

ГЕОТЕХНІЧНА І ГІРНИЧА МЕХАНІКА, МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 622.272:624.191.5

А.Н. Роечко¹, д-р техн. наук, проф.,
С.А. Харин², д-р техн. наук, доц.

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г.Днепропетровск, Украина
2 – Областное коммунальное высшее учебное заведение „Институт предпринимательства „Стратегия“, г.Желтые Воды, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗРЫВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

A.N. Roenko¹, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
S.A. Kharin², Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine
2 – Regional Municipal Higher Educational Institution “Institute of Business “Strategy”, Zhovti Vody, Ukraine

STUDY OF INFLUENCE OF EXPLOSION ON DEEP LAYERS CONSTRUCTION INTENSITY BY MEANS OF OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING

Цель. На основе разработки программного обеспечения исследовать влияние факторов взрыва на скорость строительства протяженных горизонтальных выработок: коэффициента работоспособности взрывчатых веществ (ВВ), коэффициента заполнения шпуров, применения контурного взрывания.

Методика. Реализован комплексный подход, включающий обобщение и анализ литературных источников, теоретические исследования, базирующиеся на методах математического моделирования, применение языка программирования Java.

Результаты. Разработано программное обеспечение для проведения исследований. Выполнены исследования организационно-технологических параметров проходки протяженных горизонтальных выработок при различных условиях. Установлен характер изменения темпов проведения горных выработок при меняющихся значениях коэффициента работоспособности ВВ, коэффициента заполнения шпуров, структуры пород, а также при использовании контурного взрывания для выработок различного сечения.

Научная новизна. Установлено, что в общем виде зависимость скорости проходки выработки от коэффициента работоспособности ВВ и заполнения шпуров характеризуются линейными функциями. Установлена также зависимость параметров размещения оконтуривающих и предконтурных шпуров от коэффициента крепости пород для условий с $f=10-20$, при этом показано, что расстояние между шпурами и линия наименьшего сопротивления, в зависимости от коэффициента крепости пород соответственно, описываются логарифмической и степенной функциями. Показаны результаты исследования влияния контурного взрывания на темпы проходки выработок при различных условиях: скорость проходки выработок при контурном взрывании снизится в 1,1–1,24 раза, при этом более интенсивное падение скорости проходки при повышении f можно объяснить снижением производительности бурового оборудования.

Практическая значимость. Предложена программа расчета организационно-технологических параметров проходки горных выработок в зависимости от различных факторов буровзрывных работ, что позволяет автоматизировать процессы проектирования сооружения шахт на больших глубинах разработки.

Ключевые слова: шахта, динамика, строительство, шпур, скорость, горная выработка, алгоритм, программное обеспечение, Java, метод, коэффициенты работоспособности ВВ, структура пород, контурное взрывание

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Развитие горной промышленности является важнейшим фактором динамичного роста хозяй-

ства страны. Процесс реконструкции глубоких шахт будет в той степени эффективным, в которой он поддерживается соответствующими усилиями в части исследований, направленных на совершенствование основных технологических процессов, которые требуют

высокой автоматизации для оперативного получения достоверных результатов и их использования на практике.

Анализ исследований и публикаций. Различные аспекты проблемы строительства шахт на больших глубинах разработки рассматриваются в части, например, исследования буровзрывных работ, проявлений горного давления, крепления выработок, что отражено, в частности, в работах [1–4]. Исследованы также вопросы бурения шахтных стволов, позволяющие сохранить прочность законтурного массива [5], что имеет серьезные перспективы.

Анализ ранее опубликованных результатов исследований и современного состояния практики проектирования и строительства горных выработок указывает на необходимость более широкого использования компьютерных технологий для детального учета различных особенностей сооружения подземных объектов и обеспечения оптимальных параметров ведения работ, особенно такого важного направления как организации строительства шахт.

Постановка задачи. Разработать соответствующее программное обеспечение и исследовать вопросы организации проходки протяженных горизонтальных выработок глубоких шахт под влиянием изменения параметров буровзрывных работ, а также при контурном взрывании для разных горно-геологических условий.

