составляющие погрешности расчета координат локации сигналов АЭ при использовании антенны, состоящей из четырех ПАЭ, усреднялись по всем точкам ударного воздействия. Результаты расчетов приведены в табл. 1, где через $S1$ и $\Delta 1$ обозначены случайная и систематическая погрешности, полученные при определении координат зоны локации при использовании электронного имитатора; через $S2$, $\Delta 2$ — при сбросе металлического шарика диаметром $d = 10$ мм с высоты $h = 600$ мм; через $S3$, $\Delta 3$ — при сбросе с высоты $h = 300$ мм металлического шарика диаметром $d = 16$ мм.

Таблица 1

Систематическая и случайная погрешности локации для различных методов расчета РВП при использовании антенны, состоящей из четырех ПАЭ

| Метод расчета РВП | $S1$, мм | $\Delta 1$, мм | $S2$, мм | $\Delta 2$, мм | $S3$, мм | $\Delta 3$, мм |
|-------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|
| СКО | 1,8 1,0 % | 5,4 7,7 % | 3,5 2,5 % | 6,1 5,7 % | 7,7 2,4 % | 10,2 7,7 % |
| Пороговый | 1,7 0,6 % | 5,4 1,9 % | 4,3 1,6 % | 6,1 2,2 % | 23,4 8,4 % | 22,0 7,9 % |
| Двухинтервальный | 7,2 2,6 % | 6,7 2,4 % | 9,4 3,0 % | 7,9 2,7 % | 23,9 8,6 % | 15,6 5,6 % |

Времена прихода сигналов АЭ для быстрой моды $S0$ определялись методом СКО [7]. Затем по триангуляционным формулам рассчитывались значения координат источника сигналов в единицах РВП.

Для общей оценки погрешности метода измерения координат X , Y использовалось среднее значение систематической составляющей погрешности и среднее значение случайной погрешности для двух точек (см. рис. 1) ударного воздействия. Сводные значения погрешностей приведены в табл. 2, где Δ_X , Δ_Y — средние значения систематических погрешностей определения координат X , Y .

Как следует из табл. 2, систематическая составляющая погрешности увеличивается вместе со случайной составляющей. Минимальные погрешности получены при использовании электронного имитатора. Сравнивая погрешности локации сигналов АЭ при использовании различных методов расчета (см. табл. 1), можно отметить, что наименьшие средние значения систематической и случайной составляющих погрешности получены методом СКО при сбросе шарика диаметром

Таблица 2

Усредненные значения систематической и случайной погрешностей определения координат X , Y для различных имитаторов сигналов АЭ

| Вид имитатора сигналов АЭ | Δ_{x^0} , мм | Δ_{y^0} , мм | S_{x^0} , мм | S_{y^0} , мм |
|--|---------------------|---------------------|----------------|----------------|
| Электронный имитатор | 1,4 0,4 % | 5,2 1,9 % | 1,0 0,3 % | 1,5 0,5 % |
| Имитатор Су—Нильсена | 2,6 0,7 % | 6,4 2,3 % | 1,8 0,5 % | 1,6 0,6 % |
| Сброс шарика диаметром $d=10$ мм с высоты $h=600$ мм | 2,9 0,8 % | 5,3 1,9 % | 2,6 0,7 % | 2,4 0,9 % |
| Сброс шарика диаметром $d=10$ мм с высоты $h=300$ мм | 3,3 0,9 % | 5,0 1,8 % | 2,9 0,8 % | 3,7 1,3 % |
| Сброс шарика диаметром $d=16$ мм с высоты $h=600$ мм | 3,2 0,9 % | 6,8 2,4 % | 3,7 1,0 % | 5,4 1,9 % |
| Сброс шарика диаметром $d=16$ мм с высоты $h=300$ мм | 3,8 1,1 % | 9,5 3,4 % | 4,5 1,3 % | 6,3 2,3 % |

$d=10$ мм с высоты $h=600$ мм. Наибольшие погрешности определения координат от ударного воздействия получены при сбросе на образец шарика диаметром 16 мм с высоты 300 мм.

Для оценки погрешности измерения времени прихода сигнала АЭ использовался двухинтервальный коэффициент. Для планарной локации сигналов АЭ при использовании антенны, состоящей из трех каналов, выбирался канал с минимальным двухинтервальным коэффициентом, так как он вносит наибольшую погрешность в расчете времен прихода. Рассчитана корреляция среднего значения этого коэффициента по точкам ударного воздействия с величиной случайной погрешности координат. Этот коэффициент соответствует соотношению сигнал/шум во временной области сигнала, где определяется время прихода.

