

УДК 622.822.5: 534.4

## **ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ОБРАЗЦАХ УГЛЯ И ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ГОРЕНИИ**

*Борисенко Д.И.*

*ФГОУ ВПО МГУТУ им. К.Г. Разумовского, Москва*

Одной из наиболее острых проблем горного производства остаются подземные пожары. Основная трудность заключается в отсутствии способов и средств надёжного определения местоположения очагов пожаров с точностью, необходимой для эффективного проведения противопожарных мероприятий.

Одним из перспективных направлений диагностики подземных пожаров представляется применение акустического способа идентификации процесса горения [1]. Информацию о пройденном расстоянии даёт затухание акустического импульса. При прямолинейном распространении сигнала в изотропной по пути его прохождения среде по затуханию можно определять местоположение источника импульса.

Данная работа посвящена выявлению признаков, позволяющих повысить надёжность информации, получаемой с помощью акустического способа диагностики очагов подземных пожаров в угольных пластах.

Одной из информационных характеристик любых волн, в том числе акустических, является спектр. Целью настоящей работы ставилось выявить наличие связи спектров акустических сигналов, возникающих при горении, с пройденным ими расстоянием и сжатием среды, по которой они распространяются.

Уголь является пластовой осадочной породой и поскольку в реальных условиях мощность пласта, как правило, пренебрежимо мала по сравнению с остальными размерами, наибольший интерес представляет распространение звука по его простиранию и падению, т.е. вдоль напластований.

Для моделирования распространения акустических волн в угольном пласте в лабораторных условиях логично использовать твёрдую горючую слоистую среду – древесину. Это позволяет осуществлять исследование акустических импульсов, возникающих при горении, на удобных для регистрации расстояниях в лабораторных условиях.

В работе использовалась сухая сосновая доска с направлением слоёв вдоль широких граней размерами 4×21×614см. Схема эксперимента представлена ниже (рис. 1).

Для исследования трансформации спектров акустических сигналов, связанной с пройденным этими сигналами расстоянием, необходимо устранить изменения, вызванные другими причинами. Поэтому рассматривались одни и те же импульсы, регистрируемые на разных расстояниях. Датчики устанавливались в специальных вырезах в доске. Площадки, на которые непосредственно крепились датчики, были ориентированы параллельно фронту акустических импульсов в местах установки каждого датчика (позиции 5 и 7 на рис.1).

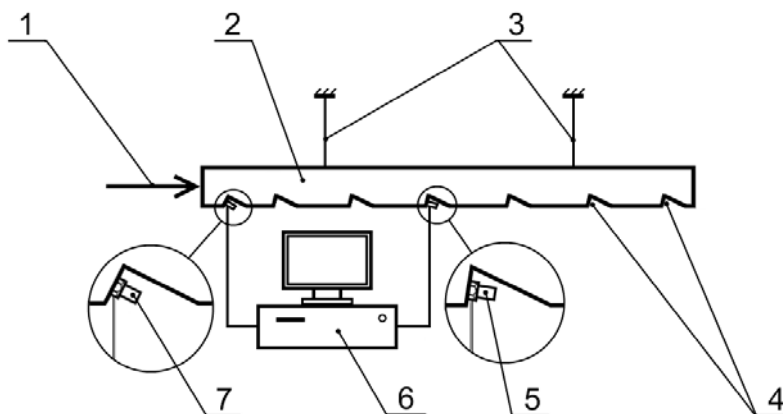


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:

1 – воздействие; 2 – доска; 3 – подвесы; 4 – вырезы в доске; 5 – «дальний» акустический датчик; 6 – компьютер; 7 – «ближний» акустический датчик.

