

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.(333 + 332) : 534.6

ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ В ИСКОПАЕМЫХ УГЛЯХ, ПОДВЕРГНУТЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КРИОГЕННОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

Е. А. Новиков, В. Л. Шкуратник, М. Г. Зайцев

*Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
E-mail: e.novikov@misis.ru, v.shkuratnik@misis.ru,
Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

Проведены экспериментальные исследования характера акустико-эмиссионного отклика ископаемых углей различной стадии метаморфизма на циклическое изменение действующих в них термических напряжений. Дано описание используемого аппаратурного и методического обеспечения. Выявлены и проанализированы особенности указанного отклика в образцах антрацита, бурых и каменных углей различной степени нарушенности, обусловленной их предварительным циклическим замораживанием и оттаиванием, а также насыщением влагой. Показано, что важнейшей из таких особенностей является проявление в каждом цикле температурного воздействия термического аналога акустико-эмиссионного эффекта Фелисити. Установлены закономерности проявления этого эффекта и дано их физическое объяснение на основе анализа процессов дефектообразования в углях на различных стадиях термического воздействия. Предложены и обоснованы методические подходы, позволяющие по проявлениям эффекта Фелисити в акустико-эмиссионном отклике углей, подвергаемых циклическому температурному нагружению, оценить их структурную поврежденность, термическую стойкость, окисленность и склонность к криогенному выветриванию. Обсуждается возможность использования указанных проявлений для прогноза структурных изменений угольной продукции при длительном хранении в конкретных климатических условиях и опасности ее самонагрева и самовозгорания.

Термостимулированная акустическая эмиссия, антрацит, каменный и бурый уголь, криогенное воздействие, акустико-эмиссионные эффекты памяти, эффект Фелисити, структура, свойства

DOI: 10.15372/FTPRPI20180601

Для изучения процессов деформирования и разрушения образцов горных пород в реальном масштабе времени широкое распространение получил метод акустической эмиссии (АЭ) [1–4]. Возникающие в этих образцах при внешних механических или термических воздействиях различные акустико-эмиссионные эффекты несут важную информацию о структурных особенностях, дефектности и свойствах геоматериала [5, 6]. Особое место среди указанных эффектов

занимают эффекты Кайзера (ЭК) и Фелисити (ЭФ) [7, 8]. Они отражают свойство памяти горных пород, т. е. их способность воспринимать, сохранять и воспроизводить при определенных условиях информацию об испытанных ранее внешних воздействиях. Эти эффекты проявляются при циклическом нагружении объектов исследования и позволяют получать количественные оценки их напряженно-деформированного состояния и степени поврежденности [9, 10]. Эффект Кайзера заключается в присутствии АЭ только на уровне фоновых шумов до тех пор, пока не будет достигнута максимальная предварительно приложенная нагрузка, при достижении которой активность АЭ скачкообразно возрастает. Эффект Фелисити проявляется в наличии АЭ при напряжениях, значения которых не достигают максимального уровня предшествующего цикла. Качество проявления ЭК и ЭФ характеризуется коэффициентом Фелисити $FR = \sigma_{n+1} / \sigma_n$, (σ_{n+1} — напряжение в объекте исследования, при котором фиксируется появление АЭ в цикле $(n+1)$, σ_n — максимальное напряжение в цикле n). Таким образом, для идеального ЭК $FR = 1$, а для ЭФ всегда выполняется условие $FR < 1$.

Многочисленные экспериментальные исследования на образцах горных пород различных генотипов свидетельствуют о том, что значение FR существенно зависит от их неоднородности и структурной поврежденности. В [11, 12] показано, что при повторном нагружении материалов, имеющих значительный уровень дефектности, скачкообразный рост активности акустической эмиссии в них всегда начинается существенно раньше момента достижения максимальной нагрузки предшествующего цикла.

Поскольку дефектность почти всегда присутствует в геоматериалах, то при их акустико-эмиссионных исследованиях на практике чаще всего проявляется именно ЭФ, а не ЭК. Очевидно, что это должно быть характерно для углей, которые в силу своего генезиса отличаются значительной разномасштабной неоднородностью и дефектностью [13]. Однако именно для углей указанные выше эффекты исследованы в наименьшей степени.

ЭК и ЭФ проявляются не только при механическом, но и при термическом нагружении, реализация которого менее трудоемка, так как не предъявляет жестких требований к форме и размерам образцов. В этом случае говорят о термических аналогах ЭК и ЭФ [14]. Если считать, что термонапряжения в образце пропорциональны температуре, то для оценки качества проявления термических аналогов ЭК и ЭФ можно использовать коэффициент $FR_T = T^{n+1} / T^n$ (T^{n+1} — температура в объекте исследования, при которой фиксируется возрастание АЭ в цикле $(n+1)$, T^n — максимальная температура в цикле n). Коэффициент FR_T позволяет в первом приближении качественно оценивать степень структурной поврежденности углей. Однако он не может использоваться для прогноза их термостойкости и склонности к термической (в частности, криотермической) деструкции. Для этого требуется применение других численных показателей и методических подходов, рассмотрению которых посвящена настоящая работа. Важность такого исследования обусловлена тем, что влияние климатических и иных воздействий окружающей среды ведет к интенсификации образования трещин, которые, являясь каналами миграции воздушной среды в угольный материал, способствует развитию в нем окислительных процессов. Такие процессы повышают риски самонагревания и самовозгорания угля, а в условиях подземной разработки могут инициировать взрывы пыли и газа [15].

АППАРАТУРНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнялись на промышленно-пластовых пробах углей марок Д (каменный уголь), 2БР (бурый уголь) и А (антрацит), отобранных и подготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 9815. Основные характеристики использованных углей приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика углей

Марка, разрез (шахта), угольный бассейн	Петрографический состав, % об.				Показатели технического анализа, % мас.				Высшая теплота сгорания, Q_s^{daf} , ккал/кг
	Vt	Sv	I	L	W^a	A^d	V^{daf}	S^d	
2БР, разрез Березовский 1, Канско-Ачинский бассейн	94	—	6	0	10.8	4.3	47.5	0.26	6523.64
Д, Талдинский угольный разрез (Таежное поле), Кузнецкий бассейн	54	11	27	8	3.1	15.3	38.8	0.37	7561.66
А, Шахта “Шерловская- Наклонная”, Донецкий бассейн	85	6	9	0	1.2	4.3	3.5	1.60	8761.95

Примечание. Vt, Sv, I, L — содержание витринита, семивитринита, инертинита и липтинита соответственно; W^a — аналитическая влажность; A^d — зольность на сухое состояние; V^{daf} — выход летучих веществ на сухое беззольное состояние; S^d — массовая доля общей серы на сухое состояние

Из каждой приведенной в табл. 1 марки угля методом сухой шлифовки изготовлено по 10 образцов в виде призм примерно прямоугольной формы, внешний вид и размеры которых представлены на рис. 1.



Рис. 1. Характерный внешний вид и размеры исследованных образцов угля

Лабораторный эксперимент осуществлялся в два этапа. На первом образцы подвергались разной степени криотермической дезинтеграции, имитирующей природное морозное выветривание, а на втором — исследовались эти образцы методом термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) [6].

С целью имитации воздействия атмосферных осадков половина образцов каждого типа на 14 сут помещалась в емкость, заполненную водой с рН 6.5–7.0. Затем сухие и влагонасыщенные образцы были перенесены в морозильную камеру типа SE 10-45, где подверглись 26 циклам замораживания и оттаивания. Каждый такой цикл включал охлаждение до $-40\text{ }^\circ\text{C}$, выдержку на этой температуре в течении 120 мин и естественное конвективное оттаивание до $+10\text{ }^\circ\text{C}$.

Насыщенные влагой образцы подвергались циклическому замораживанию и оттаиванию непосредственно в емкостях с водой. Это позволяло усилить действие криогенной дезинтеграции за счет расклинивающего действия льда и обеспечить миграцию влаги внутрь угольного вещества на стадии оттаивания.

После криотермического воздействия все образцы испытывали методом ТАЭ с помощью лабораторной установки на базе трубчатой печи Nabertherm RT 50/250/11 с программируемым контроллером типа P 320. Внешний вид установки представлен на рис. 2.

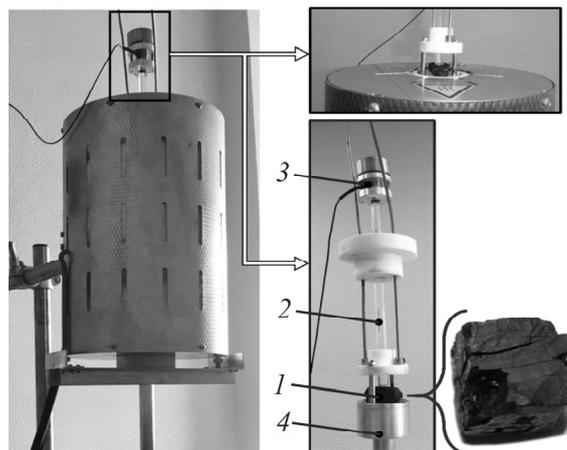


Рис. 2. Лабораторная установка (обозначения приведены в тексте)

Образец 1 угля фиксировался между волноводом 2 из кварцевого стекла, передающим сигналы ТАЭ на приемный пьезоэлектрический преобразователь 3, и цилиндрическим металлическим корпусом 4. Далее эта конструкция помещалась в герметичную камеру печи. Регистрация сигналов АЭ с выхода преобразователя 3 проводилась измерительной системой А-Line 32D. Температурный режим циклического нагревания образцов показан на рис. 3.

