

УДК 53.082.5

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.П. Ципилев

Томский политехнический университет

E-mail: tsipilev@list2.epd.tpu.edu.ru

Представлено описание стенда для исследования кинетики взрывного разложения взрывчатых веществ при воздействии импульсов лазерного излучения. Разработанный стенд позволяет с наносекундным временным разрешением синхронно изучать движение передней (облучаемой) поверхности образца, свечение взрывного разложения и детонационного фронта, электропроводность и акустический отклик образца, свечение разлетающихся продуктов взрыва. Стенд позволяет проводить раздельно исследования процессов, протекающих в зоне облучения лазерным пучком и за пределами этой зоны при вариации плотностей мощности лазерного воздействия от допороговых до многократно превышающих пороговые величины.

Экспериментальные исследования кинетики развития катастрофических процессов (взрыв, разрушение, эмиссия), безусловно, являются весьма информативными при установлении их механизмов. Особенно такие исследования актуальны при изучении взрывного разложения энергетических материалов, в том числе процессов и явлений, предшествующих взрыву. Изучение предвзрывных явлений может давать информацию о деталях (стадиях) процесса и приближать к пониманию элементарных актов, стоящих в основе быстрого разложения.

Впервые кинетика процессов быстрого разложения азидов тяжелых металлов (АТМ) изучалась в [1–3]. Авторами исследовалась кинетика свечения образцов, проводимости, акустического отклика и оптического поглощения образцов в процессе взрывного разложения после воздействия импульсов лазерного излучения и пучка ускоренных электронов.

Проведенные исследования показали большие возможности синхронных многопараметрических измерений с высоким временным разрешением для получения информации о первичных процессах. Вместе с тем, эти исследования выявили и методические трудности, связанные со спецификой процессов взрывного разложения взрывчатых веществ (ВВ).

К настоящему времени стало ясно [4–6], что при исследовании процессов инициирования ВВ необходимо выполнение как минимум трех условий, без соблюдения которых достоверность экспериментальных результатов и их интерпретация весьма затруднены.

Необходимо:

- возбуждать локальный объем ВВ, т.е. предельно уменьшать объем каустики лазерного пучка;
- добиваться высокой однородности освещаемого участка ВВ, т.е. работать только с дифракционными лазерными пучками с применением специальных схем фокусировки;
- наблюдать кинетику свечения образцов при взрывном разложении только из зоны лазерного воздействия, что требует разработки нетрадиционных способов и схем наблюдения за объектом исследования.

В настоящей работе представлено описание стенда для исследования кинетики взрывного разложения ВВ при воздействии импульсов лазерного излучения. Разработанный стенд позволяет с наносекундным временным разрешением синхронно изучать движение передней (облучаемой) поверхности образца, свечение взрывного разложения и детонационного фронта, электропроводность и акустический отклик образца, свечение разлетающихся продуктов взрыва. Стенд позволяет проводить эксперименты в атмосфере воздуха и в вакууме с помощью специально разработанных для этих целей экспериментальных ячеек. Предусмотрена возможность разделения в пространстве и времени регистрации процессов, протекающих в зоне облучения лазерным пучком и протекающих за пределами этой зоны. Имеется возможность вариации плотности мощности лазерного воздействия от допороговых до многократно превышающих пороговые величины взрывного разложения конденсированных сред различных классов.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Она является усовершенствованным вариантом схемы, описанной в [7]. В качестве источника оптического излучения использовался односторонний одночастотный неодимовый лазер, состоящий из задающего генератора и пятикаскадного усилителя бегущей волны. Максимальная энергия излучения лазера составляет 20 Дж при длительности импульса 20 нс (на полувысоте). Лазер излучает пучок, близкий к дифракционному и имеющий минимальный статистический разброс параметров излучения.

Формирование пучка предельно малых размеров на поверхности образца (наименьший достигнутый размер составил 10 мкм, что близко к теоретическому пределу фокусировки для излучаемой длины волны) с однородным распределением освещенности и резким контрастом освещенности на его границах достигалось проекционным способом. Использование проекционного способа позволило наблюдать за свечением взрывающихся образцов только с участка ВВ, облученного лазерным пучком.