Форма сигнала АЭ при работе имитатора значительно отличается от формы сигнала, полученного от сброса металлического шарика. При этом уменьшается амплитуда быстрой моды S_0 , время прихода которой считается временем прихода сигнала во всех рассматриваемых алгоритмах расчета. Основные отличия при всех методах ударного воздействия на композиционный образец заключаются в изменении соотношения амплитуд быстрой S_0 и медленной A_0 мод. Также отличия наблюдаются и в спектре сигналов АЭ, так как при ударных воздействиях энергия в спектре незначительно смещается в низкочастотную область (табл. 3).

Таблица 3

Параметры формы и спектра сигналов АЭ, полученных с датчика ПАЭ 3 в точке 6 (см. рис. 1) образца для различных видов воздействия

| Вид имитатора сигналов АЭ | Двухинтервальный коэффициент $K(t)$ | Отношение сигнал/шум для быстрой моды S/N_{s_0} | Отношение сигнал/шум для медленной моды S/N_{a_0} | Медианная частота спектра $F_{\text{мед}^2}$, кГц | Отношение амплитуды медленной моды к быстрой моде P_{a_0/s_0} |
|--|-------------------------------------|---|---|--|---|
| Электронный имитатор | 101,8 | 106,6 | 334,3 | 126 | 3,13 |
| Имитатор Су—Нильсена | 45,6 | 67,02 | 348,6 | 113 | 5,2 |
| Сброс шарика диаметром $d=10$ мм с высоты $h=600$ мм | 10,88 | 44,75 | 400 | 111 | 8,94 |
| Сброс шарика диаметром $d=10$ мм с высоты $h=300$ мм | 7,4 | 36,26 | 420 | 109 | 11,58 |
| Сброс шарика диаметром $d=16$ мм с высоты $h=600$ мм | 7,55 | 28,26 | 502,2 | 115 | 17,77 |
| Сброс шарика диаметром $d=16$ мм с высоты $h=300$ мм | 6,35 | 36,58 | 639,58 | 117 | 17,48 |

В табл. 3 через $K(t)$ обозначено среднее значение двухинтервального коэффициента по всем сигналам в точке начала сигнала быстрой S_0 моды. Через S/N_{s_0} , S/N_{a_0} обозначено отношение

сигнал/шум, определяемое отношением максимального размаха сигнала к размаху шума в предыстории для быстрой $S0$ и медленной $A0$ моды. Через $F_{\text{мед}}$ обозначена медианная частота спектра сигнала АЭ, а через P_{als} — отношение амплитуды медленной моды к амплитуде быстрой моды.

Основным отличием сигналов от ударного воздействия стального шарика является увеличение коэффициента отношения амплитуд (см. табл. 3) медленной и быстрой моды P_{als} и уменьшение среднего значения двухинтервального коэффициента $K(t)$.

Для оценки погрешности определения координат источника применялась антенна, состоящая из четырех датчиков ВОД. Регистрацию сигналов АЭ осуществляли восьмиканальным модулем АЭ-системы СЦАД-16.10, где на четыре канала были подключены пьезоэлектрические датчики ПАЭ, а на другие четыре канала — датчики ВОД (см. рис. 1). Процесс автокалибровки зоны локации имел особенность, связанную с тем, что сигнал от датчиков ВОД превышал порог селекции только от ближайшего излучающего датчика ПАЭ электронного имитатора. При этом скорость звука по сигналам ВОД в процессе автокалибровки с использованием электронного имитатора определить не удалось. Скорость звука определяли при калибровке от сброса шарика в точке за пределами зоны локации на линии между парой датчиков ВОД.

На рис. 2а приведена форма сигнала АЭ при сбросе шарика диаметром 10 мм за пределами зоны локации между пьезоэлектрическими датчиками ПАЭ 4 и ПАЭ5, а на рис. 2б — форма сигнала АЭ при сбросе этого шарика между датчиками ВОД 0 и ВОД 1. Расстояние между этими датчиками равно 360 мм, скорость звуковой волны быстрой моды $S0$ по результатам измерения РВП пьезоэлектрических датчиков ПАЭ 4 и ПАЭ 5 составила $V_x = 360 \text{ мм}/70 \text{ мкс} = 5,14 \text{ мм/мкс}$.