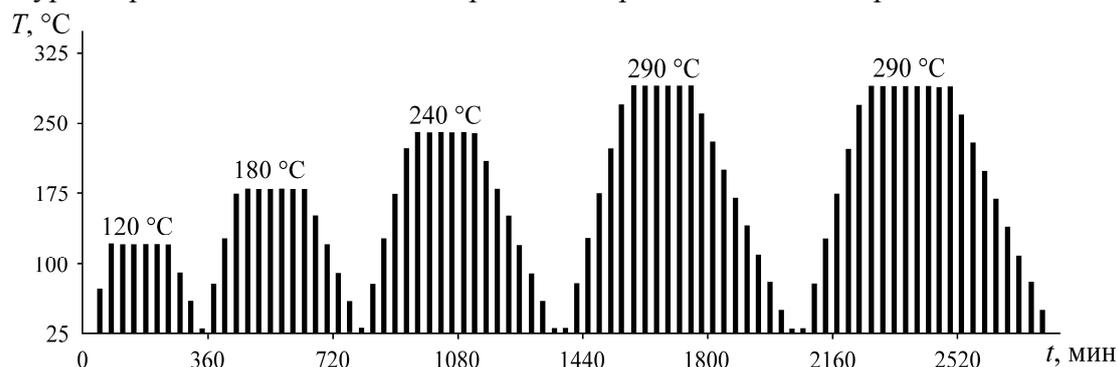


Рис. 3. Изменение температуры в камере трубчатой печи во времени

Стадия выдержки на максимальной температуре каждого цикла длилась не менее 180 мин. Нагрев осуществлялся со скоростью 1.6–1.8 °C/мин, а скорость естественного конвективного остывания составляла 1.0 °C/мин. Такой режим близко отражает реальные климатические воздействия, для которых характерны относительно плавные колебания температур, не приводящие к значительным объемным термическим градиентам и быстрому удалению содержащейся в порах и трещинах влаги. При этом химические превращения угольного материала протекают в квазистационарном режиме, отсутствуют процессы деструкции, связанные с быстрым, различным для отдельных структурных элементов объемным расширением и т. д. Выбранный режим термического нагружения позволяет по полученному в лабораторных условиях эмиссионному отклику прогнозировать поведение соответствующего угольного материала под действием природных климатических факторов. Для численной оценки этого отклика использовались такие параметры, как активность ТАЭ \dot{N}_Σ и средняя длительность импульса ТАЭ D_{imp} .

Значение \dot{N}_Σ отражает количество событий деструкции в образце за единицу времени. Величина средней активности $[M(\dot{N}_\Sigma^H)]$ ТАЭ, рассчитанная по области нагрева, характеризует количество относительно слабых структурных связей, для разрушения которых достаточно неболь-

шого перепада температур. Величина средней активности $[M(\dot{N}_{\Sigma}^B)]$ ТАЭ, рассчитанная по области температурной выдержки (рис. 3), показывает число “относительно прочных” структурных связей, ставших источниками ТАЭ только под длительным воздействием термических напряжений. Таким образом, ТАЭ-отклик в области нагрева несет информацию о степени криогенной дезинтеграции объекта контроля, а в области длительной температурной выдержки — характеризует его остаточную термическую стойкость.

Коэффициент интенсивности дефектообразования под действием термонапряжений:

$$K_n^N = \frac{M(\dot{N}_{\Sigma_n}^B)}{M(\dot{N}_{\Sigma_n}^H)},$$

где n — номер цикла термического воздействия.

Он отражает соотношение криотермически стойких и ослабленных структурных связей в n -м цикле термического нагружения и позволяет судить о склонности угольного материала к соответствующему температурному воздействию с учетом его исходной криогенной нарушенности. Поскольку на величины $M(\dot{N}_{\Sigma_n}^B)$ и $M(\dot{N}_{\Sigma_n}^H)$ одинаково влияют такие факторы неопределенности, как размер, вещественная и структурная неоднородность образца и др., то коэффициент K_n^N будет свободен от действия указанных факторов.

Параметр D_{imp} показывает время, которое требуется действующим в объекте контроля термонапряжениям, чтобы инициировать единичный акт деструкции, приводящий к генерации импульсов ТАЭ с амплитудой выше порога срабатывания измерительной системы. Превышение этого порога служит критерием отделения полезного сигнала от фоновых шумов.

На величины D_{imp} и $M(\dot{N}_{\Sigma_n}^B)$ оказывают влияние указанные выше факторы неопределенности. Для исключения этого целесообразно ввести безразмерный коэффициент термической стойкости нагружаемого материала $K^{imp} = D_{imp}^B / D_{imp}^H$ (D_{imp}^B и D_{imp}^H — величины D_{imp} , усредненные во временных областях выдержки (при $T = \text{const}$) и нагрева соответственно). Физический смысл коэффициента K^{imp} — различие в устойчивости условно прочных и ослабленных структурных связей угля, первые из которых теряют термическую стойкость только после длительного температурного нагружения, а во вторые — разрушаются уже при малом изменении температур во время медленного прогрева образца в начале эксперимента.

