

## **Об оптимизации расчетов параметров распространения воздушных ударных волн в местах изменения геометрии выработок угольных шахт**

**О. Ю. Лукашов<sup>1</sup>, Д. А. Костромин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «ШахтЭксперт-Системы»  
Кемерово, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет  
Томск, Россия

### *Аннотация*

Угольные шахты – опасные производственные объекты. Особенно опасны взрывы метана и угольной пыли. При таких авариях требуется оперативность и точность прогноза параметров распространения ударной волны в горных выработках, а также знание расстояний от эпицентра взрыва до границ опасной зоны. Это требуется для обеспечения безопасности людей при ведении горноспасательных работ. В работе представлены результаты исследований по оптимизации численных расчетов прохождения воздушной ударной волны через повороты и места изменения геометрии горных выработок методом Годунова первого порядка точности. Предлагается подход к оптимизации, основанный на замене узловых пространственных разностных ячеек на одномерные. Определены критерии, при которых такая замена возможна. Представлены теоретические оценки ускорения численных расчетов.

### *Ключевые слова*

угольная шахта, математическая модель, воздушная ударная волна, промышленная безопасность, взрывобезопасная зона

### *Для цитирования*

Лукашов О. Ю., Костромин Д. А. Об оптимизации расчетов параметров распространения воздушных ударных волн в местах изменения геометрии выработок угольных шахт // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2021. Т. 19, № 1. С. 93–103. DOI 10.25205/1818-7900-2021-19-1-93-103

## **On the Optimization of Calculations of the Parameters of the Propagation of Air Shock Waves in the Places where the Geometry Branches of Coal Mines Changes**

**O. Yu. Lukashov<sup>1</sup>, D. A. Kostromin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> LLC Mining Expert Systems  
Kemerovo, Russian Federation

<sup>2</sup> Tomsk State University  
Tomsk, Russian Federation

### *Abstract*

Coal mines are hazardous production facilities. Explosions of methane and coal dust are especially dangerous. Such accidents require prompt and accurate prediction of shock wave propagation parameters in mine workings, as well as knowledge of distances from the explosion epicenter to the boundaries of the dangerous zone. This is required to ensure the safety of people during mining rescue operations. The work presents the results of research to optimize the numerical calculations of the air shock wave through the turns and places of change in the geometry of mine workings by the method of Godunov first order of accuracy. An approach to optimization based on replacement of nodal spatial

difference cells with one-dimensional ones is proposed. The criteria under which such substitution is possible are defined. Theoretical estimates of acceleration of numerical calculations are presented.

*Keywords*

coal mine, mathematical model, air shock waves, industrial safety, explosion-proof area

*For citation*

Lukashov O. Yu., Kostromin D. A. On the Optimization of Calculations of the Parameters of the Propagation of Air Shock Waves in the Places where the Geometry Branches of Coal Mines Changes. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2021, vol. 19, no. 1, p. 93–103. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2021-19-1-93-103

## Введение

Действующее законодательство<sup>1</sup> определяет угольные шахты как опасные производственные объекты. Виды возможных аварий также учтены в руководящих документах<sup>2</sup>. Среди всех учтенных видов наиболее разрушительные и трагические последствия имеют взрывы газа и пыли [1]. При составлении плана ликвидации аварий (ПЛА), а также ведении горноспасательных работ с возможностью повторных взрывов важно знать границы безопасных зон, где могут вестись спасательные и изоляционные работы без угрозы жизни и здоровью людей. Определение этих границ производится в соответствии с отраслевой методикой<sup>3</sup> (далее Методика), в основе которой лежат классические нестационарные уравнения газовой динамики:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_f S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u S}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} = -\tau_{fr} \Pi + p \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u) S}{\partial x} = q \Pi, \quad E = c_v T + \frac{u^2}{2}, \quad (4)$$

$$p = \rho R T, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_f v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_f w}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

<sup>1</sup> Об утверждении Правил безопасности в угольных шахтах: постановление Госгортехнадзора России от 05.06.2003 № 50.