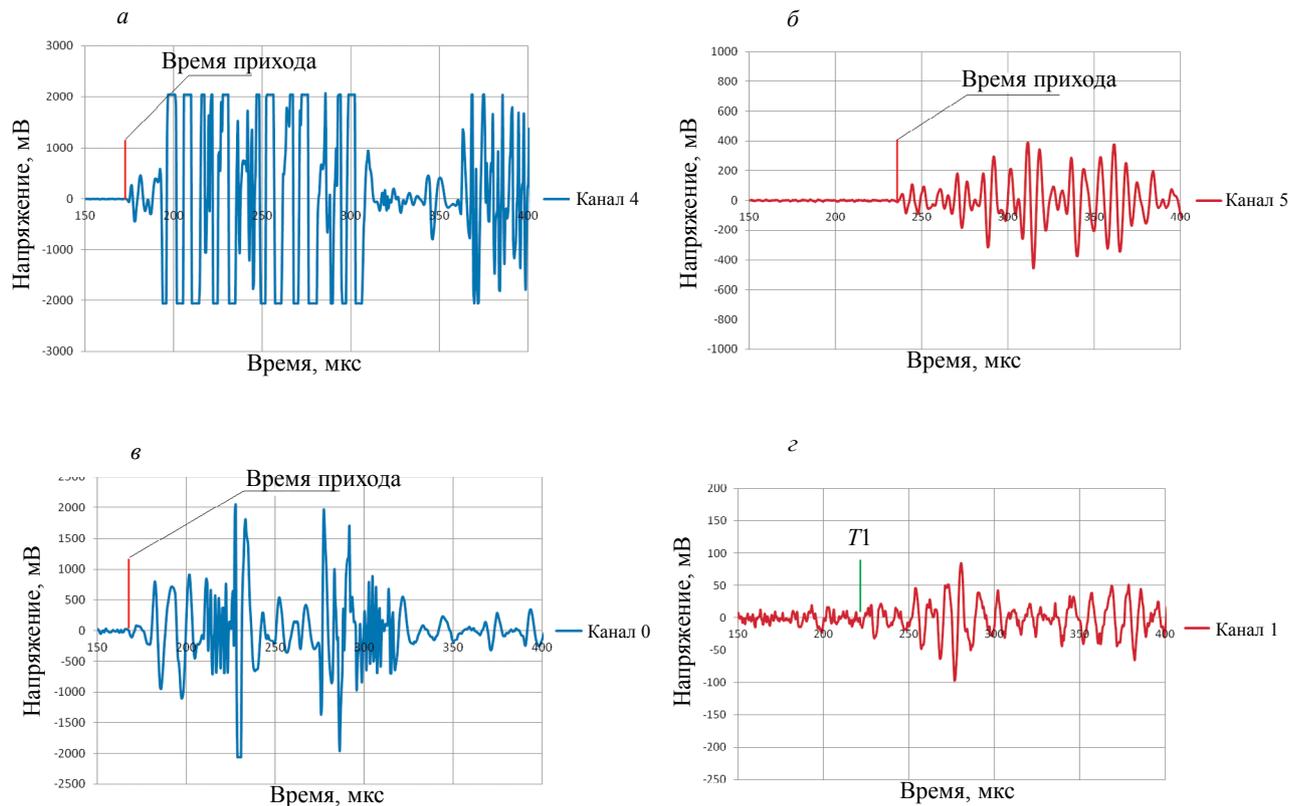


Рис. 2. Форма сигналов при калибровке зоны локации сбросом шарика диаметром 10 мм: сигнал на выходе датчика ПАЭ 4 (а); датчика ПАЭ 5 (б); сигнал на выходе датчика ВОД 0 (в); датчика ВОД 1 (г).