Далее вводим обобщающий численный показатель $R^t = K^{imp} / K^N$, который может быть использован в качестве меры склонности угольного материала к дальнейшей термической деструкции, а также для оценки изменения его термической стойкости и скорости окисления под действием определенной температуры с учетом степени исходной нарушенности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Прирост нарушенности и активность акустической эмиссии на различных стадиях термической деградации угля при длительном воздействии на него постоянного теплового потока отражены на рис. 4. Здесь же показаны фотографии образцов угля, соответствующие моменту окончания каждой из трех стадий термической деградации.

Стадия I характеризуется тем, что имеющихся термических напряжений еще недостаточно для преодоления предела прочности угольного материала. Новых дефектов практически не возникает, происходит лишь развитие исходно содержащихся в угле трещин и зон окисления. В конце стадии возможно формирование единичных трещин. Активность ТАЭ на этой стадии незначительна.

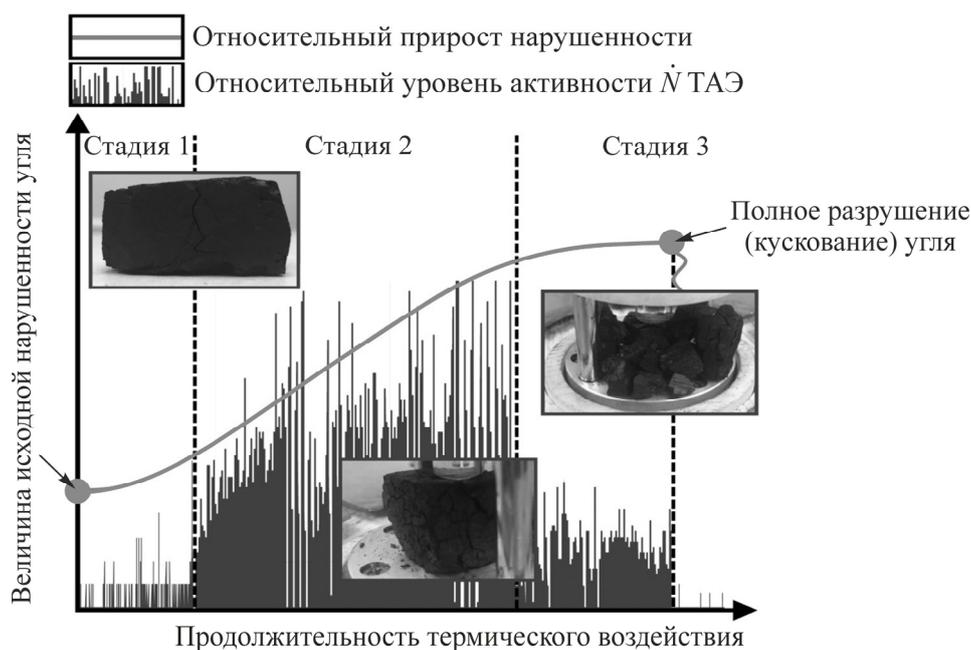


Рис. 4. Относительные изменения прироста нарушения и активности акустической эмиссии в образце угля в функции от времени постоянного термического воздействия на него

Для стадии 2 характерна интенсификация термической деструкции структурных элементов и трещинообразования, а также связанного с ними окисления угля. В образце начинает формироваться разветвленная сетка трещин, по мере развития которой заметно возрастает активность акустической эмиссии.

На стадии 3 наблюдается существенное (вплоть до фоновых значений) снижение активности акустической эмиссии, что связано с окончательным разрушением ее потенциальных источников (исчерпывается запас еще не затронутых термической деструкцией областей), а также значительным возрастанием затухания сигналов АЭ из-за начала кускования образца. Понятно, что границы указанных выше стадий и даже само их наличие будут существенно зависеть от типа угля, его конкретных механических и тепловых свойств, а также степени нарушенности.

Характерные зависимости активности ТАЭ углей марок Д, 2БР и А в ходе циклического нагревания с возрастающей максимальной температурой (при переходе от цикла 3 к 4) и постоянном значении указанной температуры (при переходе от цикла 4 к 5) приведены на рис. 5.

Учитывая длительность экспериментов, на время остывания образцов установка отключалась. В связи с этим соответствующий остыванию акустико-эмиссионный отклик на рис. 5 практически не представлен и не показана динамика температур на стадии остывания. Отметим, что для обеспечения необходимой детальности результатов на рис. 5 отражены акустограммы, соответствующие циклам ТАЭ-испытаний 3, 4 и 5, так как первые два цикла не несут принципиально новой по сравнению с ними информации. Видно, что в цикле 4 ТАЭ-испытаний наблюдается температурный аналог эффекта Фелисити (для антрацита $FR_T = 184^\circ\text{C} / 240^\circ\text{C} = 0.76$, для бурого угля $FR_T = 100^\circ\text{C} / 240^\circ\text{C} = 0.42$, а для каменного угля $FR_T = 30^\circ\text{C} / 240^\circ\text{C} = 0.125$).