Ближний датчик на протяжении всего эксперимента находился на расстоянии  $x_0 = 0,4$  м от зоны воздействия. Зона воздействия при механических ударах имела линейные размеры субсантиметрового диапазона и находилась в центре торца доски, т.е. была плоской, причём ориентирована перпендикулярно максимальному линейному размеру доски. Царапания деревянным стилусом осуществлялись в горизонтальном направлении в центре торца доски. Максимальная протяжённость зоны соприкосновения стилуса с доской составляла 2 см. Линейные размеры очага горения в экспериментах составляли несколько сантиметров и максимальный из них – поперечный горизонтальный – не превышал 4 см. Положение дальнего датчика  $x$  менялось в процессе эксперимента и составляло 1, 2, 3, 4, 5 и 6 м. Таким образом, каждый акустический импульс регистрировался двумя датчиками: на расстоянии  $x_0$  и  $x$ . Для сопоставления выбирались импульсы примерно равной амплитуды, зарегистрированной на расстоянии  $x_0 = 0,4$  м от зоны воздействия.

Типичные спектры акустических импульсов, возникающих при горении, представлены ниже (рис. 2).

Как видно из приведенных зависимостей, при изменении расстояния, проходимого акустическими импульсами, возникающими при горении, их спектр изменяется. С увеличением пройденного расстояния больше проявляется относительное затухание высоких частот. Этот факт согласуется с имеющимися представлениями и показывает, что для акустических импульсов, возникающих при горении, также справедливо увеличение коэффициента затухания с ростом частоты. Для удобства идентификации акустических импульсов, возникающих при горении, целесообразно провести сопоставление трансформации спектров в зависимости от пройденного сигналом расстояния для различных способов воздействия. И такое сопоставление проведено было. Перед поджигом на торец доски оказывалось механическое воздействие: удары металлическим и деревянным ударниками, а также царапание деревянным стилусом, изготовленным из части используемой в эксперименте доски. Спектры полученных при этом акустических сигналов представлены на (рис. 3), (рис. 4) и (рис. 5) соответственно.

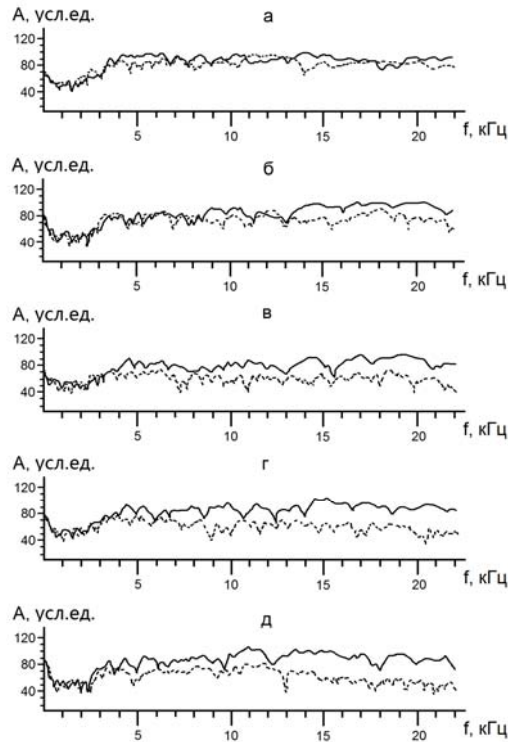


Рис. 2. Типичные спектры акустических импульсов, возникающих в сосновой доске при горении. Сплошные линии соответствуют импульсам, зарегистрированным на расстоянии  $x_0 = 0,4$  м; пунктирные –  $x$  от зоны горения. Значения  $x$ : а – 1 м, б – 2 м, в – 3 м, г – 4 м, д – 5 м.

