

13. Андрейко С.С., Иванов О.В., Литвиновская Н.А., Лукьянец Е.В. Предотвращение газодинамических явлений при последовательной отработке сильвинитовых пластов КРП и АБ в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Горный журнал. – 2023 – № 11. – С. 20-26. – DOI: 10.17580/gzh.2023.11.03.
14. Андрейко С.С., Иванов О.В., Подлесный И.А., Сиренко Ю.Г. Предотвращение «запоздалых» обрушений пород кровли подготовительных горных выработок на втором калийном пласте рудника третьего рудоуправления ОАО «Беларуськалий» // Горный журнал. – 2023 – № 8. – С. 57-62. – DOI: 10.17580/gzh.2023.08.08.
15. Andreiko S.S., Litvinovskaya N.A., Bobrov D.A. Gas content and gas-dynamic characteristics potash stratum VI in Belaruskali's mine 2 // Eurasian Mining. – 2023. – V. 39, № 1. – P. 78-82. – DOI: 10/17580/em.2023.01.17.
16. Андрейко С.С., Лукьянец Е.В. Механизм образования очагов газодинамических явлений в складчатых структурах калийных пластов // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 562-572.
17. Христианович С.А. Избранные работы. – М.: Изд-во МФТИ, 2000. – С.88-218

УДК 622.814

DOI:10.7242/echo.2024.3.11

НЕСТАЦИОНАРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ МЕТАНА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Д.Ю. Палеев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассматривается математическая модель на основе уравнений газовой динамики, позволяющая рассчитывать нестационарные процессы, возникающие в вентиляционной сети шахты при аварийных взрывах метана в горных выработках. С ее помощью можно одновременно рассчитывать как взрыв метана с распространением затухающей ударной волны по разветвленной сети горных выработок, так и переходные процессы, вызванные изменением воздухораспределения во время взрыва.

Ключевые слова: шахта, горные выработки, взрыв, ударная волна, вентиляция, математическая модель, газодинамический метод, нестационарный процесс, общешахтная депрессия.

Введение

Взрывы в угольных шахтах – наиболее опасный вид рудничных аварий из-за трудоемкости, сложности и длительности ликвидации их последствий. Возникают они всегда неожиданно, и в течение короткого времени в зону поражения попадает часть выработок, в которых создаются условия, несовместимые с жизнью находящихся в них людей. В этот момент высокие давление, температура, скорость газа и ядовитые продукты взрыва в этих выработках мгновенно нарушают их нормальное проветривание за счет общешахтной депрессии, создаваемой вентиляторами главного проветривания. При этом проветривание за счет общешахтной депрессии восстанавливается на аварийном участке после взрыва в течение довольно длительного времени. А поскольку взрывы всегда сопровождаются разрушением части вентиляционных и изолирующих сооружений, то параметры восстановившегося воздухораспределения на аварийном участке могут значительно отличаться от тех, что были до взрыва, и содержать предпосылки следующей аварии. В результате горные инженеры сталкиваются с довольно сложной научно-технической задачей – определение параметров проветривания аварийного участка, а, следовательно, и всей шахты после взрыва и их восстановление до нормативного уровня.

Исключительная сложность описанной аварийной ситуации не позволяет провести исследование взрыва и его негативное воздействие на вентиляцию в условиях действующей шахты или экспериментальной штольни. Поэтому все исследования таких сложных нестационарных процессов проводят путем математического моделирования на больших вычислительных машинах и персональных компьютерах. Для этого уже предложен целый ряд математических моделей, учитывающих в той или иной степени основные свойства изучаемых

объектов, позволяющие исследовать такие аварийные процессы в горных выработках. В настоящее время для математического моделирования взрыва и вызванных им изменений в вентиляционной сети работники угольных шахт и ВГСЧ используют программные комплексы «Вентиляция» [1] в стационарной постановке и «Ударная волна» [2] – в нестационарной. Первый комплекс применяют для расчета как нормального воздухораспределения, так и воздухораспределения после взрыва, когда вентиляционные и изолирующие сооружения на аварийном участке разрушены. Информацию о разрушениях этот программный комплекс получает из комплекса «Ударная волна», с помощью которого рассчитывается процесс распространения затухающей ударной волны по разветвленной сети горных выработок и ее силовое воздействие на встречающиеся вентиляционные и изолирующие сооружения.

