

УДК 620.179.17

DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-62-71

## ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗВИТИИ ТРЕЩИН В СТЕКЛЕ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

С. А. Бехер, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

А. А. Попков, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

*В настоящее время отсутствуют технические решения для реализации АЭ-контроля объектов, находящихся под действием динамических нагрузок. Расширение области применения метода, например, для мониторинга объектов в процессе ударного нагружения требует фундаментальных исследований закономерностей акустической эмиссии (АЭ) при динамических воздействиях. Целью работы является определение временных параметров АЭ, возникающей в объекте в результате ударного нагружения, для обнаружения развивающихся трещин и разрушений хрупкого типа.*

*В экспериментах плоские образцы из силикатного стекла нагружались ударами стальными бойками, свободно падающими с высоты 500 мм. Развитие трещины контролировалось с использованием быстродействующей тензометрической системы, АЭ-аппаратуры и видеокамеры.*

*Ударное воздействие возбуждало в объекте упругие затухающие колебания, которые фиксировались и акустико-эмиссионной, и тензометрической системами. Характерная частота сигнала тензосистемы составляла 1,6 кГц, АЭ-системы – 110 кГц. Продолжительность времени затухания колебаний в сигнале тензосистемы не превышала 4 мс, непрерывный сигнал в АЭ-системе снижался ниже порогового уровня (5 мкВ) за время 30 мс.*

*При нагружении образцов с трещиной наблюдалось смещение кромок по типу продольного сдвига на 0,1 мм с характерным временем перехода в первоначальное состояние 0,4 с. Тензодатчики, установленные перпендикулярно направлению развития трещины, регистрировали процесс релаксации деформаций трещины в течение 400 с. Зависимость количества зарегистрированных сигналов от времени удовлетворительно описывалась логарифмическим законом. После затухания непрерывных АЭ-сигналов, вызванных ударом, наблюдались два потока дискретных сигналов АЭ.*

*Сигналы первого потока, связанные со смещением кромок трещины, регистрировались в интервале 0,03...0,35 с. Распределение временных интервалов между сигналами первого потока описывается экспоненциальной функцией. Сигналы второго потока регистрировались в интервале 0,35...400 с только при увеличении длины трещины. Временные интервалы между сигналами второго потока распределены по логарифмическому закону, что соответствует временной зависимости деформаций. Поток сигналов является нестационарным и связан с разрушением кромок трещины после перераспределения напряжений, вызванных увеличением ее длины. Зарегистрированные сигналы АЭ могут быть использованы для обнаружения развивающихся трещины при ударном нагружении. Оптимальным способом их идентификации являются методы временной селекции в диапазоне 0,03...0,35 с для обнаружения развитой трещины и 0,35...400 с для обнаружения процессов роста трещины.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, амплитуда, временные интервалы, динамическая тензометрия, ударное нагружение, релаксация напряжений, трещина, разрушение.

### Введение

Детали и составные части подвижного состава всех видов транспорта, в том числе их светопрозрачные ограждающие конструкции, в процессе движения испытывают ударные воздействия, вызванные столкновениями с частицами и твердыми телами внешней среды. Ударная нагрузка также может возникать в узлах качения (ролики и кольца подшипников, колесные пары и рельсы) из-за износов поверхностей катания, при которых создается преры-

вистое движение. Механические силы, возникающие при ударе, в несколько раз превышают их допускаемые значения и способны приводить к появлению трещин, которые, в свою очередь, снижают прочность элементов конструкций до недопустимого уровня.

Для обеспечения надежности подвижного состава в эксплуатации актуальной является задача мониторинга для своевременного обнаружения развивающихся дефектов, возникающих в процессе ударных воздействий. Для реализа-

ции такого мониторинга положительно зарекомендовал себя метод акустической эмиссии (АЭ), обладающий высокой чувствительностью к развивающимся дефектам. В настоящее время стандартные решения поставленной задачи в нормативной и технической документации отсутствуют [1, 2]. Национальный стандарт ГОСТ Р 52727 и Правила ПБ 03-593-03 устанавливают требования к максимальной скорости изменения нагрузки. Испытательная нагрузка для сосудов давления может возрастать не более чем на  $P_{\max}/20$  МПа за одну минуту, где  $P_{\max}$  – максимальное испытательное давление, МПа. Повышение скорости изменения нагрузки увеличивает уровень шумов [3], поэтому в каждом конкретном случае предельное допустимое значение скорости выбирают таким образом, чтобы уровень шумов на входе предварительного усилителя не превышал 20 мкВ.

В результате ударного воздействия в объекте контроля возникают упругие колебания [4] в широкой полосе частот с амплитудой в сотни милливольт, что существенно превышает характерную амплитуду АЭ-сигналов материала. При этом в течение времени затухания колебаний  $\tau_a$  АЭ-система не способна регистрировать АЭ-сигналы, источниками которых являются изменения структуры материала объекта контроля [5, 6]. При ударном нагружении в материале возникают и неупругие процессы, такие как рост и трение берегов трещины, пластическая деформация и др. [7, 8], создающие неравновесное состояние контролируемого объекта. Равновесное состояние восстанавливается с постоянной времени  $\tau_r$ .

Применение АЭ-контроля при ударном нагружении конструкций возможно, если дли-

тельность переходного процесса  $\tau_r$  превышает характерное время затухания  $\tau_a$ . Для создания подобной технологии необходимы сведения о факторах, оказывающих влияние на временные характеристики  $\tau_r$  и  $\tau_a$  переходных процессов [9, 10].

Целью работы является определение временных параметров процессов, возникающих при ударном воздействии на объект для обнаружения развивающихся трещин АЭ-методом.