<sup>2</sup> Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по составлению планов ликвидации аварий на угольных шахтах»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России от 31.10.2016 № 451.

<sup>3</sup> Распоряжение от 27 апреля 2004 года № Р-7 о введении в действие Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли: 27 апреля 2004. 16 с.

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial \rho v w}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w^2 + p)}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u + p u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho E v + p v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho E w + p w)}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2},$$

$$\tau_{mp} = \frac{1}{8} c_f \rho u^2, \quad c_f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}}, \quad \text{Re} = \frac{\rho u D_{\text{экв}}}{\mu}, \quad D_{\text{экв}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (12)$$

$$q = \alpha (T_s - T), \quad \text{Nu} = 0.022 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.47} B, \quad \text{Pr} = \frac{\rho c}{\lambda_g}, \quad \text{Nu} = \frac{\alpha D_{\text{экв}}}{\lambda_g},$$

$$B = \begin{cases} \exp\left(\frac{(l/\delta)_{\text{opt}}}{(l/\delta)}\right), & \frac{l}{\delta} > \left(\frac{l}{\delta}\right)_{\text{opt}} \\ \exp\left(\frac{(l/\delta)}{(l/\delta)_{\text{opt}}}\right), & \frac{l}{\delta} < \left(\frac{l}{\delta}\right)_{\text{opt}} \end{cases}, \quad \left(\frac{l}{\delta}\right)_{\text{opt}} = 13, \quad (13)$$

$$p(x, 0) = \begin{cases} P_b & x \in \text{BM} \\ P_0 & x \notin \text{BM} \end{cases}, \quad T(x, 0) = \begin{cases} T_b & x \in \text{BM} \\ T_0 & x \notin \text{BM} \end{cases}, \quad \rho_f(x, 0) = \begin{cases} \rho_f & x \in \text{BM} \\ 0 & x \notin \text{BM} \end{cases}, \quad (14)$$

$$u(x, 0) = 0,$$

$$p(x, y, z, 0) = \begin{cases} P_b & \text{в BM} \\ P_0 & \text{вне BM} \end{cases}, \quad T(x, y, z, 0) = \begin{cases} T_b & \text{в BM} \\ T_0 & \text{вне BM} \end{cases}, \quad \rho_f(x, y, z, 0) = \begin{cases} \rho_f & \text{в BM} \\ 0 & \text{вне BM} \end{cases}, \quad (15)$$

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad (16)$$

$$u|_{z=0} = 0,$$

$$p|_{z=0} = p_{\text{атм}}, \quad \rho|_{z=0} = \rho_{\text{атм}}, \quad (17)$$

где  $t$  – время;  $x, y, z$  – оси декартовой системы координат;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости;  $\rho$  – плотность газа;  $\rho_f$  – парциальная плотность продуктов сгорания;  $p$  – давления;  $\tau_f$  – сила трения о стенки;  $q$  – поток тепла в стенки;  $c_v$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме;  $c_f$  – коэффициент сопротивления;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $D_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка канала;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\text{Nu}$  – число Нуссельта;  $\text{Pr}$  – число Прандтля;  $T_s$  – температура стенки;  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена;  $c$  – теплоемкость;  $B$  – поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена;  $l$  – ха-

ракторное расстояние между выступами шероховатости;  $\delta$  – характерная величина выступа;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура;  $\Pi$  – периметр сечения канала;  $S$  – площадь проходного сечения канала;  $E$  – полная энергия газа. Индексы:  $BM$  – зона взрыва метана;  $b$  – параметры в зоне взрыва;  $f$  – продукты сгорания и  $0$  – атмосферные условия.