Время прихода сигнала АЭ на датчик ВОД 0 находилось надежно (рис. 2в). Время прихода на датчик ВОД 1 визуально определялось как $T1$ (рис. 2г). Для времени прихода $T1$ РВП равно 62 мкс, а скорость $V_x = 360 \text{ мм}/62 \text{ мкс} = 5,64 \text{ мм/мкс}$. Калибровка с использованием датчиков ВОД дает

Рассчитанные усредненные по точкам ударного воздействия значения систематической и случайной погрешности определения координат X , Y для четырех зон локации при использовании датчиков ПАЭ и ВОД

| Номер зоны локации | Локализованные события, % | Δ_{Xp} , мм | Δ_{Yp} , мм | S_{Xp} , мм | S_{Yp} , мм |
|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|
| 1 | 98,8 | 4,2 1,2 % | 8,6 3,1 % | 2,3 0,6 % | 3,3 1,2 % |
| 2 | 78,1 | 9,7 2,7 % | 32,3 11,5 % | 8,9 2,5 % | 31,7 11,3 % |
| 3 | 61,0 | 36,6 10,2 % | 62,3 22,3 % | 7,3 2,0 % | 37,8 13,5 % |
| 4 | 53,7 | 64,6 17,9 % | 68,2 24,4 % | 44,0 12,2 % | 56,6 20,2 % |

большую погрешность в определении скорости быстрой моды S_0 , поэтому для расчетов координат применялись результаты калибровки, полученные пьезодатчиками ПАЭ 4, ПАЭ 5.

Результаты расчетов координат для случая сброса шарика диаметром 10 мм с высоты 600 мм для локационных зон, составленных из комбинаций датчиков ПАЭ и ВОД, приведены в табл. 4. В данной таблице зона локации 1 составлена из четырех пьезоэлектрических датчиков ПАЭ (ПАЭ 2, ПАЭ 3, ПАЭ 4, ПАЭ 5). В зону локации 2 были включены два датчика ВОД и два пьезоэлектрических датчика ПАЭ (ВОД 0, ВОД 1, ПАЭ 2, ПАЭ 3). Зона локации 3 состояла из двух датчиков ВОД и двух пьезоэлектрических датчиков ПАЭ (ПАЭ 4, ПАЭ 5, ВОД 6, ВОД 7). Зона 4 состояла из четырех датчиков ВОД (ВОД 0, ВОД 1, ВОД 6, ВОД 7). В процессе организации различных антенн датчики ПАЭ и ВОД на образце не перемещались.

Погрешности локации в зонах 2, 3 значительно увеличиваются при включении в антенну двух датчиков ВОД по сравнению с зоной 1 (см. табл. 4). Увеличение погрешности определения координат связано с низкой амплитудой сигналов, регистрируемых датчиками ВОД, вызванной их низкой чувствительностью и погрешностями в определении времени прихода сигналов.

При использовании антенны, состоящей из четырех ПАЭ и образующей зону 1, были локализованы все ударные воздействия, наносимые в 16 точках (рис. 3а). Усредненная погрешность локации по всем точкам в данном случае составила 4,2 мм по оси X и 8,6 мм по оси Y . При этом локализовано было 98,8 % из всех зарегистрированных (см. табл. 4) сигналов.

Замена двух датчиков ПАЭ на датчики ВОД привела к значительному снижению точности определения координат локализованных сигналов АЭ. Были проанализированы результаты определения координат сигналов АЭ для зон локации 2 (рис. 3б) и 3 (рис. 3в).

Точность локации сигналов АЭ в зоне 2 была выше, чем в зоне 3 (см. табл. 4). Систематическая составляющая погрешности по оси X в зоне 2 была в четыре раза меньше, чем в зоне 3 и составила 9,7 мм. По оси Y систематическая погрешность была равна 32,3 мм, что в два раза меньше, чем в зоне 3. Кроме того, в зоне 2 было локализовано на 18 % сигналов больше, чем в зоне 3 (см. рис. 3б).

На рис. 3в показаны результаты локации при использовании антенны, образующей зону 3. При этом доля локализованных сигналов АЭ снизилась до 61 % от всех зарегистрированных, а погрешности стали составлять 36,6 мм по оси X и 62,3 мм по оси Y (см. табл. 4). Максимальная суммарная амплитуда сигналов, локализованных в зоне 1, была в два раза больше, чем в зоне 3. Таким образом, включение во вторую и третью антенны различных датчиков ВОД (см. рис. 3б—в) оказывало влияние на точность результатов локации. Это определяется низкой чувствительностью и разбросом характеристик датчиков ВОД.

