

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.179.16:620.179.143

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА МАССИВОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАСЫПНОГО КОНУСА СТЕКЛОГРАНУЛЯТА¹

© Н. А. Махутов², И. Е. Васильев², В. И. Иванов²,
С. В. Елизаров³, Д. В. Чернов⁴

Статья поступила 17 ноября 2015 г.

Методика кластерного анализа и классификации регистрируемых массивов данных акустической эмиссии (АЭ) использована для выделения различных фаз при переходе от регулярного к лавинообразному процессу накопления повреждений на физической имитационной модели. Такие фазы накопления повреждений моделировали в процессе формирования насыпного конуса стеклогранулята. Их регистрацию осуществляли системой АЭ контроля, синхронизированной с камерой высокоскоростной видеосъемки.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; импульс АЭ; дескриптор; регистрация; стеклогранулят.

Проблема идентификации источников сигналов акустической эмиссии (АЭ) представляет особый интерес, особенно при диагностике элементов изделий из многослойных сложноструктурированных материалов, таких как композиты и сэндвич-панели. При АЭ контроле объектов для отделения механических и электромагнитных шумов в регистрируемых массивах данных от сигналов АЭ, возникающих в процессе деградации и разрушения компонентов многослойной структуры ПКМ, применяют различные способы фильтрации регистрируемых импульсов. Наиболее широкое применение получила диаграмма Капистрано [1], математические способы обработки регистрируемых потоков АЭ информации: вейвлет-преобразования [2 – 4] и нейронные сети [5 – 6].

В данной работе показано применение разработанной методики кластерного анализа и классификации регистрируемых сигналов АЭ [7]. Она позволяет в ходе акустико-эмиссионного контроля переходных процессов идентифицировать источники излучения регистрируемых массивов импульсов. Исследование процессов накопления повреждений с применением акустико-эмиссионного контроля на имитационных физических моделях и образцах современных конструкционных материалов, в частности полимерных

композиционных материалов (ПКМ), является одним из перспективных направлений, разрабатываемых в Институте машиноведения РАН в последние годы [7 – 11].

Выделение различных фаз при переходе от регулярного к лавинообразному процессу накопления повреждений диагностируемой системы — важный аспект при построении адекватных математических моделей переходных процессов при циклическом деформировании объектов, сопровождающихся необратимыми преобразованиями и деградацией структуры материалов, обусловленными переходом от накопления повреждений к зарождению микротрещин, их развитию, объединению в магистральные макротрещины с последующим скачкообразным прорастанием. Аналогичные процессы происходят при усталостном разрушении, когда прорастание трещины вызвано многократными скачками — переходами системы из неравновесного в субравновесное состояние.

Задача исследований состояла в том, чтобы с применением разработанной программы кластерного анализа в ходе акустико-эмиссионной диагностики с использованием синхронизированной высокоскоростной видеосъемки выявить состояния исследуемой физической системы, характеризующиеся излучением специфических импульсов АЭ, которые бы свидетельствовали о кардинальных изменениях, возникающих в результате нарушения устойчивого состояния системы, переходе в активную fazу структурных преобразований, достижении наибольшей активности, последующем замедлении и стабилизации процесса

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00776).

² Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия.

³ ООО «Интерюнис-ИТ», Москва, Россия.

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия; e-mail: vie01@rambler.ru

или продолжении его интенсивного развития до достижения критического состояния.

Методика кластерного анализа и классификации импульсов АЭ

При разработке методики и программного продукта для классификации регистрируемых массивов данных предполагали, что сигналы АЭ, порожденные одним и тем же по природе источником акустической эмиссии, схожие по форме и спектру, с высокой долей вероятности излучаются подобными источниками и, напротив, сигналы, форма и спектр которых существенно отличаются, скорее всего, излучаются различными по природе источниками АЭ. Программный продукт разрабатывали с учетом специфики распространения акустических волн в используемых имитационных моделях.

В основу алгоритма классификации сигналов АЭ положен кластерный подход, позволяющий в поле экспериментально установленных значений параметров (дескрипторов), характеризующих различные акусто-эмиссионные свойства регистрируемых импульсов, проводить их классификацию. Сигналы, схожие по ряду заранее выбранных признаков, относят к одному и тому же кластеру. При этом объектом кластеризации явились импульсы АЭ, а мерой их схожести — установленные при тестировании границы локализации их параметров на графике дескрипторов. Под термином дескрипторы (описатели) применительно к выбранным параметрам регистрируемых импульсов АЭ понимали идентификаторы, позволяющие в границах заранее установленных параметров распознавать входящие сигналы, помещая их в кластеры, свойственные определенным источникам АЭ.

Как показали проведенные исследования [7], предложенный подход позволяет во входном потоке данных выявлять наличие различных типов источников АЭ. Причем анализ регистрируемых сигналов возможен непосредственно в реальном времени и не требует предварительной фильтрации данных.

Для решения рассматриваемой задачи при регистрации входящих потоков данных акусто-эмиссионной системой использовали алгоритм распознавания сигналов по форме затухающей волны. В качестве существенных признаков, наиболее информативных для распознавания сигналов по форме волн АЭ импульсов, применяли комбинированные параметры, отражающие скорость затухания импульса и усредненную частоту выбросов.

Основные критериальные параметры, применяемые при кластерном анализе и классификации регистрируемых массивов данных, включают максимальную амплитуду импульса (u_m), его длительность (t_u), число выбросов (N_u) от момента пересечения импульсом уровня порога дискриминации (u_{th}) до ухода сигнала под порог, а также комплексные параметры u_m/N_u ,

N_u/t_u , характеризующие скорость затухания импульса и усредненную частоту выбросов.

С применением преобразователей АЭ, объединенных в локационные группы, определяли место положения источников излучения регистрируемых сигналов. Строили графики кумулятивного накопления импульсов АЭ (N_Σ) для каждого канала и отдельно для локируемых сигналов, а также регистрировали активность сигналов, т.е. их количество в единицу времени (\dot{N}_Σ). Оценивали динамику изменения амплитуды, длительности, счета выбросов в импульсах и величины параметра u_m/N_u локированных сигналов во времени.

Методику кластерного анализа и классификации регистрируемых массивов данных АЭ отрабатывали в ходе экспериментов по формированию насыпного конуса стеклогранулята. Применение такой физической имитационной модели накопления повреждений позволяло получать большие массивы информации, моделировать различные формы импульсов АЭ в ходе формирования насыпного конуса, варьировать скорость его роста, использовать для регистрации происходящих процессов не только акусто-эмиссионный контроль, но и высокоскоростную видеосъемку, синхронизированную с акусто-эмиссионной системой.

Системы акусто-эмиссионного контроля и видеорегистрации

Для регистрации сигналов АЭ использовали четырехканальную многопараметрическую акусто-эмиссионную систему A-Line 32D фирмы ООО «Интерюнис», предварительные усилители сигналов ПАЭФ-014 с коэффициентом усиления 26 дБ и резонансные преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) R15α фирмы Mistras. Применяемые ПАЭ позволяли регистрировать низкоэнергетические сигналы в переходных процессах, сопровождающихся большими массивами импульсов с уровнем амплитуды, близким к уровню шумов акусто-эмиссионной системы.

Собственные шумы электрического тракта АЭ системы A-Line 32D, включающего ПАЭ, предусилитель, блок сбора и предварительной обработки информации, составляли 26 дБ. Для исключения влияния внешних шумов порог дискриминации сигналов АЭ был повышен до $u_{th} = 27,7$ дБ.