Уравнения (1)–(5) описывают одномерное движение воздушных ударных волн (ВУВ) по прямолинейным участкам горных выработок (ветвям), а уравнения (6)–(11) – пространственное движение ВУВ в сопряжениях, поворотах и точках изменения геометрии выработок (узлах). По эмпирическим соотношениям (12) вычисляются силовые взаимодействия потока газа со стенками канала. Теплообмен потока газа со стенками определяется из критериальных зависимостей (13). Начальные условия для ветвей и узлов описываются выражениями (14), (15). Граничные условия задаются выражением (16), если границей ветви является тупик, и выражением (17), если выход на поверхность. Система уравнений решается одним из методов конечных объемов – методом С. К. Годунова [2]. Оптимальный шаг дискретизации расчетной области был определен экспериментальным путем в 4 м.

Особенностью Методики является использование единственной пространственной разностной ячейки в каждом узле (рис. 1) [3; 4]. Это позволяет существенно ускорять вычисления при проведении практических расчетов, не теряя количественных характеристик. При выполнении множества расчетов во время аварий экономия времени является важным фактором, определяющим оперативность и точность принимаемых решений, от которых напрямую зависят жизни и здоровье людей.

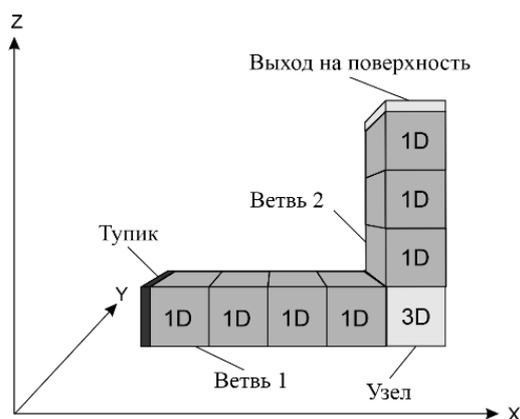


Рис. 1. Схема участка сети  
Fig. 1. Scheme of network segment

Однако подобное упрощение несет в себе и отрицательный момент – размер узлов является самостоятельной фиксированной величиной (ячейка – это куб со стороной 4 м), поэтому всегда есть некоторые расхождения параметров ВУВ для смежных ветвей с поперечными сечениями (рис. 2). В некоторых случаях (скважины с малым диаметром, стволы с большим диаметром) такое расхождение является значительным и влечет за собой чрезмерные искажения физических характеристик в узле.

Решить эту проблему без кардинальной смены метода решения системы уравнения (метод Годунова устойчив в широком диапазоне физических параметров среды) можно двумя способами. Первый – привести размеры узловых ячеек в соответствие размерам смежных с ними одномерных ячеек, однако это приведет к существенному увеличению времени расчетов из-за необходимости соблюдения условия Куранта для величины шага по времени  $\tau$ :

$$\tau = \frac{h_{\min}}{3 \cdot \max[|V| + C]},$$

где  $h_{\min}$  – минимальный шаг по пространству,  $V$  – скорость потока,  $C$  – скорость звука.

