

УДК 539.3:539.4

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАКОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. М. Лепихин\*, В. В. Москвичев<sup>\*,\*\*</sup>, А. П. Черняев<sup>\*\*</sup>

\* Институт вычислительных технологий СО РАН, 660049 Красноярск, Россия

\*\* Специальное конструкторско-технологическое бюро “Наука”

Красноярского научного центра СО РАН, 660036 Красноярск, Россия

E-mails: aml@ict.nsc.ru, krasn@ict.nsc.ru, sib\_era@sib.kras.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов накопления повреждений металлокомпозитного бака высокого давления при проведении пневматических испытаний на прочность. Выполнен анализ процессов деформирования и разрушения композитной конструкции, сопровождающихся растрескиванием матрицы и разрывом волокон. Показано, что данные растрескивания и разрывы излучают акустико-эмиссионные сигналы различного типа. На основе результатов акустико-эмиссионного контроля предложен критерий ранжирования баков по прочностным характеристикам силовой композитной оболочки.

**Ключевые слова:** металлокомпозитный бак, испытания на прочность, повреждения, акустико-эмиссионный контроль.

DOI: 10.15372/PMTF20180316

**Введение.** В последнее время при создании спутников активно применяются сосуды высокого давления. Наиболее перспективными являются композитные и металлокомпозитные сосуды, обладающие малым удельным весом и высокой прочностью. В АО “Информационные спутниковые системы” им. акад. М. Ф. Решетнева” совместно с Центральным научно-исследовательским институтом специального машиностроения был разработан металлокомпозитный бак высокого давления (МКБВД) для электрореактивных двигателей космических аппаратов. МКБВД, предназначенный для хранения необходимого объема рабочего тела (ксенона) в течение срока активного существования космического аппарата, представляет собой эллипсоидальную конструкцию, состоящую из внутреннего герметичного тонкостенного металлического сосуда (лейнера) и внешней композитной оболочки (рис. 1). Металлический лейнер обеспечивает герметичность бака, композитная оболочка — его прочность. Лейнер представляет собой тонкостенную сварную емкость, состоящую из двух днищ переменной толщины, расположенных на подкладном кольце, и биметаллических фланцев. Заготовка для днищ выполняется методом раскатки листа титанового сплава ВТ1-0 толщиной 1,5 мм (ГОСТ 22178-76). Сборно-сварные биметаллические

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в ходе реализации проекта по Соглашению № 14.607.21.0038 в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.” (RFMEF160714X0038).

© Лепихин А. М., Москвичев В. В., Черняев А. П., 2018

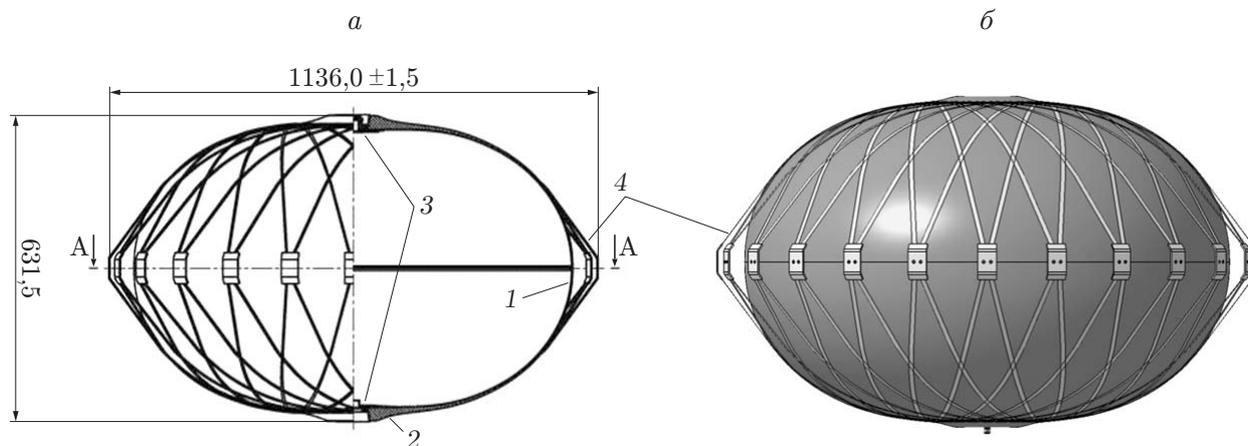


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) МКБВД:

