

УЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ШАХТНЫХ СТОЛОВ ПРИ АВАРИЙНОЙ ЭВАКУАЦИИ ГОРНОРАБОЧИХ

Проаналізовано основні критерії, якими користується розробник плану ліквідації аварій при визначенні шляхів аварійної евакуації гірників під час виникнення екзогенної пожежі. Зазначено, що ці критерії враховують лише кількість людей, які підлягають евакуації, та особливості подолання відрізків шляхів евакуації до шахтних стовбурів. Критерії потребують вдосконалення з метою урахування місткості клітей та часу їх руху на поверхню. Пропонується новий підхід до розрахунку часу евакуації з урахуванням вказаних аспектів.

THE CALCULATION CARRYING ABILITY OF MINE TRUNKS IN THE TIME OF EMERGENCY EVACUATION OF MINERS

The basic criterions, which uses by developer of plan liquidation of accidents in a time definition ways of emergency evacuation of miners by the rising of exogenous fire, were analyzed. Marked, that this criterions take into account only the quantity of miners, this subject to the evacuation and peculiarities overcoming of pieces ways of evacuation to the mine trunks. This criterions demands perfection with the aim calculation capacity of checks and the time of its traffic to the surface. The new approach to estimation time of evacuation with calculation of directed aspects was proposed.

Своевременная оперативная эвакуация всех находящихся в шахте на момент возникновения в ней экзогенного пожара горнорабочих на поверхность или в безопасные места является основной задачей разрабатываемого на каждой шахте плана ликвидации аварий (ПЛА). В его оперативной части подробно характеризуются маршруты эвакуации из аварийных (где непосредственно возникает пожар) и угрожаемых (в которых через некоторое время может повыситься температура и куда могут попасть газообразные продукты горения) участков шахты, а также в ряде случаев приводится контрольное время движения людей по ним с целью определения возможности использования самоспасателей и необходимости принятия дополнительных мер в случае, если времени их защитного действия для обеспечения безопасной эвакуации недостаточно.

"Правилами безопасности в угольных шахтах" [1] предписывается организовывать аварийную эвакуацию таким образом, чтобы маршруты движения людей проходили, по крайней мере, в значительной своей части, по выработкам со свежей струей воздуха. Если этого достичь затруднительно или даже невозможно – необходимо изыскивать возможности для минимизации длины загазированного участка маршрута. Это может быть достигнуто изменением вентиляционного режима (в большинстве случаев в качестве соответствующей меры применяется общешахтное или местное реверсирование вентиляционной струи). Следует лишь учитывать, что изменение это производится всегда с определенным запаздыванием, вызванным как объективными (инерционностью системы вентиляции шахты), так и субъективными (несвоевременностью ввода ПЛА в действие) причинами. Кроме того, изменения депрессии добычного участка, происходящие при реверсировании, способствуют дополнительному по-

ступлению метана из выработанного пространства на исходящую струю; последнее может вызвать осложнения протекания аварийной ситуации.

Изменение вентиляционного режима происходит, как правило, в то время, когда аварийная эвакуация горнорабочих началась, и они движутся по маршрутам, которые в этом случае должны быть скорректированы.

Однако это – лишь одна сторона проблемы. Если в ПЛА указать лишь основные направления эвакуации – по каким выработкам и к каким стволам должны выводиться люди – остается открытым вопрос о времени осуществления полной аварийной эвакуации. Он связан как с необходимостью получения информации о реальном количестве находящихся в шахте людей и распределении их по основным и дополнительным рабочим местам, так и с возможностью использования для целей аварийной эвакуации транспортных средств, в том числе циклического действия и с ограниченной вместимостью.

Все эти факторы для шахт, обладающих разветвленной сетью горных выработок большой топологической размерности (примером такой шахты может служить шахта им. А.Ф. Засядько, вентиляционная сеть которой содержит около 1100 ветвей [2], а ПЛА включает 276 позиций [3]), делают решение указанных задач лишь на основе инженерного опыта и интуиции составителя ПЛА практически невозможным. Необходимы проведение оптимизационных расчетов с использованием ПЭВМ и разработка для этих целей специальных методов имитационного моделирования. При этом получение эффективного результата требует использования специальных критериев оптимальности вырабатываемых рекомендаций.