Следует отметить, что стационарная математическая модель программного комплекса «Вентиляция» позволяет быстро рассчитывать только установившийся режим проветривания шахты, когда аэродинамические сопротивления горных выработок заданы, а характеристики вентиляторов главного проветривания в ходе расчета не меняются. В основу же математической модели программного комплекса «Ударная волна» положена нестационарная система уравнений газовой динамики. Поэтому этот комплекс требует для расчета взрыва гораздо больше времени, чем «Вентиляция», позволяя рассчитывать изменения основных газодинамических параметров в выработках, которые попали в зону воздействия ударной волны. Такой раздельный подход последовательного решения сложной задачи с помощью двух программных комплексов в стационарной и нестационарной постановках вполне соответствует современному уровню математического моделирования в горном деле, определяемого производительностью используемой компьютерной техники.

Однако уже сейчас точность таких расчетов перестала удовлетворять практические потребности горноспасателей. Для повышения безопасности их работы требуется уже знание нестационарных процессов, возникающих при взаимодействии вентиляционных потоков с высокоскоростными потоками большего давления, сформировавшихся при взрыве метана [3]. Но тогда программный комплекс «Вентиляция», должен быть также в нестационарной постановке и работать с «Ударной волной» как одно целое. Это должен быть единый программный комплекс, разработанный на основе одной математической модели. Тогда можно будет рассчитывать переходные процессы в вентиляции как во время взрыва, так и после его затухания, с учетом разрушенных вентиляционных сооружений. Эти процессы в настоящее время практически не изучены.

Физическая постановка задачи

В настоящее время разработаны и реализованы в виде программных комплексов две математические модели – «Ударная волна» [2] и «Нестационарная вентиляция» [4], позволяющие рассчитывать временные изменения газодинамических параметров в горных выработках. Положенные в их основу уравнения и пространственная модель горных выработок допускают объединение их в одну математическую модель с разработкой единого программного комплекса, решающего поставленную выше задачу.

Итак, угольная шахта представляется, как это принято в [2, 4], в виде пространственной сети пересекающихся под определенными углами прямолинейных горных выработок, имеющих выход на дневную поверхность. Геометрические размеры выработок и трехмерные координаты их пересечений (сопряжений) известны. Тогда задача о проветривании горных выработок и распространении по ним газодинамических возмущений, вызванных взрывом, сводится, как и в [2, 4], к решению систем нестационарных газодинамических уравнений в каждой горной выработке с соответствующими начальными и граничными условиями и их стыковкой в сопряжениях.

Предполагается, что в некотором объеме горной выработки произошел мгновенный взрыв метановоздушной смеси, сопровождающийся резким повышением давления и рас-

ширением продуктов взрыва, то есть рассматривается задача о распаде произвольного взрыва в параметрах газа. Образовавшаяся на границе расширяющихся продуктов взрыва ударная волна быстро переходит в волну сжатия, дальнейшее распространение которой по разветвленной сети горных выработок происходит уже со скоростью звука. Ее интенсивность быстро уменьшается вплоть до затухания за счет потерь энергии на сопряжениях и поворотах, вовлечения в движение дополнительных масс воздуха, а также на трение и теплообмен с оборудованием и стенками горных выработок. В результате в горных выработках одновременно существуют две области, течения в которых описываются своей математической моделью. Первая – где произошел взрыв (зона взрыва), и наблюдается ее расширение вслед за распространением затухающей волны сжатия. Течение газа в ней описывается системой нестационарных газодинамических уравнений, приведенной в [2]. И вторая область, которая продолжает проветриваться за счет общешахтной депрессии. Эта область сокращается из-за расширяющейся области взрыва. Течение в ней описывается другой системой нестационарных газодинамических уравнений [4]. После затухания взрыва и снижения давления в первой области до первоначального она начинает также проветриваться за счет общешахтной депрессии, как и остальные выработки.

Объединенная математическая модель, в отличие от математических моделей [2, 4], описывает течение газовой смеси, содержащей следующие компоненты: воздух, метан и продукты взрыва.