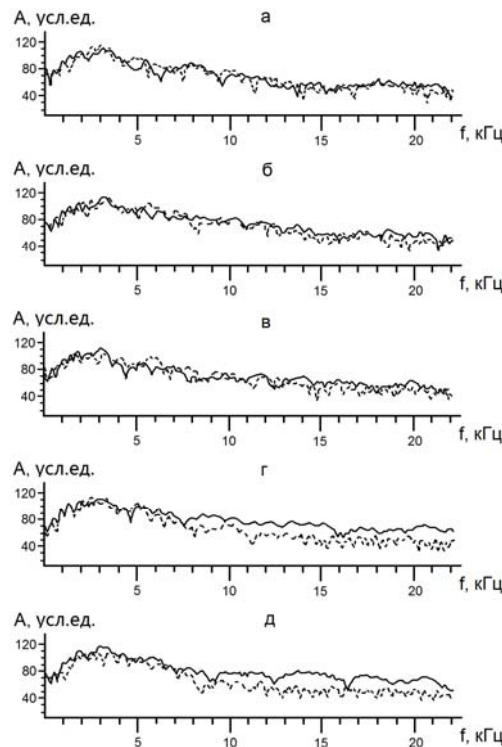


Рис. 3. Типичные спектры акустических импульсов, возникающих в сосновой доске при механических ударах стальным ударником. Сплошные линии соответствуют импульсам, зарегистрированным на расстоянии  $x_0 = 0,4$  м; пунктирные –  $x$  от зоны горения. Значения  $x$ : а – 1 м, б – 2 м, в – 3 м, г – 4 м, д – 5 м.

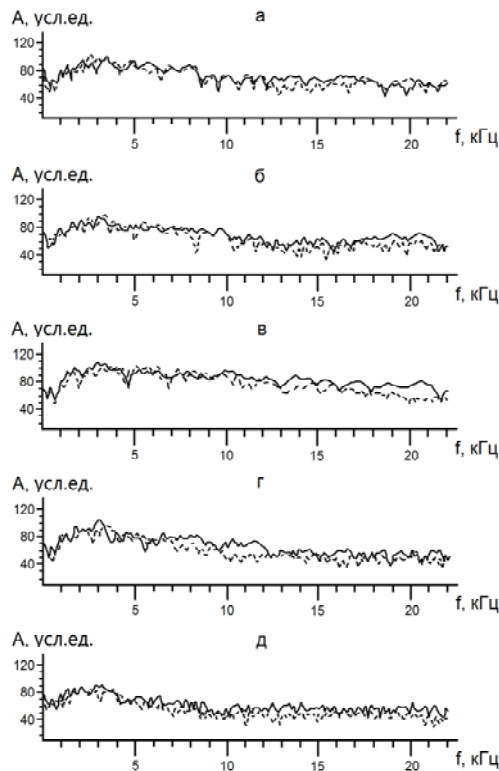


Рис. 4. Типичные спектры акустических импульсов, возникающих в сосновой доске при механических ударах деревянным ударником, изготовленным из этой же доски. Сплошные линии соответствуют импульсам, зарегистрированным на расстоянии  $x_0 = 0,4$  м; пунктирные –  $x$  от зоны горения. Значения  $x$ : а – 1 м, б – 2 м, в – 3 м, г – 4 м, д – 5 м.

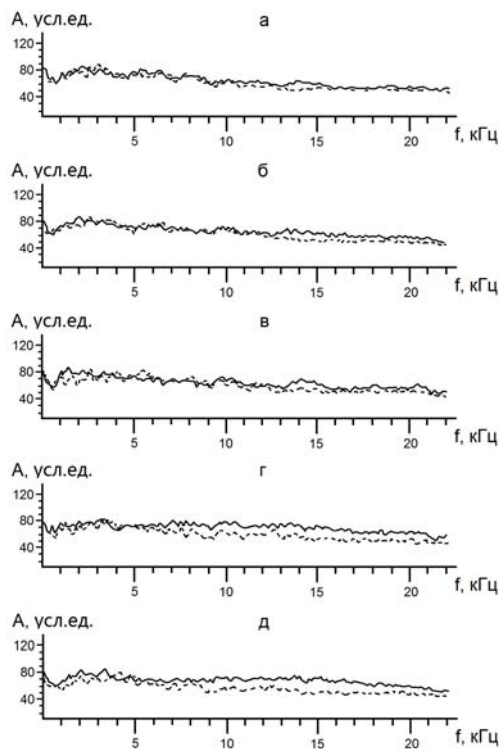


Рис. 5. Типичные спектры акустических импульсов, возникающих в сосновой доске при царапании деревянным стилусом, изготовленным из этой же доски. Сплошные линии соответствуют импульсам, зарегистрированным на расстоянии  $x_0 = 0,4$  м; пунктирные –  $x$  от зоны горения. Значения  $x$ : а – 1 м, б – 2 м, в – 3 м, г – 4 м, д – 5 м.

