

УДК 621.72:534.222.2:624.19

© Коллектив авторов, 2007

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПРОТЯЖЕННЫХ ТОННЕЛЯХ

*С.И. СУМСКОЙ, А.В. ПЧЕЛЬНИКОВ, канд. физ.-мат. наук (НТЦ «Промышленная безопасность»),  
И.О. ШАМШИН, канд. физ.-мат. наук (ИХФ РАН), С.Б. ВИКТОРОВ, канд. физ.-мат. наук (МИФИ)*

**В** настоящее время существуют различные методы прогнозирования последствий таких взрывных превращений в газовых облаках, как детонация, дефлаграция, детонационно-подобные процессы. Эти методы применимы как для открытых пространств, так и для ограниченных или частично ограниченных объемов.

Для оценки последствий взрывных превращений в открытом пространстве (в практике промышленной безопасности этому случаю соответствуют аварийные ситуации, связанные с выбросом пожаро- и взрывоопасных веществ вне зданий и сооружений) существует широкий набор подходов в целях получения количественных оценок различной степени точности. К наиболее простым относятся методики, базирующиеся на оценке тротилового эквивалента взрыва топливовоздушной смеси (ТВС) [1, 2]. В более совершенных методах учитываются такие факторы, как режим энерговыделения (дефлаграция с различными скоростями, детонация) [3, 4]. Наконец, наиболее полную картину дает прямое численное моделирование<sup>1</sup>, которое позволяет детально рассмотреть весь процесс и получить всю совокупность пространственно-временных характеристик при различных видах взрывного превращения (программные комплексы AutoReaGas [5], FLACS [6], EXSIM [7]). При детальном численном моделировании взрывных процессов обычно используют систему уравнений Эйлера, которая в двух- или трехмерной постановке описывает нестационарное течение сжимаемого газа. Уравнения Эйлера не учитывают такие факторы, как наличие вязкости у газа или турбулентности в потоке. Решение уравнений Эйлера с хорошей точностью позволяет моделировать задачи для следующего сценария: «сгорание или взрыв облака ТВС — расширение продуктов — генерация и распространение в воздухе волн сжатия (в том числе ударных волн) и волн разрежения — взаимодействие волн с пре-

пятствиями, в том числе с поверхностью земли». На сегодня существуют численные методы решения уравнений Эйлера, позволяющие получать качественные результаты для конкретных ситуаций, в том числе с учетом реально расположенных объектов.

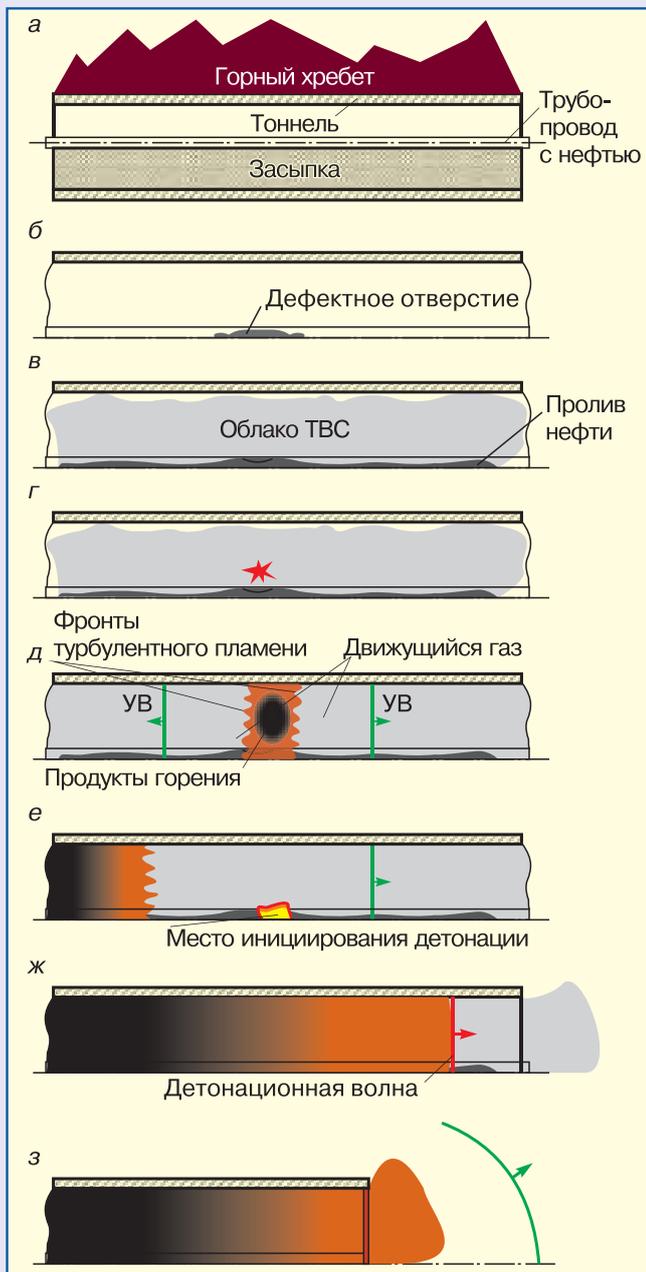
Менее широко можно прогнозировать и последствия взрывов в замкнутых (или частично замкнутых) объемах (в практике промышленной безопасности этому случаю соответствуют аварии, связанные с образованием топливовоздушных смесей внутри аппаратов, зданий и сооружений). Применяются также методы оценки параметров волн давления в областях с разной степенью загромождения пространства [8], например на нефтедобывающих платформах. Однако имеется ряд конкретных практических задач, для решения которых трудно напрямую использовать перечисленные выше подходы.