### Постановка эксперимента

Для исследований выбран хрупкий материал – стекло, которое характеризуется высокой чувствительностью к ударным нагрузкам и склонностью к хрупкому разрушению. Образцы толщиной 2 мм изготавливались из листового силикатного стекла (рис. 1). Для повышения ударной прочности образцы располагались на картонной подложке толщиной 1 мм. Нагружение осуществлялось стальными шариками-бойками, падающими на стеклянный лист под действием силы тяжести в направляющей трубке с высоты 500 мм. Направляющую устанавливали под углом к плоскости образца таким образом, чтобы после удара боек повторно не соприкасался с поверхностью образца.

На пути трещин перпендикулярно к предполагаемому направлению их распространения наклеивались проволочные тензодатчики типа ПКС-12-200. Для измерения динамических деформаций применялась быстродействующая тензометрическая система «Динамика-3». Для исключения влияния тензодатчиков, наклеенных на образцы, все эксперименты повторялись на образцах без тензодатчиков.

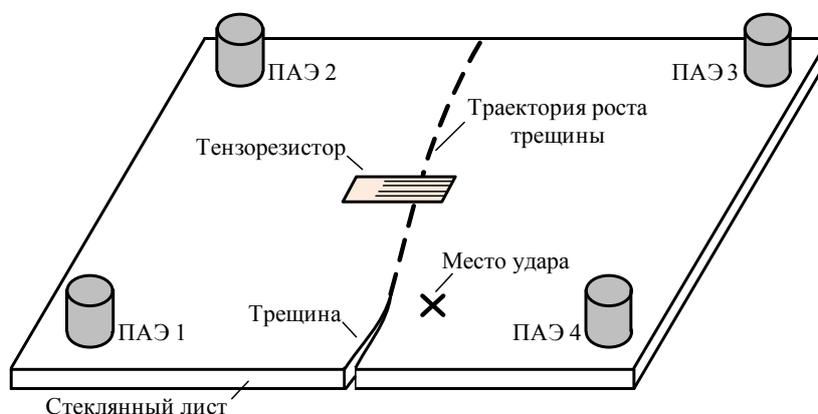


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований АЭ при ударном нагружении образцов

Fig. 1. Scheme of experimental studies of AE under shock loading of samples

Сигналы АЭ регистрировались пьезоэлектрическими преобразователями с полосой пропускания 0,1...0,7 МГц. Преобразователи устанавливались в углах образца и образовывали прямоугольную пьезоантенну. Плоскостная локация источников АЭ осуществлялась по разности времен прихода сигналов на три ближайших преобразователя. Оцифровка и обработка сигналов проводилась системой цифровой акустико-эмиссионной СЦАД-16.03 с частотой дискретизации 2 МГц и пороговым уровнем фиксации не более 10 мкВ на входе предварительного усилителя.

### Экспериментальные результаты и их анализ

После ударного воздействия преобразователи АЭ регистрируют колебания (рис. 2), амплитуда которых монотонно убывает во времени по закону

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

где  $U_0 = 12,8$  МВ – начальная амплитуда колебаний после удара;  $\tau = 4,3$  мс – характерное время затухания колебаний.

Коэффициенты  $U_0$  и  $\tau$  в уравнении (1) получены после обработки экспериментальных данных (см. рис. 2) методом наименьших квадратов с коэффициентом корреляции 0,8. В эксперименте в соответствии с (1) амплитуда колебаний уменьшалась ниже порога фиксации аппаратуры (10 мкВ) через 30 мс после удара. Спектральный состав акустического сигнала широкополосный с локальным максимумом на частоте, равной  $(110 \pm 10)$  кГц и соответствующей частоте максимальной чувствительности преобразователя [11].

Зависимость относительных деформаций на берегах трещины от времени приведена на рис. 3. Для наглядности и обоснования логарифмической зависимости график построен в полулогарифмическом масштабе. Коэффициент корреляции деформаций и логарифма времени на участке релаксации напряжений составляет 0,98. В момент удара деформации увеличиваются до 50 млн<sup>-1</sup>. После этого в течение 4 мс регистрируются колебания с частотой 1,6 кГц и монотонно убывающей амплитудой. Описанная временная зависимость характерна для переходных процессов второго рода [12].

После затухания колебаний с 4-й мс деформации берегов трещины монотонно убывают. Данный процесс наилучшим образом аппроксимируется логарифмической функцией времени,

которая в полулогарифмических осях имеет вид прямой линии (см. рис. 3):

$$\varepsilon(t) = -\varepsilon_0 \log_{10}\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0 = 26$  млн<sup>-1</sup> – максимальный уровень деформаций;  $\tau = 400$  с – характерное время переходного процесса.

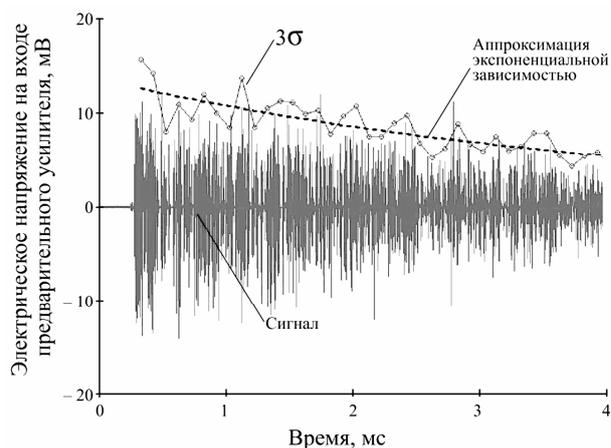


Рис. 2. Сигнал, зарегистрированный АЭ-системой при ударе бойка, где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение сигнала на интервале времени 100 мкс

