

УДК 622.831.325:534.2:622.807.4

Некоторые особенности протекания и предотвращения газодинамических явлений

В рамках термоупругой модели рассмотрена задача поглощения поверхностным слоем угольного пласта энергии внешнего излучения. Получены зависимости возникающих напряжений от глубины проникновения импульса в массив для разных моментов времени. Установлено, что определенное соотношение сжимающих и растягивающих напряжений может служить критерием, согласно которому зародившийся процесс способен развиваться или затухать.

Ключевые слова: газодинамическое явление, сжимающие и растягивающие напряжения, физико-химическая обработка.

Контактная информация: smakeev@ukr.net

Для определения эффективности воздействия на углепородный массив необходимо учитывать не статическое, а его постоянно меняющееся динамическое состояние. Это возможно в русле новаторских воззрений на природу подземных явлений, которые дополняют представления об их протекании и в том числе о механизме выбросов угля, породы и газа. Такой подход позволит детализировать и одновременно расширить существующие концепции, выдвигавшиеся исследователями, изучавшими поведение углепородного массива, подверженного газодинамическим явлениям. Накоплен опыт борьбы с ними, однако до конца проблема так и не решена. Возможно потому, что нет единой эволюционно-структурной модели газодинамических явлений, способной устранить неудовлетворенность ученых-горняков и адекватно выбрать параметры приемлемого способа управления напряженно-деформированным состоянием горного массива, чтобы не допустить катастрофических последствий от вырвавшейся из-под контроля подземной стихии.

Доскональная модель должна быть основана на сопоставлении и увязке наиболее соответствующих процессу протекания внезапных выбросов принципов известных теорий с привлечением современных исследований, в которых переосмысливается картина динамического явления или предлагается новый взгляд на проблему. В указанном аспекте представленные некоторые моменты теоретической модели не претендуют на исчерпывающие результаты, но, тем не менее, могут быть частным случаем описания одной из возможных стадий газодинамического процесса, неординарного по разнообразию форм его протекания.

При деформировании горных пород возникает электромагнитное поле, его частотный диапазон находится в пределах от единиц до сотен тысяч герц. Такое дополнительное усилие на породный массив изнутри может возбудить, с учетом технологических факторов, динамические процессы в виде горных ударов и внезапных выбросов угля и газа. Поэтому для их возникновения



А. Ф. БУЛАТ,
доктор техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)



С. Ю. МАКЕЕВ,
канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)



С. Ю. АНДРЕЕВ,
канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)



Г. А. РЫЖОВ,
магистр
(ИГТМ НАН Украины)

достаточно даже малых внешних воздействий техногенного или природного характера при достижении некоторых критических значений нелинейной системы уголь–газ–влага, чтобы квазиравновесное состояние нарушилось [1, 2] и возник необратимый процесс с образованием солитонов – структурно устойчивых одиночных волн, распространяющихся в нелинейной среде [3, 4]. Таким образом, нагрузка на горный массив, как правило, носит волновой характер в виде суперпозиции электромагнитной и механической составляющих с выделением тепловой энергии.

Постановка задачи. Пусть при осуществлении подобного воздействия воплощающий его импульс падает в момент времени $t = 0$ на пласт угля, который представлен упругим полупространством $x \geq 0$ с начальной температурой $T = T_0$. В рамках термоупругой модели происходит частичное поглощение энергии падающего излучения поверхностным слоем пласта толщиной l , где время прохождения по нему волны напряжений может быть сравнимо с длительностью импульса t_d .

Если количество поглощенной энергии в слое вблизи его границы экспоненциально убывает с глубиной, то за время действия импульса t_d поток энергии Π на единицу поверхности поддерживается постоянным [5, 6]. Его скорость на единицу объема

$$p(x, t) = p_0 e^{-x/l} [H(t) - H(t - t_d)]. \quad (1)$$

Здесь $p_0 = \Pi/l$; $H(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Уравнение энергии запишем в виде [6]

$$(1/k)(\partial T/\partial t) = -(\partial \varepsilon/\partial t) [\alpha T_0 (3\lambda + 2\mu)]/\beta + (p/\beta), \quad (2)$$

где k – коэффициент температуропроводности;
 ε – главная деформация по оси x ;
 α – коэффициент линейного расширения;
 λ, μ – параметры Ламе;
 β – коэффициент теплопроводности.