К ним, в частности, относятся взрывы ТВС в протяженных тоннелях (например, где проложены нефтепроводы), для моделирования которых необходимо учитывать следующие основные факторы: образование в тоннеле протяженных (до нескольких сот метров) облаков ТВС, такая возможность не исключается даже при наличии датчиков загазованности и своевременного поступления сигнала об аварии; наличие в тоннелях уклонов, представляющих дополнительный фактор, способствующий формированию протяженных облаков; возможность горения ТВС, переход его в детонацию и распространение в тоннеле детонационной волны; формирование ударной волны в окружающей среде на стадии истечения продуктов взрыва из тоннеля; наличие уменьшающей ударно-волновое воздействие турбулентности в истекающем потоке продуктов взрыва.

Общая схема развития аварии в тоннеле показана на рис. 1.

В качестве примера рассмотрим тоннель в виде трубы диаметром  $d = 5$  м и длиной  $L = 3400$  м, который наполовину засыпан грунтом. В тоннеле проложены трубопроводы, транспортирующие нефть и нефтепродукты (см. рис. 1, а). По истечении определенного времени в трубопроводе появляется

<sup>1</sup> Здесь надо отметить, что на сегодня прямое численное моделирование для задач, связанных с генерацией волн давления при сгорании (взрыве) облаков, не всегда возможно на основе «первых принципов», поэтому, говоря о прямом численном моделировании, следует понимать, что использование этого метода означает принятие некоторых эмпирических допущений.



**Рис. 1. Схема развития аварийной ситуации при разрушении трубопровода с нефтью, образовании внутри тоннеля облака ТВС и его инициировании:**

а — нормальная эксплуатация; б — появление утечки; в — растекание пролива и испарение с его поверхности, образование облака ТВС; г — инициирование облака паров нефти; д — распространение пламени, формирование УВ; е — возникновение детонации; ж — распространение детонации; з — выход детонации из тоннеля и распространение УВ в воздухе

дефектное отверстие, из которого нефть начинает поступать в тоннель, и образуется пролив (см. рис. 1, б). В результате испарения с поверхности пролива пары нефти смешиваются с воздухом, и в тоннеле формируется облако топливно-воздушной смеси (см. рис. 1, в). Размеры облака и его характеристики будут существенным образом зависеть

от количества нефти, вытекшей из трубопровода; размеров пролива, образовавшегося в тоннеле; наличия уклонов внутри тоннеля; характера естественной или принудительной вентиляции, существующей в тоннеле; и, естественно, от свойств самой нефти.