Кроме различия в значениях FR_T , проявления ЭФ в каждом типе угля имеют и другие особенности. В каждом последующем цикле ТАЭ-испытаний антрацита вплоть до четвертого интенсификация \dot{N}_Σ происходит при одной и той же температуре T^N . Переход к пятому циклу

сопровождается смещением температуры T^N начала интенсификации активности ТАЭ. Это явление объясняется высокой прочностью структурных связей антрацита, которые под действием относительно малых температур разрушаются не полностью. Возникающих при таких температурах термонапряжений недостаточно для полного разрушения структурных связей, которые остаются потенциальными источниками ТАЭ и “срабатывают” в последующих циклах.

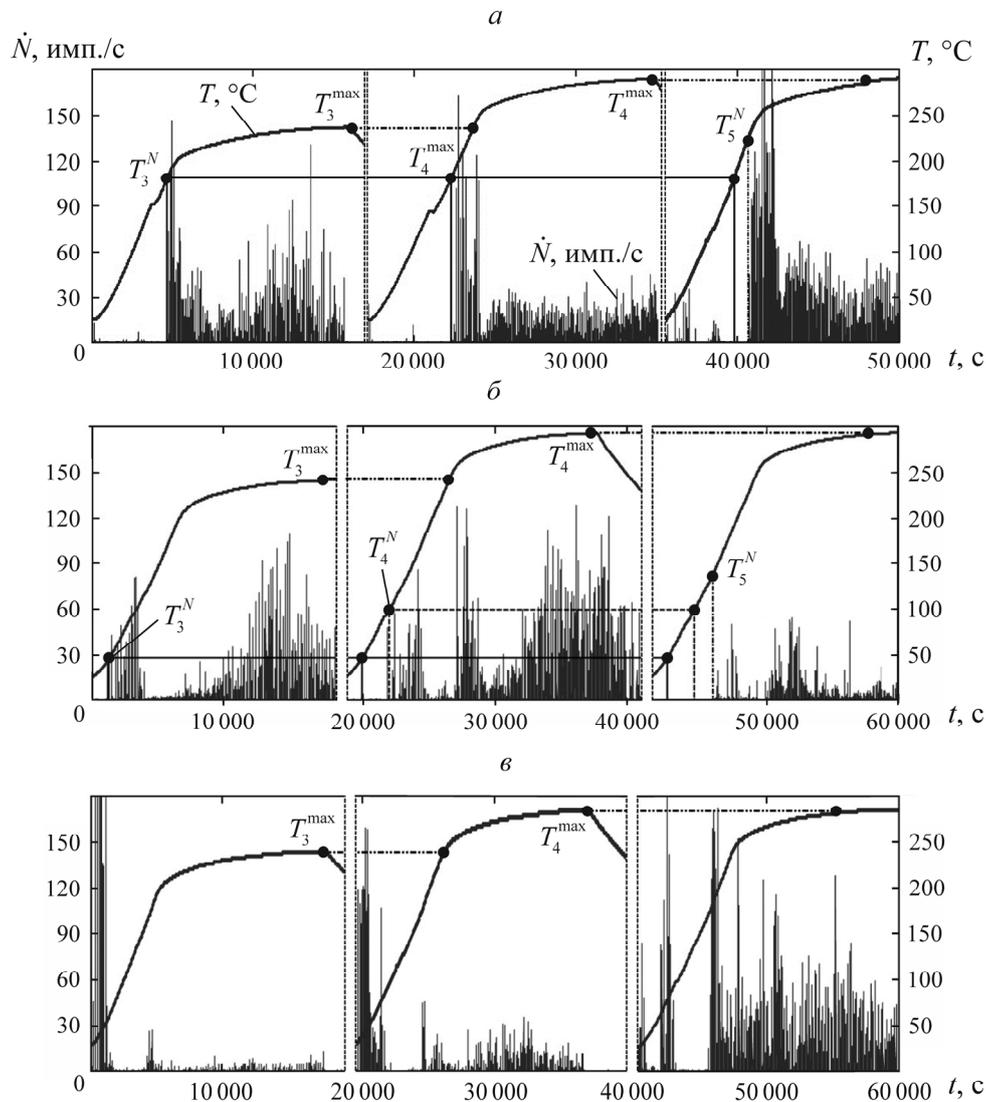


Рис. 5. Характерные зависимости активности ТАЭ \dot{N}_{Σ} образцов антрацита (а), бурого (б) и каменного (в) углей при циклическом изменении температуры их нагрева в функции от времени с начала третьего цикла эксперимента

Смещение величины T^N при переходе от цикла к циклу термического воздействия может рассматриваться в качестве идентификационного признака того, что в образце достигнуты термонапряжения, при которых нарушается структурная устойчивость угля к температурному воздействию. С каждым последующим циклом термического нагружения формируются новые дефекты, которые становятся концентраторами напряжений, что в свою очередь активизирует процессы дефектообразования. Эти процессы сопровождаются генерацией импульсов АЭ и продолжаются до полного разрушения структурных связей, после чего последние перестают быть потенциальными источниками эмиссии.