Fig. 2. The signal registered by the AE system when the striker strikes, where  $\sigma$  is the standard deviation of the signal over a time interval of 100 mks

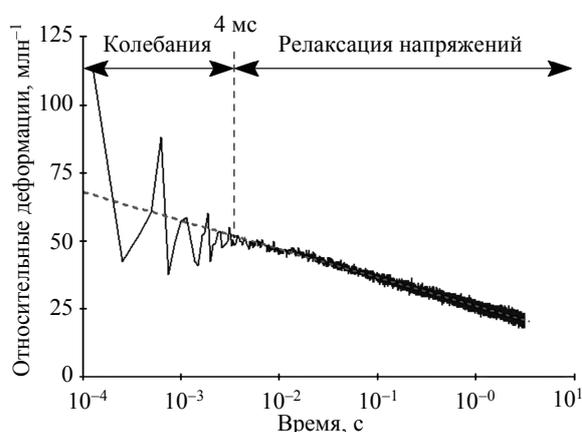


Рис. 3. Зависимость относительных деформаций образца от времени в полулогарифмическом масштабе

Fig. 3. Dependence of the relative deformations of the sample on the time on a semi-log scale

Коэффициенты аппроксимации в уравнении (2) получены методом наименьших квадратов и усреднены по 10 ударам. Таким образом, через 4 мс после удара наблюдается процесс релаксации деформаций с характерным масштабом времени, равным 400 с. Смещения

кромки трещины зафиксированы видеокамерой. После удара кромки смещаются относительно друг друга по типу продольного сдвига на 0,1 мм, при этом время возвращения кромок в начальное состояние составляет не более 0,4 с.

После затухания колебаний, вызванных ударом, регистрируются дискретные сигналы АЭ, имеющие характерную импульсную форму (рис. 4). Спектральный состав [13, 14] сигналов

в стекле определяется амплитудно-частотной характеристикой преобразователя. Спектр сигналов равномерно распределен в области частот 66...280 кГц. У незначительного количества сигналов обнаруживаются локальные максимумы в высокочастотной области на частоте около 550 кГц. Закономерности появления таких сигналов и их связь с ростом трещины не установлены. Доля высокочастотных сигналов в общем потоке не превышает 1 %.

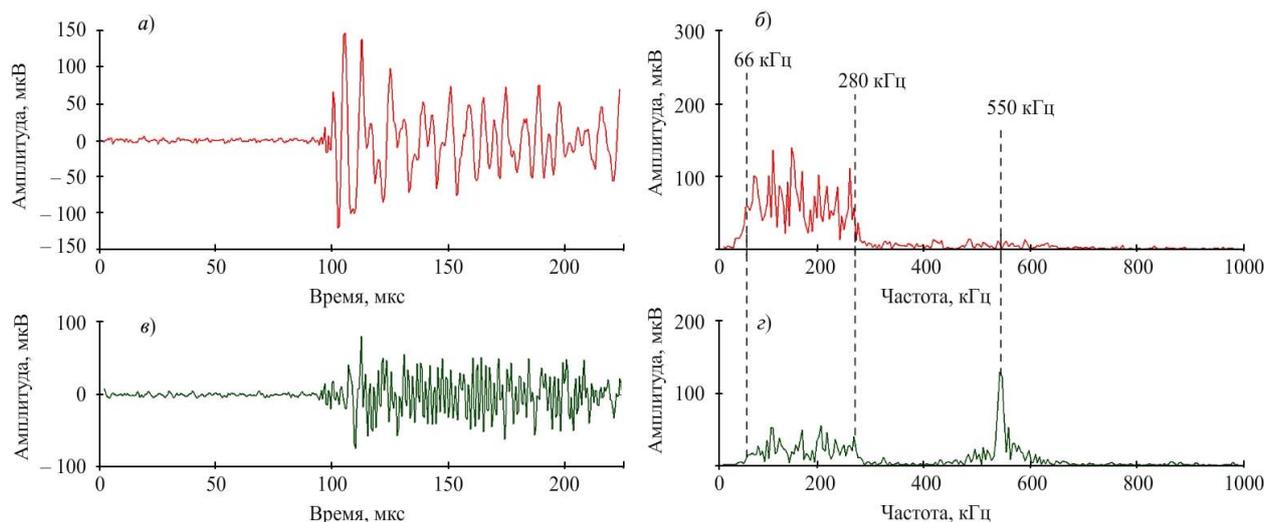


Рис. 4. Два характерных сигнала АЭ, зарегистрированные в разные моменты времени после затухания колебаний от удара: а, в – форма; б, г – спектр

Fig. 4. Two characteristic AE signals registered at different points in time after the damping of oscillations due to the impact: a, в - shape; б, г - spectrum

Зависимость числа сигналов от времени в серии последовательных ударов описывается ступенчатой функцией (рис. 5, а). У нижнего основания каждой «ступеньки» располагается сигнал ударного воздействия. Вертикальная грань «ступеньки» (см. рис. 5, б) формируется дискретными сигналами АЭ, которые вызваны смещением кромок трещины и фиксируются на интервале времени 0,04...0,4 с. Сигналы на этом интервале регистрируются только при ударе по образцу с трещиной и не связаны с видимым увеличением ее длины. Основной механизм их формирования – разрушение кромок трещины в процессе возвращения в первоначальное состояние [15]. При ударах, вызывающих видимое увеличение длины трещины, наблюдаются сигналы на интервале времени 0,4...200 с, которые визуальнo проявляются на графиках в виде размытия горизонтальной грани «ступеньки» (см. рис. 5, в).