Видеорегистрацию процесса формирования насыпного конуса осуществляли с применением высокоскоростной видеокамеры «Видеоспринт», синхронизированной с акусто-эмиссионной системой A-Line 32D, что позволило просматривать потоки видеоизображений и массивы регистрируемых импульсов АЭ в режиме пост-обработки при анализе переходных процессов формирования насыпного конуса стеклогранулята.

Регистрация неустойчивых переходных процессов при формировании насыпного конуса стеклогранулята

Методику кластерного анализа и классификации регистрируемых массивов данных АЭ тестировали в ходе моделирования неустойчивых переходных процессов, возникающих при формировании насыпного конуса стеклогранулята в результате падения потока гранул из контейнера питателя на поверхность листового стекла.

Процессы истечения стеклогранулята и формирования насыпного конуса регистрировали с помощью акусто-эмиссионной системы A-Line 32D, синхронизированной с камерой «Видеоспринт» посредством программного продукта “LabVIEW”.

В качестве сыпучего материала для проведения экспериментов использовали стеклогранулят с размером гранул 100 – 200 мкм. Контейнером для стеклогранулята служила воронка, изготовленная из плотной ложеной бумаги. Диаметр выходного отверстия воронки составлял 2 мм. Во время эксперимента контейнер закрепляли в подвижном зажиме штатива и перемещали относительно поверхности листового стекла по мере роста насыпного конуса таким образом, что расстояние между выпускным отверстием воронки и вершиной конуса постоянно сохранялось на уровне 40 мм.

Для локации источников сигналов АЭ, возникающих в результате соударения гранул, их последующего отскока и скатывания по наклонной поверхности формируемого конуса, использовали четыре ПАЭ, расположенные на тыльной стороне стекла. ПАЭ № 2 устанавливали напротив сопла питателя (место падения гранул), а ПАЭ № 1, 3, 4 — на расстоянии 170 мм от него в вершинах равностороннего треугольника с размером стороны 300 мм, образующего с центральным ПАЭ четыре локационные группы: № 1 – 3 – 4, 1 – 2 – 3, 1 – 2 – 4 и 3 – 2 – 4.

Рассмотрим результаты одного из экспериментов, в ходе которого использовали стеклогранулят объемом 260 мл и массой 546 г с размерами гранул 100 – 200 мкм, загруженный в питательный контейнер. Истечение гранул из контейнера продолжалось в течение 190 с эксперимента: с 12-й по 202-ю с включительно. В результате на поверхности стекла образовался насыпной конус правильной формы с диаметром в основании 143 мм, высотой 43 мм и углом нахлона 34°.

На рис. 1 показана координатная локация источников сигналов (а), графики накопления локационных импульсов (б), активности их регистрации каждым каналом (в) и диаграмма дескрипторов u_m/N_i , N_i/t_i (г), на которой выделены кластеры основных типов импульсов АЭ, регистрируемых в процессе формирования насыпного конуса стеклогранулята.

В результате истечения гранулята стекла из контейнера питателя на плоскость листового стекла и

формирования насыпного конуса стеклогранулята каждым каналом АЭ системы было зарегистрировано порядка 27 000 импульсов. При этом суммарное количество локационных импульсов было существенно меньше — $(N_\Sigma)_l = 7672$ ед.

Как видно из рис. 1, б, наибольшее количество источников сигналов регистрировал центральный преобразователь (№ 2), который находился в месте падения гранул на плоскость листового стекла с тыльной стороны. ПАЭ № 1, 3 и 4, находящиеся на расстоянии 170 мм от центрального датчика, локировали на 25 – 30 % меньше источников сигналов, что обусловлено затуханием акустических волн в пластине. Схема расположения преобразователей АЭ показана на рис. 1, а. Отдельными точками отмечены источники импульсов АЭ, регистрируемые в первые секунды эксперимента, когда в результате упругих соударений с плоскостью стекла гранулы разлетались дальше от места падения.

В качестве основного информативного параметра, позволяющего получить наглядное представление о происходящих при формировании насыпного конуса стеклогранулята неустойчивых переходных процессах, может быть использована активность АЭ, динамика изменения которой показана на рис. 1, в. Графическую зависимость $\dot{N}_\Sigma = f(t)$ можно разделить на три этапа. Этап t_1 характеризуется резким возрастанием активности регистрации сигналов. В течение первых 6 с с момента открытия выпускного отверстия питателя (с 12-й по 18-ю с) активность АЭ повысилась до $\dot{N}_\Sigma = 100$ ед/с. Этап t_2 , длиющийся с 22-й по 197-ю с эксперимента, отличается пульсирующими циклическими изменениями активности АЭ с незначительным повышением ее среднего уровня по мере увеличения размеров формируемого конуса. На этом этапе поток гранул из контейнера питателя падал уже на сформировавшийся на первом этапе слой стеклогранулята. Вследствие этого энергия удара падающих гранул на рыхлую поверхность основания насыпного конуса заметно гасилась. По данным видеорегистратора процесс роста конуса сопровождался увеличением его диаметра за счет скатывания и сползания потоков гранул с вершины. Поток гранул, падая на вершину конуса, буквально размывал ее, вызывая массовое скатывание стеклогранулята, периодически сопровождаемое оползнями. Этим обусловлены интенсивные пульсации сигналов АЭ на графике активности, отражающие лавинообразный сход накопившихся массивов стеклогранулята с вершины конуса. Этап t_3 (198 – 202 с) характеризуется резким падением активности сигналов АЭ в течение четырех секунд: с $\dot{N}_\Sigma = 140$ ед/с на 198-й с до полного прекращения их регистрации на 202-й с, когда стеклогранулят перестал поступать из контейнера питателя.

На рис. 1, г в поле дескрипторов $u_m/N_i - N_i/t_i$ выделены три основных кластера локационных импульсов: нижний (Н) — $u_m/N_i = 0 – 1$ мкВ/ед, $N_i/t_i = 10 –$

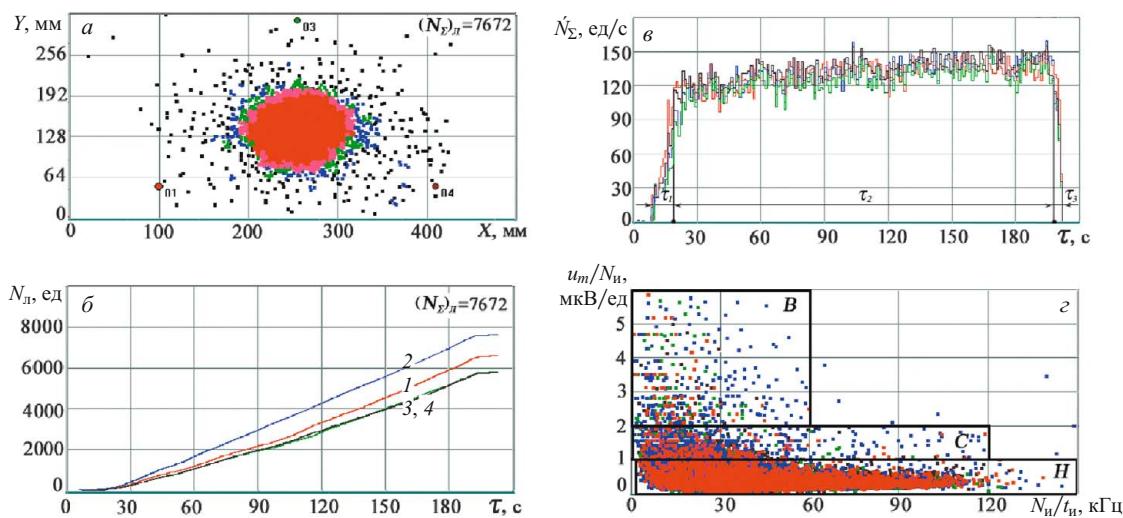


Рис. 1. Графики координатной локации источников сигналов (*а*), их накопления (*б*), активности регистрации импульсов (*в*) и диаграмма дескрипторов (*г*) с кластерами основных типов импульсов (В, С, Н), образовавшихся в процессе формирования насыпного конуса

150 кГц; средний (С) — $u_m/N_i = 1 - 2 \text{ мкВ/ед}$, $N_i/t_i = 0 - 120 \text{ кГц}$; верхний (В): $u_m/N_i = 2 - 6 \text{ мкВ/ед}$, $N_i/t_i = 10 - 60 \text{ кГц}$.