1 — лайнер, 2 — композитная оболочка, 3 — фланцы, 4 — элементы крепления

фланцы изготавливаются из титанового сплава ВТ1-0 и стали марки 12Х18Н10Т. Композитная силовая оболочка изготавливается спирально-кольцевым методом непрерывной намотки на лайнер ленты из полимерного композитного материала на основе углеродного волокна IMS60. В качестве связующего используется эпоксидная смола ЭД-И (ТУВЗ-774-2010) или ЭДУ (ТУВЗ-753-92).

В соответствии с техническими условиями конструкция бака должна обеспечивать давление разрушения не менее  $(13,5 \pm 0,5)$  МПа для бака с запасом ксенона 350 кг и  $(18,9 \pm 0,5)$  МПа для бака с запасом ксенона 500 кг. Ресурс бака в условиях космического пространства должен составлять не менее 15 лет при вероятности безотказной работы не ниже 0,999. Для обеспечения указанных параметров были решены задачи определения оптимальной формы бака и обоснования методов конструктивно-технологического исполнения [1]. Высокие требования, предъявляемые к прочности и надежности МКБВД, и отсутствие отечественных аналогов обуславливают необходимость проведения большого объема теоретических и экспериментальных исследований механики деформирования такой гибридной конструкции. Анализ предварительных результатов экспериментальной отработки МКБВД, различных конструктивных решений и расчетных оценок прочности и надежности проведен в [2–4]. В данной работе представлены результаты анализа процессов деформирования и разрушения МКБВД при натурных пневматических испытаниях с использованием акустико-эмиссионного контроля (АЭ-контроль). АЭ-контроль, являющийся пассивным типом акустического контроля, основан на регистрации и анализе свободных колебаний акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и разрушения (роста трещин) контролируемых объектов [5]. Данный метод позволяет достаточно точно определять увеличивающиеся дефекты и проводить контроль непосредственно в процессе нагружения конструкций.

**1. Методика испытаний и АЭ-контроля.** Экспериментальные исследования проводились на натурных образцах МКБВД, выполненных в соответствии с требованиями конструкторской документации и прошедших пневматические испытания на герметичность рабочим давлением, гидравлические испытания пробным давлением, вибрационные испытания и испытания в термобарокамере. Испытания проводились при нагружении баков внутренним пневматическим давлением до разрушения или потери герметичности. Целью испытаний являлось исследование особенностей механизмов деформирования и разрушения МКБВД, а также определение предельных давлений потери работоспособности

(нарушения герметичности и разрушения). Для обеспечения безопасности испытания проводились в полевых условиях с использованием специально сконструированного взрывозащищенного испытательного стенда. Методика испытаний включала специальную подготовку баков, пневматические испытания внутренним давлением до достижения предельного состояния, металлографические исследования фрагментов разрушения.

Нагружение баков внутренним давлением проводилось с использованием воздушного компрессора УКС-400В-131 поэтапно, при этом осуществлялся АЭ-контроль. На первых двух этапах при давлении до 5 МПа проводились тестирование, настройка и калибровка контрольно-измерительных средств и приборов. На следующих 8–10 этапах нагружения контролировались и регистрировались параметры состояния бака.

В процессе испытаний осуществлялись контроль давления в баке, АЭ-контроль, видеофиксация состояния бака, контроль температуры поверхности бака, контроль герметичности бака, контроль перемещений стенок бака. Измерение перемещений проводилось с использованием резистивных датчиков ЛИР-7, устанавливаемых на торцевых поверхностях фланцев бака, а также вдоль экваториальной плоскости. Для контроля герметичности на бак наносился пенополимерный индикатор ППИ-2. Видеонаблюдение осуществлялось с помощью видеокамер GF-IR1353H и СК-Р361IR. Запись параметров АЭ-контроля, перемещений, температуры, давления и видеозапись общего состояния баков выполнялись в режиме реального времени с синхронизацией начала отсчетов со временем начала испытаний.