На зависимости числа сигналов от времени, построенной в полулогарифмическом масштабе,

выделяются две области (рис. 6). Время отсчитывается от сигнала, вызванного ударом, который на графике не представлен. Непрерывные сигналы – «хвосты» – представляют собой монотонно затухающие колебания, возбужденные ударом [16]. Эти сигналы регистрируются в течение 30 мс, после чего обнаруживаются дискретные сигналы АЭ материала. Зависимость их числа от времени аппроксимирована логарифмической зависимостью с коэффициентом корреляции 0,94. Значение коэффициента корреляции [17] меньше 0,99 связано с наличием излома зависимости на интервале времени 0,2...0,4 с.

Для повышения статистической значимости результатов экспериментальных данных рассчитана интегральная функция вероятности распределения задержек времени между регистрируемыми сигналами АЭ и сигналом ударного воздействия по 63 ударам с общим количеством сигналов более 1000 [18]. Непрерывные сигналы («хвосты» ударного воздействия) исключены из рассмотрения.

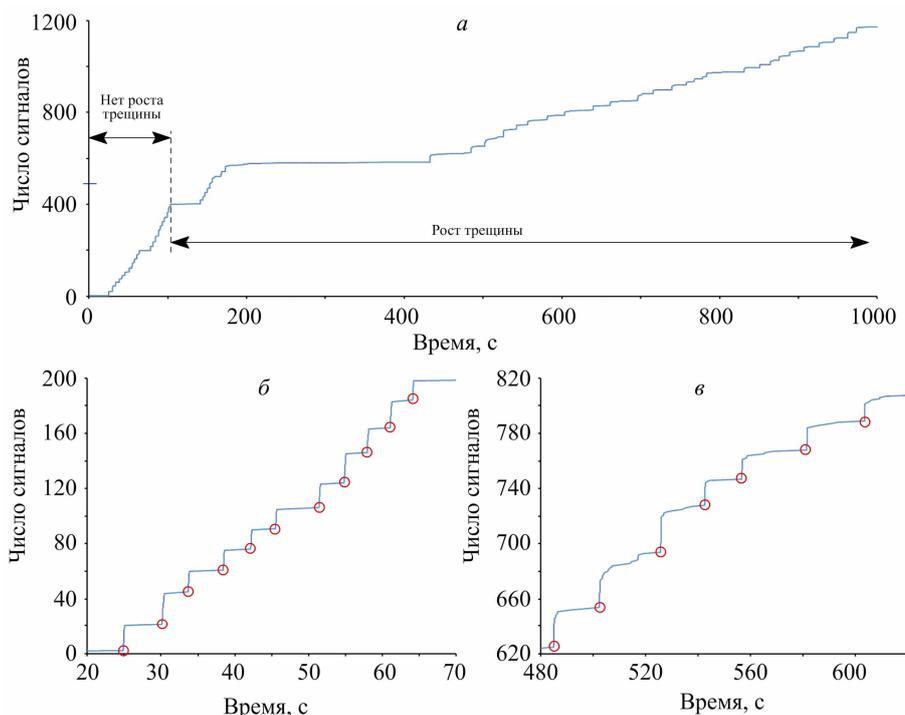


Рис. 5. Зависимость числа сигналов от времени для серии последовательных ударов: а – весь эксперимент; б – без видимого увеличения длины трещины; в – с видимым увеличением длины трещины

Fig. 5. Dependence of the number of signals on time for a series of consecutive blows: а – the whole experiment; б – without a visible increase in the length of the crack; в – with a visible increase in crack length

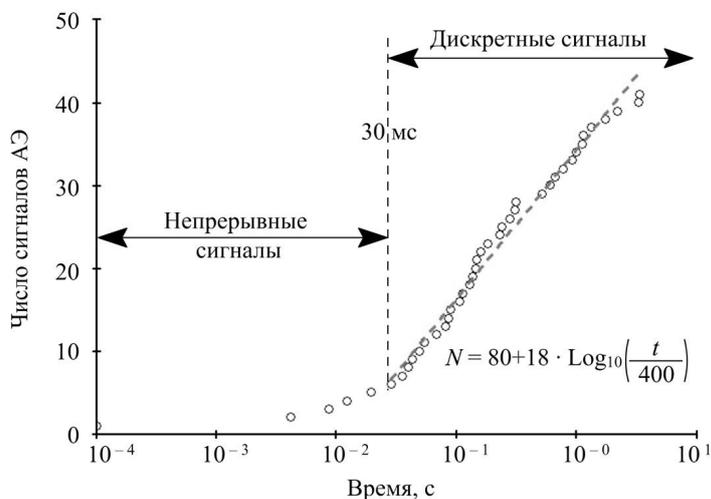


Рис. 6. Зависимость числа сигналов АЭ от времени при одном ударе в полулогарифмическом масштабе времени и результат аппроксимации

Fig. 6. Dependence of the number of AE signals on time at one hit in the semi-logarithmic time scale and the result of approximation

### Анализ результатов

На зависимости (рис. 7, а), построенной в полулогарифмическом масштабе, наблюдаются три временных интервала, отличающихся разным характером зависимости. На начальном интервале времени в течение 25 мс непрерыв-

ные затухающие колебания превышают порог фиксации каналов АЭ-системы, поэтому сигналы дискретной АЭ не регистрируются [19].

Поток сигналов АЭ на интервале 25...350 мс характеризуется экспоненциальным законом распределения временных интервалов с коэф-

коэффициентом корреляции 0,999 (см. рис. 7, б). Плотность вероятности, параметры которой определены по экспериментальным данным методом наименьших квадратов, определяется выражением

$$p(t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

где  $\tau = 0,08$  с – характерное время регистрации АЭ-сигналов.