Диафрагма – 2, вырезающая центральную часть гауссова пучка лазера – 1, и поверхность образца –

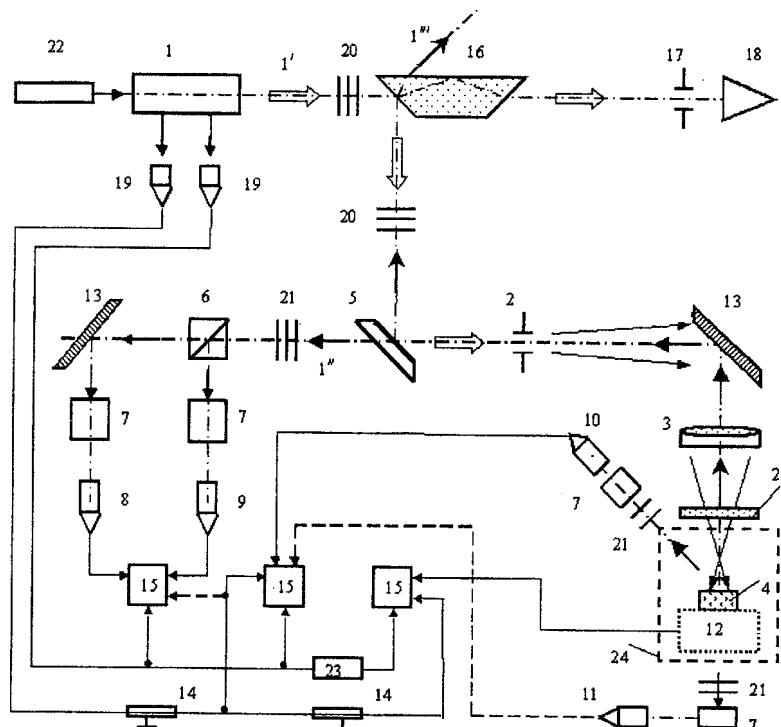


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1) неодимовый лазер (1,06 мкм; 20 нс); 1') лазерный пучок; 1'') сигнал вспышки из зоны лазерного воздействия; 1''') отраженный от образца лазерный пучок; 2) формирующая диафрагма; 3) объектив-ахромат; 4) образец АТМ; 5) интерференционное поворотное зеркало; 6) светоделительный кубик; 7) полосовые фильтры (светофильтры, монохроматоры МУМ; 8), 9), 10), 11) фотоумножители ФЭУ-106; 12) датчик импульса давления; 13) поворотные зеркала; 14) кабельные линии задержки (200...1000 нс); 15) осциллографы С8-14; 16) призма Дове; 17) измерительная диафрагма; 18) калориметр ИКТ-1Н; 19) коаксиальные элементы ФЭК-19КМ; 20), 21) нейтральные светофильтры; 22) юстировочный гелий-неоновый лазер ЛГ-38; 23) генератор импульсов Г5-56; 24) вакуумная камера; 25) защитная стеклянная плоскопараллельная пластинка

4 находятся в сопряженных плоскостях по отношению к объективу — 3, в качестве которого был выбран ахромат с исправленными сферическими аберрациями. Объектив был просветлен на длине волны лазерного излучения (1060 нм), имел фокусное расстояние 100 мм, а увеличение оптической системы составляло 0,1. ФЭУ — 8 и 9 синхронно регистрировали взрывное свечение — 1'' (области спектра 700...800 нм и 500...600 нм соответственно) из зоны лазерного воздействия, наблюдаемое через объектив — 3, диафрагму — 2, зеркало — 5 и светоделительный кубик 6 (в последующем будем называть их зонными ФЭУ). ФЭУ — 10 был установлен традиционным способом и регистрировал развитие процесса во всем объеме образца и в его окрестности (в последующем будем называть его ФЭУ панорамного обзора). ФЭУ — 11 фиксировал выход детонационной волны на тыльную сторону образца (случай прессованных таблеток). Изменение оптических характеристик образца в момент лазерного воздействия определялось путем регистрации отраженного от образца лазерного пучка — 1'''.

Момент начала движения передней поверхности образца контролировался по отклонению отраженного от поверхности луча вспомогательного лазера и спаду сигнала фотодетектора (режим сброса). Изменение электропроводности образца во время инициирования регистрировалось с помощью изме-

рений импульса тока, протекающего через образец. Импульс давления, возникающий в объеме ВВ при взрывном разложении, фиксировался акустическим датчиком — 12. Датчик тарирован в области исследуемых длительностей нагружения, имеет чувствительность порядка 0,15 В/бар и временное разрешение 5 нс. Конструкция и работа датчика подробно описаны в [8]. Общее временное разрешение каналов регистрации было не хуже 10 нс.