При использовании антенны, состоящей из четырех датчиков ВОД, не было получено локации сигналов АЭ при сбросе стального шарика массой 18,5 г на образец. Поэтому для получения устойчивой локации сигналов АЭ использовалось ударное воздействие, наносимое грузом массой $m = 530$ г с тупым наконечником [10]. Сброс груза выполнялся с высоты $h_1 = 200$ мм и $h_2 = 400$ мм. Значения энергии от падения груза массой $m = 530$ г по формуле (1) составили

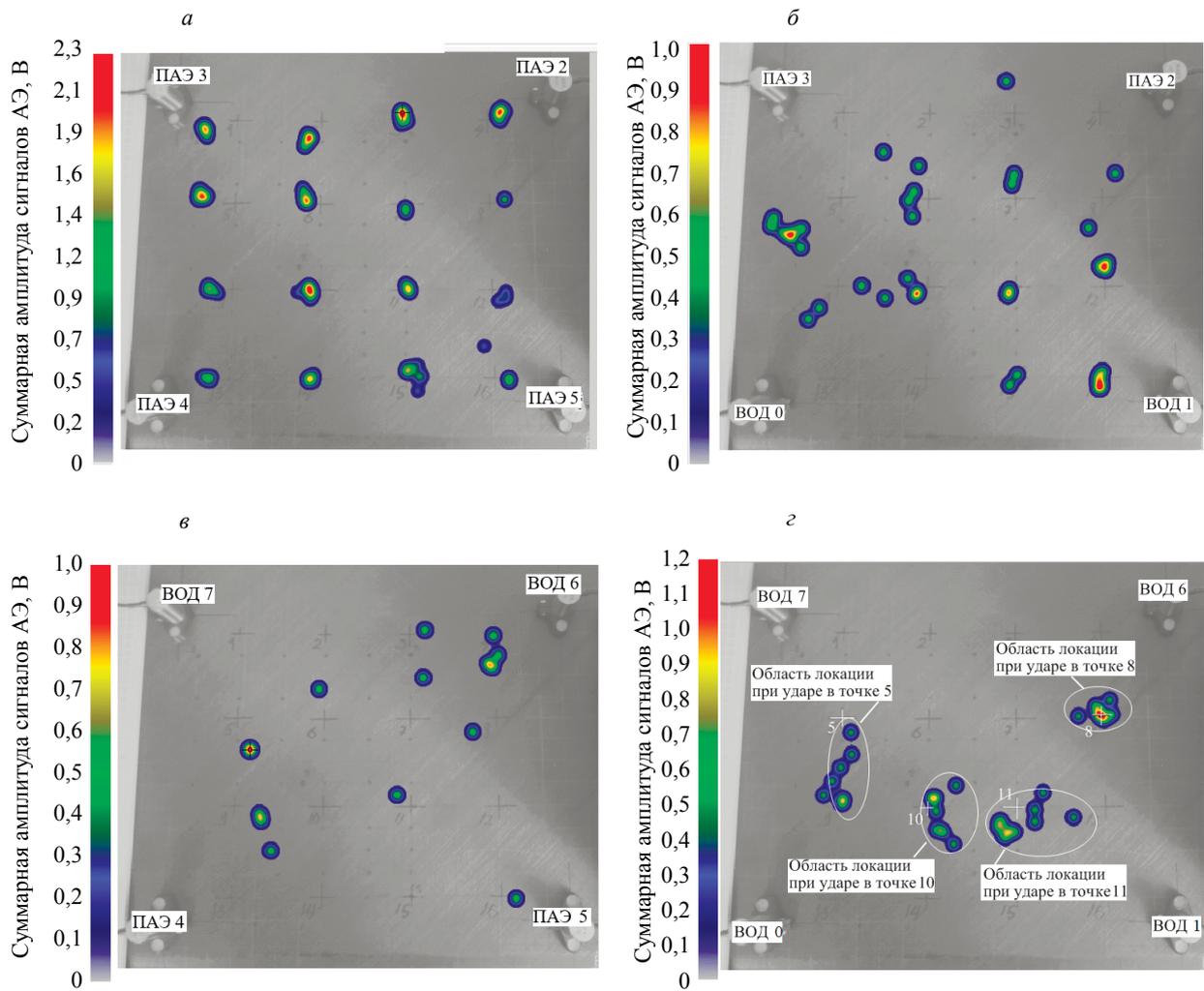


Рис. 3. Локация сигналов АЭ при использовании пьезоантенн, состоящих из четырех ПАЭ (а); из двух ПАЭ и двух ВОД (б— в); из четырех ВОД (г).