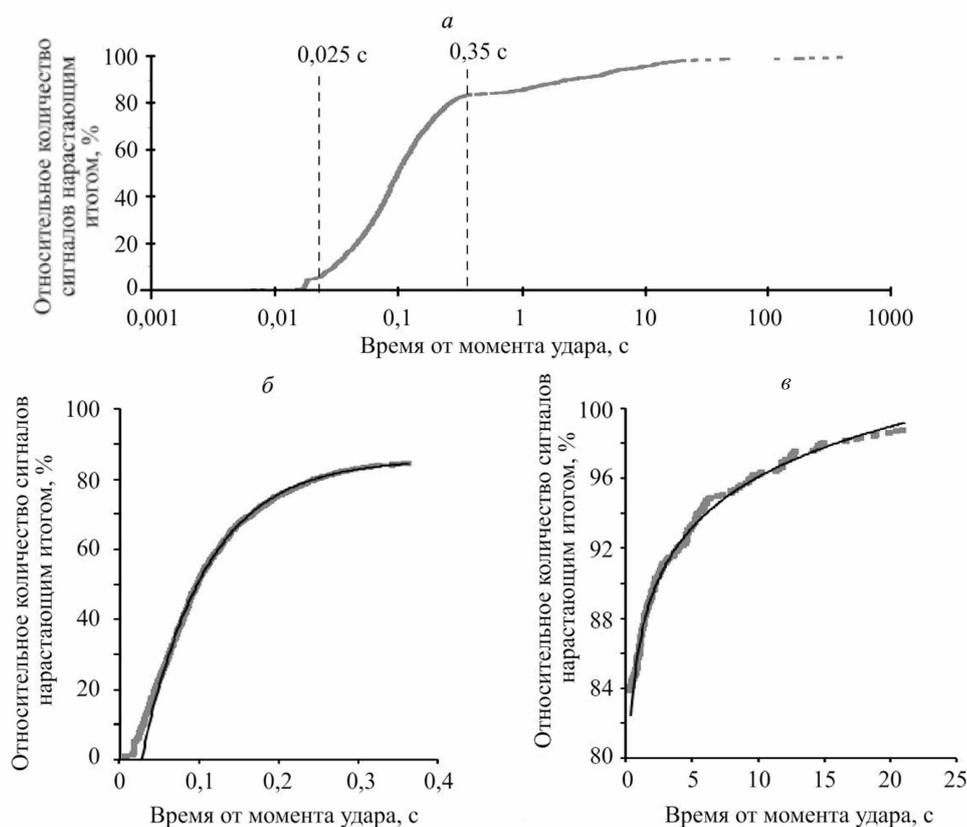


Рис. 7. Зависимость количества АЭ-сигналов от времени регистрации относительно времени регистрации сигнала ударного воздействия, построенная по 63 ударам в полулогарифмическом масштабе (а); зависимости для сигналов, регистрируемых в интервале времени 0,025...0,35 с (б) и в интервале 0,3520 с (в)

Fig. 7. Dependence of the number of AE signals on the time of registration relative to the time of registration of the shock signal, built on 63 semi-log beats (a); dependencies for signals recorded in the time interval of 0.025 ... 0.35 s (б) and in the range of 0.3520 s (в)

Отклонение экспериментальной зависимости от теоретической на времени меньше 0,05 с связано (см. рис. 7, б) с влиянием «мертвого» времени системы. Часть дискретных АЭ-сигналов не могут быть приняты системой, поскольку на входе преобразователя затухающие колебания не опустились ниже уровня фиксации. Доля пропущенных дискретных сигналов оценивается по разности теоретической (3) и экспериментальной (см. рис. 7, б) зависимостей и не превышает 30 %.

После 0,35 с экспериментальные данные (см. рис. 7, в) не принадлежат экспоненциальному распределению (коэффициент корреляции составляет от 0,84 до 0,86), зависимость относительного количества сигналов от времени удовлетворительно описывается логарифмической

зависимостью (см. рис. 7, в), коэффициент корреляции которой с экспериментальными данными превышает 0,99:

$$P(t) = a + b \cdot \log\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad (4)$$

где  $a = 111$  %,  $b = 9,6$  % – коэффициенты аппроксимации, полученные методом наименьших квадратов;  $\tau = 400$  с – характерное время регистрации АЭ сигналов.

В среднем после каждого удара регистрировались от 7 до 39 сигналов дискретной АЭ (среднее значение равно 18, среднее квадратичное отклонение – 7). Сигналы, появляющиеся через 0,35 с после удара, связаны с визуально обнаруживаемым подрастанием трещины. При ударах, которые не вызывают видимых измене-

ний в области концентратора или прироста трещины, доля таких сигналов не превышает 0,5 %. В экспериментах из 24 ударов только в одном были зафиксированы два сигнала через 0,35 с после удара при общем количестве сигналов более 400.

При ударах, вызывающих увеличение длины трещины, доля «замедленных» сигналов, регистрируемых через 0,35 с после удара, изменяется с 7 до 39 % (среднее значение равно 19 %, среднее квадратическое отклонение 7 %). Таким образом, временная селекция АЭ-сигналов при ударном нагружении позволяет идентифицировать три механизма формирования упругих колебаний.

Первый механизм – упругие монотонно затухающие колебания, вызванные воздействием бойка на образец, регистрируемые в течение 0,025 с. Время затухания зависит от свойств материала основания, на котором расположен образец.

Второй механизм связан с разрушением кромок концентратора и кромок трещины при ударном нагружении. Сигналы этой группы регистрируются на интервале времени 0,025...0,35 с. Время появления этих сигналов совпадает со временем возвращения кромок трещины в исходное состояние, зафиксированное видеокamerой (рис. 8).