Для синхронного запуска осциллографов — 15 использовался сигнал с выхода одного из коаксиальных фотоэлементов — 19. Сигнал второго фотоэлемента служил для контроля за временным положением и формой лазерного импульса. Компенсация собственных временных задержек фотодетекторов осуществлялась с помощью кабельных линий задержки, встроенных в каналы регистрации. Компенсация достаточно большой акустической задержки датчика — 12 производилась путем задержки сигнала запуска осциллографа активной линией — 23 (генератор задержек) совместно с задержкой опорного лазерного импульса кабельной линией — 14.

Для исключения интерференционных эффектов, приводящих к нарушению однородности в сформированном лазерном пучке, в качестве расщепителя пучка перед калориметром — 18 устанавливалась призма Дове — 16, а поверхности стеклянной плоскопараллельной пластинки — 25, установленной для

защиты формирующего объектива — 3 от воздействия продуктов взрывного разложения, были просветлены на длине волны лазерного излучения. Для облегчения настройки и юстировки измерительных каналов все оптические сигналы подводились к соответствующим приемникам (монохроматор, ФЭУ) с помощью кварц-полимерных волоконных жгутов.

Образцы азидов свинца и серебра в виде насыпных порошков и прессованных (давление 10000 атм.) таблеток размерами 2×2 мм² и толщиной от 100 до 500 мкм, а также макрокристаллов азид серебра толщиной около 400 мкм и выращенных из раствора нитевидных кристаллов размерами $0,1 \times 0,1 \times 5,0$ мм³ устанавливались в специальных сборках, изображенных на рис. 2. Сборки позволяли одновременно регистрировать до шести, описанных ниже, параметров процесса взрывного разложения АТМ. В ча-

стности, для синхронной регистрации взрывного свечения, импульса давления в образце и движения передней поверхности использовалась схема, приведенная на рис. 2, а. Здесь испытуемый образец располагался на стеклянной подложке — 5, имеющей акустический контакт (слой легкого масла) с электродом пьезодатчика — 8. Стеклянная подложка устраняла влияние электрода датчика на процесс иницирования в случае нагрева его поверхности или плазмообразования при поглощении лазерного излучения, проникшего сквозь образец.

Для регистрации момента движения передней поверхности образца использовался зеркальный компонент френелевского отражения от поверхности кристаллов и порошков АТМ, прессованных в специальных для этой цели условиях (зеркальные поверхности рабочих частей прессформ). Для этого увеличенное изображение пучка полупроводникового лазера — 15 строилось на диафрагме — 18. Монохроматор — 19 с полосой пропускания на полувысоте 2 нм настроен на длину волны лазера — 15 (657 нм) и эффективно подавляет вспышку взрывного разрушения. Размер и положение зондирующего пучка на поверхности ВВ соответствовали размеру и положению пучка основного лазера — 1, что достигалось соответствующей установкой линзы — 16. Схема использовала принцип "оптического рычага" и обеспечивала чувствительность измерительного тракта к перемещению на уровне 5 мВ/мкм.

Для синхронной регистрации взрывного свечения, давления и проводимости образец располагался между двумя электродами из медной фольги толщиной 100 мкм (рис. 2, б), подключенными к зарядному конденсатору C и низкоомной разрядной нагрузке R_n . Для чистоты опыта между электродами и образцом устанавливались воздушные зазоры порядка 50...100 мкм, а размер образца всегда был несколько большим диаметра лазерного пучка d , что исключало возможность пробоя на поверхности электродов при их облучении в момент лазерного воздействия. Возникновение электропроводности в процессе взрывного разложения образцов фиксировалось появлением токового импульса и импульса напряжения на нагрузке. Схема имела коаксиальное исполнение, работала в режиме "ключа" и обеспечивала временное разрешение 1...5 нс.