На рис. 2 показана динамика изменения анализируемых параметров локационных импульсов в процессе формирования насыпного конуса стеклогранулята. Значения максимальной амплитуды локационных импульсов и их длительности приведены на рис. 2, *a* и *б*. Графики на рис. 2, *в* и *г* отражают счет выбросов в импульсах и величину дескриптора u_m/N_i регистрируемых сигналов. На гистограммах рис. 2, *д* – *з* представлено дифференциальное распределение значений рассматриваемых параметров в границах полученных выборок при величинах градации $u_m = 2 \text{ дБ}$, $t_i = 100 \text{ мкс}$, $N_i = 10 \text{ ед}$, $u_m/N_i = 1 \text{ мкВ/ед}$.

Как следует из графиков на рис. 2, импульсы с максимальным уровнем амплитуды $u_m = 55 - 60 \text{ дБ}$, длительности $t_i = 56 - 65 \text{ мс}$ и числом выбросов $N_i = 2000 - 2500 \text{ ед}$ регистрировали в первые секунды эксперимента при ударах потока гранул о поверхность листового стекла. Начиная примерно с 30-й с эксперимента, после формирования основания насыпного конуса, когда соударение потока гранул уже происходило с поверхностью рыхлого слоя стеклогранулята, уровень анализируемых параметров регистрируемых импульсов заметно снижался и не превышал $u_m = 52 \text{ дБ}$, $t_i = 50 \text{ мс}$ и $N_i = 1600 \text{ ед}$. Величина параметра u_m/N_i регистрируемых импульсов изменялась от нуля до 6 мкВ/ед. При этом, как видно из рис. 2, *з*, более 82 % всех локационных импульсов входили в нижний кластер с уровнем параметра $u_m/N_i \leq 1 \text{ мкВ/ед}$, примерно 15 % — в средний кластер с уровнем $u_m/N_i = 1 - 2 \text{ мкВ/ед}$ и менее 3 % — в верхний кластер с $u_m/N_i > 2 \text{ мкВ/ед}$.

Синхронизация видео- и акустико-эмиссионной регистрации процесса формирования насыпного кону-

са стеклогранулята позволила выявить основные типы сигналов АЭ и установить природу их возникновения. В ходе эксперимента регистрировали следующие типы импульсов АЭ: первый — от упругого соударения и отскока стеклогранулята от плоскости стекла и поверхности формирующегося конуса; второй — от соударения и внедрения гранул в рыхлый наружный слой формирующегося конуса; третий — от периодического обрушения вершины конуса и сползания наружного слоя под действием собственного веса в результате сдвига слоев.

Использование синхронной регистрации массивов акустико-эмиссионных сигналов и потока видеозображений позволило в процессе мониторинга формирования насыпного конуса стеклогранулята провести точную идентификацию источников основных регистрируемых импульсов.

Для более точной идентификации источников регистрируемых массивов данных в процессе формирования насыпного конуса сопоставили кластеры импульсов на диаграммах дескрипторов и графиках дифференциального распределения, полученных в первые 10 с эксперимента на этапе τ_1 , с кластерами импульсов, фиксируемых в период максимальной активности АЭ в конце этапа τ_2 со 187-ю по 197-ю с включительно.

На рис. 3 показаны графики координатной локации источников сигналов (*а*), их накопления (*б*), активности регистрации импульсов каналами АЭ системы (*в*) и диаграмма дескрипторов u_m/N_i , N_i/t_i (*г*) локационных импульсов, регистрируемых с 12-й по 22-ю с включительно.

На рис. 4 приведены графики изменения максимальной амплитуды (*а*), длительности (*б*), счета выбросов в импульсах (*в*) и параметра u_m/N_i (*г*) регистрируемых сигналов в первые 10 с эксперимента, а также гистограммы *д* – *з* дифференциального распреде-

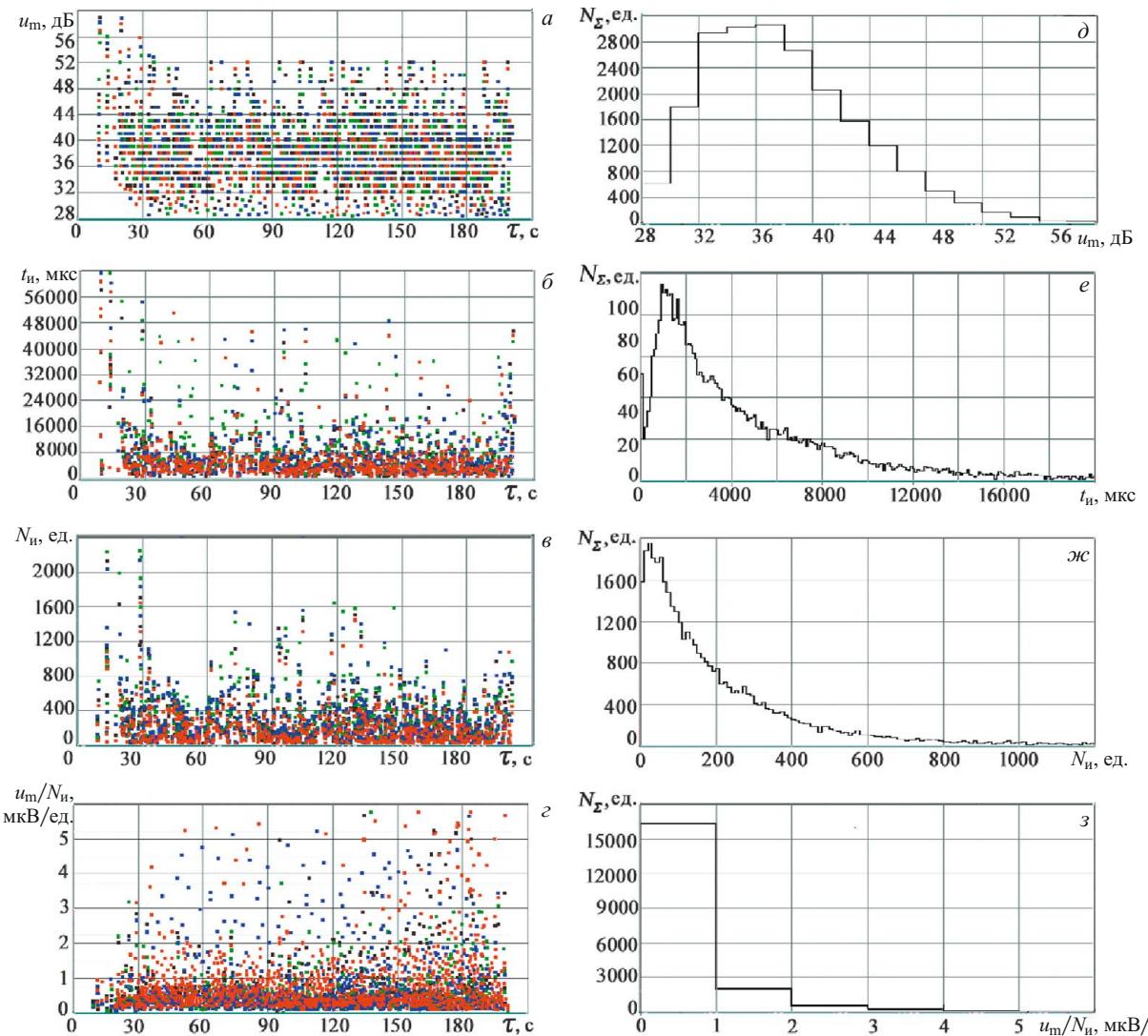


Рис. 2. Графики максимальной амплитуды (*а*), длительности (*б*), счета выбросов (*в*) и параметра u_m/N_u (*г*), регистрируемые в течение эксперимента с 12-й по 202-ю с включительно, и гистограммы их дифференциального распределения (*д* – *з*)

ления рассматриваемых параметров в границах полученных выборок при величинах градации u_m — 2 дБ, t_i — 100 мкс, N_u — 10 ед, u_m/N_u — 1 мкВ/ед.