АЭ-контроль проводился с использованием системы A-Line32D с записью информации по шести каналам и системы L-Card с записью информации по четырем каналам. Система A-Line32D использовалась для записи АЭ-сигналов на этапах выдержки МКБВД под давлением в соответствии с ГОСТом [6]. Для этого на каждом испытываемом баке устанавливались шесть АЭ-датчиков: два датчика на расходном и глухом фланцах лейнера и четыре датчика на композитной оболочке (равномерно по экватору) (рис. 2).

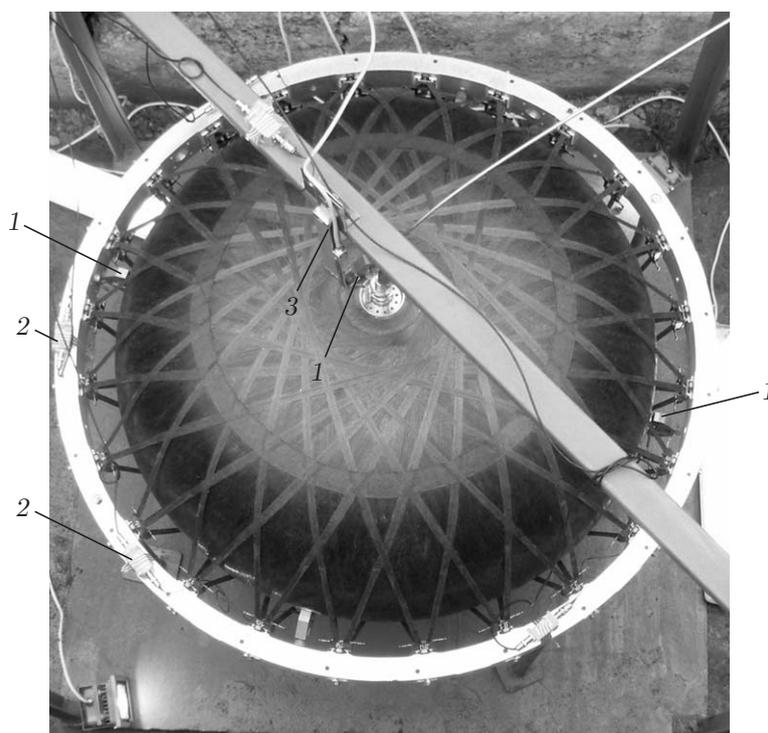


Рис. 2. Металлокомпозитный бак с датчиками акустической эмиссии (1), преобразователями (2) и датчиком перемещений (3) до начала испытаний

Такое расположение датчиков позволяло одновременно регистрировать АЭ-сигналы как в титановом лейнере, так и в композитной оболочке. Результаты АЭ-контроля обрабатывались программным комплексом акустико-эмиссионной системы A-Line32D с использованием локально-динамических критериев [7].

Система L-Card применялась для записи АЭ-сигналов в течение всего процесса нагружения и выдержки баков под давлением с интервалами 8 мин. АЭ-датчики этой системы устанавливались равномерно вдоль экватора бака. Длительность одной записи составляла 85 с. Суммарное время записи информации по каждому из четырех каналов составило 30 мин для каждого испытанного бака. Обработка информации проводилась вручную с использованием методов спектрального анализа.

**2. Анализ процессов деформирования МКБВД и АЭ-сигналов.** Начальная стадия нагружения МКБВД до значения давления  $p = 5$  МПа характеризуется преимущественно упругим деформированием титанового лейнера. При этом композитная оболочка испытывает пренебрежимо малые деформации. При АЭ-контроле в этом диапазоне давлений выявляются в основном пассивные источники АЭ II класса в соответствии с локально-динамическим критерием. Источники сосредоточены преимущественно в зонах сварных соединений фланцев с днищами лейнера.