Изложение материала и результаты. В современных условиях представляет интерес вопрос о возможности управления темпами проходческих работ не только с помощью различного оборудования. В этой связи, в частности, актуальна оценка степени влияния на скорость проходки выработки (v) коэффициента работоспособности взрывчатых веществ (ВВ) (e_p), коэффициента заполнения шпуров (k_s) и коэффициента структуры пород (f_c). В этой связи представляет интерес разработка соответствующего программного обеспечения для оперативного изучения вопросов организации проходки выработок с учетом влияния ряда факторов буровзрывных работ на темпы проведения выработок. Как представляется, весьма целесообразным, в данном случае, может быть программное обеспечение, использующее объекты объектно-ориентированного программирования.

Для автоматизации исследований нами разработаны алгоритм (рис. 1) и компьютерная программа на языке Java. Основные возможности этого языка весьма разнообразны. К ним относится, в частности, следующее:

- набор стандартных коллекций;
- наличие простых средств создания сетевых приложений;
- встроенные в язык средства создания многопоточных приложений;
- увеличенные возможности обработки исключительных ситуаций;
- унифицированный доступ к базам данных;
- поддержка обобщений;
- автоматическое управление памятью;
- значительный набор средств фильтрации ввода-вывода;

- параллельное выполнение программ.

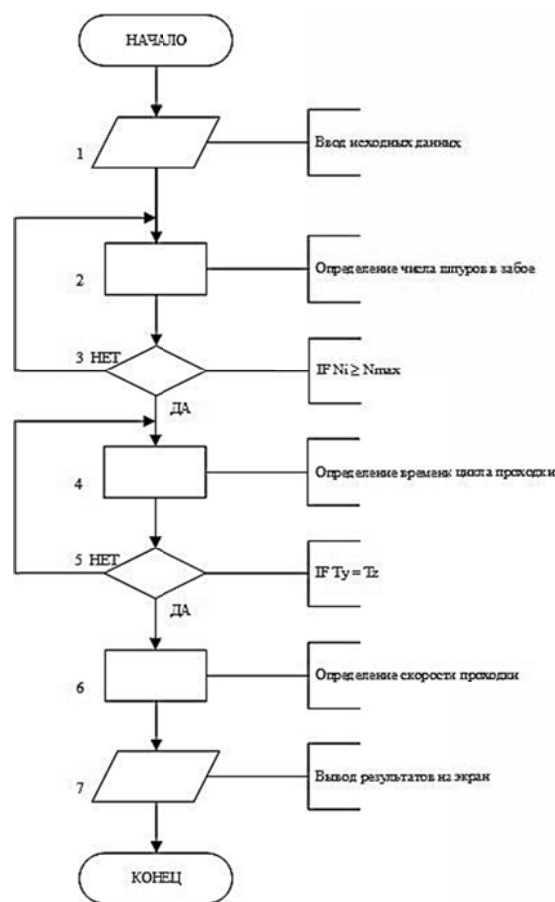


Рис. 1. Алгоритм программы

Все это дает возможность эффективно использовать язык Java для решения задач горного производства.

Рассмотрим процесс проходки с помощью буровзрывной технологии в обычных условиях квершлага площадью поперечного сечение 20м^2 с применением непосредственно при проходке только временной набрызгбетонной крепи. Пересекаемые горные породы имеют коэффициент крепости 16 по шкале проф. Протодяконова М.М., при этом эксплуатационная производительность бурового оборудования принята на уровне $11,1\text{м/ч}$, погрузочного $10\text{м}^3/\text{ч}$ породы в целике.

Исследуем зависимость скорости строительства квершлага от коэффициента структуры пород. При увеличении f_c имеет место уменьшение скорости проходки выработки: так, например, при $f_c=0,8$ будет наблюдаться скорость $37,31\text{м/мес.}$, но уже при $f_c=1$ она сократится до $32,74\text{м/мес.}$, а в дальнейшем, при достижении максимального для нашего случая значения $f_c=2$, скорость уменьшится до $20,24\text{м/мес.}$

Можно сказать, что зависимость скорости проходки выработки от коэффициента структуры пород будет характеризоваться линейной функцией $v = -13,8f_c + 46,5$. Следует отметить значительную изменчивость коэффициента структуры пород и его способность в большой степени влиять на скорость проходки выработок. Так, при изменении f_c в 2,5 раза v изменится в 1,84 раза.