Таким образом, в первых циклах нагрева антрацита сохраняется запас потенциальных источников ТАЭ, переходящих в активное состояние при одной и той же температуре. Продолжительное воздействие температур порядка 290 °С создает условия, достаточные для полного разрушения части структурных связей. Очевидно, что сначала разрушаются ослабленные структурные связи угольного материала, нарушенные в ходе генетических и постгенетических преобразований, а также в процессе предварительной криотермической обработки образцов. Для перевода в активное состояние оставшихся исходно более прочных структурных связей угля и стимуляции АЭ требуется прогрев образца до все больших температур или в течение все большего времени. Отмеченное объясняет смещение T^N при повторяющемся нагреве до $T = 290$ °С в цикле 5.

Особенностью бурого угля (рис. 5б) является смещение T^N в каждом последующем цикле нагрева (начиная с цикла 3), а не только при высокотемпературных воздействиях. Как и в случае антрацита, это связано с разрушением наиболее слабых структурных связей, вызывающим генерацию АЭ. Однако, если в антраците в силу его большей прочности возможна повторная активация источников ТАЭ, то в менее прочном буром угле ослабленные структурные связи полностью разрушаются уже после первого цикла термического воздействия и на характер ТАЭ в последующих циклах нагрева не влияют. В то же время в каждом цикле нагревания часть исходно прочных структурных связей за счет накопления дефектов переходит в разряд ослабленных, которые становятся источниками ТАЭ в последующем цикле термического воздействия. Соответственно запас потенциальных источников ТАЭ частично возобновляется до тех пор, пока в угольном веществе остаются не затронутые термической деградацией участки. Когда таких участков больше не остается, образец переходит на стадию 3 (рис. 4) и разваливается на отдельные части (кускуется). По мере развития процесса термической деструкции угольного материала в стадию предреализации переходят все более прочные структурные связи. Для того чтобы инициировать их окончательное разрушение и генерацию АЭ требуется создать термические напряжения большие, чем требовалось для разрушения исходно ослабленных структурных связей.

Из рис. 5в следует, что характер ТАЭ каменного угля принципиально иной, чем у антрацита и бурого угля. Активность АЭ резко увеличивается сразу после возрастания температуры в камере печи, но в каждом последующем цикле нагрева уровень \dot{N}_Σ на начальной стадии эксперимента снижается. Это явление может быть объяснено относительно низкой хрупкостью каменного угля, качественная оценка которой может быть дана по содержанию в углях витринита и семивитринита. Согласно табл. 1, их содержание в исследованных образцах каменного угля не превышает 65 % об., тогда как у бурого угля и антрацита доходит до 94 и 91 % об. соответственно. Таким образом, менее прочные по сравнению с другими углями структурные связи каменного угля переходят в упруго-пластическое состояние и становятся источниками ТАЭ сразу после возникновения термических напряжений. За счет более высокой упругости структурные связи каменного угля способны некоторое время воспринимать даже критические термонапряжения без значительных необратимых деформаций. Следует учесть, что в каменном угле формируются вызванные циклическим нагружением усталостные явления, в результате чего ухудшаются упругие свойства структурных связей. Чем ниже упругие свойства условной структурной связи, тем быстрее она переходит в предельное напряженное состояние и перестает излучать импульсы АЭ. Как следствие, по мере развития термической деградации и снижения упругих свойств активность акустической эмиссии угольного материала снижается.

По результатам обработки представленных на рис. 5 экспериментальных данных получены зависимости показателя R' в функции от количества циклов термического нагружения углей при наличии и отсутствии их влагонасыщения (рис. 6). Для антрацита приведена только одна зависимость. Это связано с тем, что для него характерна относительно низкая открытая пористость и трещиноватость, что ограничивает возможности миграции влаги в угольное вещество. Поэтому влагонасыщение не привело к сколь-нибудь значимым изменениям термостимулированной акустической эмиссии антрацита.