При нагрузке  $p > 6$  МПа начинается процесс интенсивного деформирования лейнера, сопровождающийся трением его поверхности о композитную оболочку. На этом этапе процесс акустической эмиссии имеет характерную зависимость амплитуды  $A$  импульсов АЭ от времени  $t$  (рис. 3). Зависимость амплитуды от времени состоит из двух участков: участка, на котором амплитуда увеличивается, что соответствует процессу интенсивного деформирования лейнера, и участка, на котором значения амплитуды уменьшаются, что соответствует уменьшению интенсивности деформирования лейнера. Последнее мож-

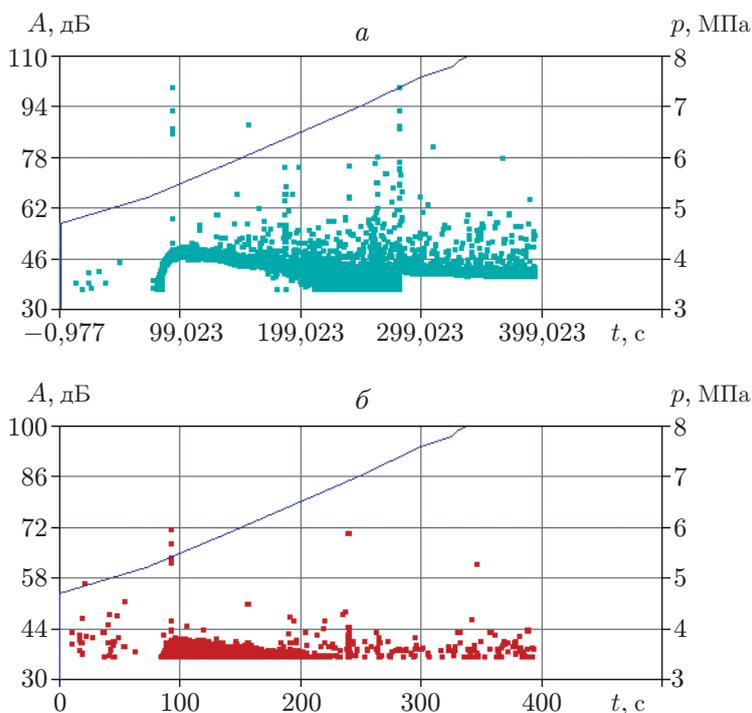


Рис. 3. Зависимость амплитуды АЭ-импульсов от времени при нагружении до значения  $p = 8$  МПа для датчика на лейнере (*а*) и композитной оболочке (*б*) (линия — зависимость давления от времени)

но объяснить тем, что при увеличении нагрузки лейнер начинает деформироваться совместно с композитной оболочкой. Указанный характер зависимостей амплитуды и длительности АЭ-сигналов от времени сохраняется как для датчиков, расположенных вблизи полюсов, так и для датчиков, расположенных вблизи экватора. Следует отметить, что АЭ-сигнал быстро затухает при распространении по композитному материалу от источника в окрестности полюса, но при этом характер зависимости  $A(t)$ , соответствующий трению поверхностей, сохраняется.

Интенсивная деформация композитного материала начинается при давлении  $p > 12 \div 13$  МПа и сопровождается растрескиванием матрицы, скольжением слоев и разрывом волокон. Данные процессы приводят к увеличению АЭ-активности и изменению значений параметров АЭ-сигналов по всем каналам, при этом появляются пассивно-активные и активные источники II–III классов. Большинство этих источников сосредоточены в области сварных соединений фланцев с днищами лейнера, а также в области интенсивного трения поверхностей лейнера и композитной оболочки (на расстоянии от фланцев, равном  $250 \div 400$  мм).

При дальнейшем увеличении нагрузки до  $15 \div 16$  МПа отмечается преобладание АЭ-импульсов с максимальной длительностью (рис. 4). Помимо этого происходит увеличение среднего значения амплитуды, а также минимального значения амплитуды (начиная с определенного момента времени) АЭ-сигналов. Нагружение до значения  $p = 18$  МПа приводит к появлению характерной зависимости средней амплитуды АЭ-сигналов от времени (рис. 5).