Исследуем в дальнейшем зависимость скорости проходки выработки от коэффициента работоспособности ВВ. Для ВВ с высокой работоспособностью, например, $e_p = 0,7$, характерна скорость проходки 40,3м/мес., в то время как ВВ с низкой работоспособностью, при $e_p = 1,2$, обеспечивает скорость проведения выработки всего лишь 29,04м/мес. Таким образом, изменение e_p в 1,714 раза влечет за собой изменение v в 1,39 раза. В общем виде зависимость скорости проходки выработки от коэффициента работоспособности ВВ характеризуется линейной функцией $v = -23,6 e_p + 56,7$.

Анализ опыта применения контурного взрывания показал следующее. Уменьшение концентрации взрыва на 1м шпура достигается за счет применения ВВ с высокой (360–450см³) работоспособностью в патронах малого (21–24мм) диаметра или применения ВВ в патронах обычного (32–36мм) диаметра, но малой (260–300см³) работоспособности, а также комбинации двух первых способов. Благодаря увеличенному зазору между диаметром шпура и патроном ВВ снижается плотность заряжения и связанное с этим давление газа на стенки шпура.

При контурном взрывании применяют три типа конструкций заряда – с радиальным, осевым и радиально-осевым зазором. Заряды с радиальным зазором применяют при использовании ВВ в патронах малого диаметра, с осевым зазором – при использовании ВВ в патронах диаметром 32–36мм; заряды с радиально-осевым зазором применяются в случаях, когда ВВ имеют большую работоспособность, но малый диаметр патрона. Применение контурного взрывания уменьшает глубину трещин в породном массиве в 4–7 раз, перебор породы – примерно в 3 раза, заметно снижает затраты на крепление 1м выработок – в 1,5 раза.

В технической литературе имеются данные о зависимости расстояния между оконтуривающими шпурами в горизонтальных выработках от коэффициента крепости пород по шкале проф. М.М. Протоdjeяконова. Так, например, при $f=3$ это расстояние составляет 75см, а при $f=10$ уменьшается до 45см. В то же время в указанных работах отсутствуют данные о параметрах размещения оконтуривающих шпуров в породах с $f > 10$.

Воспользовавшись имеющимися данными можно установить зависимости параметров размещения шпуров от коэффициента крепости пород, экстраполировав их для условий с $f = 10–20$ (рис. 2, табл. 1).

Полученные параметры размещения шпуров контурного и предконтурного ряда используем для определения зависимости скорости проходки выработки при контурном взрывании в крепких и весьма крепких породах.

Исследуем зависимость скорости проходки выработки от крепости пород для различных условий (табл. 2) в выработках с площадью поперечного сечения $S = 10$ и $S = 20\text{м}^2$.

Использование контурного взрывания приводит к необходимости бурения дополнительного числа шпуров, что должно сказываться на темпах проходки выработки. Анализ результатов моделирования числа шпуров при обычном (N) и контурном (N_k) взрывании

показал следующее. При абсолютном (и весьма значительном) возрастании числа шпуров, с увеличением коэффициента крепости пород, относительное их увеличение при контурном взрывании будет более высоким при меньших значениях f . Так, например, в выработке с $S = 10\text{м}^2$ относительное возрастание числа шпуров при контурном взрывании по сравнению с обычным при $f = 10$ составит 1,276 раза, при $f = 14–1,244$ раза, в то время как при $f = 20$ оно уменьшится до 1,189 раза.

Таблица 1

Зависимость параметров буровзрывных работ от коэффициента крепости пород

Вид шпуров	Расстояние между шпурами, a_k , см	Линия наименьшего сопротивления, W_k , см
Оконтуривающие шпуры	Логарифмическая, $a_k = -24,1 \ln(f) + 99,711$	Степенная $W_k = 149,2 f^{-0,43}$
Предконтурные шпуры	Логарифмическая, $a_{pk} = -28,9 \ln(f) + 119,5$	Степенная $W_{pk} = 179,4 f^{-0,42}$