Как видно из приведенных зависимостей, изменения спектров акустических сигналов, возникающих при механических ударах и царапании с увеличением расстояния, между собой различаются меньше, чем в сравнении со спектрами акустических сигналов, возникающих при горении. При этом спектры акустических импульсов, вызванных горением, заметнее ослабляются с увеличением пройденного расстояния в высокочастотной области, чем спектры импульсов, вызванных остальными исследованными в работе воздействиями. И сама высокочастотная область понижения спектральных функций с увеличением пройденного сигналом расстояния для спектров акустических сигналов, вызванных горением, начинается при меньших частотах, чем для спектров акустических сигналов, вызванных механическими ударами и царапанием.

Поскольку акустический информационный шум в шахтных условиях складывается в основном из механических воздействий, отличительными признаками акустических импульсов, возникающих при горении, являются спектр и его изменение.

Для получения более полной информации из получаемого сигнала желательно знать условия, имеющие место по пути его распространения. Неравномерность свойств горного массива приводит к снижению достоверности информации, получаемой акустическим способом диагностики, сужает геометрические размеры области, из которой возможно проведение поиска очагов пожара. В горном массиве основной причиной пространственной неоднородности являются горно-геологические условия, проявляющиеся в различной плотности среды и различном напряжённо-деформированном состоянии.

В [2] предложено одновременное исследование затухания упругих волн как функции частоты и давления. В настоящей работе эксперименты по выявлению зависимости спектров акустических сигналов, возникающих при горении, от сжатия проводились с образцами каменного угля (марки КО, шахта им. В.И. Ленина, г. Междуреченск Кемеровской обл.) размерами 40×60×30 мм (толщина (база) × ширина × высота). Перед началом эксперимента образец заподлицо с рабочей поверхностью вставлялся в специальное П-образное направляющее ложе, выточенное из цельного куска стали Ст45 с толщиной стенки 16 мм, по которому свободно перемещался стальной поршень (рис. 6).

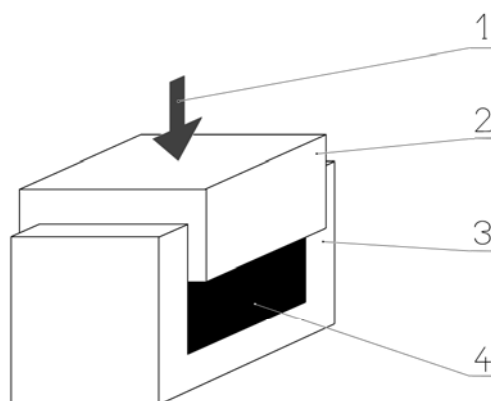


Рис. 6. Схема расположения образца в экспериментальной установке: 1 – направление сжимающего воздействия пресса; 2 – поршень; 3 – направляющее П-образное ложе; 4 – образец угля.

Размеры образцов выбирались из соображений исследования макроразмерного куска угля. Для этого их линейные размеры должны превышать характерные размеры в зоне горения: длины свободного пробега молекул в газовых продуктах горения, толщины температурного, гидродинамического и концентрационных пограничных слоёв, диаметры конвективных вихрей, образующихся в процессе горения. Образцы представляли собой правильные параллелепипеды с отшлифованными гранями. Причём образцы изготавливались таким образом, что рабочий торец (на который оказывалось воздействие открытым пламенем, на рис. 6 именно в него упирается выносная линия 4) располагался перпендикулярно направлению слоистости угля, ориентированной горизонтально. При вертикальном направлении сжимающего воздействия пресса это максимально отвечало реальной преимущественной ситуации в горном массиве. Отметим также, что в реальных условиях наблюдается объёмное сжатие произвольно выбранного фрагмента сплошного горного массива. Для моделирования этого обстоятельства служило П-образное направляющее ложе, препятствовавшее деформации образца в направлении боковых вертикальных поверхностей. Таким образом, в проведённом эксперименте в результате сжатия прессом и нагрева, вызванного горением, уголь мог расширяться только в сторону подвода тепла – как в условиях горящего забоя, где уголь может выпячиваться только в сторону выработанного пространства.