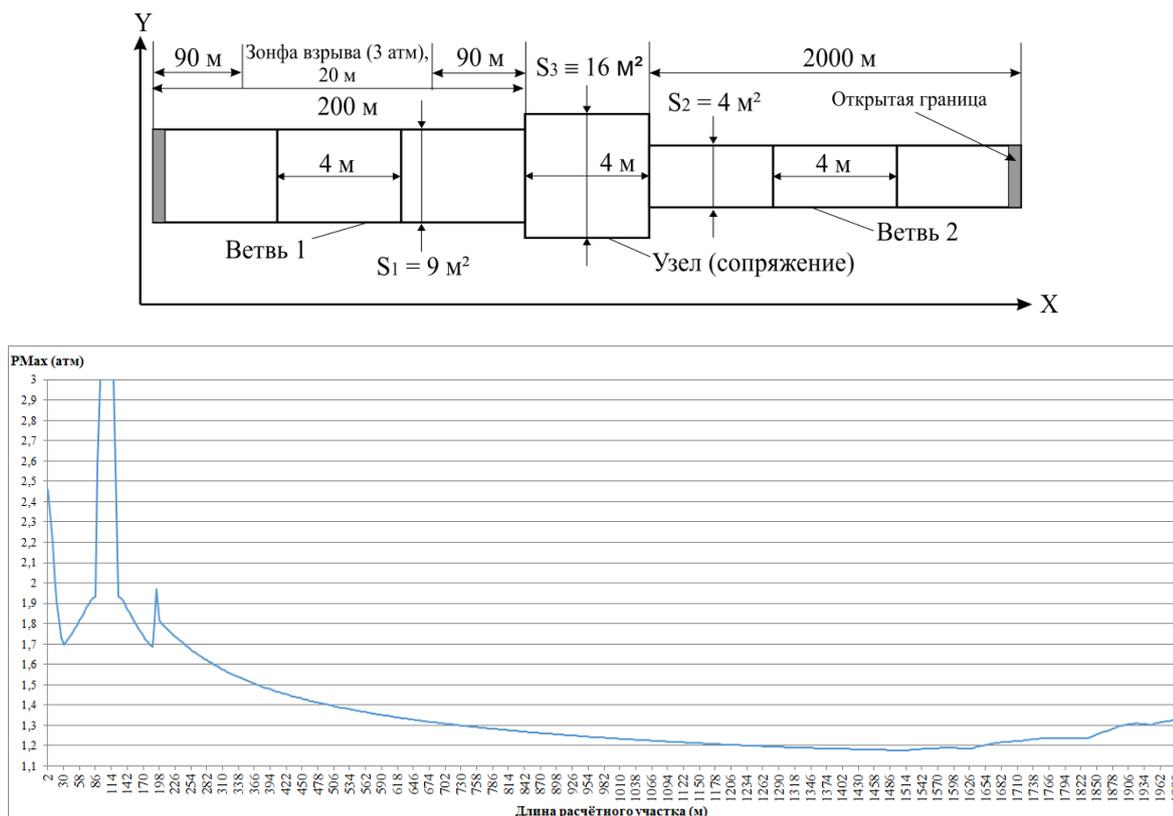


Рис. 2. Схема расчета участка сети с перепадами сечений (сверху).

График максимального давления ВУВ по горным выработкам (снизу) для указанной схемы.

Условия эксперимента: давление в зоне взрыва 3 атм; угол порота 0;

$S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – площадь поперечного сечения ветви 1, ветви 2 и узла сопряжения

Fig. 2. Scheme for calculating a network section with cross-sectional differences (left).

The graph of the maximum air shock wave pressure in mine workings (on the right) for the indicated scheme.

Experimental conditions: pressure in the explosion zone 2 atm; rotation angle 0;

$S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – cross-sectional area of branch 1, branch 2 and linking

В критических условиях ликвидации аварии существенное увеличение времени расчетов может быть неприемлемым.

Второй способ противоположен первому – упростить расчеты, заменив узловые, пространственные, трехмерные ячейки одномерными там, где это возможно – на поворотах горных выработок, где сопрягаются не более двух ветвей. Очевидно, что угол взаимного отклонения этих ветвей не должен превышать некоторую критическую величину. Замена пространственных расчетов на одномерные даст дополнительное преимущество в скорости расчета, которое может быть использовано для детализации параметров ВУВ на геометрически сложных участках исследуемой области.

### Условия численного эксперимента

Для поиска критериев, определяющих возможность упрощения расчетов в узлах, был проведен численный эксперимент. Для подготовки расчетной области использовалась разработанная технология построения локально детализированных разностных сеток для расчета зон поражения при взрывах газа и пыли в угольных шахтах [5]. Технология позволяет строить локально адаптивную декартовую сетку [6] для моделируемой области с помощью древовидных структур данных [7]: двоичные, quadro- и октодеревья.