Одним из важнейших факторов, определяющих степень эффективности аварийной эвакуации, является, как уже было сказано выше, количество людей, находящихся в шахте на момент возникновения аварии, и их распределение по горным выработкам. Если первое требование удовлетворяется достаточно легко – на каждой шахте действует система табельного учета спускающихся в шахту горнорабочих, то второе практически неосуществимо. Горнорабочие очистных и проходческих забоев, как правило, находятся на конкретных рабочих местах в течение смены, чего нельзя сказать о рабочих других участков: горно-капитальных работ, электромонтажного оборудования, вентиляции и техники безопасности, ремонта горных выработок, и т.д. Рабочие этих участков постоянно перемещаются по выработкам шахты, поэтому в разные моменты численность людей в выработках (нами в свое время было предложено [4] называть этот показатель "человекоемкостью" выработок) может быть различной.

Если обратиться к истории вопроса, можно отметить, что на первом этапе разработки методов оптимизации аварийной эвакуации людей в качестве критерия оптимальности использовался показатель [5]

$$\sum_{(i,j) \in \theta_s} \lambda(i,j) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где (i,j) – ветвь, кодирующая в расчетной схеме шахтной вентиляционной сети (ШВС) горную выработку, в которой находится количество людей $\lambda(i,j)$; θ_3 – зона загазирования ШВС, представляющая собой совокупность ее аварийных и угрожаемых участков.

"Человекоемкость" выработки $\lambda(i,j)$ представляет собой математическое ожидание количества людей в выработке (i,j) в течение рабочего цикла (смены). Суммируя указанные величины для всех выработок, входящих в θ_3 , можно получить некоторую численную характеристику рассматриваемого вентиляционного режима с точки зрения обеспечения им определенного уровня безопасности аварийной эвакуации. Если таких, "подозрительных на оптимальность" [4], вентиляционных режимов несколько – истинно оптимальным считается тот режим, для которого значение функционала (1) является минимальным. При этом значение (1) характеризовало как суммарное количество подлежащих выводу людей, так и сложность эвакуации, определяемую временем их нахождения в выработках зоны θ_3 .

Практическое использование критерия (1) встретило, однако, некоторые трудности. Вычисление $\lambda(i,j)$ классическими методами невозможно ввиду, как уже отмечалось, наличия в шахте значительного количества участков и служб с различными условиями функционирования, а значит – и с различной вероятностью и временем нахождения горнорабочих в той или иной выработке. В связи с этим нами [6] был предложен специальный метод расчета этого показателя, основанный на конструировании в каждом конкретном случае не вероятностных, а аналитических формул, учитывающих специфику работы конкретного горного предприятия. Расчет по ним значений $\lambda(i,j)$, как показало сравнение расчетных данных и значений количества людей в выбранных участках шахты, дает в значительном числе случаев достаточно точные значения $\lambda(i,j)$. Наиболее подробно указанный метод описан в [4].

Вместе с тем критерий (1) не обладает достаточной степенью универсальности. Его значение в большой мере зависит от времени, на которое рассчитывается его значение. Из практических соображений ясно, что принятие значения этого времени максимально возможным (вплоть до ∞) позволит застраховаться от любых неожиданностей, поскольку в этом случае θ_3 достигнет максимально возможных размеров. Однако при этом неявно предполагается, что до указанного момента времени аварийная эвакуация не производится, или, точнее, производится с учетом того факта, что выработки, чистые в реальный момент времени, будут в дальнейшем загазированы. Маршруты аварийной эвакуации при этом неоправданно усложняются; обеспечивая безопасную эвакуацию больших групп горнорабочих, критерий ставит малочисленные их группы в затруднительное положение. Критерий не позволяет оценить (он для этого просто не предназначен) степень сложности их аварийной эвакуации. При условии же нахождения таких групп на большом расстоянии от пригодных для эвакуации шахтных стволов применение критерия (1) является грубым нарушением требований [1] и создает опасность для жизни горнорабочих.

С целью устранения указанного противоречия в результате проведенных исследований нами был разработан более общий критерий, позволяющий комплексно учитывать распределение людей в шахте, возможность их аварийной эвакуации и длину строящихся для этого маршрутов. Критерий этот имеет вид [7]:

$$\sum_{(i,j) \in \theta} \lambda(i,j) \left[\exp \left(P \sum_{(i',j') \in \mu(i,l)} \frac{C(i',j')L(i',j')}{v(i',j')} \right) - 1 \right] \rightarrow \min \quad (2)$$

где θ – множество всех выработок шахты, P – числовой параметр, характеризующий степень влияния характеристик маршрута на значение критерия в целом, $C(i',j')$ – концентрация пожарных газов в (i',j') , $L(i',j')$, $v(i',j')$ – длина (i',j') и скорость движения людей по ней соответственно; последняя определяется по нормативным данным или рассчитывается по методике [8], $\mu(i,l)$ – маршрут аварийной эвакуации людей от узла i к узлу l , находящемуся на поверхности.