Как видно из рис. 4, *а* – *в*, в течение первых 5 с регистрируемые импульсы АЭ имели максимальную амплитуду $u_m = 36$ – 60 дБ, наибольшую длительность от 8000 до 65 000 мкс, количество выбросов до 2400 ед. В этот период эксперимента большая часть падающих гранул ударялась непосредственно о поверхность стекла. Из фрагмента видеорегистрации процесса на первой секунде эксперимента (рис. 5), полученного при скорости 500 кадров в секунду, видно, что после первого удара о плоскость стекла гранулы совершили еще несколько отскоков до остановки.

Удаленность разлета гранул от места падения зависела от смещения центра массы относительно точки соударения, веса гранул, скорости удара (накопленной кинетической энергии), поверхности соприкосновения при ударе (грань, ребро, вершина). После первого соударения гранулы могли совершать 3 – 4 отскока от

плоскости стекла, после чего катились по ней, сталкиваясь с другими гранулами, до полной остановки. При этом акусто-эмиссионная система в основном регистрировала импульсы, возникающие в результате упругих соударений с поверхностью стекла. Максимальная амплитуда импульсов катящихся гранул была уже ниже уровня порога дискриминации $u_{th} = 27,7$ дБ.

Величина параметра, характеризующего скорость затухания импульсов АЭ, при соударении гранул со стеклом в первые секунды эксперимента (см. рис. 4, *г*) была минимальной — $u_m/N_u \leq 1$ мкВ/ед. Процесс формирования основания конуса происходил следующим образом. Гранулы после соударения с плоскостью стекла отскакивали от места падения, так что на начальном этапе формировалось основание, напоминающее чашеобразный конус. На рис. 6 представлен фрагмент высокоскоростной съемки формирования основания насыпного конуса, выполненный при скорости 500 кадров в секунду.

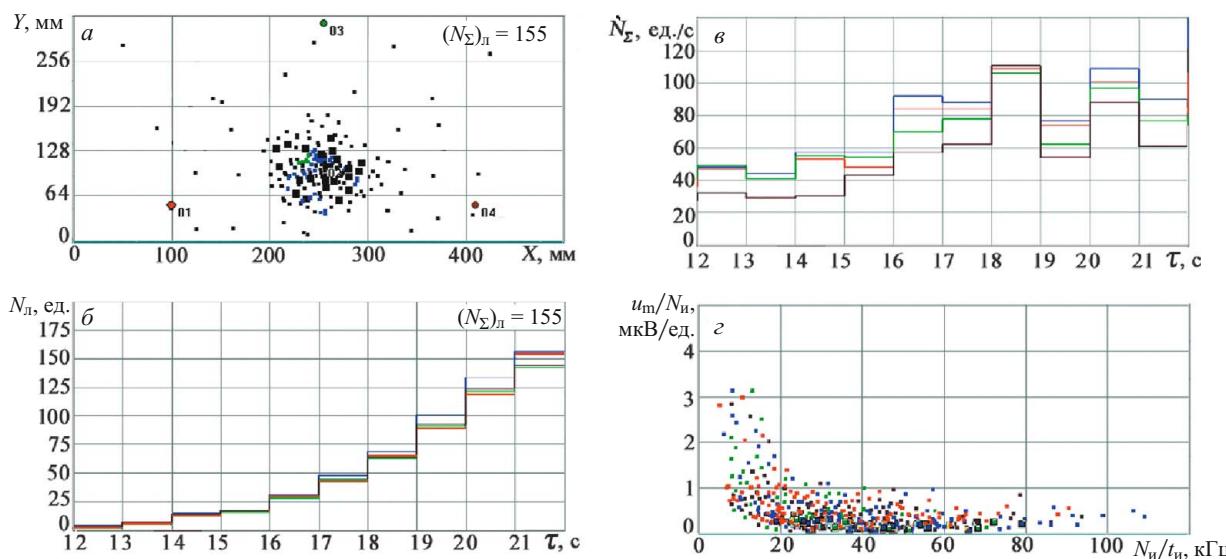


Рис. 3. Графики локации источников сигналов (*а*), их накопления (*б*), активности АЭ (*в*) и диаграмма дескрипторов (*г*) для локационных импульсов, зарегистрированных в первые 10 с эксперимента