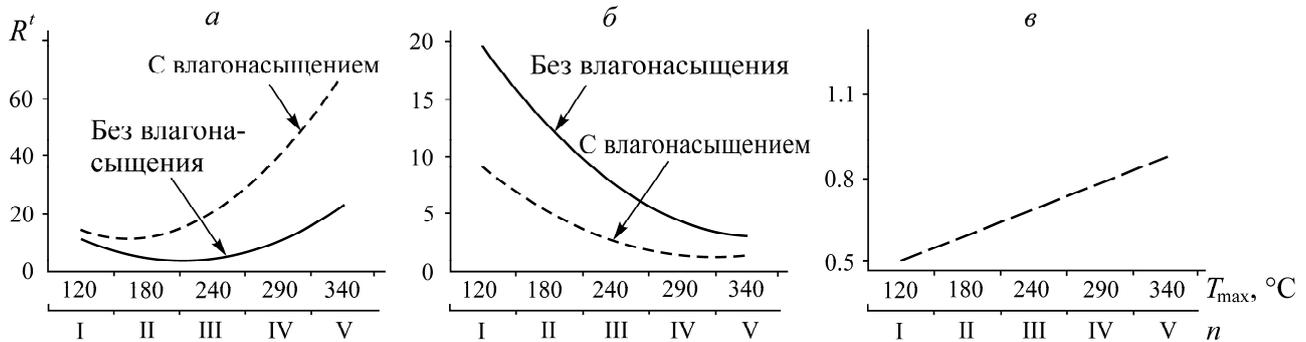


Рис. 6. Зависимость показателя R' образцов бурого угля (а), каменного угля (б) и антрацита (в) от количества n и максимальной температуры T_{max} циклов термического нагружения

Из рис. 6 следует, что характер функций $R'(T_{max})$ для углей различных стадий метаморфизма различен. На начальных стадиях температурного воздействия (первые два цикла) показатель R' в буром угле снижается примерно на 18%. Это связано с быстрым разрушением в нем ослабленных предварительным криотермическим воздействием структурных связей, а значит, и уменьшением потенциальных источников ТАЭ. При этом возникающих в образцах термонапряжений недостаточно для активизации исходно более прочных структурных связей. Такая активизация происходит уже на последующих циклах нагрева (начиная с третьего), когда термические напряжения достигают уровня, достаточного для интенсификации дефектообразования и увеличения за счет этого каналов миграции кислорода в угольное вещество. Таким образом, в каждом последующем цикле нагрева все больше снижается термическая стойкость угольного материала и возрастает его склонность к самовозгоранию. Данный процесс носит незатухающий характер в связи с высокой скоростью развития сетки трещин. В результате этого не успевает сформироваться слой переокисленного угля, препятствующий дальнейшей миграции кислорода воздуха в угольное вещество. Следует учитывать, что, находясь на начальной стадии метаморфизма, бурый уголь имеет наибольший запас структурных связей низкой прочности, за счет разрушения которых поддерживается распространение процесса деструкции.

Водонасыщение бурого угля приводит к увеличению скорости нарастания показателя R' , причем нарастание начинается уже после первого цикла ТАЭ-испытаний. Последнее связано с интенсификацией процессов криотермической деструкции за счет расклинивающего действия льда, вследствие чего происходит ослабление прочности угольного материала и интенсивное дефектообразование начинается при меньшей термической нагрузке.

В отличие от результатов, полученных при ТАЭ-испытаниях бурого угля, в образцах каменного угля с увеличением числа циклов нагрева показатель R' убывает. Это связано с особенностями механизма образования АЭ в каменном угле, который вызван переходом структурных связей в напряженное состояние с последующей частичной релаксацией в исходное состояние. Процессы разрушения структурных связей также наблюдаются, но в отличие от бурого угля, они протекают гораздо медленнее и не создают столь высокий уровень активности эмиссии.

Тенденция к снижению показателя R^t каменного угля обусловлена также затуханием процессов окисления и термической деструкции по мере исчерпания не затронутых ими участков. Отмечающаяся в этом угле относительно высокая прочность и упругость структурных связей обуславливает низкую скорость трещинообразования под влиянием термонапряжений. В результате на свободных поверхностях успевает сформироваться слой (барьер) из переоxygenного угля, который устойчив к воздействию температур и препятствует дальнейшему проникновению кислорода вглубь образца. По мере формирования такого барьера и разрушения исходно слабых структурных связей, склонность каменного угля к дальнейшей термической деструкции снижается. Таким образом, выполаживание функции $R^t(T_{\max})$ свидетельствует о достижении предельно возможной для данных условий степени окисленности и исчерпании запаса структурных связей, склонных к разрушению под влиянием температур.

В образцах каменного угля, подвергнутых насыщению влагой, в ходе циклического замораживания и оттаивания (на стадии пробоподготовки) образование дефектов протекает интенсивнее. По сравнению с сухими у таких образцов меньше сохранившихся после криотермического воздействия ослабленных структурных связей, поэтому у них меньше потенциал для развития термической деструкции. Как следствие, зависимость $R^t(T_{\max})$ для влагонасыщенных образцов расположена ниже аналогичной зависимости для сухих, причем с ростом T_{\max} разница между соответствующими кривыми уменьшается (рис. 6б).

Как видно из рис. 6в, для антрацита характерны относительно малые значения R^t , что свидетельствует о его низкой склонности к криотермической деструкции. Линейное возрастание значений критерия R^t антрацита в каждом последующем цикле термического воздействия отражает процесс формирования в нем структурных нарушений, ведущих к постепенному снижению термической стойкости. Однако это снижение относительно мало, о чем свидетельствует малая крутизна нарастания R^t при переходе от цикла к циклу нагрева.