$E_1 = 1$ Дж при высоте сброса $h_1 = 200$ мм и $E_2 = 2$ Дж при высоте $h_2 = 400$ мм. При этом максимальная амплитуда локализованных сигналов АЭ (рис. 3г) была равна 0,6 В. При сбросе груза массой $m = 530$ г в четыре размеченные точки 5, 8, 10 и 11 образца (см. рис. 1) позволило получить локацию, показанную на рис. 3г.

При нанесении ударного повреждения груз сбрасывался с высоты $h_2 = 400$ мм. В процессе испытания было зарегистрировано 62 сигнала АЭ, из которых 28 соответствовали ударам, а остальные — отскокам груза и шумам. Для оценки погрешностей была выполнена фильтрация и выбраны только полезные сигналы. В табл. 5 приведены результаты расчета систематической и случайной погрешностей для точек 5, 8, 10, 11, показанных на рис. 1. Наибольшее значения погрешности определения координат было получено в области локации при ударе в точке 5. Суммарная систематическая составляющая погрешности составила $\Delta_{XY} = 54,3$ мм, а суммарная случайная — $S_{XY} = 23,2$ мм. Наиболее высокая точность наблюдалась при ударе в точке 8. При этом систематическая и случайная составляющие погрешности были равны $\Delta_{XY} = 9,7$ мм и $S_{XY} = 10,6$ мм.

Отмечалось, что при обработке АЭ-информации, зарегистрированной датчиками ВОД, снижение точности локации было связано с их низкой чувствительностью и как следствие этого — со сложностями определения времен прихода сигналов АЭ.

Таблица 5

Рассчитанные значения систематической и случайной погрешности определения координат X , Y при нанесении ударных повреждений в точках 5, 8, 10, 11 образца и использовании антенны, состоящей из четырех ВОД

| Номер точки (см. рис. 1) | Δ_x , мм | Δ_y , мм | S_x , мм | S_y , мм | Δ_{xy} , мм | S_{xy} , мм |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|
| 5 | 22,3 6,2 % | 49,5 17,7 % | 8,1 2,2 % | 21,7 7,8 % | 54,9 18,7 % | 23,2 8,1 % |
| 8 | 9,1 2,5 % | 3,5 4,4 % | 9,0 2,3 % | 5,6 2,0 % | 9,7 2,8 % | 10,6 3,2 % |
| 10 | 23,7 6,6 % | 1,0 0,3 % | 7,8 2,2 % | 17,6 6,3 % | 23,7 6,6 % | 19,3 6,7 % |
| 11 | 8,4 2,3 % | 8,8 3,1 % | 22,2 6,2 % | 7,8 2,8 % | 12,1 3,9 % | 23,5 6,8 % |

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы методики определения времен прихода сигналов АЭ на датчики антенны. Установлено, что наименьшие погрешности локации от ударов стальным шариком диаметром 10 мм с высоты 600 мм достигаются при использовании антенны, состоящей из четырех ПАЭ с применением метода СКО при определении времен прихода сигналов АЭ. При этом усредненная погрешность локации по оси X составила 4,15 мм, а по оси Y — 8,6 мм (см. табл. 4). Было локализовано 98,8 % из всех зарегистрированных сигналов. Наибольшие погрешности (см. табл. 2) определения координат от ударного воздействия получены при сбросе на образец шарика диаметром 16 мм с высоты 300 мм.

2. При испытаниях все датчики устанавливались на образец один раз, после чего за счет их различных сочетаний, были рассмотрены четыре локационные антенны. Это позволило экспериментально определить погрешности локации при нанесении ударных повреждений для четырех типов антенн и проанализировать возможности их практического использования.

3. Использование антенны, состоящей из двух датчиков ПАЭ на датчики ВОД привела к снижению точности определения координат локализованных сигналов АЭ. При этом удары наносились шариком диаметром 10 мм, сбрасываемым с высоты 600 мм. Доля локализованных сигналов АЭ снизилась до 61,0 % от всех зарегистрированных, а погрешности стали составлять 36,6 мм по оси X и 62,3 мм по оси Y .