При наблюдениях кинетики взрывного свечения и свечения разлетающихся продуктов взрыва, с целью устранения влияния подложки на процессы разлета продуктов, образцы укреплялись на тонкой металлической проволочке (диаметр 0,05 мм) и устанавливались в вакуумной камере между прозрачными экранами (стеклянные пластинки) на различных расстояниях L_1 и L_2 от них. Синхронные наблюдения за кинетикой процесса проводились с помощью одного зонного и двух панорамных ФЭУ. Схема крепления образцов и конструкция камеры для данной серии опытов приведены на рис. 2, в.

Синхронизация и временная привязка каналов регистрации к моменту лазерного воздействия осу-

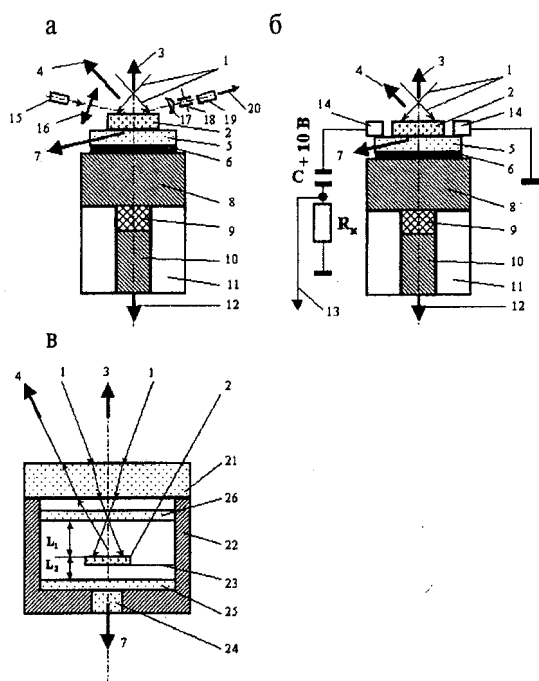


Рис. 2. Схемы измерительных ячеек:

1) лазерный пучок; 2) образец АТМ; 3) сигнал вспышки, регистрируемый зонным ФЭУ; 4) сигнал вспышки, регистрируемый панорамным ФЭУ; 5) стеклянная плоскопараллельная пластина толщиной 5 мм с напыленным металлическим слоем толщиной порядка 1 мкм; 6) напыленная пленка металла; 7) сигнал вспышки при выходе волны взрывного разложения на тыльную поверхность образца (регистрируется в режиме панорамного обзора); 8) металлическая плоскопараллельная пластина толщиной 2 мм (1-й электрод датчика); 9) пьезоэлемент (кристаллический кварц, пьезокерамика ЦТС-19); 10) электрод-демпфер (2-й электрод датчика); 11) изолятор; 12) сигнал акустического датчика; 13) к измерителю тока; 14) электроды; 15) полупроводниковый лазер (657 нм); 16) линза фокусирующая; 17) объектив проекционный; 18) диафрагма; 19) монохроматор МУМ; 20) отраженный от поверхности луч; 21) входное окно вакуумной камеры (плоскопараллельная пластина из стекла толщиной 15 мм); 22) корпус камеры; 23) держатель образца (проволочка диаметром 50 мкм); 24) нижнее окно камеры; 25, 26) прозрачные экраны (стеклянные плоскопараллельные пластинки)

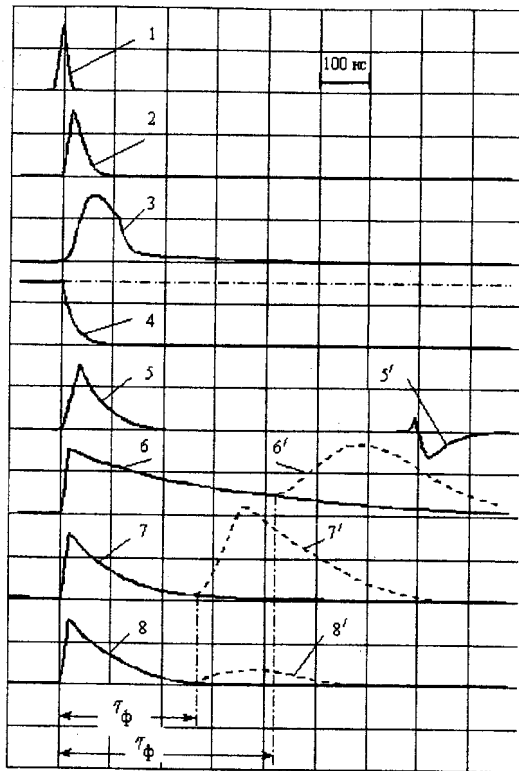


Рис. 3. Совмещенные осциллограммы процессов взрывного лазерного разрушения тонкой металлической пленки:

1) лазерный импульс; 2) вспышка свечения плазмы в момент разрушения пленки, регистрируемая зонным ФЭУ; 3) токовый импульс, характеризующий проводимость движущейся между электродами плазмы; 4) сигнал, характеризующий начало движения пленки; 5) совмещенный с лазерным импульсом акустический отклик взрывного разрушения пленки 5' отображает выход волны сжатия на 2-й электрод; 6), 7) сигнал вспышки, регистрируемый панорамным ФЭУ в атмосфере воздуха и в условиях вакуума соответственно; 8) сигнал вспышки с тыльной стороны пленки. Пунктирные кривые 6', 7' и 8' соответствуют сигналам дополнительных вспышек в момент соударения разлетающейся плазмы с преградой. Диаметр лазерного пучка на поверхности пленки $d = 600$ мкм. Плотность энергии импульса $H = 3$ Дж/см². Расстояние до прозрачного экрана $L = 4,7$ мм

ществлялась моделированием "взрыва" тонкой металлической пленки — 6, напыленной на стеклянную пластинку — 5. При этом образец — 2 убирался, а пластинка — 5 переворачивалась напыленной поверхностью в сторону падающего пучка. Установка поверхности пленки (или образца АТМ) в сопряженную плоскость осуществлялась микрометрической подачей столика, на котором укреплялась сборка, с точностью позиционирования равной 100 мкм. При лазерном испарении пленки образовывалось отверстие, по которому определялся (с помощью микроскопа) фактический диаметр лазерного пучка на поверхности образца, задаваемый размером формирующей диафрагмы — 2.

Для временной привязки и анализа сигналов, необходимых для правильной интерпретации инфор-

мации при взрывном разложении АТМ, исследовалась кинетика взрывного разрушения металлической пленки по всем шести основным каналам регистрации. Осциллограммы кинетики разрушения приведены на рис. 3. Данная методика обеспечивает достаточно жесткую привязку сигналов ФЭУ к центру лазерного импульса, поскольку длительность процесса разрушения пленки сопоставима с длительностью лазерного импульса, о чем свидетельствует осциллограмма сигнала зонного ФЭУ (см. кр. 2). Примечательно, что сигналы панорамных ФЭУ (кр. 6, 7 и 8) значительно превосходят по длительности сигналы зонных. Отсюда очевидно, что панорамные ФЭУ регистрируют некую интегральную картину процесса испарения пленки и разлета плазмы. Очевидно также, что близкую к истинной кинетику процесса испарения пленки отображает сигнал зонных ФЭУ. Отметим это весьма важное обстоятельство.

В то же время длительность сигналов панорамных ФЭУ при помещении сборки в вакуумную камеру с давлением ~ 1 Па (кр. 7 и 8) значительно сокращается по сравнению с сигналом в атмосфере воздуха (кр. 6). По-видимому, в последнем случае наблюдается не только свечение разлетающейся плазмы, но и свечение, связанное с возникновением ударной волны при столкновении сверхзвукового плазменного потока с воздушной средой. Для оценки скорости разлета плазменного факела перед взрывающейся пленкой на расстоянии 4,7 мм устанавливался прозрачный экран в виде стеклянной пластинки. Момент соударения фиксировался по интенсивной вспышке в виде второго максимума на сигналах панорамных ФЭУ (см. пунктирные кривые 6' и 7'). При плотностях энергии лазерного импульса 3 Дж/см² (порог разрушения пленки) скорость разлета плазмы в вакууме достигала $1,8 \cdot 10^4$ м/с, а в атмосфере воздуха средняя скорость составила около $1,2 \cdot 10^4$ м/с. Появление сигнала с тыльной стороны пленки практически совпадает (кр. 8) с моментом ее разрушения. Второй максимум, соответствующий соударению плазмы с преградой, слабо выражен (кр. 8'), что указывает на экранирующее действие плазменного факела и рассеяние света на разрушенной поверхности пленки.