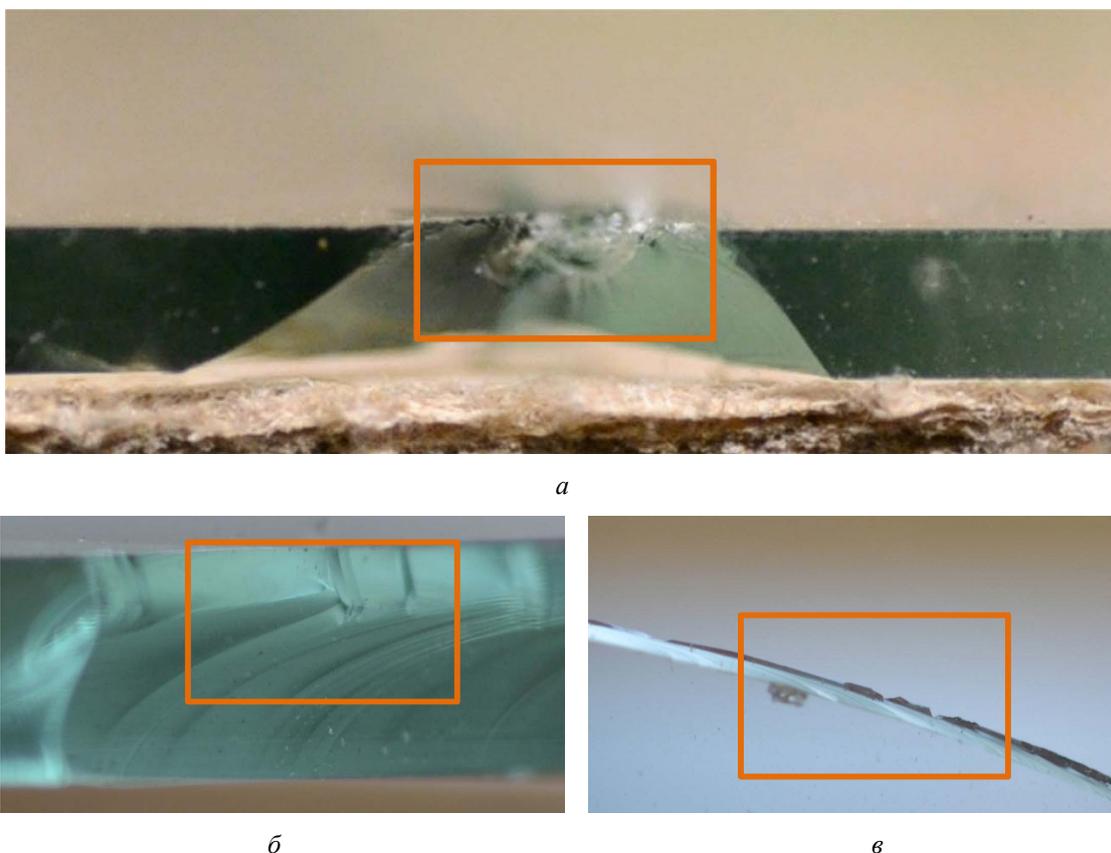


Рис. 8. Фотографии смещения кромок трещины в момент удара (а) и разрушенные кромки трещины (б, в)

Fig. 8. Photographs of the crack edge displacement at the moment of impact (a) and fracture of fracture edges (b, c)

Последним механизмом АЭ является замедленное разрушение, а возникающие при этом АЭ-сигналы регистрируются с 0,35-й с после удара и в течение более 400 с. Особенностью потока сигналов является логарифмическая зависимость суммарного счета от времени и, как показано в [20], нестационарность потока событий АЭ. Сигналы формируют идентифицируемые по времени регистрации группы, внутри которых распределение интервалов описывается экспоненциальным законом распределения.

### Основные выводы

Проведены ударные испытания образцов из силикатного стекла с трещинами. Контроль процессов развития трещин выполнялся АЭ-методами в частотном диапазоне 100...700 кГц и динамической тензометрии с частотой дискретизации 64 кГц. Проанализированы временные характеристики сигналов АЭ. Установлено наличие трех разных механизмов формирования потока сигналов: упругий удар, трение берегов трещины и рост трещины.

На первом этапе 0...30 мс регистрируются монотонно убывающие по амплитуде непрерывные АЭ-сигналы, вызванные упругим ударом. Данный поток не имеет отношение к развитию трещины и определяет «мертвое» время, в течение которого невозможна регистрация информативных АЭ-сигналов материала. Уменьшение длительности этих сигналов может быть обеспечено путем демпфирования объекта контроля, для этого в экспериментах использовалась картонная подкладка под образцом.

При ударе трещина деформируется по типу продольного сдвига с максимальным смещением 0,1 мм и возвращается в исходное состояние в течение 300-400 мс после удара. Данный процесс идентифицируется по сигналам дискретной АЭ, распределение временных интервалов между которыми удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией.

На последней стадии, продолжительность которой составляет более 400 с, наблюдается нестационарный поток событий АЭ. Распределение временных интервалов близко к логарифмическому. При этом поток состоит из идентифицируемых групп, внутри которых распределения временных интервалов также описываются экспоненциальным законом. Поток обнаруживается только при увеличении длины трещины и связан с замедленным разрушением кромок после увеличения ее длины. Описываемый поток сигналов может быть использован для обнаружения и идентификации развивающихся трещин в хрупких материалах при ударном нагружении.