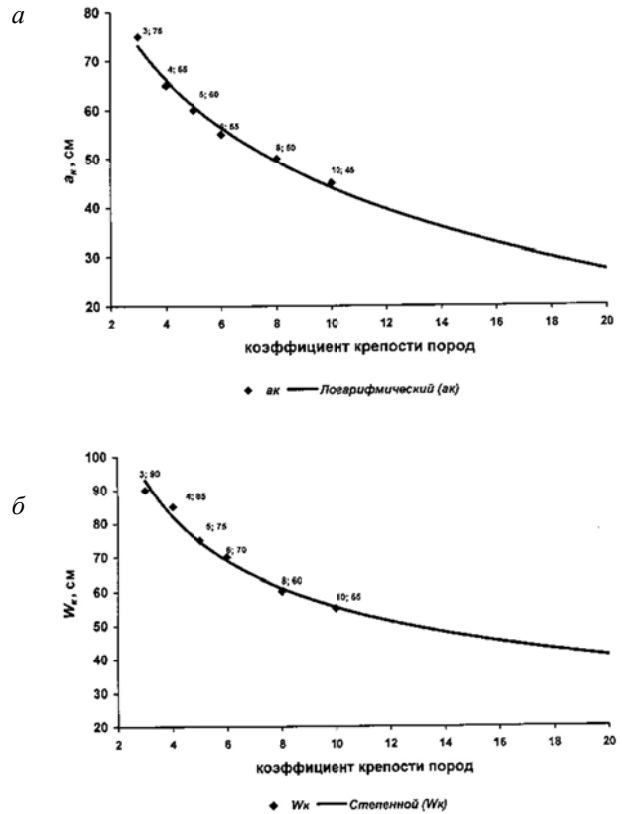


Рис. 2. Параметры размещения оконтуривающих шпуров: зависимости расстояния между шпурами (а) и линии наименьшего сопротивления (б) от коэффициента крепости пород

В выработке с $S = 20\text{м}^2$ такое изменение, имея сходный характер, будет отличаться несколько меньшим уровнем: при $f = 10$ оно составит 1,276 раза, при $f = 14–1,244$ раза, в то время как при $f = 20$ – уменьшится до 1,189 раза. В варианте условий 1, при применении обычного взрывания, и изменении f с 10 до 14, скорость проходки выработки снизится с 77 до 50,16м/мес. (на

34,8%). Дальнейшее изменение f до 20 приводит к снижению скорости проходки выработки до 29м/мес. (в 2,66 раза по сравнению с $f = 10$). При использовании контурного взрывания (вариант условий 2) необходимость в бурении дополнительного числа шпуров приводит к снижению в соответствующих случаях скорости проходки выработки. Так, при $f = 10$ она составит 67,8м/мес. (меньше, чем при обычном взрывании в 1,14 раза). При $f = 20$ скорость снизится до 24,64м/мес. (в 2,75 раза по сравнению с $f = 10$ и в 1,18 раза по сравнению с обычным взрыванием).

Таблица 2
Варианты условий исследования

Варианты условий	Площадь поперечного сечения выработки в проходке, м ²	Вид взрывания	Производительность средств бурения
1	10	Обычное	Изменяется в соответствии с f
2		Контурное	Изменяется в соответствии с f
3		Контурное	Увеличена по сравнению с вариантом 2 в 2 раза
4	20	Обычное	Изменяется в соответствии с f
5		Контурное	Изменяется в соответствии с f
6		Контурное	Увеличена по сравнению с вариантом 5 в 2 раза

Представляет интерес исследование изменения скорости проходки выработки при контурном взрывании, но при увеличении в 2 раза (в соответствующих случаях) производительности средств бурения, поскольку именно бурение оказывает наибольшее воздействие на темпы работ. В этом случае (вариант условий 3) будут иметь место следующие скорости проведения выработки: 63,4м/мес. при $f=10$ (0,82 к соответствующему уровню скорости при обычном взрывании); 49,2м/мес. при $f=14$ (уже 0,98); 41м/мес при $f=16$.

При $f = 16$ происходит уравнивание скоростей – проходки с обычным и контурным взрыванием, но с удвоенной производительностью бурового оборудования. В породах с $f=20$ контурное взрывание с удвоенной производительностью бурового оборудования обеспечивает скорость проходки выработки уже в 1,41 выше обычного взрывания.