Для одномерного деформированного состояния при малых перемещениях u частиц вдоль оси x

$$\varepsilon = \partial u/\partial x. \quad (3)$$

Закон Гука запишем следующим образом:

$$\sigma = (\lambda + 2\mu)\varepsilon - \alpha(3\lambda + 2\mu)T, \quad (4)$$

где σ – главное напряжение.

Из соотношений (2)–(4) получаем волновое уравнение относительно σ :

$$(\partial^2 \sigma)/(\partial t^2) = c^2(\partial^2 \sigma)/(\partial x^2) - (k/\beta)\alpha(3\lambda + 2\mu)(\partial p/\partial t), \quad (5)$$

где c – адиабатическая скорость звука,

$$c = \sqrt{[\lambda + 2\mu + (3\lambda + 2\mu)^2 \alpha^2 T_0 \beta/k]/p_0}.$$

Поскольку p задается уравнением (1) и $p_0 = \Pi/l$, где $\Pi = Q/t_d$ (Q – полная энергия импульса), то из формулы (5) получим

$$(\partial^2 \sigma)/(\partial t^2) = c^2(\partial^2 \sigma)/(\partial x^2) - (R/t_d) e^{-x/l} [\delta(t) - \delta(t - t_d)], \quad (6)$$

где $R = \alpha(3\lambda + 2\mu)Qk/(\beta l)$;

$\delta(t)$ – дельта-функция Дирака, для которой функция Хевисайда $H(t)$ является первообразной:

$$H(x) = \int_{-\infty}^x \delta(t) dt.$$

Начальные условия примем в виде

$$\sigma(x, 0) = 0; \quad (\partial \sigma/\partial t)(x, 0) = 0, \quad (7)$$

а граничное условие –

$$\sigma(0, t) = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения (6) с учетом условий (7) и (8):

$$\sigma(x, t) = [1/(2c)] \int_0^t \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} [-R/t_d] \cdot e^{-\varphi/l} [\delta(\tau) - \delta(\tau - t_d)] d\varphi, \quad (9)$$

где t и φ – переменные интегрирования.

Или в конечном виде после упрощения интегралов

$$\sigma(x, t) = (Rl)/(2ct_d) [H(t)(e^{-(x+ct)/l} - e^{-(x-ct)/l}) + H(t - t_d)(e^{-(x-c(t-t_d))/l} - e^{-(x+c(t-t_d))/l})]. \quad (10)$$

Первая экспонента в круглых скобках при $H(t)$ описывает волну, падающую на поверхность, вторая – уходящую вглубь массива. Заметим, что при $x = 0$ и любом значении t выполняется граничное условие (8). Так, при $t > t_d$ на эти волны накладываются еще две волны, описываемые экспонентами в выражении при $H(t - t_d)$, одна из которых также «бежит» к поверхности, а вторая – от нее.

Указанный процесс с наложением волн одна на другую может продолжаться неограниченное время в безопасных от внезапных выбросов пределах (как при малоэнергетических воздействиях [7]), пока будет работать внешний источник энергии. Но если его интенсивность увеличить, то, не успевая совмещаться, волны будут как бы подгонять одна другую глубже в пласт до столкно-

вения с очагом потенциальной опасности в виде разных нарушений или неоднородностей с изменяющейся структурой угольно-породного вещества [8]. Чем ближе к работающему забою расположен очаг выбросоопасности, тем быстрее его реакция на внешнее воздействие и тем выше вероятность инициирования им обратной волны растяжения, которая, возвращаясь к обнаженной поверхности угольного забоя и отражаясь от нее, перерастает в волну дробления выброса.