Внешний вид экспериментальной установки представлен на (рис. 7).

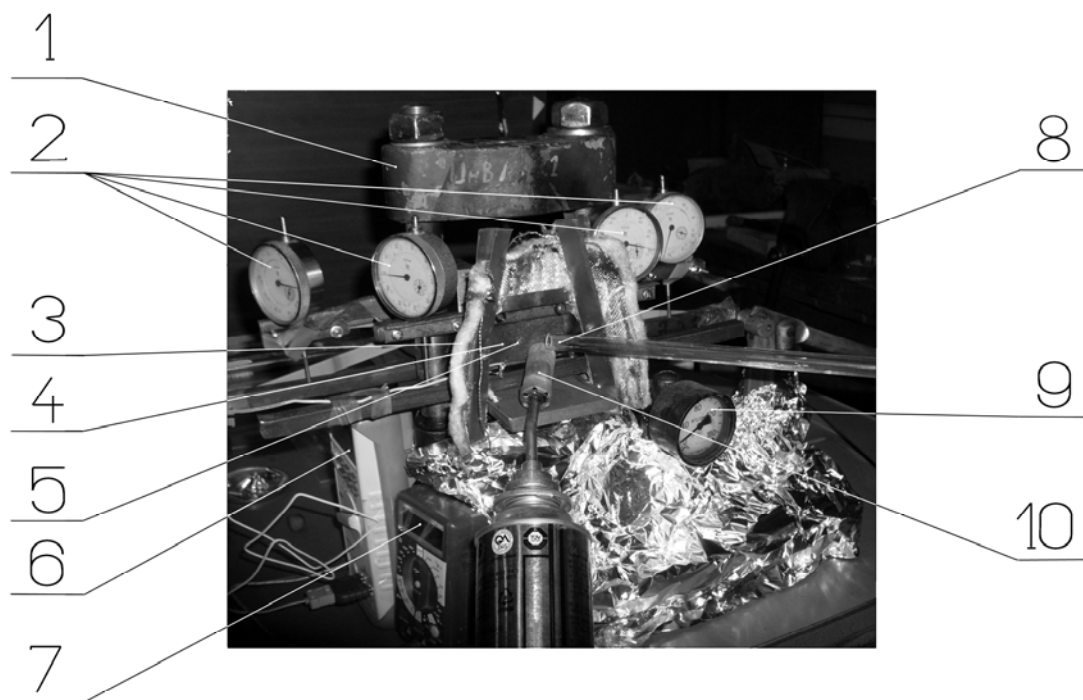


Рис. 7. Внешний вид экспериментальной установки: 1 – ручной пресс; 2 – индикаторы линейных перемещений часового типа; 3 – теплоизоляция; 4 – рабочий (горящий) торец исследуемого образца угля; 5 – чувствительный элемент платинородий-платиновой термопары; 6 – мультиметр, показывающий значение температуры на горящем торце образца угля; 7 – мультиметр, показывающий значение температуры на торце образца угля, противоположном горящему; 8 – пробозаборник газоанализатора Delta-65 (на рисунке не показан); 9 – манометр, показывающий усилие, создаваемое прессом; 10 – сопло газовой горелки.

На торце образца, противоположном рабочему, устанавливались акустические датчики ДН-3-М1 и ДН-4-М1, сигналы с которых поступали на персональный компьютер, где фиксировались и обрабатывались. Алгоритм проведения эксперимента выглядел следующим образом. Включались измеряющие устройства (регистрирующие температуру, акустические импульсы в образце, газовый состав атмосферы вблизи рабочего торца образца). На рабочий торец образца оказывалось воздействие открытым пламенем горящего изобутана, после достижения самостоятельного горения образца горелка удалялась из зоны проведения эксперимента, чтобы не создавать дополнительные искажения регистрируемых величин. Ступенчато повышалось давление прессы. В расчёт принимались только те акустические импульсы, которые возникали в отсутствие горелки в зоне эксперимента и после того, как прекращались серии акустических импульсов, сопровождавших увеличение сжатия прессом. Таким образом, учитываемые акустические импульсы считались вызванными именно процессом горения.