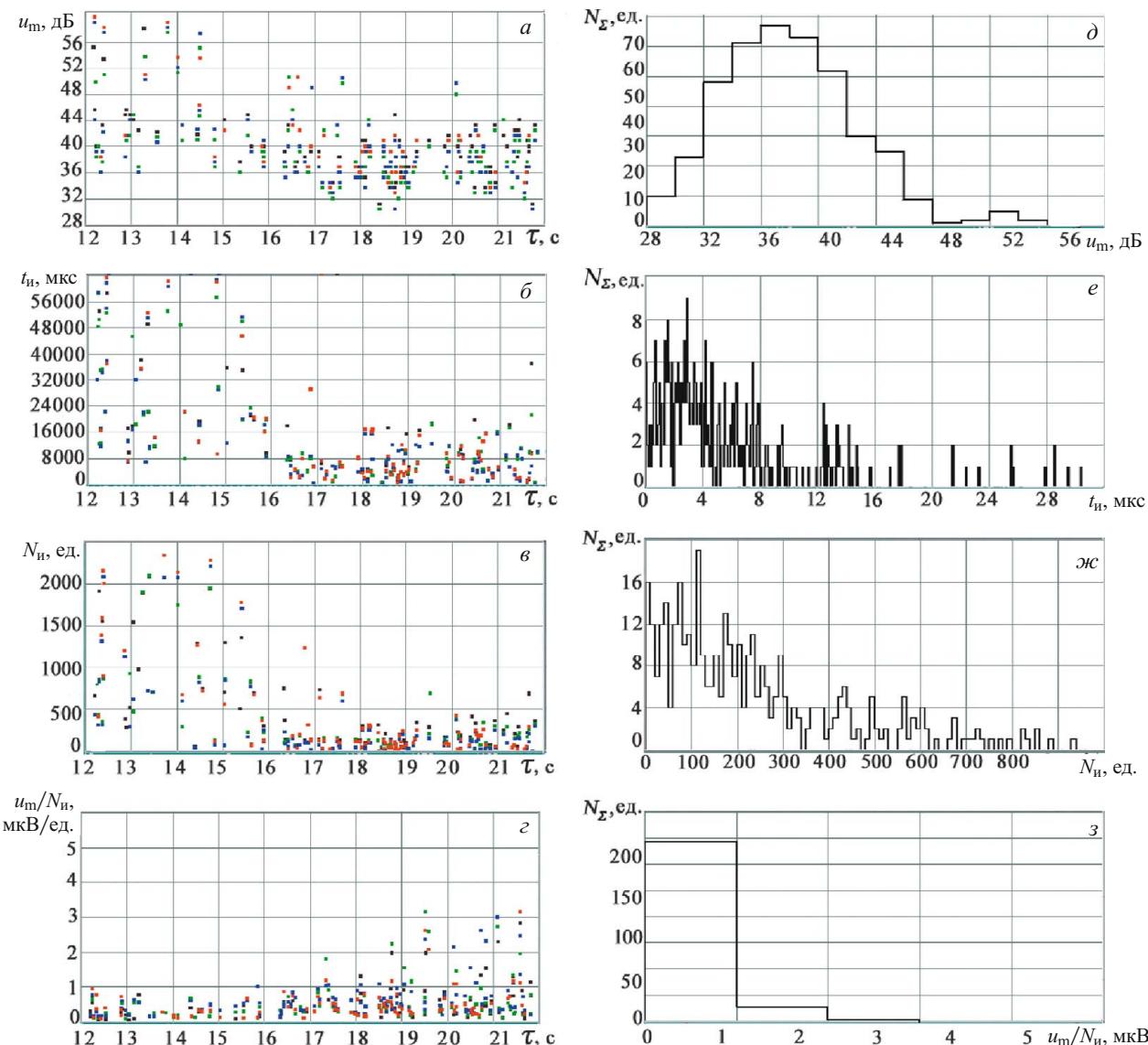


Рис. 4. Графики максимальной амплитуды (*а*), длительности (*б*), счета выбросов (*в*) и параметра $u_m/N_u, \text{ед.}$ (*г*), регистрируемые в первые 10 с эксперимента с 12 по 22 секунду включительно, и гистограммы их дифференциального распределения (*д* – *з*)

По мере роста чашеобразного основания конуса большинство отскакивающих от поверхности стекла гранул соударялось с его стенками и оставалось внутри чаши, заполняя ее объем. Отскакивая от плоскости стекла и соударяясь со стенками чашеобразного конуса, поток гранул вызывал сильные вибрации на этапе формирования основания конуса. При этом регистрировали импульсы с амплитудой до 60 дБ и длительностью до 65 мс в течение 2 с, пока происходило заполнение чаши и формирование основания конуса. В дальнейшем поток гранул, соударяясь с рыхлым слоем основания конуса, генерировал импульсы существенно меньших амплитуды и длительности.



Рис. 5. Фрагмент видеорегистрации соударения потока гранул с поверхностью стекла на первой секунде эксперимента (скорость съемки 500 кадров в секунду)

На рис. 7, *a – e* приведены типичные осциллограммы импульсов, регистрируемые при соударении гранул с плоскостью стекла.

Начиная с 17-й с эксперимента наряду с рассмотренными выше регистрировали импульсы с величиной параметра $u_m/N_u = 1 - 2 \text{ мкВ/ед}$. Причем, как видно из гистограммы дифференциального распределения параметра u_m/N_u на рис. 4, *з*, количество таких импульсов, зарегистрированных в течение первых 10 с соударения потока гранул с плоскостью стекла, составляло менее 10 % от всех локализованных импульсов. Эти импульсы возникали в результате соударения падающего стеклогранулята с рыхлым основанием



Рис. 6. Фрагмент формирования основания насыпного конуса на второй секунде эксперимента (скорость съемки 500 кадров в секунду)

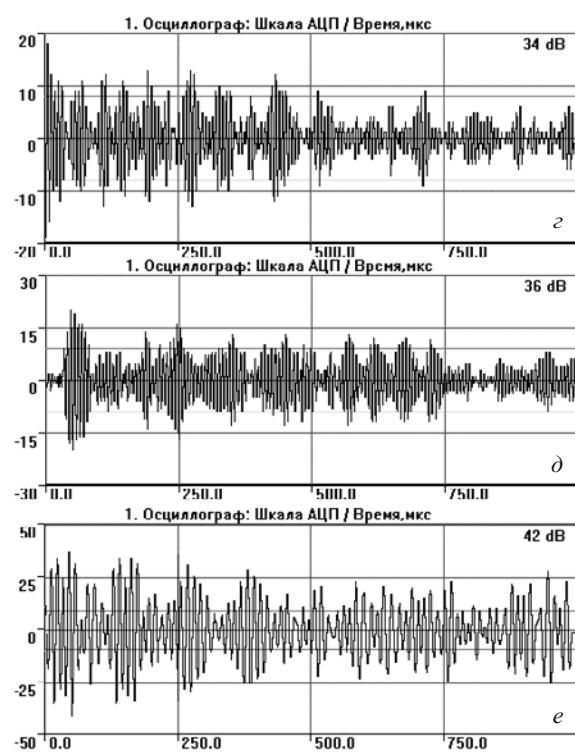
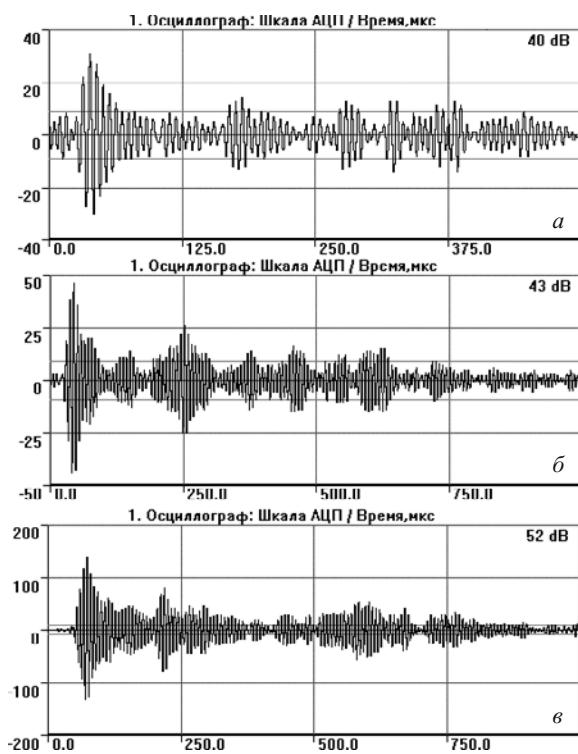


Рис. 7. Осциллограммы импульсов АЭ, регистрируемые при соударении гранул с плоскостью стекла (*a – e*) и внедрении гранул в рыхлый наружный слой формирующегося конуса (*г – е*)

формирующегося конуса. Их максимальная амплитуда достигала 45 дБ, длительность — 10 мс, количество выбросов — 500 ед.

Параметр, характеризующий скорость затухания импульсов АЭ, при соударении гранул с рыхлым основанием конуса (см. рис. 4, ε) составлял $u_m/N_i \leq 2$ мкВ/ед. При соударении гранул с рыхлой поверхностью формирующегося конуса наблюдался как отскок гранул, так и их внедрение в поверхностный слой в месте падения. Внедрение гранул в рыхлый поверхностный слой конуса, сопровождаемое ударным воздействием на ближайшего «соседа», вызывало импульсы, подобные тем, что возникают при контакте трущихся поверхностей. На рис. 7, $\varepsilon - e$ приведены типичные осциллограммы таких импульсов.

Как видно из рис. 4, ε , начиная с 18-й с эксперимента наряду с импульсами нижнего и среднего кластеров регистрировали сигналы с параметром $u_m/N_i > 2$ мкВ/ед, относящиеся к верхнему кластеру (см. рис. 1). Они обладали достаточно низким уровнем максимальной амплитуды $u_m = 28 - 30$ дБ, длительностью, не большей 2000 мкс, и количеством выбросов, как правило, не превышающим 10 единиц. Количество сигналов АЭ верхнего кластера было менее 1 % от всех локированных импульсов.