Определение концентрационных полей в тоннеле — достаточно сложная задача, ее решение представляет собой самостоятельную проблему. Понятно, что распределение паров нефти внутри тоннеля будет главным фактором (вместе с режимом энерговыделения, реализующимся при сгорании (взрыве) этих паров), определяющим последствия такой аварии. Для того чтобы смоделировать взрыв в тоннеле, в статье рассмотрен наиболее опасный вариант, т.е. весь тоннель равномерно заполнен стехиометрической смесью топлива и воздуха. При этом в качестве вещества, моделирующего пары нефти, принят пропан. Такой выбор сделан исходя из того, что, например, согласно [9], пары нефти по молекулярному весу близки к пропану. С точки зрения учета в моделировании общего количества выделившейся энергии такой подход вполне правомерен. При появлении источника инициирования топливовоздушная смесь воспламенится (рис. 1, г). Источник зажигания может находиться как внутри тоннеля, так и снаружи. Снаружи зажигание произойдет только в том случае, если пары нефти (нефтепродукта) распространились до выхода из тоннеля. Здесь рассмотрен случай, когда инициирование происходило в середине тоннеля.

Мощность большинства источников инициирования, существующих на практике, недостаточна, чтобы уже на месте зажигания реализовался бы детонационный режим энерговыделения, поэтому зачастую на месте зажигания возникает дефлаграция. В открытом пространстве, согласно [3], скорость дефлаграционного горения смеси паров нефти (в нашем допущении пропана) с воздухом составляет 150–200 м/с. Однако в протяженном тоннеле распространение дефлаграционного горения имеет существенную специфику. При движении пламени в тоннеле возникает газовый поток, как в исходной смеси, так и в продуктах. В результате в тоннеле образуется комплекс, состоящий из фронта турбулентного пламени и ударной волны (УВ), распространяющейся по топливно-воздушной смеси. Между фронтом пламени и УВ находится движущийся газ (рис. 1, д). Этот поток будет взаимодействовать со стенками тоннеля и приводить к увеличению турбулизации (усилению хаотически пульсирующей составляющей скорости); турбулизация будет приводить к ускорению горения, а оно к еще большей турбулизации и т.д. Такой механизм ускорения пламени при его распространении в трубах известен и достаточно изучен [10, 11].

Из экспериментальных данных известно, что при достаточной протяженности трубы ускоряющееся горение может привести к возникновению детонации. Одна из характеристик этого процесса — расстояние, на котором возникает детонация при иницировании у закрытого торца трубы. Для смесей углеводородов с воздухом длина преддетонационного участка в гладкой трубе составляет 40–50 диаметров трубы [10, 11]. Если рассматривать тоннель как трубу с эффективным диаметром (по площади) 3,53 м, то отношение длины 1700-метрового участка к его эффективному диаметру составит 480. Очевидно, что в таких условиях при сделанных предположениях в тоннеле возникнет детонация (рис. 1, е).

Детонация возникает перед фронтом горения, на некотором расстоянии за фронтом УВ. После этого в большей части тоннеля энерговыделение будет проходить именно в детонационном режиме. Учитывая тот факт, что в тоннелях обычно имеются дополнительные препятствия, выполняющие роль турбулизаторов, можно ожидать, что переход горения в детонацию произойдет еще на более коротком расстоянии. Турбулизаторами могут служить и выступающие части тьюбингов, которыми обычно укрепляют своды тоннелей. После подхода к концу тоннеля или к границе «облако ТВС — воздух» в случае, если облако вышло за границы тоннеля, детонация прекращается, и в воздухе формируется УВ амплитудой 0,9–1 МПа (9–10 атм). Затем эта УВ будет распространяться в воздухе (рис. 1, з). В отличие от конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) при выходе детонационной волны в воздух из детонирующего облака энергия, выделившаяся при детонации в облаке в целом, не сразу переходит в УВ. Сначала разгружаются «продукты детонации (ПД) — воздух» — слои, близко прилегающие к контактной поверхности, а затем слои, далеко отстоящие от нее, — в глубь облака.

Облаку ПД требуется некоторое время, чтобы «закачать» энергию, выделившуюся при взрыве, в УВ. В рассматриваемой же ситуации действие этого фактора будет еще более существенным, поскольку энергия, выделившаяся в тоннеле, «перекачивается» за его пределы — в УВ, в кинетическую энергию движения газа, кинетическую энергию турбулентности и т.д. — в течение нескольких секунд, пока будет происходить истечение продуктов из тоннеля. Именно истечение продуктов детонации, его длительность и интенсивность, а не только общее количество выделившейся энергии, будут определять параметры УВ (ее длительность и амплитуду), а следовательно, и размеры зон поражения, в том числе поражения УВ.