ВЫВОДЫ

Циклическое нагревание – охлаждение ископаемых углей с возрастающей от цикла к циклу максимальной температурой и последующей выдержкой на этой температуре сопровождается проявлениями в них термического аналога акустико-эмиссионного эффекта Фелисити. Для углей различной стадии метаморфизма и степени нарушенности характер этих проявлений индивидуален, что позволяет на их основе идентифицировать марку и генотип угля, а также проводить оценку его термостойкости. Для такой оценки может быть использован эффект смещения температуры T^N первого всплеска активности \dot{N}_Σ ТАЭ в каждом последующем цикле термического воздействия, а также показатель R^t . Величина смещения ΔT^N позволяет оценить стойкость угля к вызвавшему это смещение термическому воздействию. Сравнивая ΔT^N у эталонной (свежей) и исследуемой проб угля, можно качественно определить степень криогенной деструкции последней. Путем периодического отбора и испытания проб подверженного действию климатических факторов угля, по эффекту смещения величины T^N можно судить о развитии процесса криогенного выветривания.

Показатель R^t является функцией средних значений активности и длительности импульсов ТАЭ на участках увеличения и выдержки температуры каждого из циклов термического воздействия. Величина R^t отражает склонность угольного материала к дальнейшей термической деструкции при определенном режиме температурного нагружения. Это может быть использовано для решения прогнозных задач, связанных с оценкой возможных структурных

изменений угольной продукции при ее длительном хранении, определением опасности ее самовозгорания, а также установлением предельных сроков хранения угля в заданных климатических условиях.

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о высокой чувствительности показателей ΔT^N и R^t к процессам термической деструкции и окисления ископаемых углей, в частности под влиянием криогенного выветривания и атмосферных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков И. П., Куксенко В. С., Чмель А. Е. Накопительная стадия сигналов акустической эмиссии при компрессионном и ударном разрушении гранита // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 78–82.
2. Tripathi R., Srivastava M., Hloch S., Adamčík P., Chattopadhyaya S., and Das A. K. Monitoring of acoustic emission during the disintegration of rock, *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 149. — P. 481–488.
3. Xiangguo Kong, Enyuan Wang, Xueqiu He, Dexing Li, and Quanlin Liu. Time-varying multifractal of acoustic emission about coal samples subjected to uniaxial compression, *Chaos, Solitons and Fractals*, 2017, Vol. 103. — P. 571–577.
4. Filimonov Yu. L., Lavrov A. V., and Shkuratnik V. L. Effect of confining stress on acoustic emission in ductile rock, *Strain*, 2005, Vol. 41, Issue 1. — P. 33–35.
5. Novikov E. A., Oshkin R. O., Shkuratnik V. L., Epshtein S. A., and Dobryakova N. N. Application of thermally stimulated acoustic emission method to assess the thermal resistance and related properties of coals, *Int. J. of Min. Sci. and Tech.*, 2018, Vol. 28. — P. 243–249.
6. Шкуратник В. Л., Новиков Е. А. Термостимулированная акустическая эмиссия горных пород как перспективный инструмент решения задач геоконтроля // Горн. журн. — 2017. — № 6. — С. 21–27.
7. Lavrov A. V. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2003, Vol. 40, Issue 2. — P. 151–171.
8. Mingwei Zhang, Qingbin Meng, Shengdong Liu, Deyu Qian, and Nong Zhang. Impacts of cyclic loading and unloading rates on acoustic emission evolution and felicity effect of instable rock mass, *Advances in Materials Sci. and Eng.*, 2018, Article ID 8365396. — 16 p.
9. Yunpei Liang, Qingmiao Li, Yilei Gu, and Quanle Zou. Mechanical and acoustic emission characteristics of rock: Effect of loading and unloading confining pressure at the postpeak stage, *J. of Natural Gas Sci. and Eng.*, 2017, Vol. 44. — P. 54–64.
10. Zhang R., Dai F., Gao M. Z., Xu N. W., and Zhang C. P. Fractal analysis of acoustic emission during uniaxial and triaxial loading of rock, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2015, Vol. 79. — P. 241–249.
11. Dunegan H. L. and Harris D. Acoustic emission a new nondestructive testing tool, *Ultrasonic*, 1969, No. 9. — P. 160–166.
12. Dunegan H. L., Harris D., and Tatro C. A. Fracture analysis by use of acoustic emission, *Engineer Fracture Mech.*, 1968, No. 1. — P. 105–122.
13. Kossovich E., Epshtein S., Dobryakova N., Minin M., and Gavrilova D. Mechanical properties of thin films of coals by nanoindentation, *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*, 2017. — P. 45–50.
14. Zhenlong Ge. and Qiang Sun. Acoustic emission (AE) characteristics of granite after heating and cooling cycles, *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, Vol. 200. — P. 418–429.
15. Курленя М. В., Скрицкий В. А. Взрывы метана на высокопроизводительных участках угольных шахт и причины их возникновения // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 71–78.

Поступила в редакцию 4/X 2018
После доработки 29/X 2018
Принята к публикации 28/XI 2018