Предлагаемый критерий автоматически предусматривает вывод людей из шахты, в то время как критерий (1) ограничивался лишь оценкой их количества.

Критерий (2) автоматически устраняет противоречие между выработками с большими и малыми значениями $\lambda(i,j)$. Из малости величины $\lambda(i,j)$ еще не следует незначительность влияния $\lambda(i,j)$ выработок на выбор вентиляционного режима, поскольку весовое воздействие $\mu(i,l)$ быстро (по экспоненте) растет с увеличением длины маршрута и может оказаться определяющим; нужно лишь соответствующим образом подобрать значение P . Область его определения, как следует из [7], находится в интервале $(0,1]$, поскольку при $P < 0$ функционал становится качественно иным, при $P = 0$ критерий теряет смысл, а при $P > 1$ ослабевает роль P , как масштабного множителя экспоненты, и весовое воздействие $\mu(i,l)$ в критерии (2) становится преобладающим. Значение P в указанном интервале можно выбрать произвольно, однако из практических соображений рационально выбрать $P = 1/\tau_{с.с.}$, где $\tau_{с.с.}$ – время защитного действия используемого типа самоспасателя. При этом показатель экспоненты характеризует степень влияния на величину критерия маршрутов $\mu(i,l)$, на которых требуется организация пунктов переключения в резервные самоспасатели. Устранение же таких маршрутов или, по крайней мере, уменьшение их общего количества – одна из задач при разработке мероприятий оперативной части ПЛА.

Преимущества критерия (2) по отношению к критерию (1) очевидны, т.к. он уже на этапе формирования маршрута из удаленных от стволов мест сосредоточения людей "сигнализирует" о непригодности рассматриваемого вентиляционного режима в качестве аварийного и последний автоматически исключается из перечня "подозрительных на оптимальность". Суммирование же выработок по всей ШВС (в отличие от (1), где суммирование велось лишь по выработкам загазированной зоны ШВС) обеспечивает выполнение требования о спасении всех находящихся в шахте людей.

Вместе с тем дополнительные исследования показывают, что и критерий (2) не является оптимальным. В самом деле, расчет $v(i',j')$ в нем производится, в соответствии с требованиями [1] и методики [8], как при движении по выработкам в пешем порядке. На самом же деле те же [1] предписывают, если это возможно, использовать для ускорения аварийной эвакуации транспортные средства, находящиеся на маршрутах аварийной эвакуации. Если этим требованием можно еще пренебречь для горизонтальных и слабонаклонных выработок (т.е. не пользоваться ленточными конвейерами и вагонетками, предназначенными для пассажирских перевозок), то выполнение его для вертикальных выработок вообще неосуществимо. Воздухоподающие стволы, как правило, оборудованы лестничными отделениями; правда, подъем по ним на расстояние 400-500 и более метров представляет значительные трудности. В вентиляционных стволах, которые используются для целей аварийной эвакуации при общешахтном реверсировании вентиляционной струи, такие отделения отсутствуют вообще. Эвакуация предусматривается с использованием подъемных сосудов циклического действия (клетей малой вместимости и скипов), что требует учета времени, затрачиваемого на один цикл подъема-спуска. Ясно, что использование критерия (2) с учетом этого требования будет малоэффективно.

Предпринятые нами с целью устранения указанного противоречия исследования [9, 10] касались в основном совершенствования программной реализации формирования маршрутов вывода горнорабочих, не затрагивая вопросов комплексной оптимизации процесса аварийной эвакуации. Рассмотрим поэтому основные принципы формирования критерия оптимизации маршрутов аварийной эвакуации нового уровня – учитывающего наличие на маршрутах выработок, оборудованных транспортными средствами циклического действия.

С целью обобщения критерия маршрут аварийной эвакуации $\mu(i,l)$ может быть представлен в виде

$$\mu(i,l) = \mu(i,l_1) + \mu(l_1,l),$$

где первое слагаемое характеризует маршрут от места скопления людей, эвакуируемых по рассматриваемому маршруту, до окоlostвольного двора ствола, предназначенного для аварийной эвакуации, а второе – маршрут движения собственно по указанному стволу. Если движение людей в пешем порядке по выработкам маршрута $\mu(i,l_1)$ является практически непрерывным и определяется лишь их геометрической вместимостью, то эвакуация людей через воздухоподающие и вентиляционные стволы, особенно последние, обладающие, как правило, подъемом малой производительности, является процессом дискретным и весьма длительным. Связано это с возникновением вынужденных перерывов, продолжительность которых зависит от времени движения клетки от места загрузки до поверхности или неугрожаемого горизонта, разгрузки и ее возвращения. Неучет данного фактора в критерии (2) способен повлечь за собой выработку неправильных рекомендаций, нарушающих требования [1]. Это, однако, не означает, что необходимо исключать из рассмотрения стволы с подъемом

малой производительности, поскольку при этом исчезает ряд очевидных решений и эвакуация теряет нужную оперативность.