Исходя из сказанного следует, что задача в рассматриваемой постановке о детонации топливно-воздушной смеси в тоннеле и генерации УВ естес-

твенным образом распадается на две части: первая — расчет течения до окончания детонации в тоннеле, вторая — истечение продуктов детонации из тоннеля и собственно формирование воздушной УВ. Для моделирования взрывного процесса в тоннеле используется точное автомодельное решение задачи о движении детонационной волны от жесткой стенки.

При решении задачи о детонации в тоннеле использовались следующие допущения: во-первых, предполагалось, что стехиометрическая смесь воздуха и паров нефти (пропана) заполняет равномерно весь тоннель, за пределами тоннеля находится только воздух; во-вторых, с учетом возможности быстрого перехода горения в детонацию, в тоннеле было принято, что сразу после иницирования в середине тоннеля в обе стороны распространяется детонационная волна. Тоннель предполагается горизонтальным и прямым. Очевидно, что картина течения в тоннеле симметрична относительно плоскости симметрии, расположенной посередине, перпендикулярно к его оси.

В такой постановке существует автомодельное решение для простой волны, описывающее распределение параметров за детонационным фронтом [12]. На момент подхода детонационной волны к выходу из тоннеля распределение параметров в тоннеле, в зависимости от пространственной координаты, выглядит следующим образом (предполагается, что в каждом поперечном сечении параметры одинаковы по всей площади сечения):

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq x_1, 0 \leq r \leq \frac{d}{2}; u_x = u_r = 0; \\ x_1 \leq x \leq x_*, 0 \leq r \leq \frac{d}{2}; u_x = u_{CJ} \frac{x - x_1}{x_* - x_1}, u_r = 0; \\ 0 \leq x \leq x_*, 0 \leq r \leq \frac{d}{2}; \\ c = c_{CJ} + \frac{\gamma - 1}{2} (u_x - u_{CJ}), \rho = \left( c^2 \frac{\rho_{CJ}^\gamma}{\gamma p_{CJ}} \right)^{1/(\gamma - 1)}, \\ p = p_{CJ} \left( \frac{\rho}{\rho_{CJ}} \right)^\gamma, T = \frac{p}{\rho} \cdot \frac{\mu}{R}, \\ x_1 = \left( c_{CJ} - \frac{\gamma - 1}{2} u_{CJ} \right) t_*, t_* = \frac{x_*}{D_{CJ}} = \frac{x_*}{u_{CJ} + c_{CJ}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $x$  — пространственная переменная, расстояние вдоль оси тоннеля, нулевая координата (0) соответствует середине тоннеля, месту иницирования детонации;  $x_1$  — точка, разделяющая область покоя, присутствующую в тоннеле, от области движения ПД;  $r$  — пространственная координата, расстояние по радиусу;  $d$  — диаметр тоннеля, равный 5 м;

$u_x, u_r$  — составляющие скорости ПД соответственно вдоль осей  $x$  и  $r$ ;  $x_*$  — положение фронта детонации на момент выхода волны из тоннеля,  $x_* = L/2$ ;  $t_*$  — время, за которое детонация проходит расстояние  $x_*$ ;  $L$  — длина тоннеля,  $L = 3400$  м;  $c$  — местная скорость звука в ПД;  $\gamma$  — показатель адиабаты ПД;  $\rho, p, T$  — плотность, давление и температура ПД;  $\mu$  — молекулярная масса ПД;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $D$  — скорость детонации. Индекс «CJ» в системе уравнений (1) означает, что параметры относятся к фронту детонации, т.е. это параметры Чепмена—Жуге.

Параметры детонации Чепмена—Жуге для смеси паров нефти (пропана) с воздухом были рассчитаны по термодинамической программе [13, 14]. Согласно сделанным расчетам продукты детонации стехиометрической смеси паров нефти (пропана) с воздухом характеризуются следующими параметрами:  $\gamma = 1,165$ ,  $\mu = 27,67$  кг/кмоль,  $p_{CJ} = 1,85$  МПа,  $u_{CJ} = 806$  м/с,  $c_{CJ} = 994$  м/с,  $\rho_{CJ} = 2,18$  кг/м<sup>3</sup>,  $D_{CJ} = 1800$  м/с. Термодинамический расчет позволяет также определить и состав продуктов детонации, представленный ниже:

Компонент смеси	Мольная доля, %
N <sub>2</sub> .....	70,78
H <sub>2</sub> O.....	13,87
CO <sub>2</sub> .....	8,36
CO.....	3,00
O <sub>2</sub> .....	1,16
OH.....	0,97
NO.....	0,84
H <sub>2</sub> .....	0,70
H.....	0,17
O.....	0,15

Как и следовало ожидать, для стехиометрической смеси в продуктах практически нет составляющих, способных дореагировать при подмешивании воздуха. Небольшое количество CO и H<sub>2</sub>, находящееся в продуктах, при их расширении дореагирует с имеющимися в смеси O<sub>2</sub> и OH. Из сказанного следует, что при истечении продуктов из тоннеля в воздух можно не учитывать химические реакции при смешении продуктов с воздухом и считать, что с точки зрения энерговыделения параметры УВ в воздухе будут определяться лишь энергией, выделившейся при распространении детонации в тоннеле.

Используя характеристики детонации, полученные при термодинамическом расчете, и систему уравнений (1), можно получить количественные распределения параметров течения в тоннеле во время распространения по нему детонации. На рис. 2, а, б, в для времени  $t = 0,944$  с (момент выхода детонации из тоннеля) и 0,472 с (время прохода детонационной волной  $L/4$ ) показано распре-

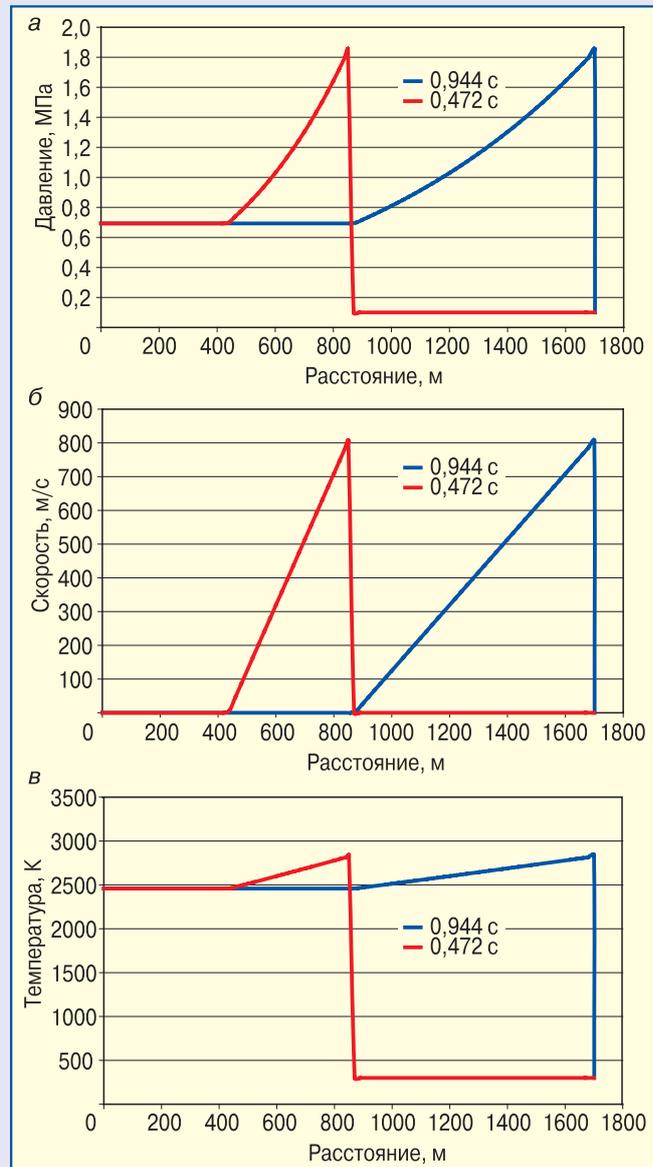


Рис. 2. Распределение давления (а), скорости (б) и температуры (в) по длине тоннеля в разное время

деление давления, скорости и температуры по длине тоннеля.

Из полученных результатов (см. рис. 2, а, б, в) видно, что поражающие факторы в тоннеле имеют чрезвычайно высокую интенсивность: амплитуда давления на фронте волны составляет около 1,9 МПа (19 атм), температура повышается и держится продолжительное время (не менее 1–2 с) в диапазоне 2500–2800 К, скоростной напор движущихся по тоннелю продуктов детонации составляет несколько сот метров. Даже если принять во внимание взаимодействие волны детонации и ее продуктов с внутренней поверхностью тоннеля, которое приведет к теплотерям и потере импульса, понятно, что создаваемые нагрузки способны привести к полному разрушению оборудования и коммуникаций в тоннеле и даже его разрушению.