В результате проведенного эксперимента были получены следующие усреднённые спектры акустических импульсов, возникающих в образце угля при горении для различных значений сжатия (рис. 8). Поскольку основные отличия спектров с изменением давления происходят в низкочастотной части, на (рис. 8) использован логарифмический масштаб частоты.

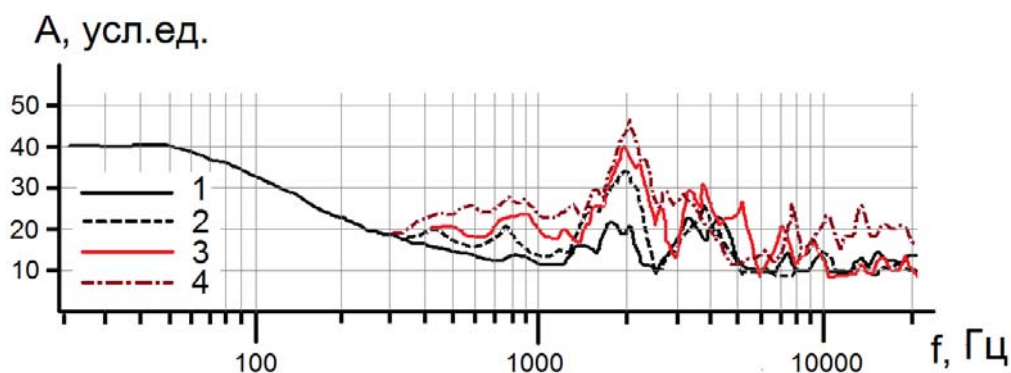


Рис. 8. Усреднённые спектры акустических импульсов, возникающих в образце каменного угля при горении для различных значений сжатия: 1 – 35 кг/см<sup>2</sup>, 2 – 55 кг/см<sup>2</sup>, 3 – 70 кг/см<sup>2</sup>, 4 – 92 кг/см<sup>2</sup>.

Как видно из (рис. 8), с увеличением давления огибающие спектров смещаются в сторону более высоких значений амплитуды. Для случаев, исследованных в настоящей работе, заметное увеличение амплитуды с повышением давления начинается с частот в 300 Гц; основной рост спектра наблюдается в районе частот 2 кГц, а в районе 4 кГц и 6 кГц – наоборот: увеличение давления гораздо меньше влияет на изменение амплитуды. При этом в районе 6 кГц и в высокочастотной части спектра (при частотах, больших 10 кГц) заметное увеличение спектра отмечено только для давлений, превышающих предел прочности на сжатие для испытываемого угля (85 кг/см<sup>2</sup>). Таким образом, установлено, что спектры акустических сигналов, возникающих в угле при горении, изменяются с изменением сжатия.

Как показали проведенные исследования, в твёрдой горючей слоистой среде спектры акустических импульсов, характеризующих процесс горения, более заметно, чем спектры акустических импульсов, возникающих при механическом воздействии, ослабляются в высокочастотной области с увеличением пройденного расстояния. С увеличением сжатия образцов спектральные функции возникающих в них акустических сигналов, характеризующих процесс горения, сдвигаются в сторону более высоких амплитуд. Полученные результаты могут являться основой для получения информации об условиях, имеющих место в горном массиве по пути распространения акустических импульсов, характеризующих процесс горения, при диагностике очагов пожаров в угольных пластах.

### Литература

1. Борисенко Д.И./ Способ акустической пеленгации подземного горения угля// Горение твёрдого топлива: Сборник докладов VII Всероссийской конференции с международным участием, Новосибирск, 10-13 ноября 2009. – Новосибирск: Издательство ИТ СО РАН, 2009. – Ч.3. – 263 с. – С.119-123.
2. Калинин В.А., Жуков И.В., Г.А. Ефимова/ Затухание ультразвука в горных породах при давлении до 1,5 ГПа: метод эталонирования и частотный анализ// Физика горных пород при высоких давлениях: сборник научных трудов Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, М.: Наука, 1991. – С.79-86.