Производительность механических транспортных средств циклического действия может учитываться различными путями. Наиболее перспективный из них состоит в выборе допустимого времени эвакуации t_d и расчете максимального количества людей, которое может быть выведено за это время через соответствующий запасной выход, т.е.

$$n_d \leq t_d/t_y \cdot n_y, \quad (3)$$

где n_d – количество людей, которых можно перевезти за время t_d , t_y – время одного цикла работы подъемной установки, n_y – количество людей, перевозимых за один цикл.

Вследствие этого критерий (2) должен быть соответствующим образом преобразован с целью учета неравенства (3).

Однако такое преобразование является весьма сложным. Необходима разработка специального метода оптимизации маршрутов аварийной эвакуации людей, который учитывал бы динамичность преодоления их вследствие наличия на них выработок с циклически действующими транспортными средствами. Решение задачи в указанных постановках оказываются непригодными методы, описанные в [4]. Для определения оптимального плана эвакуации людей из шахты могут быть применены методы линейного потокового программирования [11], а именно, методы решения задач о потоке минимальной стоимости. При этом в качестве стоимости ветви принимается значение количества людей, которые в ней находятся, а в качестве потока по ветви – количество людей, которое может быть по ней выведено. Для учета особенностей задачи аварийной эвакуации людей стандартные методы должны быть несколько модифицированы. Это вызвано тем, что для транспортных средств циклического действия зависимость времени доставки последнего человека на поверхность от производительности подъема и количества людей, которых предполагается вывезти по конкретному стволу, имеет ступенчатый характер. Поэтому в критерии (2) каждая выработка с транспортом циклического действия учитывается, как множество параллельных ветвей с фиксированной стоимостью, равной количеству людей, находящихся в ней в течение одного цикла подъема. Поэтому внешний вид критерия (2) остается без изменения, меняется лишь количество суммируемых выработок (i, j). Следует лишь учитывать, что суммарное время аварийной эвакуации должно включать не только время движения по маршрутам с учетом движения людей по выработкам с циклически действующими транспортными средствами, но и время их простоя в связи с посадкой-высадкой людей.

Как показали вычислительные эксперименты [10], проведенные в свое время на руднике "Комсомольский" Норильского горно-металлургического комбината (который, кстати, по своим топологическим характеристикам – в расчетной схеме его на момент эксперимента состояло 8200 ветвей и 7 стволов, предназначенных для аварийной эвакуации горнорабочих – значительно пре-

вышает любую угольную шахту Украины), указанная модификация критерия эффективности аварийного вентиляционного режима обеспечивает эффективное решение задачи определения порядка эвакуации. Без его использования время эвакуации в одной, наугад выбранной, позиции ПЛА [10] составляло примерно 6 часов, что явно не соответствовало требованиям Единых правил безопасности, действующих с того времени на горных предприятиях Министерства цветной металлургии СССР; использование его позволило снизить это время до 1 часа. Правда, при этом не был учтен ряд других факторов, связанных с порядком проведения аварийной эвакуации; однако цифра снижения времени аварийной эвакуации все же выглядит весьма серьезно.

С учетом того, что, по данным ГВГСС время аварийной эвакуации людей в ряде позиций шахты им. А.Ф. Засядько составляет порядка 4 и более часов, использование программных средств определения маршрутов аварийной эвакуации, основанных на описанном модифицированном критерии, представляется весьма перспективным.