Итак, в данной работе проведено моделирование аварийной ситуации в протяженном тоннеле при детонации в нем смеси паров нефти и воздуха. При рассмотрении задачи был использован консервативный подход: предполагалось, что весь объем тоннеля заполнен стехиометрической смесью паров нефти с воздухом. Результаты позволяют не только оценить масштабы и понять характерные особенности данной аварийной ситуации, но и применить полученное аналитическое решение для других задач. Например, решение системы уравнений (1) может быть использовано для задания силовых, скоростных и тепловых нагрузок на стенки тоннеля в целях определения возможных разрушений самого тоннеля и оценки масштабов обрушений и завалов в нем, а также можно использовать полученное решение и для оценки последствий при истечении продуктов детонации из тоннеля.

#### Список литературы

1. ГОСТ 12.3.047–98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
2. ПБ 09-540–03. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств.
3. РД 03-409–01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (Методика ТВС) (с изменениями и дополнениями).
4. Lees F.P. Loss Prevention in the Process Industries, 2nd edn., Butterworth-Heinemann. — Boston, MA, 1996.
5. Century Dynamics/TNO (1999). AutoReaGas User Documentation. Version 3.0.
6. Van Wingerden K., Hansen O.R., Foisselon P. Predicting blast overpressures caused by vapor cloud explosions in the vicinity of control rooms, Process Safety Progress. — 1999. — № 181. — P. 17–24.
7. Hjertager B.H. Numerical models of gas explosions e.g. EXSIM, Proceedings of the Explosion Prediction and Mitigation: Congested Volumes and Complex Geometries, University of Leeds, Leeds, UK, 1997.
8. Developments in vapour cloud explosion blast / W.P.M. Mercx, A.C. van den Berg, C.J. Hayhurst, N.J. Robertson, K.C. Moran // Modeling Journal of Hazardous Materials. — 2000. — № 71. — P. 301–319.
9. Волков О.М., Проскураков Г.А. Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. — М.: Недра, 1981. — 256 с.
10. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 255 с.
11. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Махвиладзе, Г.М. Либрович. — М.: Наука, 1980.
12. Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. — М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1987.
13. Victorov S.B. The Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Phase Transitions on Detonation Properties of Aluminized Explosives // 12th Int. Detonation Symp., San Diego, California, USA. August 11–16, 2002. Office of Naval Research, Arlington, Virginia 22217-5660, ONR 333-05-2. — P. 369–376.
14. Прогнозирование детонационных характеристик безводородных взрывчатых веществ / С.Б. Викторов, С.А. Губин, И.В. Маклашова, В.И. Пепекин // Химическая физика. — 2005. — № 12. — Т. 24. — С. 22–45.

УДК 622.831.24

© В.М. Андриенко, И.И. Сторчак, 2007

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ СМЕЩЕНИЙ ПОРОД И ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

В.М. АНДРИЕНКО, канд. техн. наук, И.И. СТОРЧАК, инженер (ГП ДонУГИ)

**Ф**ункционирование угольных шахт существенно зависит от состояния подготовительных выработок. В настоящее время применяют дорогостоящие крепи и необоснованно увеличивают плотность их установки. Одни и те же по назначению крепи используют в различных горно-геологических и горнотехнических условиях, что приводит к неоправданному их расходу. Отсюда следует необходимость управления геомеханическими процессами в подготовительных выработках, которое должно осуществляться не только за счет использования технических средств в самой выработке, но и за счет регионального регулирования состоянием массива. В связи с этим существенно

возрастает значение прогнозирования горного давления и средств управления им при выборе типов и параметров крепей в соответствии с конкретной горнотехнической ситуацией [1].

Анализ причин завалов в подготовительных выработках и выполненные авторами исследования показали, что для улучшения состояния подготовительных выработок необходимо знание процессов смещений пород и их прогнозирование в различные периоды их проведения и поддержания [2, 3].

Многолетние наблюдения за проявлением горного давления позволили разработать прогноз ожидаемых смещений пород при различных способах проведения и поддержания выработок (табл. 1).