Модельный участок состоял из двух ветвей – 1 и 2. Длина ветви 1 принималась равной 200 м, 2 – 14 000 м. Взрыв производился в ветви 1. В каждом расчете поочередно варьировались:

- угол поворота – от 0 до 45° с шагом 5°;
- сечения смежных выработок – использовались значения 4, 9, 16, 25 м<sup>2</sup>;
- давление в зоне взрыва (ДЗВ) – использовались значения 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,8 МПа.

В численном эксперименте рассматривались все возможные комбинации перечисленных параметров, общее количество расчетов составило 800. Цель эксперимента – определить углы поворота и соотношения сечений между смежными ветвями, при которых в узлах возможна замена пространственной ячейки на одномерную и исключение учета угла поворота между выработками.

Исследования проводились следующим образом. Для каждого соотношения сечений ветвей, угла поворота и давления в зоне взрыва:

- выполнялись расчеты распространения ВУВ по модельному участку;
- строился график максимального давления по маршруту распространения ВУВ;
- для каждого угла поворота:
  - анализировались изменение границы опасной для человека зоны с избыточным давлением более 0,006 МПа;
  - оценивалось изменение максимального давления по маршруту распространения ВУВ по отношению к максимальному давлению без поворота;
- результаты расчетов обобщались, определялись комбинации сечений и углов поворота, при которых замена пространственной ячейки на одномерную в узле возможна.

Для исключения влияния волновых эффектов границы расчетной области были помечены как выход в атмосферу. Схема эксперимента показана на рис. 3.

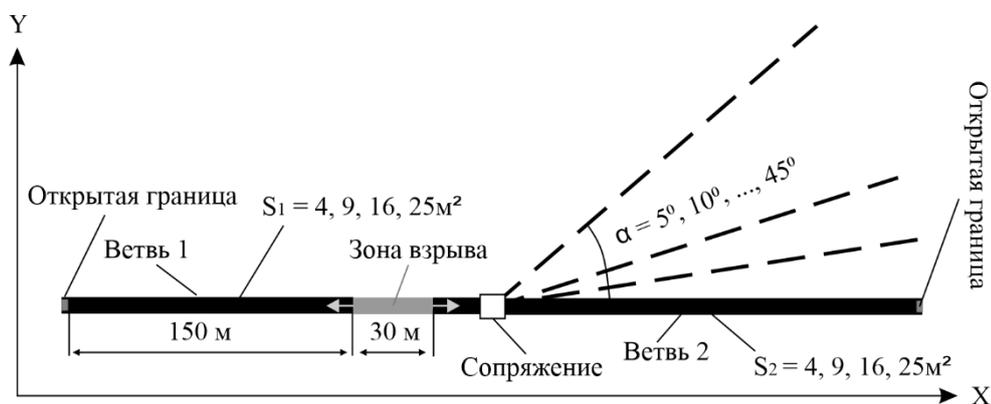


Рис. 3. Схема численного эксперимента.

$S_1, S_2$  – поперечные сечения ветвей 1 и 2,  $\alpha$  – угол поворота между ветвями