Рассмотрим аналогичным образом скорости проходки выработки с $S = 20\text{м}^2$. В этом случае при обычном взрывании (вариант условий 4) скорость проходки выработки изменяется от 51,2м/мес. при $f = 10$ и 36,4 при $f = 14$ до 22,3м/мес. при $f = 20$. Использование контурного взрывания (вариант условий 5) приводит к снижению темпов сооружения выработки в следующих пределах: при $f = 10$ до 46,8м/мес. (в 1,1 раза), при $f = 14$ до 32,4м/мес. (в 1,12 раза), и при $f = 20$ до 18м/мес. (в 1,24 раза). Более интенсивное снижение скорости проходки при контурном взрывании при больших значениях f можно объяснить не столько увеличением в этом случае числа шпуров (интенсив-

ность прироста числа шпуров при высоких f , напротив, снижается), но усложнением условий их бурения.

Применение и в данном случае, по аналогии с выработкой меньшего сечения, сочетания контурного взрывания с удвоенной производительностью бурового оборудования (вариант условий 6) заметно повышает скорость проведения выработки – до 54,9м/мес. при $f = 10$ (уже при таком значении f скорость будет превышать имевшую место в варианте при обычном взрывании, но однократной производительности средств бурения) или 28,2м/мес. при $f = 20$.

Результаты исследований, на основании которых установлены зависимости скорости проходки выработки от коэффициента крепости пород по вариантам условий, сведем в табл. 3. Указанные зависимости с удовлетворительной точностью могут быть описаны линейными функциями.

Таблица 3
Зависимости скорости проходки выработки от крепости пород

Варианты условий	Функция	Вид зависимости
1	$v = -4,63f + 119,1$	линейный
2	$v = -4,09f + 105,6$	
3	$v = -2,04f + 80,1$	
4	$v = -2,82f + 77,5$	
5	$v = -2,78f + 72,5$	
6	$v = -2,58f + 79,3$	

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, по результатам исследований, следует указать, что фактором, не поддающимся управлению, значение которого определяется горно-геологическими условиями строительства, является коэффициент структуры пород. Под его воздействием скорость проходки может изменяться в пределах 1,84 раза. Факторами, которыми возможно управлять, являются коэффициент работоспособности ВВ и коэффициент заполнения шпуров: они могут воздействовать на скорость проведения выработки, изменяя ее, соответственно, в 1,39 и 1,24 раза. При строительстве горных выработок в вязких и упругих породах можно предположить возникновение значительных трудностей по поддержанию необходимых темпов ведения работ.

Исследования зависимости влияния контурного взрывания на скорость проходки выработок при различных условиях показали следующее: при использовании контурного взрывания возникает необходимость в бурении дополнительного числа шпуров, измеряемого, для различных условий, 19–28% для выработки с $S = 10\text{м}^2$ или 17–24% для выработки с $S = 20\text{м}^2$, причем с увеличением f имеет место относительное сокращение прироста числа оконтуривающих шпуров; скорость проходки выработки с $S = 10\text{м}^2$ при контурном взрывании снизится в 1,14 при $f = 10$ и в 1,18 раза при $f = 20$; для выработки с $S = 20\text{м}^2$ указанные показатели составят, соответственно, 1,1 и 1,24 раза.

Более интенсивное падение скорости проходки при повышении f можно объяснить снижением в этом случае производительности бурового оборудования. Удвоенная производительность средств бурения позволяет не только компенсировать снижение скорости

при контурном взриванні, но и получить, при более высоких значениях f , ее приращение.

В ходе дальнейших исследований было бы полезно разработать соответствующие программы и рассмотреть вопросы о зависимости оптимальных организационных параметров сооружения протяженных выработок от различных факторов.

Список литературы / References

1. Фролов А.А. Обоснование рациональных расстояний между цилиндрическими зарядами при их взрывании в скальном массиве горных пород / А.А. Фролов // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2013. – № 1 (32). – С. 298–303.

Frolov, A.A. (2013), "Validation of rational distances between cylindrical charges during their blasting in rock mass", *Visti Donetskooho Hirnychooho Instytutu*, no. 1 (32), pp. 298–303.