Для получения наиболее полной информации о параметрах импульсов, формирующих верхний кластер на диаграмме дескрипторов, и выявления возможных источников их излучения выполним кластерный анализ и проведем классификацию локационных импульсов, регистрируемых в течение последних 10 с этапа t_2 — с 187-й по 197-ю с включительно, когда активность АЭ была максимальна. На рис. 8 показаны графики локации источников сигналов (a), их накопления (β), активности АЭ (ε) и диаграмма дескрипторов (ε) локационных импульсов, регистрируемых в течение периода наивысшей активности

N_i/t_i локационных импульсов (ε), зарегистрированных с 187-й по 197-ю с включительно.

На рис. 9 приведены графики изменения максимальной амплитуды (a), длительности (β), счета выбросов в импульсах (ε) и параметра u_m/N_i (ε), зарегистрированные с 187 по 197 с включительно, а также гистограммы δ — з дифференциального распределения анализируемых параметров в границах полученных выборок при величинах градации $u_m = 2$ дБ, $t_i = 100$ мкс, $N_i = 10$ ед, $u_m/N_i = 1$ мкВ/ед.

Как показала высокоскоростная видеорегистрация (рис. 10), в период наивысшей активности импульсы АЭ возникали в результате соударения потока падающих гранул с вершиной конуса, повторных отскоков и их последующего внедрения в рыхлый поверхностный слой, скатывания и сползания стеклогранулята по наклонной, а также ударов о поверхность стекла и взаимного соударения.

При этом основной массив генерируемых импульсов не регистрировался акусто-эмиссионной аппаратурой, так как имел уровень максимальной амплитуды ниже установленного порога дискриминации $u_{th} = 27,7$ дБ. На рис. 11 приведены осциллограммы импульсов верхнего кластера.

Сопоставление анализируемых параметров локационных импульсов и графиков их дифференциального распределения, зарегистрированных в первые и последние 10 с эксперимента, показывает, что с ростом высоты и диаметра основания конуса процентное соотношение импульсов в сформировавшихся кластерах (нижнего, среднего и верхнего кластеров) изменялось незначительно, тогда как объем стеклогранулята насыпного конуса возрастал в 19 раз. Пропорционально должно возрастать количество гранул в массивах, участвующих в обрушениях и оползнях вершины формирующегося конуса. Однако количество локационных импульсов, регистрируемых в первые и последние 10 с эксперимента, увеличилось менее чем в три раза,

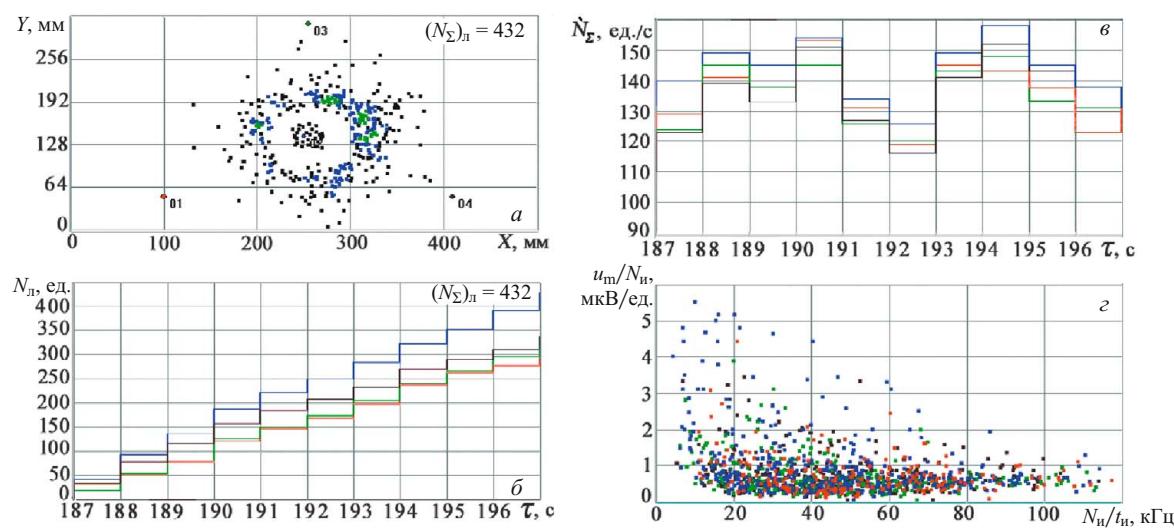


Рис. 8. Графики локации источников сигналов (a), их накопления (β), активности АЭ (ε) и диаграмма дескрипторов (ε) локационных импульсов, регистрируемых в течение периода наивысшей активности

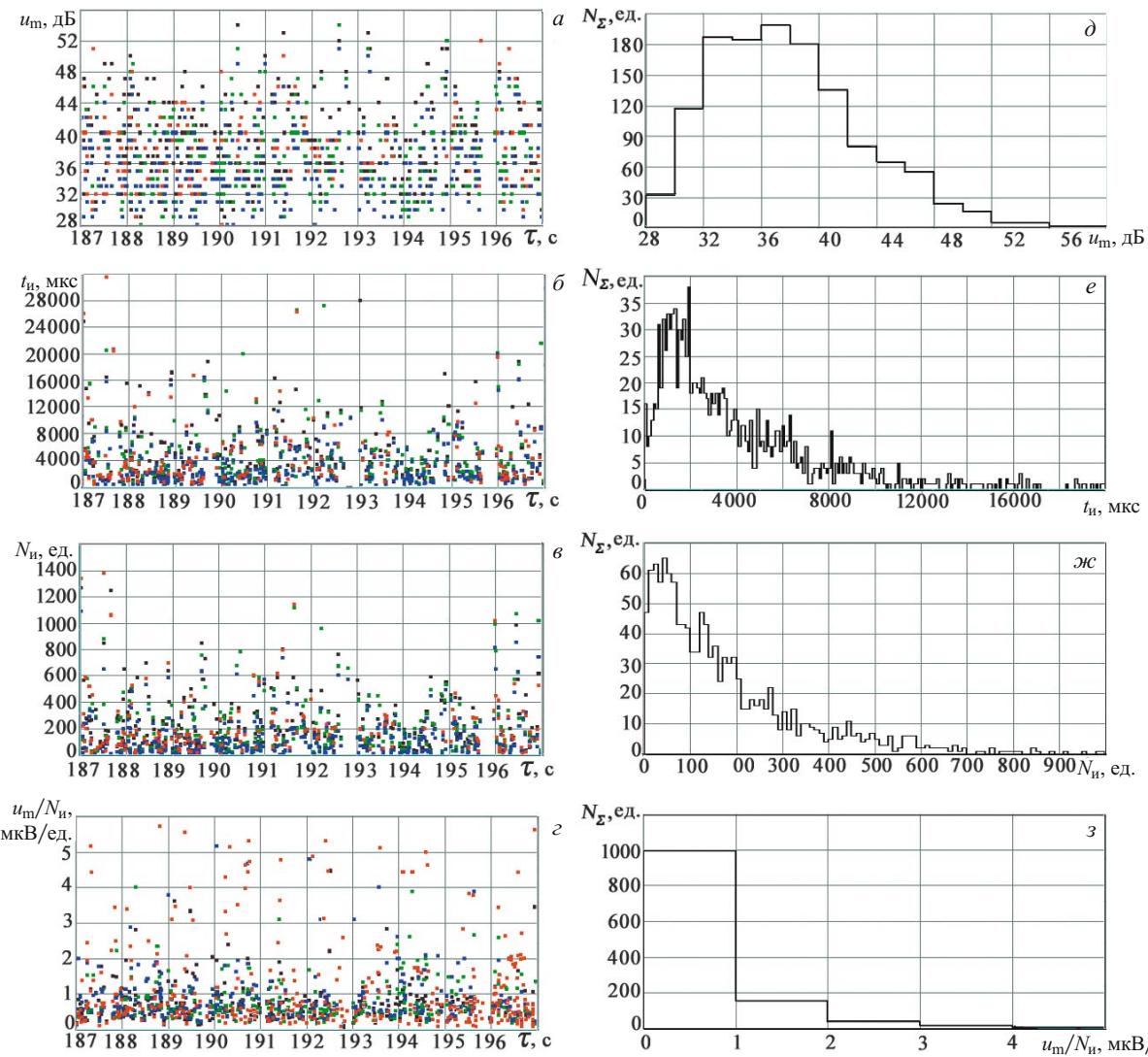


Рис. 9. Графики максимальной амплитуды (а), длительности (б), счета выбросов (в) и параметра u_m/N_u (г), регистрируемые в период максимальной активности сигналов с 187-й по 197-ю с эксперимента, и гистограммы их дифференциального распределения (д – з)