Анализ АЭ-сигналов на заключительных стадиях испытаний МКБВД показал, что при давлении  $p > 20 \div 22$  МПа появляются источники АЭ IV класса, свидетельствующие о начале разрушения. За 5–7 с до потери герметичности или разрушения МКБВД резко увеличивается количество сигналов, поступающих по каналу датчика на расходном фланце лейнера в единицу времени (с 500 до 1200 1/с). При этом количество АЭ-сигналов, поступающих по каналам датчиков на композитной оболочке в единицу времени, не превышало  $200 \div 220$  1/с при амплитуде сигналов  $A < 75$  дБ. Плотность расположения источников АЭ остается неоднородной с максимумом в зоне трения поверхностей лейнера и композитной оболочки. При достижении предельного состояния, которому соответствует нарушение герметичности, на кривой зависимости  $A(t)$  появляется характерный “горб” (подъем и последующий спад) средней амплитуды сигналов (рис. 6). При достижении предельного состояния, которому соответствует разрушение, зависимость амплитуды от времени характеризуется неубывающими значениями средних амплитуд (рис. 7). Характер изменения регистрируемых на этом этапе АЭ-сигналов показан на рис. 8. Таким образом, анализируя характер диаграмм АЭ-сигналов в процессе испытаний, можно прогнозировать вид предельного состояния МКБВД: нарушение герметичности или полное разрушение.

**3. Обоснование критерия опасности АЭ-сигналов.** Основной проблемой, возникающей при использовании АЭ-контроля, является определение наиболее эффективного критерия отбраковки МКБВД с высокими уровнями АЭ-активности на основе оценки опасности АЭ-сигналов. С этой целью рассматривались амплитудный, локально-динамический и интегральный критерии, интегрально-динамический критерий, критерий кода ASME, критерий МОНРАК [8–11], а также индекс Фелисити [11], определяемый как отношение давления, при котором зафиксировано начало существенной акустической эмиссии на рассматриваемом этапе нагружения, к давлению на предыдущем этапе нагружения. Установлено, что ни один из указанных нормативных критериев опасности АЭ-сигнала включая индекс Фелисити не удовлетворяет в полной мере требованиям отбраковки МКБВД. Сложность выбора критерия в данном случае обусловлена особенностями объекта контро-

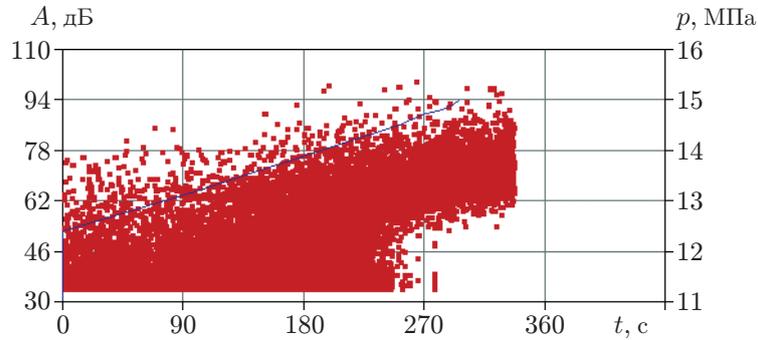


Рис. 4. Зависимость амплитуды АЭ-импульсов от времени при нагружении до значения  $p = 15$  МПа для датчика на экваторе композитной оболочки (линия — зависимость давления от времени)

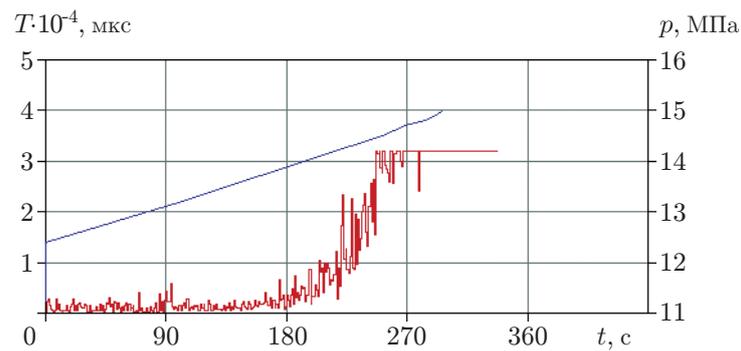


Рис. 5. Зависимость средней длительности АЭ-импульсов  $T$  от времени при нагружении до значения  $p = 18$  МПа для датчика на экваторе композитной оболочки (линия — зависимость давления от времени)