2. Шашенко А.Н. Критерии оценки устойчивости пород почвы горных выработок / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. – № 1. – С. 44–49.

Shashenko, A.N. and Solodyankin, A.V. (2007), "Criteria of estimation of stability of rock of floor of the main working", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychooho Universytetu*, no. 1, pp. 44–49.

3. Мартовицький А.В. Обгрунтування комплексу ефективних заходів з підвищення стійкості виробок шахт ПАТ „ДТЕК Павлоградвугілля“ / А.В. Мартовицький // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2012. – № 3. – С. 45–53.

Martovytskyi, A.V. (2012), "Substantiation of an effective set of measures aiming increase of mine workings stability in mines owned by Private Joint-Stock Company "DTEK Pavlogradugol", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychooho Universytetu*, no. 3, pp. 45–53.

4. Калякин С.А. Управление разрушающим действием взрыва удлиненного шпурового заряда взрывчатого вещества / С.А. Калякин, А.Н. Шкумагов, К.Н. Лабинский // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2013. – №1 (32). – С. 157–164.

Kalyakin, S.A., Shkumatov, A.N. and Labinskiy, K.N. (2013), "Control of explosion cracking ability of elongated blast-hole charges of explosive", *Visti Donetskooho Hirnychooho Instytutu*, no. 1 (32), pp. 157–164.

5. Левит В.В. Бурение шахтных стволов как перспективное направление в шахтном строительстве / В.В. Левит, А.А. Горелкин // Вісник КрНУ. – 2012. – Вип. 2/2012 (73). – С. 104–110.

Levit, V.V. and Gorelkin, A.A. (2012), "Drilling of vertical shafts as a promising direction in mine building", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 2, no. 73, pp. 104–110.

Мета. На основі розробки програмного забезпечення дослідити вплив факторів вибуху на швидкість будівництва протяжних горизонтальних виробок: коефіцієнта працездатності вибухових речовин (ВР), коефіцієнта заповнення шпурів, застосування контурного вибуху.

Методика. Реалізовано комплексний підхід, що включає узагальнення та аналіз літературних джерел, теоретичні дослідження, що базуються на методах математичного моделювання, застосування мови програмування Java.

Результати. Розроблено програмне забезпечення для проведення досліджень. Виконані дослідження організаційно-технологічних параметрів проходки протяжних горизонтальних виробок за різних умов. Встановлено характер зміни темпів проведення гірничих виробок при мінливих значеннях коефіцієнта працездатності ВВ, коефіцієнта заповнення шпурів, структури порід, а також при використанні контурного підривання для виробок різного перетину.

Наукова новизна. Встановлено, що в загальному вигляді залежність швидкості проходки виробки від коефіцієнтів працездатності ВВ та заповнення шпурів характеризується лінійними функціями. Встановлено також залежність параметрів розміщення оконтурювальних і передконтурних шпурів від коефіцієнта міцності порід для умов з $f=10-20$, при цьому показано, що відстань між шпурами та лінія найменшого опору, залежно від коефіцієнта міцності порід відповідно, описуються логарифмічною й ступеневою функціями. Показані результати дослідження впливу контурного підривання на темпи проходки виробок за різних умов: швидкість проходки виробок при контурному підриванні знизиться в 1,1–1,24 рази, при цьому більш інтенсивне падіння швидкості проходки при підвищенні f можна пояснити зниженням продуктивності бурового обладнання.

Практична значимість. Запропонована програма розрахунку організаційно-технологічних параметрів проходки гірничих виробок у залежності від різних факторів буропідривних робіт, що дозволяє автоматизувати процеси проектування спорудження шахт на великих глибинах розробки.

Ключові слова: шахта, динаміка, будівництво, шпур, швидкість, гірничі виробки, алгоритм, програма безпеки, Java, метод, коефіцієнти працездатності ВВ, структура порід, контурне підривання

Purpose. To investigate the influence of the following factors of explosion on the extended horizontal workings construction speed based on software development: explosive efficiency ratio, fill factor of holes, perimeter blasting technique.

Methodology. We have implemented a comprehensive approach that includes the synthesis and analysis of literary sources, theoretical studies based on the methods of mathematical modeling, use of the programming language Java.