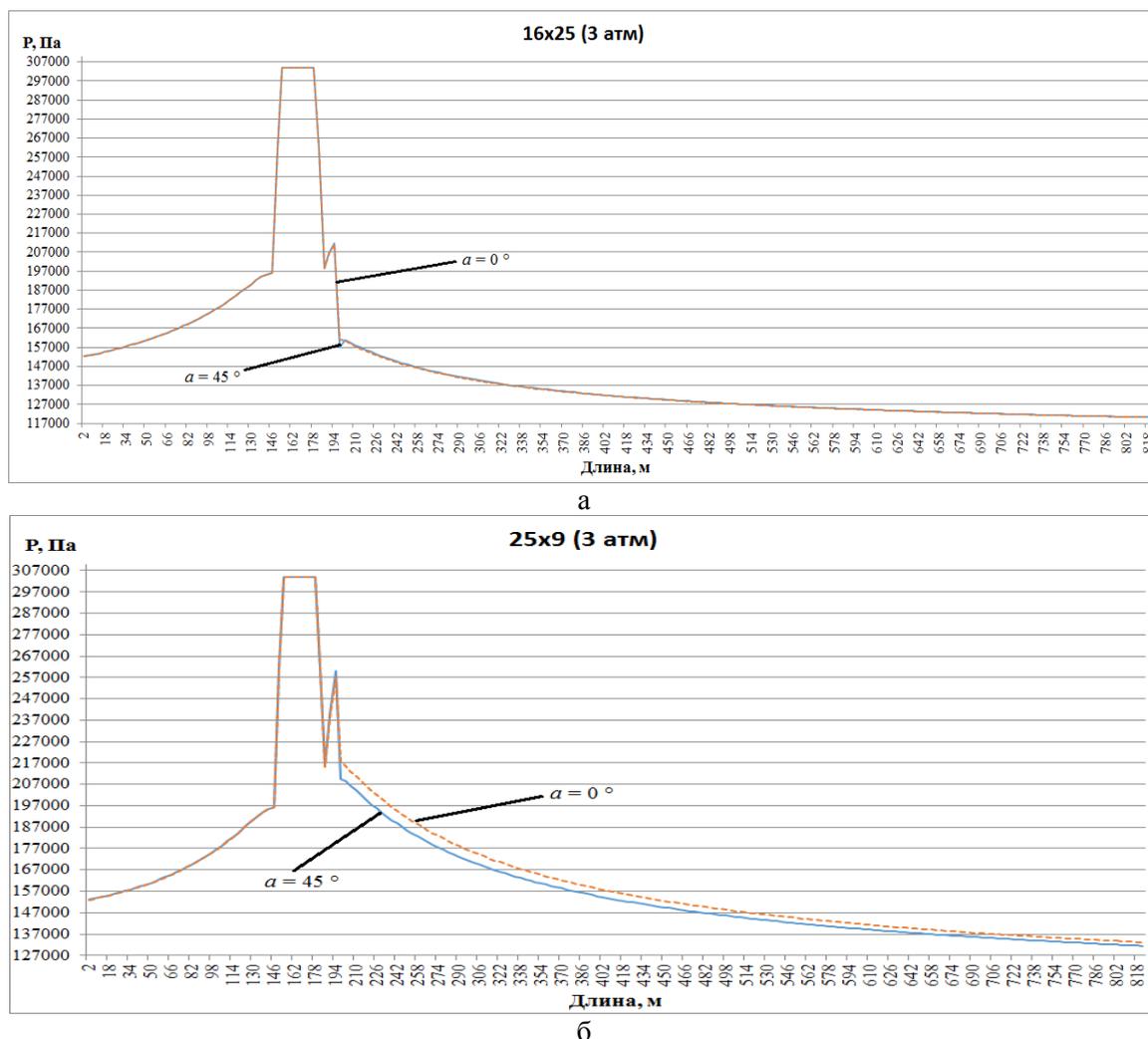
Fig. 3. Numerical experiment scheme.

$S_1, S_2$  – cross-sections of branches 1 and 2,  $\alpha$  – rotation angle between branches

## Результаты

Поворот горных выработок приводит к появлению местного сопротивления и сокращению зоны поражения по фактору избыточного давления. В табл. 1 показаны расчеты прохождения ВУВ через поворот для пяти сочетаний типовых значений поперечного сечения горных выработок – 9, 16 и 25 м<sup>2</sup>. Здесь  $S_1$  и  $S_2$  – сечения участков до и после поворота соответственно. Видно, что при прохождении ВУВ поворота с одновременным сужением