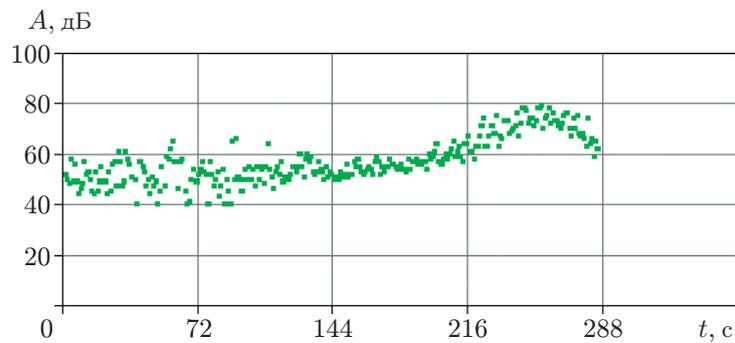


Рис. 6. Зависимость средней амплитуды АЭ-импульсов от времени при нагружении до значения  $p = 17$  МПа для датчика на экваторе композитной оболочки (предельное состояние — нарушение герметичности)

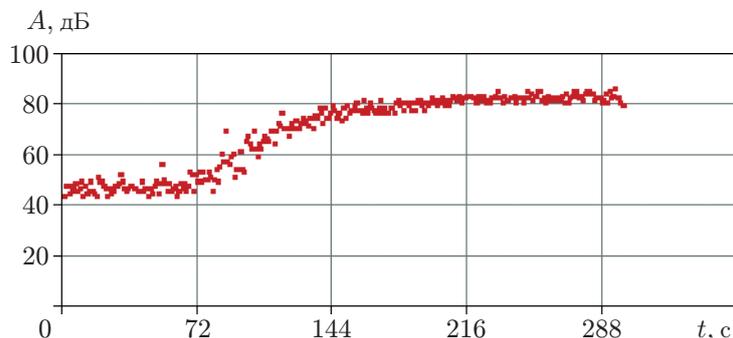


Рис. 7. Зависимость средней амплитуды АЭ-импульсов от времени при нагружении до значения  $p = 20$  МПа для датчика на экваторе композитной оболочки (предельное состояние — разрушение)

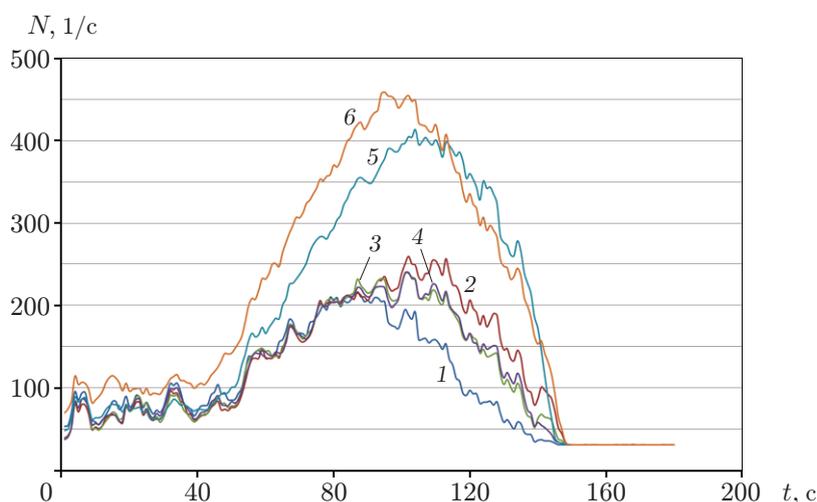


Рис. 8. Количество акустических сигналов в единицу времени на заключительной стадии нагружения (при разгерметизации) бака до значения давления  $p = 18,5$  МПа:

1 — канал 1, 2 — канал 2, 3 — канал 3, 4 — канал 4, 5 — канал 5 (верхний полюс), 6 — канал 6 (нижний полюс)

ля. При совместном деформировании лайнера и композитной оболочки возникает сложная картина АЭ с наложением сигналов от источников АЭ в лайнере, композитной оболочке и сигналов от областей контактного трения на поверхностях лайнера и оболочки. АЭ-сигналы формирующихся очагов разрушения удается четко выделить только на заключительных стадиях деформирования и разрушения МКБВД при давлениях, значительно превышающих значения, предусмотренные конструкторско-технологической документацией.