В качестве вывода по данной публикации можно заключить, что в ней прослеживается неоднократно отмечавшийся автором подход, заключающийся в последовательном снятии ограничений на условия решения задачи. В самом деле, задача аварийной эвакуации в начальной постановке (без применения средств вычислительной техники) заключалась только в определении стратегии аварийной эвакуации, именно – к каким стволам направлять людей. По мере совершенствования ее был предложен критерий (1), предназначенный для определения количества людей, которые должны быть направлены к тому или иному стволу. Следующим шагом оптимизации явился критерий (2), который учел эргономические характеристики маршрутов эвакуации в комплексе с количеством эвакуируемых горнорабочих. Описанная в данной работе модификация критерия учитывает наличие на маршрутах выработок с транспортными средствами циклического действия. Исчерпан ли перечень модификаций? Отнюдь нет. Ведь при аварийной эвакуации используются, как отмечалось выше, и транспортные средства, находящиеся в горизонтальных и слабонаклонных выработках: ленточные конвейеры и вагонетки, предназначенные для передвижения людей. Необходимо совершенствовать методику местного реверсирования, оперативного оповещения людей, движущихся по маршрутам аварийной эвакуации, об изменениях в протекании аварийной ситуации [12], учитывать особенности преодоления угрожаемых участков, когда существенное сокращение времени аварийной эвакуации достигается переходом со свежей струи в предположительно загазированную [13], вопросы регулирования количества и концентрации метана, поступающего в горные выработки особенно при реверсировании вентиляции в ходе принятия мер по ликвидации экзогенного пожара, и многие другие факторы. Над решением указанных вопросов работает коллектив группы информационных технологий отдела проблем разработки месторождений на больших глубинах ИГТМ НАН Украины.

Автор надеется, что, прочитав настоящую публикацию, специалисты угольной отрасли подскажут новые, не учтенные им, направления исследований, свя-

занных с выбором и реализацией мероприятий ПЛА и путями совершенствования системы противоаварийной защиты угольных шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности в угольных шахтах. ДНАОП 1.1.30-1.01-00.- Киев, 2000.- 240 с.
2. Методологические основы совершенствования шахтной вентиляционной системы /Булат А.Ф., Ефремов И.А., Ильюшенко В.Г., Бокий Б.В., Кокоулин И.Е., Бунько Т.В.// Геотехническая механика/ Межведомственный сборник научных трудов.- Днепропетровск,2002.- № 37.- с. 23-30.
3. Анализ особенностей составления и ввода в действие плана ликвидации аварий на шахте им. А.Ф. Засядько/ Бокий Б.В., Кокоулин И.Е., Утешев А.Н., Афанасьев А.Ю.// Геотехническая механика/ Межведомственный сборник научных трудов.- Днепропетровск,2002.- № 36.- с. 41-45.
4. Автоматизация составления оперативной части планов ликвидации аварий на шахтах и рудниках/ Потемкин В.Я., Козлов Е.А., Кокоулин И.Е.// Киев: Техника, 1991.- 126 с.
5. Критерий эффективности аварийных вентиляционных режимов/ Светличный В.П.// Уголь Украины.- 1975.- № 8.- с. 46.
6. Расчет критерия эффективности аварийных вентиляционных режимов/Светличный В.П., Кокоулин И.Е.//Уголь Украины.- 1979.- № 6.- с. 40 – 42.
7. Выбор аварийного вентиляционного режима с учетом эвакуации людей при подземном пожаре/Кокоулин И.Е.// Уголь Украины.- 1987.- № 8.- с. 40 – 41.
8. Расчет времени движения людей при выходе из аварийной зоны/ Потемкин В.Я., Светличный В.П., Кокоулин И.Е.// Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело: Науч.-техн. реф. сб. ЦНИЭИ-Уголь.- 1977.- № 12.- с. 13 – 14.
9. Учет пропускной способности выработок, оборудованных транспортными средствами циклического действия, при организации аварийной эвакуации людей/ Потемкин В.Я., Подольский А.Л., Кокоулин И.Е.// Материалы совместного совещания работников служб депрессионных съемок и профилактической службы ВГСЧ Минцветмета СССР.- Свердловск,1988.- с.79 – 81.
10. Метод определения эвакуации людей при авариях/ Потемкин В.Я., Кокоулин И.Е., Подольский А.Л.// Профилактика травматизма и борьба с профессиональными вредностями в цветной металлургии// Науч. тр./ЦНИИПП,1988.- с. 55 – 60.
11. Йенсен П., Барнес Д. Потокное программирование. М.: Радио и связь, 1984.- 215 с.
12. Эффективность аварийной эвакуации горнорабочих при возникновении аварий на шахте/ Кокоулин И.Е.// Безопасность труда в промышленности- 2000.- № 3.- с. 44-45.
13. Учет особенностей преодоления угрожаемых участков при имитационном моделировании аварийной эвакуации горнорабочих/ Кокоулин И.Е.// Геотехническая механика./ Межведомственный сборник научных трудов.- Днепропетровск, 1997.- № 3.- с. 140-145.