*Рис. 4.* Эпюры максимального давления по маршруту распространения ВУВ: *а* – поворот с расширением потока (эпюры давлений визуально накладываются друг на друга, поворот не оказывает значительного влияния); *б* – поворот с сужением потока (на скачке сечения заметно значительное влияние поворота)

*Fig. 4.* Diagrams of maximum pressure along the route of the air shock wave propagation: *a* – turning with extension flow (pressure diagrams are visually superimposed on each other, rotation does not have a significant effect); *b* – turning with constriction flow (at the jump of the cross-section, a significant influence of the rotation is noticeable)

канала влияние угла более значительно, чем при отсутствии изменений сечения, и тем более с расширением канала. При этом стоит отметить, что сравнение абсолютных значений взрывобезопасных расстояний для различных сочетаний сечений особого смысла не имеет, так как во всех примерах бралась одна и та же протяженность зоны взрыва, что в сочетании с различными сечениями дает разные объемы взорвавшегося метана и, соответственно, энергии взрыва.

Вывод, который можно сделать из данных табл. 1: углы поворота до  $10\text{--}15^\circ$  в зависимости от отношения  $S_1/S_2$  оказывают незначительное влияние на протяженность зоны поражения. Это подтверждают и эпюры максимальных давлений (рис. 4). При расширении потока на повороте на угол вплоть до  $45^\circ$  для всех сечений в диапазоне  $4\text{--}25\text{ м}^2$  максимальное отличие

давлений не превысило 900 Па (15 % от опасного для человека избыточного давления 6 000 Па) по сравнению с ситуацией, когда поворот отсутствует (рис. 4, а). При сужении канала изменения более существенны. Например, при  $S_1 = 25 \text{ м}^2$  и  $S_2 = 9 \text{ м}^2$  максимальное отличие давления при отсутствии поворота (угол =  $0^\circ$ ) и при повороте на  $45^\circ$  уже составляет 8 000 Па, что на 25 % превышает безопасную для человека величину (рис. 4, б), поэтому такой поворот не может быть проигнорирован. При сужении (допустимые с точки зрения безопасности) отличия в расстояниях (до 4 разностных ячейки с учетом наличия разностной вязкости численного метода = 16 м) и изменениях давления (853 Па) достигаются лишь на углах до  $15^\circ$ .

### Заключение

Для оценки степени ускорения времени расчетов за счет предложенной оптимизации была собрана статистика на примере 30 имеющихся в распоряжении авторов моделей шахтных сетей (~ 50 % от общего количества шахт в РФ), представленная в табл. 2. В анализе участвовали узлы с двумя смежными ветвями, ранжированные по диапазонам углов отклонений с шагом  $5^\circ$  (в соответствии с условиями численного эксперимента, см. рис. 3).

Таблица 2

Доля узлов с двумя ветвями в интервалах углов отклонения от прямолинейного направления

Table 2

The proportion of nodes with two branches in the intervals of angles of deviation from the rectilinear direction

Угол отклонения, $^\circ$	Доля узлов, %
0–5	35
5–10	16.9
10–15	12
15–20	9.54
20–25	7.85
25–30	6.28
30–35	4.86
35–40	3.71
40–45	3.11

Видно, что доля узлов с углом отклонения, не превышающим  $15^\circ$ , в среднем составляет 63.9 % от общего количества узлов. Учитывая, что при замене пространственной ячейки на одномерную исчезает необходимость в решении 4 из 6 задач распада произвольного разрыва, средняя теоретическая оценка прироста скорости составит:

$$1 - [(N - M) \cdot 6 + M \cdot 2] / (N \cdot 6) = 1 - 2/3 \cdot M/N = 57 \%,$$

где  $N$  – общее количество узлов;  $M$  – количество узлов с углом отклонения, не превышающим  $15^\circ$ .