Для объяснения результатов, полученных с использованием АЭ-контроля, необходимо установить связь параметров акустической эмиссии с процессами деформирования и разрушения лайнера и композитной оболочки и оценить предельные значения этих параметров для отбраковки МКБВД. Исследования спектров показали, что в потоках АЭ-сигналов присутствуют характерные узкополосные и широкополосные сигналы (рис. 9), активность которых возрастает по мере увеличения приложенной нагрузки. Узкополосные сигналы (сигналы первого типа) характеризуются малыми временами нарастания и спада, широ-

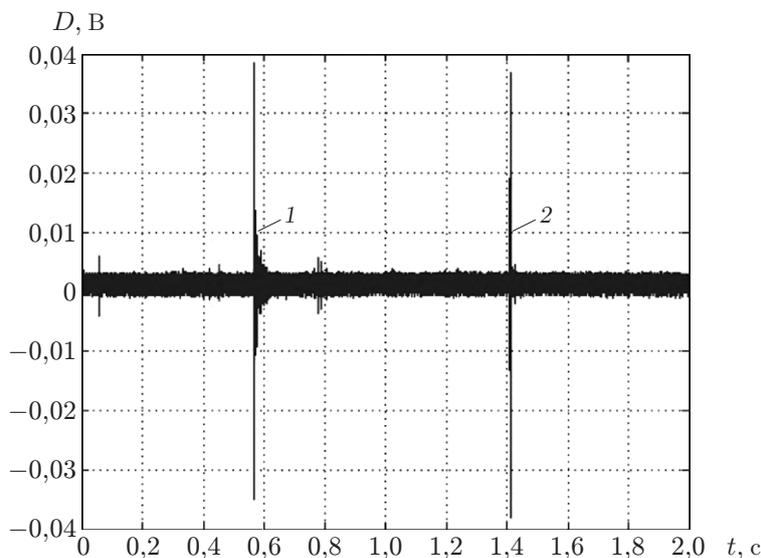


Рис. 9. Зависимость дисперсии АЭ-сигналов  $D$  от времени: 1 — сигнал второго типа, 2 — сигнал первого типа

Параметры выделенных АЭ-сигналов

| $p$ , МПа | $N$ , 1/мин          |                      | $V$ , мВ             |                      |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|           | Сигналы первого типа | Сигналы второго типа | Сигналы первого типа | Сигналы второго типа |
| 8         | 4                    | 0                    | 0,76                 | —                    |
| 11        | 18                   | 2                    | 1,07                 | 7,4                  |
| 13        | 130                  | 5                    | 1,53                 | 8,7                  |
| 15        | 1742                 | 183                  | 2,74                 | 9,1                  |
| 20        | 2225                 | 304                  | 3,11                 | 12,2                 |

кополосные сигналы (сигналы второго типа) — малым временем нарастания и большим временем спада, а также высокой долей энергии в диапазоне низких частот. Параметры сигналов выделенных типов приведены в таблице ( $N$  — количество сигналов в единицу времени;  $V$  — средняя амплитуда сигналов). Следует отметить, что амплитуды сигналов обоих типов не имеют характерных значений. В диапазоне амплитуд  $A = 65 \div 100$  дБ регистрируются сигналы обоих типов.

Проведенный анализ показал, что АЭ-сигналы первого типа соответствуют процессу развития повреждений в матрице композитного материала. Эти повреждения не являются критическими (не приводят к нарушению герметичности или разрушению МКБВД). АЭ-сигналы второго типа соответствуют процессу разрыва волокон композитного материала, приводящему к уменьшению прочности композитной оболочки. Число таких сигналов может соответствовать количеству разрушений волокон. При определенном уровне поврежденности прочность композита может уменьшиться до критического значения, при котором возможно разрушение МКБВД.

Таким образом, разделение сигналов по типам необходимо проводить на основе анализа их формы, а не с использованием стандартных параметров АЭ-сигналов. Разработанный алгоритм обработки спектров позволяет провести разделение сигналов АЭ по типам.

С учетом изложенного выше в качестве критерия безопасного состояния МКБВД можно рассматривать отсутствие или наличие отдельных АЭ-сигналов второго типа. Отсут-

ствии сигналов этого типа свидетельствует о том, что стадия разрывов волокон композита еще не достигнута, а наличие АЭ-активности объясняется преимущественно процессами растрескивания матрицы, не оказывающими существенного влияния на прочность МКБВД.