Для получения более обобщенной картины происходящего введем в выражение (10) безразмерные величины:

$$X = x/l; L = (tc)/l; \Sigma = \sigma/R; L_d = (t_d c)/l. \quad (11)$$

Тогда при $L < L_d$ получим систему из двух уравнений:

$$\begin{aligned} \Sigma(X, L) &= -(e^{-L} \text{sh} X) / L_d \quad \text{при } X \leq L; \\ \Sigma(X, L) &= -(e^{-X} \text{sh} L) / L_d \quad \text{при } X > L. \end{aligned} \quad (12)$$

Для величины $L \geq L_d$ получим систему из трех уравнений:

$$\begin{aligned} \Sigma(X, L) &= [(e^{-(L-L_d)} - e^{-L}) \text{sh} X] / L_d \quad \text{при } X \leq L - L_d; \\ \Sigma(X, L) &= [-e^{-L} \text{sh} X + e^{-X} \text{sh} (L - L_d)] / L_d \quad \text{при } L - L_d \leq X \leq L; \\ \Sigma(X, L) &= e^{-X} [\text{sh} (L - L_d) - \text{sh} L] / L_d \quad \text{при } X > L. \end{aligned} \quad (13)$$

Результаты исследований. На рис. 1 и 2 показаны зависимости безразмерных напряжений Σ от X для некоторых значений L . При $L < L_d$ напряжения Σ определяются формулами (12) (кривые 1-3, рис. 1), при $L \geq L_d$ - формулами (13) (кривые 1-3, рис. 2).

Кривая 3 на рис. 1 построена как по формуле (12), так и (13) и может характеризовать место соприкосновения сжимающих усилий с растягивающими, т. е. быть тем моментом истины, когда с учетом различных условий газодинамическое явление способно развиваться или, наоборот, затухать. Из рис. 1 и 2 следует, что до момента $L = L_d$ существуют только сжимающие напряжения, причем они постоянно

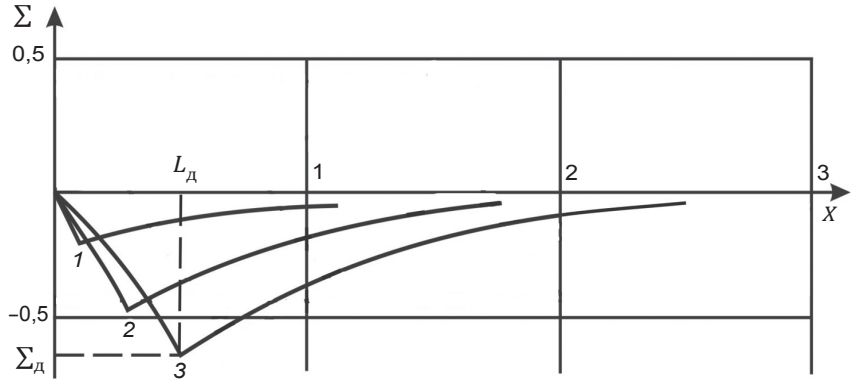


Рис. 1. Зависимости сжимающих напряжений от глубины их проникновения в массив для разных моментов времени в безразмерных величинах при $L \leq L_d$: 1 - $L = 0,2L_d = 0,1$; 2 - $L = 0,6L_d = 0,3$; 3 - $L = L_d = 0,5$.

возрастают, так как энергия подходит к поверхностному слою и одновременно идет разгрузка со свободной поверхности. Поэтому отпадает необходимость увеличивать интенсивность воздействия в начальной стадии процесса. Когда $L = L_d$, даже если действие импульса заканчивается, успевшие распространиться вглубь пласта растягивающие напряжения (см. кривые 1-3 на рис. 2) при $X \rightarrow \infty$ стремятся к значению $\Sigma_+ = (1 - e^{-L_d}) / (2L_d)$, в то время как сжимающие напряжения по мере удаления от свободной поверхности - к значению $\Sigma_- = -(1 - e^{-L_d}) / (2L_d)$. Соотношение этих величин, разность между которыми при $X \rightarrow \infty$ стремится к значению $(1 - e^{-L_d}) / L_d$, играет важную роль в создании дееспособности газодинамического процесса.