т.е. большинство возникающих при этом сигналов не лоцировалось, поскольку уровень их максимальной амплитуды был ниже установленного порога дискриминации.

Как следует из рис. 9, з, основной массив локационных импульсов (около 80 %), сформировавших нижний кластер на диаграмме дескрипторов, составляют сигналы, генерируемые в результате соударения потока падающего гранулята с вершиной конуса, последующих отскоков гранул от наклонной его поверхности, а также соударения с основанием конуса и плоскостью стекла. Средний кластер сформировали сигналы, возникающие в результате внедрения падающих и отскакивающих гранул в рыхлую поверхность конуса. Массив этих сигналов составляет порядка 16 % относительно общего количества лоцированных импульсов. Верхний кластер сформировали импульсы, возникающие в процессе скатывания и сползания массивов стеклогранулята с вершины конуса к его ос-

нованию. Их количество не превышало 4 % от всех лоцированных импульсов.

Процесс формирования конуса на протяжении всего эксперимента сопровождался практически постоянным обрушением его вершины и сползанием массивов стеклогранулята к его основанию. Причем частота обрушений и оползней стеклогранулята возрастала по мере увеличения высоты и среднего диаметра формирующегося конуса.

С увеличением высоты и среднего диаметра конуса возрастали его демпфирующие свойства, гасящие акустические волны, возникающие в процессе соударения потока гранул с поверхностью конуса и последующего их движения. Энергия частиц при повторных отскоках от рыхлой поверхности конуса заметно падала, что приводило к тому, что амплитуда лоцированных преобразователями импульсов из-за демпфирующего воздействия конуса оказывалась ниже порога дискриминации. Об этом свидетельствует отсутствие локации источников сигналов в средней части



Рис. 10. Фрагмент высокоскоростной регистрации соударения потока гранул с вершиной насыпного конуса (скорость съемки 500 кадров в секунду)

конуса на графике координатной локации. Как следует из рис. 8, *a*, импульсы АЭ, возникающие при повторных отскоках гранул, лоцировались уже в области периметра основания конуса или в границах плоскости стекла. На этом этапе эксперимента наибольшее затухание имели продольные волны импульсов, распространяющиеся в направлении центрального датчика (ПАЭ № 2). Удаленные от центра преобразователи (ПАЭ № 1, 3, 4) фиксировали импульсы поверхностных волн с более высоким уровнем максимальной амплитуды.

К основным результатам работы по тестированию методики кластерного анализа и классификации регистрируемых массивов данных АЭ, а также изучению с применением акусто-эмиссионной диагностики и высокоскоростной видеосъемки неустойчивых переходных процессов, происходящих при формировании насыпного конуса стеклогранулята, можно отнести следующие.

1. Синхронизация высокоскоростной видеосъемки движения потоков стеклогранулята и регистрации массивов АЭ сигналов позволила проследить динамику формирования основных кластеров локационных импульсов и выявить генерирующие их источники в процессе формирования насыпного конуса.

Нижний кластер на диаграмме $u_m/N_i - N_i/t_i$ ($u_m/N_i = 0 - 1 \text{ мкВ/ед}$, $N_i/t_i = 10 - 150 \text{ кГц}$) сформирован постоянно регистрируемыми в процессе эксперимента импульсами АЭ, возникающими при соударении падающего потока стеклогранулята с плоскостью стекла, рыхлой поверхностью конуса, а также в результате повторных отскоков гранул; средний кластер ($u_m/N_i = 1 - 2 \text{ мкВ/ед}$, $N_i/t_i = 0 - 120 \text{ кГц}$) — импульсами АЭ, генерируемыми в процессе повторных отскоков и внедрении гранул в рыхлый наружный слой поверхности насыпного конуса; верхний кластер ($u_m/N_i = 2 - 6 \text{ мкВ/ед}$, $N_i/t_i = 0 - 60 \text{ кГц}$) — импуль-

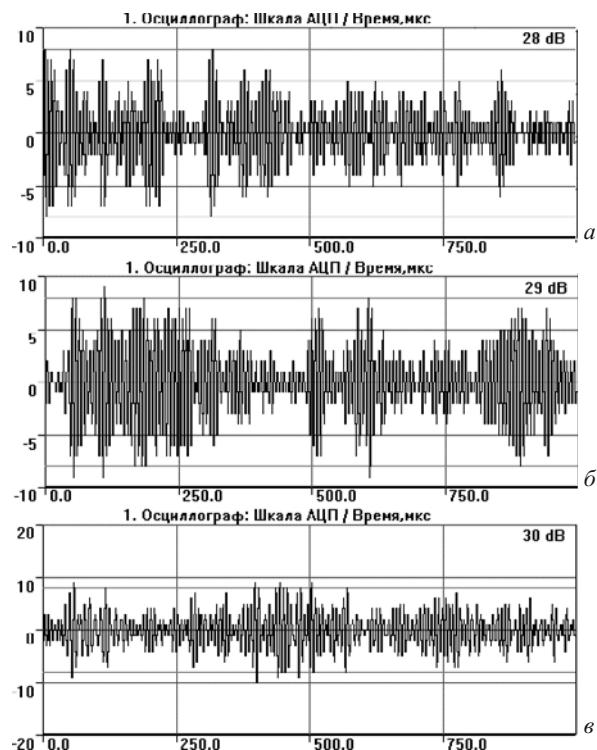


Рис. 11. Осциллограммы импульсов АЭ, регистрируемые при обрушении вершины конуса и сползании стеклогранулята к его основанию (*a*, *b* и *c*)

сами, возникающими в результате обрушений и оползней вершины формирующегося конуса.

2. В результате статистической обработки зарегистрированных массивов получен следующий результат: нижний кластер включал более 82 % всех локационных импульсов, средний — 15 % и верхний — менее 3 %. Такой характер распределения импульсов обусловлен тем, что большинство импульсов, возникающих в результате скатывания и сползания стеклогранулята с вершины конуса в процессе эксперимента, не регистрировалось, так как имел уровень максимальной амплитуды ниже установленного порога дискриминации $u_{th} = 27,7 \text{ дБ}$.

3. С возрастанием объема формирующегося конуса повысилась степень демпфирования акустических волн, возникающих при соударении падающего стеклогранулята с рыхлой его поверхностью, в результате чего снизились амплитуда, длительность и число выбросов регистрируемых импульсов АЭ. Проведенные эксперименты показали, что при увеличении высоты конуса выше 50 мм источники импульсов АЭ, возникающие в результате соударения потока падающих гранул с вершиной конуса, уже не лоцировались акусто-эмиссионной системой.