**Заключение.** Испытания МКБВД, проведенные с использованием АЭ-контроля, позволили получить реальную картину процессов деформирования и разрушения исследованных МКБВД. На основе проведенных экспериментальных исследований можно выделить четыре стадии деформирования и разрушения МКБВД: упругое деформирование титанового лейнера; интенсивное деформирование лейнера, приводящее к трению поверхностей лейнера и силовой композитной оболочки; деформирование композитной оболочки с растрескиванием матрицы; интенсивное деформирование композитной оболочки с множественными разрывами волокон вплоть до их полного разрушения. В качестве характеристики деформации титанового лейнера можно рассматривать уменьшение амплитудных значений и максимальных длительностей импульсов АЭ. О начале деформации композитной оболочки можно судить по локальным максимумам длительностей АЭ-сигналов и характерным особенностям увеличения амплитуд. Момент перехода от процессов микроразрушений композитного материала к процессам его интенсивного деформирования определяется по характерным участкам исследуемых зависимостей средней амплитуды и средней длительности АЭ-сигналов от времени. По характеру зависимости средней амплитуды от времени можно прогнозировать тип предельного состояния МКБВД: нарушение герметичности или полное разрушение.

Следует отметить, что разрушение матрицы и разрушение адгезионного слоя между слоями композита являются простыми кратковременными процессами, в то время как процесс разрушения волокон является сложным (происходят множественные разрывы и дробления волокон, отслоения и вырывание волокон из матрицы) и более длительным. Каждый из указанных процессов является источником АЭ-сигналов определенного типа. Результаты исследований показывают, что разрушение матрицы характеризуется узкополосными сигналами малой длительности, разрывы волокон композита — широкополосными сигналами АЭ большой длительности с преобладанием низкочастотной составляющей спектра. На основе проведенных исследований в качестве критерия безопасности МКБВД можно принять отсутствие АЭ-сигналов второго типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Vasiliev V. V.** Composite pressure vessels: analysis, design, and manufacturing. Blacksburg: Bull Ridge Publ., 2009.
2. **Лепихин А. М., Москвичев В. В., Черняев А. П. и др.** Экспериментальная оценка прочности и герметичности металлокомпозитных сосудов высокого давления // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 6. С. 30–36.
3. **Лепихин А. М., Буров А. Е., Москвичев В. В.** Возможности расчетной оценки надежности металлокомпозитных баков высокого давления // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 49–55.
4. **Амелина Е. В., Буров А. Е., Голушко С. К. и др.** Расчетно-экспериментальная оценка прочности металлокомпозитного бака высокого давления // Вычисл. технологии. 2016. Т. 21, № 5. С. 3–22.
5. **Поллок А.** Акустико-эмиссионный контроль // Металлы. 9-е изд. Т. 17. Б. м.: ASM, 1989. С. 278–294. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.diapec.ru/Articles/Pollock.pdf>.
6. **ГОСТ Р 52727-2007.** Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. Введ. 14.06.07. М.: Стандартинформ, 2007.

7. **Standard E 1067-96.** Practice for acoustic emission examination of fiberglass reinforced plastic resin (FRP) tanks /vessels. West Conshohocken: Amer. Soc. for Testing and Materials, 2001.
8. **ПБ 03-593-03.** Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов: Утв. Госгортехнадзором 09.06.03. М.: ПИО ОБТ, 2003.
9. **De Groot P., Wijnen P., Janssen R.** Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites // Composites Sci. Technol. 1995. V. 55. P. 405–421.
10. **Prosser W. H., Jackson K. E., Kellas S., et al.** Advanced, waveform based acoustic emission detection of matrix cracking in composites // Materials Evaluat. 1995. V. 53, N 9. P. 1052–1058.
11. **Mizutani Y., Saiga K., Nakamura H., et al.** Integrity evaluation of COPVs by means of acoustic emission testing // J. Acoust. Emission. 2008. V. 26. P. 109–119.

*Поступила в редакцию 29/VIII 2017 г.*

---