Именно участок шириной L_d (в размерных координатах длина участка составляет $t_d c$ - рас-

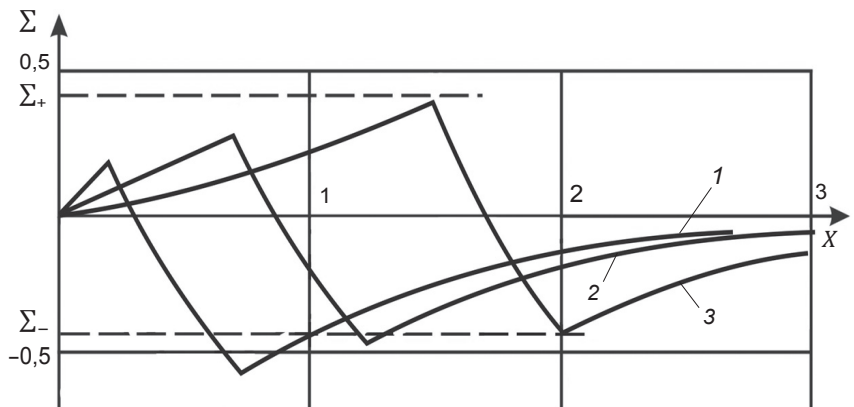


Рис. 2. Зависимости растягивающих напряжений от глубины их проникновения в массив для разных моментов времени в безразмерных величинах при $L > L_d$: 1 - $L = 4L_d = 2$; 2 - $L = 12L_d = 6$; 3 - $L = 30L_d = 15$.

стояние, которое проходит волна за время действия импульса) ответственен за переход от сжимающих напряжений к растягивающим, а значит служит критической величиной, способной в числовом выражении определить границы выбросоопасности. Окончательные размеры, а также время его образования и период существования относятся, как упоминалось, к решающим факторам развязывания газодинамического явления или затухания так и неокрепших сил для создания процесса разрушающего характера.

Таким образом, зная расчетные или экспериментальные параметры зарождения газодинамического явления, можно исследовать его особенности и диагностировать возможные формы и варианты протекания.

Основные случаи реализации внешнего воздействия на угольно-породную среду представляются такими:

- очаг выбросоопасности в пределах его достижимости внешним воздействием отсутствует, и будет оправдана нагрузка различной интенсивности на вовлекаемый в работу массив;
- очаг выбросоопасности находится вблизи угольного забоя, и воздействие любой интенсивности обязательно его достигнет, но фронт волны растяжения из глубины массива к его поверхности не успеет набрать необходимой силы для дальнейшего развития. И, скорее всего, произойдет высыпание или выброс угля и газа небольшой интенсивности;
- очаг выбросоопасности находится не на близком расстоянии, но достижимом для воздействия с возрастающей интенсивностью. Он переориентирует волну сжатия в растягивающую отраженную волну и, возвращаясь к поверхности забоя, мощный фронт разрушения может воплотиться в сокрушительный внезапный выброс.

Сжимающие напряжения $\Sigma_d = (e^{-2L_d} - 1)/(2L_d)$ согласно разработанной модели достигают максимального значения в точке $X = L_d$. Для недопущения условий реализации этого критического значения при воздействии на массив следует проводить противовыбросные мероприятия. В целях «сглаживания» пика напряжений необходимо применение «мягких» профилактических способов с равномерной пропиткой пласта, не оставляющих (в отличие от более мощных способов воздействия) локальных необработанных зон и потому имею-

щих более надежный радиус эффективного влияния обработки. К ним можно отнести малоэнергоемкие воздействия, в частности, физико-химическое [7–9].

Малоэнергоемкие способы заключаются в использовании энергии, накопленной в горных породах, для изменения состояния массива слабыми воздействиями, на один-два порядка меньшими численного предела прочности пород на одноосное сжатие, которые нарушают равновесное состояние и приводят к выделению энергии упругих деформаций из массива, за счет чего развивается процесс разгрузки приконтурной части пласта.

Суть метода состоит в периодической (например, между циклами по выемке угля) посылке управляющих слабых воздействий на призабойную часть пласта. При этом в зависимости от горно-геологических условий разработки воздействия (циклические, импульсные, вибрационные, гидроимпульсные, гидrocиклические, микробиологические и др.) могут быть переданы: через вмещающие породы; непосредственно пласту; комбинацией первого и второго вариантов.

Важно, чтобы указанные воздействия имели профилактический характер, а не становились (при отклонении от нормативных параметров паспорта горных работ) инициаторами возникновения газодинамических явлений, против которых они, собственно, и направлены.