4. Отработана методика и технология регистрации физических переходных процессов, происходящих в ходе формирования насыпного конуса стеклогранулята, с применением акусто-эмиссионной системы, синхронизированной с высокоскоростной видеокамерой.

5. В качестве наиболее информативного параметра, наглядно отображающего динамику неустойчивых переходных процессов при регистрации непрерывного потока данных, может быть использована активность АЭ.

В заключение можно отметить, что тестовые испытания методики кластерного анализа и классификации регистрируемых сигналов АЭ на физических имитационных моделях — насыпном конусе, наклеиваемых оксидных тензоиндикаторах [7] — подтвердили эффективность ее применения для выделения основных типов импульсов и источников их излучения при исследовании неустойчивых переходных процессов и хрупких многослойных структур.

Синхронная регистрация потока видеоизображений и массива акусто-эмиссионных импульсов АЭ позволила точно контролировать и идентифицировать источники излучения сигналов в ходе неустановившихся переходных процессов при формировании насыпного конуса стеклогранулята.

Информация, полученная с применением акусто-эмиссионной диагностики и синхронной видеорегистрации при формировании насыпного конуса стеклогранулята, может быть использована для выбора более корректных подходов при построении адекватных математических моделей неустойчивых переходных процессов, возникающих, например, при циклическом нагружении сложноструктурных материалов (композитов и сэндвич панелей), сопровождающемся необратимыми преобразованиями и деградацией структуры, обусловленными накоплением повреждений, зарождением и развитием макротрешин, разрушением связующего и наполнителя, расслоением структуры и разрывом слоев.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов В. И., Власов И. Э.** Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник. В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7. Кн. 1. — М.: Машиностроение, 2005. — 340 с.
- Терентьев Д. А., Елизаров С. В.** Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах / Контроль. Диагностика. 2008. № 7. С. 51 – 54.
- Терентьев Д. А., Булыгин К. А., Елизаров С. В.** Фильтрация шумов и выделение мод Лэмба в осцилограммах АЭ-сигналов с применением непрерывного вейвлет-преобразования / Контроль. Диагностика. 2010. № 4. С. 66 – 68.
- Markus G. R.** Acoustic Emission Signal Propagation in Damaged Composite Structures / J. Acoustic Emission. 2013. Vol. 31. P. 1 – 18.
- Hill E. K., Foti C. J., Leung N. Y., Palacios A. E.** Neural network burst prediction in tall graphite – epoxy vessels from acoustic emission data / J. Acoustic Emission. 2012. Vol. 30. P. 167 – 179.
- Hill E. V. K., Rovik Ch. L.** In-Flight Fatigue Crack Growth Monitoring in a Cessna T-303 Crusader Vertical Tail / J. Acoustic Emission. 2013. Vol. 31. P. 19 – 35.
- Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Иванов В. И., Елизаров С. В.** Акусто-эмиссионные свойства оксидных тензоиндикаторов и распознавание сигналов при образовании трещин в хрупком слое покрытия / Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 48 – 60.
- Махутов Н. А., Шемякин В. В., Ушаков Б. Н., Петерсен Т. Б., Васильев И. Е.** Применение акустической эмиссии для контроля за процессом образования трещин в хрупких оксидных тензоиндикаторах / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 6. С. 41 – 44.
- Пат. 2403564 РФ, МПК G 01N 29/14. Устройство для диагностики предельного состояния и раннего предупреждения об опасности разрушения материалов и изделий / Васильев И. Е., Иванов В. И., Махутов Н. А., Ушаков Б. Н.; заявитель и патентообладатель Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. — № 2009100183/28. 10.11.10. Бюл. № 31.
- Матвиенко Ю. Г., Фомин А. В., Иванов В. И., Северов П. Б., Васильев И. Е.** Комплексное исследование дефектов в изделиях из композиционных материалов с применением хрупких тензопокрытий и акустической эмиссии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 1. С. 46 – 52.
- Махутов Н. А., Фомин А. В., Иванов В. И., Пермяков В. Н., Васильев И. Е.** Комплексная диагностика предельных состояний и раннего предупреждения аварийных состояний конструкций / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 2. С. 46 – 51.

REFERENCES

- Ivanov V. I., Vlasov I. É.** Metod akusticheskoi émissii. Nerazrushayushchii kontrol': Spravochnik [Acoustic Emission Method. Nondestructive Testing]. In 7 vols. Book 1. — Moscow: Mashinostroenie, 2005. — 340 p. [in Russian].
- Terentyev D. A., Elizarov S. V.** Veivlet-analiz signalov AE v tonkostenykh ob'ektakh [Wavelet analysis of acoustic-emission signals in thin-walled Objects] / Kontrol' Diagn. 2008. N 7. P. 51 – 54 [in Russian].
- Terentyev D. A., Bulygin K. A., Elizarov S. V.** Fil'tratsiya shumov i vydelenie mod Lemb'a v otsillogrammakh AE-signalov s primenieniem nepreryvnogo veivlet-preobrazovaniya [Noises filtration and extraction of Lamb's modes in AE-signals oscilograms by continuous wavelet transform] / Kontrol' Diagn. 2010. N 4. P. 66 – 68 [in Russian].
- Markus G. R.** Acoustic Emission Signal Propagation in Damaged Composite Structures / J. Acoustic Emission. 2013. Vol. 31. P. 1 – 18.
- Hill E. K., Foti C. J., Leung N. Y., Palacios A. E.** Neural network burst prediction in tall graphite – epoxy vessels from acoustic emission data / J. Acoustic Emission. 2012. Vol. 30. P. 167 – 179.
- Hill E. V. K., Rovik Ch. L.** In-Flight Fatigue Crack Growth Monitoring in a Cessna T-303 Crusader Vertical Tail / J. Acoustic Emission. 2013. Vol. 31. P. 19 – 35.
- Matvienko Yu. G., Vasil'ev I. E., Ivanov V. I., Elizarov S. V.** The Acoustic Emission Properties of Oxide Tenso-Sensitive Indicators and Signal Recognition during the Formation of Cracks in a Brittle Coating Layer / Russ. J. Nondestruct. Testing. 2015. Vol. 51. N 1. P. 39 – 49.
- Makhutov N. A., Shemyakin V. V., Ushakov B. N., Petersen T. B., Vasil'ev I. E.** Primenenie akusticheskoi émissii dlya kontrolya za protsessom obrazovaniya treschchin v khrupkikh oksidnykh tenzoindikatorakh [Application of acoustic emission to monitoring of the crack formation process in brittle oxide tensoindicators] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2011. Vol. 77. N 6. P. 41 – 44 [in Russian].
- RF Pat. 2403564, Vasil'ev I. E., Ivanov V. I., Makhutov N. A., Ushakov B. N. Byull. Otkryt. Izobret. N 31 [in Russian].
- Matvienko Yu. G., Fomin A. V., Ivanov V. I., Severov P. B., Vasil'ev I. E.** Kompleksnoe issledovanie defektov v izdeliyakh iz kompozitsionnykh materialov s primenieniem khrupkikh tenzopokrytiy i akusticheskoi émissii [A comprehensive study of the defects in composite materials using brittle strain-sensitive coatings and acoustic emission] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2014. Vol. 80. N 1. P. 46 – 50 [in Russian].
- Makhutov N. A., Fomin A. V., Ivanov V. I., Permyakov V. N., Vasil'ev I. E.** Kompleksnaya diagnostika predel'nykh sostoyaniy i rannego preduprezhdeniya avarийnykh sostoyaniy konstruktsii [Complex diagnostics of limiting states and early prevention of emergency states of structures] / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin. 2013. N 2. P. 46 – 51 [in Russian].