#### Библиографические ссылки

1. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев, К. Л. Комаров, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев, В. Л. Кожемякин, А. Ф. Паньков ; под ред. Л. Н. Степановой. М. : Радио и связь, 2000, 280 с.
2. Муравьев В. В., Степанова Л. Н., Кареев А. Е. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 63–68.
3. Петерсен Т. Б. Акустическая эмиссия при соударении твердых тел. Ч. 1 // Контроль. Диагностика. 2010. № 2. С. 18–24.
4. Щербаков И. П., Куксенко В. С., Чмель А. Е. Накопительная стадия сигналов акустической эмиссии при компрессионном и ударном разрушении гранита // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2002. № 4. С. 78–82.
5. Особенности инициации ударного разрушения в керамике  $\text{SiO}_2$  / Р. И. Мамалимов, А. Б. Синани, А. Е. Чмель, И. П. Щербаков // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, №1 0. С. 61–67.
6. Степанова Л. Н., Серьезнов А. Н., Муравьев В. В., Бобров А. Л., Чаплыгин В. Н., Лебедев Е. Ю., Кабанов С. И., Катарушкин С. А., Кожемякин В. Л. Связь спектра сигналов АЭ с процессом усталостного развития трещин в металлических образцах // Контроль. Диагностика. 1999. № 2. С. 5–8.
7. Степанова Л. Н., Чернова В. В. Анализ структурных коэффициентов сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении образцов из углепластика с ударными повреждениями // Контроль. Диагностика. 2017. № 6. С. 34–41.
8. Бехер С. А., Попков А. А. Применение ударного нагружения для обнаружения трещин в стекле акустико-эмиссионным методом // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 3–8.
9. Быстродействующая диагностическая акустико-эмиссионная система / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, В. Л. Кожемякин, А. Е. Ельцов, Е. Ю. Лебедев // Дефектоскопия. 1998. № 7. С. 8–14.
10. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С. Б. Барабанова, В. Л. Кожемякин, С. И. Кабанов // Дефектоскопия. 1997. № 10. С. 79–84.
11. Муравьев В. В., Муравьева О. В. Оценка роста усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 9. С. 24–29.
12. Исследование основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20ГЛ / Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров, К. В. Канифадин, В. В. Чернова // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 6. С. 41–45.
13. Муравьев В. В. Автоматизированные диагностические стенды для продления срока службы литых деталей вагонов // Вестник ИжГТУ. 2013. № 4 (60). С. 98–102.
14. Муравьев В. В. Анализ работы акустико-эмиссионных стендов для контроля литых деталей тележек грузовых вагонов // Железнодорожный транспорт. 2014. № 12. С. 58–60.
15. Муравьев В. В. Сравнительная достоверность акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 3. С. 30–33.
16. Муравьев В. В. Анализ результатов работы по продлению срока службы литых деталей тележек с использованием метода акустической эмиссии // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 4. С. 32–35.
17. Смирнов А. Н., Данилов В. И., Ожиганов Е. А., Горбатенко В. В., Муравьев В. В. Зависимость локальных деформаций и полей внутренних напряжений от способа сварки конструкционной стали ВСтЗсп. Влияние способа сварки на механические характеристики и параметры акустической эмис-

сии стали ВСтЗсп // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 59–67.

18. Муравьев В. В., Муравьева О. В. Физические основы и технологии акустико-эмиссионного контроля металлоконструкций на железнодорожном транспорте : учеб. пособие. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. 392 с.

19. Бобров А. Л., Попков А. А. Восстановление измеряемых характеристик источников акустической эмиссии при контроле металлоконструкций в машиностроении // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 3. С. 31–37.

20. Муравьев В. В. Анализ результатов эксплуатации акустико-эмиссионных стендов для контроля литых деталей тележек железнодорожных грузовых вагонов // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1 (21). С. 136–143.

### References

1. Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Murav'ev V.V., Komarov K.L., Kabanov S.I., Lebedev E.Yu., Kozhemyakin V.L., Pan'kov A.F. *Akustiko-emissionnaya diagnostika konstruktssii* [Acoustic-emission diagnostics of structures]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000, 280 p. (in Russ.).

2. Stepanova L.N., Murav'ev V.V., Kareev A.E. [Evaluation of the Danger Degree of Fatigue Cracks in the Acoustic Emission Testing of Cast Pieces of a Freight-Car Truck]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2003, vol. 39, no. 1, pp. 54-59.

3. Petersen T.B. [Acoustic emission in the collision of solids. P. 1]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2010, no. 2, pp. 18-24 (in Russ.).

4. Shcherbakov I.P., Kuksenko V.S., Chmel' A.E. [Acoustic emission accumulation stage in compression and impact rupture of granite]. *Journal of Mining Science*, 2002, vol. 48, no. 4, pp. 656-659.

5. Mamalimov R.I., Sinani A.B., Chmel' A.E., Shcherbakov I.P. [Initiation of impact fracture in SiO<sub>2</sub> ceramics. *Technical Physics*]. *The Russian Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 58, no. 10, pp. 1453-1458.

6. Stepanova L.N., Ser'eznov A.N., Murav'ev V.V., Bobrov A.L., Chaplygin V.N., Lebedev E.Yu., Kabanov S.I., Katarushkin S.A., Kozhemyakin V.L. [The relationship of the spectrum of AE signals with the process of fatigue crack development in metal samples]. *Kontrol'. Diagnostika (Testing. Diagnostics)*, 1999, no. 2, pp. 5-8 (in Russ.).

7. Stepanova L.N., Chernova V.V. [Analysis of the structural coefficients of acoustic emission signals under static loading of CFRP specimens with impact damage]. *Kontrol'. Diagnostika (Testing. Diagnostics)*, 2017, no. 6, pp. 33-41 (in Russ.).

8. Bekher S.A., Popkov A.A. [The use of shock loading for the detection of cracks in the glass acoustic emission method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, no. 11, pp. 3-8 (in Russ.).