Одним из наиболее приемлемых воздействий в указанном случае является физико-химическая обработка. Ее двоякая польза заключается, с одной стороны, в упорядочении действующих сил давления, приводящего к их более равномерному распределению, а с другой – в более активном вовлечении в противодействие участков с преобладанием пластичных свойств. Во время нагнетания в пласт определенных композиций они способны изменять свое фазовое состояние и приводить к межструктурной пластификации углепородной среды с последующим общим упрочнением на макроуровне. Это позволяет изменять до безопасного предела относительные деформации в выбросоопасном пласте, а также за счет упрочняющего действия раствора повышать однородность структуры массива.

Инъектирование в горный массив химических растворов в течение определенного про-

межутка времени необходимо для полной и равномерной пропитки, когда одновременно с изменением неупругих свойств изменяются упругие характеристики массива, обработанного химическими составами. Это препятствует ветвлению трещин, переводит затраты подводимой энергии с процесса хрупкого разрушения на процесс пластического деформирования, повышает прочность при ударной нагрузке, а значит способствует приостановлению процесса зарождения и развития газодинамического явления [9].

Выводы. В результате проведенных исследований установлены особенности протекания газодинамических явлений, заключающиеся в том, что причиной их возникновения могут быть соотношения сжимающих и растягивающих напряжений в массиве. На основе этой гипотезы получен критерий оценки выбросоопасного состояния, суть которого в том, что разность между растягивающими и сжимающими напряжениями при удалении от свободной поверхности забоя стремится к значению $(1 - e^{-L_d})/L_d$ и играет важную роль в развязывании газодинамического процесса.

Развивающимися в массиве упругими и неупругими характеристиками возможно управлять, регулируя концентрацию химических компонентов в нагнетаемом составе, изменяя, тем самым, время загустевания раствора. При необходимости химическим композициям придается упрочняющий характер, что дополнительно увеличивает однородность структуры угля и вмещающих пород, окончательно устраняя градиент физико-механических характеристик массива, но предельные напряжения остаются неизменными или уменьшаются. Последнее удовлетворяет условиям описанной теоретической модели в случае сдерживания проявления максимальных сжимающих напряжений для уменьшения вероятности возникновения динамического явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булат А. Ф. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / А. Ф. Булат, В. И. Дырда // Геотехническая механика. – 2013. – Вып. 108. – С. 3–31.
2. Булат А. Ф. Кластерно-синергетическая нелинейная эволюционно-структурная модель газодинамических явлений в горном массиве / А. Ф. Булат, В. И. Дырда // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XXIII междунар. науч. школы, 23–29 сентября 2013 г. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2013. – С. 34–36.
3. Булат А. Ф. Феноменологическая модель генезиса динамических явлений в шахтах / А. Ф. Булат, С. Ю. Макеев, С. Ю. Андреев, Г. А. Рыжов // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: матеріали II міжнарод. конф., 18 травня 2011 р. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 11–16.
4. Булат А. Ф. Особенности процесса трещинообразования в массиве при управлении его газодинамикой / А. Ф. Булат, С. Ю. Макеев, С. Ю. Андреев [и др.] // Геотехническая механика. – 2011. – Вып. 94. – С. 24–30.
5. Морленд А. Возникновение термоупругих волн напряжений под действием импульса электромагнитного излучения / А. Морленд // Ракетная техника и космонавтика. – 1968. – № 6. – С. 17–21.
6. Зейкер В. Волны напряжений в упругих твердых телах, вызываемые тепловым воздействием / В. Зейкер // Прикладная механика. – 1965. – № 1. – С. 28–32.
7. Булат А. Ф. Управление состоянием предельно напряженного породного массива малоэнергоёмкими воздействиями / А. Ф. Булат, А. Т. Курносов, Ю. А. Русанцов. – К.: Наук. думка, 1993. – 176 с.
8. Булат А. Ф. Развитие гипотезы возникновения газодинамических явлений в результате формирования микроплазменных разрядов в подземных условиях / А. Ф. Булат, С. Ю. Макеев, В. Я. Осенний, С. Ю. Андреев // Геотехническая механика. – 2012. – Вып. 104. – С. 3–9.
9. Булат А. Ф. Использование волнового и ротационного подходов для интерпретации динамических явлений в шахтах / А. Ф. Булат, С. Ю. Макеев, С. Ю. Андреев, Г. А. Рыжов // Геотехническая механика. – 2012. – Вып. 107. – С. 12–18.