4. В случае использования антенны, состоящей из четырех датчиков ВОД, из-за их низкой чувствительности удары, наносимые шариками, АЭ-системой не локализовались. Поэтому для исследования возможностей локации энергию удара увеличили и использовали груз массой 530 г, сбрасываемый с высоты 400 мм. При этом минимальные значения систематической и случайной погрешности составили $\Delta_{xy} = 9,7$ мм и $S_{xy} = 10,6$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейгенбаум Ю.М., Миколайчук Ю.А., Метелкин Е.С., Батов Г.П. Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композиционных конструкций // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9. С. 71—82.
2. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 187. С. 83—91.
3. Чернышев С.Л., Зиченков М.Ч., Смотрова С.А., Новоторцев В.М., Музафаров А.М. Технология обнаружения малозаметных ударных повреждений силовых элементов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов с использованием ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 4. С. 48—53.
4. Барсук В.Е., Степанова Л.Н., Чернова В.В., Кабанов С.И. Локация зон разрушения при прочностных испытаниях фюзеляжа самолета из углепластика // Полет. 2017. № 2. С. 21—26.
5. Барсук В.Е., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Чернова В.В. Акустико-эмиссионный контроль дефектов кессона крыла самолета из углепластика в процессе статического и ударного нагружения // Полет. 2019. № 5. С. 17—24.

6. Madaras E. Highlights of NASA's role in developing state-of-the-art nondestructive evaluation for composites: NASA Document ID 20050050900 / Presented at the American Helicopter Society Hampton Roads Chapter Structure Specialist Meeting. Williamsburg, VA, 30 Oct.—1 Nov. 2001.
7. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кареев А.Е., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожмякин В.Л., Бобров А.Л., Боярркин Е.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение / Машиностроение—Полет, 2004. 368 с.
8. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Чернова В.В., Кузнецов А.Б. Локация сигналов акустической эмиссии в образцах из дюралюминия и углепластика с использованием антенны, состоящей из волоконно-оптических датчиков и пьезопреобразователей // Контроль. Диагностика. 2021. № 2. С. 18—29.
9. Степанова Л.Н., Петрова Е.С., Чернова В.В. Прочностные испытания лонжерона из углепластика с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 24—30.
10. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Милосердова М.А. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов и кессона крыла из углепластика от ударных нагрузок // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 9. С. 4—11.
11. Бехер С.А., Попков А.А. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 62—71.
12. Бочкова С.Д., Волковский С.Д., Ефимов М.Е., Дейнека И.Г., Смирнов Д.С., Литвинов Е.В. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 73—77.
13. Башков О.В., Ромашко Р.В., Зайков В.И., Панин С.В., Безрук М.Н., Кхун Х.Х.А., Башков И.О. Детектирование сигналов акустической эмиссии волоконно-оптическими интерференционными преобразователями // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 18—25.
14. Федотов М.Ю., Будадин О.Н., Козельская С.О. Особенности технологии оптического неразрушающего контроля композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками // Конструкции из композиционных материалов. 2020. № 2. С. 52—55.
15. Yu F., Okabe Y., Wu Q., Shigeta N. Damage type identification based on acoustic emission detection using a fiber—optic sensor in carbon fiber reinforced plastic laminates / 32-nd European Conference on Acoustic Emission Testing. Prague, Czech Republic, September 07—09, 2016.
16. Lexmann M., Bueter A., Schwarzaupf O. Structural Health Monitoring of composite aero-space structures with Acoustic Emission // Journal of Acoustic Emission. 2018. V. 35. P. 172—193.
17. Soman R., Wee J., Peters K. Optical Fiber Sensors for Ultrasonic Structural Health Monitoring: A Review // Sensors. 2021. V. 21 (21). P. 7345. <https://doi.org/10.3390/s21217345>
18. Willberry J. O., Papaalias M., Fernando G. F. Structural Health Monitoring Using Fibre Optic Acoustic Emission Sensors // Sensors. 2020. V. 20. P. 6369. DOI:10.3390/s20216369
19. Yu F., Okabe Y. Fiber-optic sensor-based remote acoustic emission measurement in a 1000 °C environment // Sensors. 2017. V. 17. P. 2908.
20. Tada K., Yuki H. Detection of acoustic emission signals with the fabry-perot interferometer type optical fiber sensor // Journal of Acoustic Emission. 2017. V. 34. P. S38—S41.
21. Попков А.А., Бехер С.А. Применение пространственной корреляции параметров сигналов акустической эмиссии для решения задач кластеризации источников // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 4. С. 30—38. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-30-38
22. Гончаров А.А., Копылов В.Д. Метрология, стандартизация и сертификация в строительстве: учебное пособие. М.: ООО Издательство «КноРус», 2022. 232 с.