9. Ser'eznov A.N., Murav'ev V.V., Stepanova L.N., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., Eltsov A.E., Lebedev E.Yu. [A high-speed acoustic-emission diagnostic system]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1998, vol. 34, no. 7, pp. 481-485.

10. Ser'eznov A.N., Murav'ev V.V., Stepanova L.N., Barabanova S.B., Kozhemyakin V.L., Kabanov S.I. [Localization of acoustic emission signals in metal structures]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1997, vol. 33, no. 10, pp. 726-730.

11. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., [Evaluation of the growth of fatigue cracks in the side frames of carriages of freight cars by acoustic emission method]. *Deformaciya i razrushenie materialov*, 2016, no. 9, pp. 24-29 (in Russ.).

12. Stepanova L.N., Bobrov A.L., Kanifadin K.V., Chernova V.V. [Investigation of the main parameters of acoustic emission signals during static and cyclic testing of samples from steel 20GL]. *Deformaciya i razrushenie materialov*, 2014, no. 6, pp. 41-45 (in Russ.).

13. Murav'ev V.V. [Automated diagnostic stands for extending the service life of cast car parts]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2013, no. 4, pp. 98-102 (in Russ.).

14. Murav'ev V.V. [Analysis of acoustic emission stands for control of cast parts of freight car trucks]. *Zheleznodorozhnyj transport*, 2014, no. 12, pp. 58-60 (in Russ.).

15. Murav'ev V.V. [Comparative accuracy of acoustic emission control of side frames and bogie beams of freight car trucks]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2014, no. 3, pp. 30-33 (in Russ.).

16. Murav'ev V.V. [Analysis of the results of the work on the extension of the service life of cast parts of carts using the method of acoustic emission]. *Vagonny i vagonnoe hozyajstvo*, 2014, no. 4, pp. 32-35 (in Russ.).

17. Smirnov A.N., Danilov V.I., Ozhiganov E.A., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. [Dependence of local deformations and internal stress fields on the method of welding of structural steel VSt3sp. Influence of the welding method on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of the steel VSt3sp]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 11, pp. 59-67 (in Russ.).

18. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V. *Physical bases and technologies of acoustic emission control of steel structures in railway transport* [Physical bases and technologies of acoustic emission control of metal constructions on railway transport]. Izhevsk, IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova Publ., 2014, 392 p. (in Russ.).

19. Bobrov A.L., Popkov A.A. [Reconstruction of Measured Characteristics of Sources of Acoustic Emission During Testing of Metal Structures in Mechanical Engineering]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, T. 21, no. 3, pp. 31-37 (in Russ.).

20. Murav'ev V.V. [Analysis of operation of acoustic emission stands to control cast parts of trucks of railway freight cars]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, no. 1, pp. 136-143 (in Russ.).

## Temporal Characteristics of the Flow of Acoustic Emission Signals in the Development of Cracks in Glass under Shock Loading

S.A. Bekher, DSc in Engineering, Associate Professor, Siberian State University of Railways, Novosibirsk, Russia

A.A. Popkov, Siberian State University of Railways, Novosibirsk, Russia

Currently, there are no technical solutions for the implementation of AE-control of objects under dynamic loads. Expanding the scope of the application of the method, for example, to monitor objects in the process of shock loading requires fundamental research into the laws of AE caused by dynamic effects. The aim of the work is to determine the temporal parameters of acoustic emission arising in an object as a result of impact, in order to detect developing cracks and fractures of a fragile nature.

During the experiment, flat samples of silicate glass were loaded with blows from steel strikers, freely falling from a height of 500 mm. Crack development was monitored using a high-speed strain gauge system, AE instrumentation and a video camera.

The shock effect excited in the object elastic damped oscillations, which were also recorded by acoustic emission and strain gauge systems. The characteristic frequency of the tensor signal was 1.6 kHz, and the AE system was 110 kHz. The duration of the decay time of oscillations in the signal of the strain system did not exceed 4 ms, the continuous signal in the AE system decreased below the threshold level (5  $\mu V$ ) during 30 ms.

When a specimen was loaded with a crack, a shift of edges along the type of longitudinal shear by 0.1 mm was observed with a characteristic transition time to the initial state of 0.4 s. Strain gauges mounted perpendicular to the direction of crack development recorded the process of crack deformation relaxation for 400 s. The dependence of the number of recorded signals on time was satisfactorily described by a logarithmic law. After the attenuation of continuous AE signals caused by the impact, two consecutive streams of discrete AE signals were observed.

The signals of the first flow were recorded in the interval from 0.03 to 0.35 s and are associated with the displacement of the edges of the crack. The distribution of time intervals between the signals of the first stream is described by the exponential function. The signals of the second flow were recorded in the interval from 0.35 s to 400 s only with an increase in the crack length. The time intervals between the signals of the second stream are distributed according to a logarithmic law, which corresponds to the time dependence of the deformations. The signal flows are non-stationary and are associated with fracture of the edges of the crack, after the redistribution of stresses caused by the increase in its length. Registered AE signals can be used to detect developing cracks under shock loading. The best way to identify them is the methods of time selection in the range from 0.03 to 0.35 s for detecting a developed crack and from 0.35 to 400 s for detecting the processes of crack growth.

**Keywords:** acoustic emission, amplitude, time intervals, dynamic tensometry, shock loading, stress relaxation, crack, fracture.

Получено 18.02.2019

### Образец цитирования

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. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-62-71.

### For Citation

Bekher S.A., Popkov A.A. [Temporal characteristics of the flow of acoustic emission signals in the development of cracks in glass under shock loading]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1. pp. 62-71 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-62-71.