Findings. The software has been developed for the research. We have studied organizational and technological parameters of the extended horizontal workings driving under various conditions. We have determined the nature of change of pace of mining depending on varying values of the explosive efficiency ratio, the fill factor of holes, the structure of rocks, and use of the perimeter blasting technique for workings of various section shape.

Originality. We have found that in general the dependence of the driving speed on the explosive efficiency ratio

and fill factor of holes is characterized by linear functions. The dependence of cropper holes placement options on the coefficient of rock strength for conditions with $f=10-20$ has been determined. The results have shown that in this case the distance between the holes and the line of least resistance, depending on the coefficient of rock strength are described by logarithmic and exponential functions respectively. We have presented the results of studies of the perimeter blasting technique effect on the driving speed under different conditions: driving speed drops by 1.1–1.24 times, while the more intense reduction in speed with increasing penetration rate f can be explained by the reduced performance of the drilling equipment.

Practical value. We have suggested the program of calculation of organizational and technological parameters of underground development with respect to various factors of blasting that allows us to automate the design process for deep mining.

Keywords: *mine, dynamics, construction, trace, speed, excavation, algorithm, software, Java, algorithm method, explosive efficiency ratio, rock structures, perimeter blasting technique*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
О.В. Солодянкіним. Дата надходження рукопису
10.02.14.*

УДК 532:536.715

А.Г. Бутенко, канд. техн. наук, доц.

Государственное высшее учебное заведение „Одесский национальный политехнический университет“, г.Одесса, Украина, e-mail: alex_butenko@ukr.net

ГИДРОДИНАМИКА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

A.G. Butenko, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.

State Higher Educational Institution “Odessa National Polytechnic University”, Odessa, Ukraine, e-mail: alex_butenko@ukr.net

HYDRODYNAMICS OF NON-ISOTHERMAL TURBULENT AIRFLOWS IN DUCTS OF ANNULAR SECTION

Цель. Определение гидродинамических характеристик неизотермического турбулентного течения воздуха в напорном канале кольцевого сечения с граничными условиями первого рода.

Методика. Реализация цели исследования осуществлялась путем численного моделирования в программной среде SOLID WORKS COSMOS FLO.

Результаты. Получены зависимости изменения гидравлического коэффициента трения вдоль кольцевого канала, обогреваемого через внутреннюю стенку, а так же графики зависимости локального значения коэффициента Дарси от числа Рейнольдса для разных значений степени неравномерности распределения вязкости в сечении. Рассчитаны значения толщины пристенных слоев, касательных напряжений и градиентов скорости у стенок канала. Дан анализ особенностей гидродинамической стабилизации неизотермического турбулентного потока в канале кольцевого сечения.

Научная новизна. Доказано, что при турбулентном течении воздушного потока в напорном канале кольцевого сечения, при его обогреве через внутреннюю стенку и при граничных условиях первого рода, гидравлическое сопротивление вдоль течения возрастает. Объяснение этому эффекту дано путем анализа причин и характера изменения вдоль канала толщины пристенных слоев, касательных напряжений и градиентов скорости. Установлено, что увеличение степени неравномерности распределения вязкости в данном сечении приводит к снижению локального значения коэффициента гидравлических потерь. На основании анализа особенностей гидродинамической стабилизации неизотермического потока в качестве критерия стабилизации предложена величина турбулентной вязкости.

Практическая значимость. Неизотермическое турбулентное течение в напорных каналах кольцевого сечения характерно для теплообменных аппаратов типа „труба в трубе“. Проектирование этих аппаратов предполагает их гидравлический расчет. В настоящее время такие расчеты ведутся без учета неравномерности температурного поля. Выявленные закономерности позволяют учесть неизотермический характер течения и тем самым повысить точность гидравлических расчетов.

Ключевые слова: *неизотермический поток, свойства жидкости, гидравлический коэффициент трения, касательные напряжения, градиент скорости, толщина пристенного слоя, турбулентная вязкость*

Постановка проблемы и анализ последних исследований. Вопросы гидродинамики напорных изо-

термических течений в трубах как круглого, так и более сложного поперечного сечения достаточно хорошо изучены. Однако, в некоторых случаях, например, в элементах теплотехнического оборудования, течение