При регистрации и временной привязке токового импульса электроды — 14 (см. рис. 2) устанавливались на расстоянии друг от друга, несколько большем диаметра лазерного пучка, и изолировались от металлической пленки диэлектрической прокладкой толщиной 50 мкм. Достаточно высокая скорость расширения плазмы обеспечивала быстрое замыкание контактов и минимальную задержку токового импульса (рис. 3, кр. 3).

Временная привязка сигнала датчика давления не совсем однозначна, т.к. скорость распространения ударных волн в твердых телах на 10...20 % отличается от звуковой и зависит от амплитуды давления на фронте. По нашим оценкам, а также по данным [8], начальная амплитуда давления в ударной

волне, генерируемой при разрушении пленки, при пороговых плотностях энергии лазерного импульса (примерно $2,5 \text{ Дж/см}^2$, плотность потока порядка 10^8 Вт/см^2) составляет примерно $10...100 \text{ кбар}$, что по порядку величины близко к амплитуде давления на фронте детонационной волны при взрыве АТМ [9]. Это обстоятельство позволило свести к минимуму

ошибку при оценке акустической задержки датчика и его временной привязке.

Стенд может быть использован для исследований кинетики развития любых катастрофических процессов, контроль за которыми может быть осуществлен измерениями шести описанных выше параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Кречетов А.Г. Кинетика развития взрывного разложения азидов серебра при инициировании лазерным импульсом // Химическая физика. — 1997. — Т. 16. — № 8. — С. 119–125.
2. Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Захаров Ю.А., Кречетов А.Г. Взрывное разложение азидов тяжелых металлов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1999. — Т. 116. — № 5 (11). — С. 1676–1693.
3. Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М. и др. Предвзрывные явления в азидовых тяжелых металлов среды // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36. — № 5. — С. 78–89.
4. Коньков В.В., Кригер В.Г., Лисицын В.М., Ципилев В.П. Размерный эффект при лазерном инициировании кристаллов азидов серебра // Физико-химические процессы в неорганических материалах: Тез. докл. 8-й Междунар. конф., Кемерово, 2001. — Т. 2. — С. 62–64.
5. Ципилев В.П., Лисицын В.М., Корепанов В.И., Олешко В.И. Кинетика взрывного разложения азидов тяжелых металлов при лазерном импульсном инициировании // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды 3-й Междунар. конф., Томск, 2002. — С. 245–247.
6. Корепанов А.В., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Исследование пространственно-временной структуры плазмы, образующейся при взрывном разложении AgN_3 // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды 3-й Междунар. конф., Томск, 2002. — С. 130–132.
7. Александров Е.И., Ципилев В.П. Размерный эффект при инициировании прессованного азидов свинца лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17. — № 5. — С. 77–81.
8. Александров Е.И., Каракуцев А.В., Ципилев В.П. Метод создания наносекундных импульсов сжатия в твердом теле для возбуждения химических реакций // Рук. деп. в ВИНТИ. 1979. № 247–79 Деп.
9. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Шехтер Б.И., Станюкович К.П. Физика взрыва. — М.: Наука, 1975. — 704 с.

УДК 531.7.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНЫХ ФАКТОРОВ И ПАРАМЕТРОВ НА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

В.А. Васильев, В.А. Веремьев, А.И. Тихонов

Пензенский государственный университет
E-mail: paspen@rambler.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований воздействия и влияния вибраций на пьезоэлектрический датчик давления, установленный в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Сделана оценка параметров частотных факторов, изучено влияние параметров на информативный сигнал датчика давления. Установлена связь между частотной погрешностью, граничной частотой и чувствительностью пьезоэлектрического датчика. Выработаны рекомендации по рациональному проектированию пьезоэлектрических датчиков давления.

Пьезоэлектрические датчики нашли широкое применение для измерения неэлектрических величин (давлений, силы, ускорений и др.) [1–4]. Достоинством пьезоэлектрических датчиков является то, что они могут быть эффективно использованы при измерении параметров быстропротекающих процессов. Именно поэтому пьезоэлектрические

датчики давления используют в большинстве случаев для измерения циклических давлений в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и импульсных давлений в баллистических установках.

При проектировании пьезоэлектрических датчиков давления, предназначенных для работы в сложных условиях эксплуатации, необходимо учитывать