Обобщая результаты, можно говорить о том, что при расчете взрывобезопасных расстояний при взрывах метана в угольных шахтах повороты горных выработок до  $15^\circ$  в диапазоне сечений от 4 до  $25 \text{ м}^2$  могут быть проигнорированы и заменены прямолинейными участками, а соответствующие трехмерные разностные ячейки – одномерными. Незначительное увели-

чение размеров (до 16 м) зоны поражения избыточным давлением является допустимым, особенно учитывая, что замена поворота прямым участком лишь незначительно увеличит, но не сократит ее. Это можно рассматривать как введение большого запаса с точки зрения взрывобезопасных расстояний.

### Список литературы

1. **Воробьева О. В., Костеренко В. Н., Тимченко А. Н.** Анализ причин взрывов с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий. М.: Горная книга, 2018. 16 с.
2. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
3. **Лукашов О. Ю.** Исследование волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн по разветвленной сети горных выработок: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2003. 141 с.
4. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / Под ред. И. М. Васенина. Томск, 2006. 322 с.
5. **Лукашов О. Ю., Костромин Д. А.** Технология построения локально детализированных разностных сеток для расчета зон поражения при взрывах газа и пыли в угольных шахтах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020 Т. 18, № 1 С. 36–50. DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-36-50
6. **Афендииков А. Л., Давыдов А. А., Луцкий А. Е., Меньшов И. С., Меркулов К. Д., Пленкин А. В., Ханхасаева Я. В.** Адаптивные вейвлетные алгоритмы для решения задач гидро- и газовой динамики на декартовых сетках. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. 234 с.
7. **Ахо А., Хопкрофт Д. Э., Ульман Д. Д.** Структуры данных и алгоритмы: Учеб. пособие: Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2000. 384 с.

### References

1. **Vorobieva O. V., Kosterenko V. N., Timchenko A. N.** Analysis of the causes of explosions in order to improve the efficiency of the labor safety management system of coal mining enterprises. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2018, 16 p. (in Russ.)
2. **Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Ya., Kraiko A. N., Prokopov G. P.** Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics. Moscow, Nauka, 1976. (in Russ.)
3. **Lukashov O. Yu.** Investigation of wave effects arising from the propagation of shock waves in a ramified network of mine workings. Diss. Candidate of Physics and Mathematics. Tomsk, 2003, 141 p. (in Russ.)
4. **Vasenin I. M.** (ed.). Mathematical modeling of combustion and explosion of high-energy systems. Tomsk, 2006, 322 p. (in Russ.)
5. **Lukashov O. Yu., Kostromin D. A.** Technology of constructing locally detailed difference grids for calculating the affected zones in gas and dust explosions in coal mines. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2020, vol. 18, no. 1, p. 36–50. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-36-50
6. **Afendikov A. L., Davydov A. A., Lutsky A. E., Menshov I. S., Merkulov K. D., Plenkin A. V., Hanhasaeva Ya. V.** Adaptive wavelet algorithms for solving problems of hydro gas dynamics on Cartesian grids. Moscow, IPM named after M. V. Keldysh, 2016, 234 p. (in Russ.)

7. **Aho A., Hopcroft D. E., Ulman D. D.** Data structures and algorithms: A Stud. Manual. Moscow, Williams Publ., 2000, 384 p. (in Russ.)

*Материал поступил в редколлегию  
Received  
10.02.2021*

### Сведения об авторах

**Лукашов Олег Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, ООО ШахтЭксперт-Системы (Кемерово, Россия)  
olukashov@gmail.com

**Костромин Дмитрий Александрович**, аспирант, Томский государственный университет (Томск, Россия)  
kd2206@yandex.ru

### Information about the Authors

**Oleg Yu. Lukashov**, Candidate of Physics and Mathematical, LLC Mining Expert Systems (Kemerovo, 650065, Russian Federation)  
olukashov@gmail.com

**Dmitriy A. Kostromin**, Graduate Student, Tomsk state university (Tomsk, Russian Federation)  
kd2206@yandex.ru