Система уравнений на прямолинейных участках

По аналогии с [2, 4] используются одномерные уравнения газовой динамики в нестационарной постановке, учитывающие в правых частях трение и теплообмен со стенками горных выработок. В [2] поступление метана в горные выработки с их стенок из-за кратковременности протекания взрыва не учитывается, в [4] – учитывается. Принята односкоростная и однотемпературная модель течения. Диффузия компонентов смеси газов в направлении длины горной выработки не учитывается из-за их малости по сравнению со скоростью основного потока. Считается, что смесь газов подчиняется уравнению состояния совершенного газа, а теплоемкость и газовая постоянная – аддитивные функции этих величин для составляющих смеси.

Исходя из описываемого процесса, математическая модель содержит три уравнения сохранения массы: для смеси газов, продуктов взрыва и метана. Масса воздуха находится из остальных вычисленных компонентов.

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = G_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{пв}} S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{пв}} u S}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho C S}{\partial t} + \frac{\partial \rho C u S}{\partial x} = G_1; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p) S}{\partial x} = p \frac{\partial S}{\partial x} + G_2; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho E S}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E + p u) S}{\partial x} = G_3; \quad (5)$$

$$p = \rho R_c T; \quad (6)$$

$$E = [C c_M + C_{пв} c_T + (1 - C - C_{пв}) c_{вх}] T + \frac{u^2}{2}; \quad (7)$$

$$R_c = C R_M + C_{пв} R_{пв} + (1 - C - C_{пв}) R_B; \quad (8)$$

$$\rho = \rho_M + \rho_B + \rho_{пв}; \quad C + C_B + C_{пв} = 1; \quad C = \frac{\rho_M}{\rho}; \quad C_B = \frac{\rho_B}{\rho}; \quad C_{пв} = \frac{\rho_{пв}}{\rho}; \quad (9)$$

$$G_1 = \begin{cases} 0, & x \in 3B, \\ m\Pi, & x \notin 3B, \end{cases} \quad G_2 = \begin{cases} -\tau_{тр}\Pi, & x \in 3B, \\ -\Pi\beta \frac{\rho u^2}{2} - S\rho g \sin \alpha, & x \notin 3B, \end{cases} \quad G_3 = \begin{cases} q\Pi, & x \in 3B, \\ q\Pi + mh_M, & x \notin 3B, \end{cases} \quad (10)$$

где t – время, с; x – координата, м; $\rho, \rho_{пв}, \rho_M, \rho_B$ – плотности смеси газов, продуктов взрыва, метана и воздуха, кг/м³; $C, C_B, C_{пв}$ – относительные массовые концентрации метана, воздуха и продуктов взрыва; u – скорость, м/с; p – давление, Па; T – температура, К; E – полная энергия, Дж/кг; h_M – энтальпия метана, кДж/кг; $R_c, R_B, R_M, R_{пв}$ – газовые постоянные смеси, воздуха, метана и продуктов взрыва, Дж/(кг·К); S – площадь поперечного сечения выработки, м²; Π – периметр выработки, м; m – массовая скорость поступления метана в выработку, кг/(м²·с); q – тепловой поток в стенки выработки, Дж/(м²·с); $c_{вх}, c_M, c_T$ – удельные теплоемкости воздуха, метана и продуктов взрыва при постоянном объеме, Дж/(кг·К); $\tau_{тр}$ – сила трения потока о стенки, Н/м²; β – безразмерный коэффициент трения, зависящий от выступов шероховатости стенок выработок [5]; α – угол наклона выработки к горизонту; g – ускорение свободного падения, м/с²; $3B$ – зона взрыва.

Силовое и тепловое взаимодействие потока газа и воздуха со стенками горных выработок описывают следующие эмпирические зависимости [2]:

$$\tau_{тр} = \frac{k}{8} c_f \rho u^2; \quad c_f = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}; \quad \beta = \frac{2\alpha_F}{\rho}; \quad Re = \frac{\rho u D_{ekv}}{\mu}; \quad D_{ekv} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (11)$$

где c_f – коэффициент сопротивления; k – поправочный коэффициент для c_f , учитывающий выступы шероховатости стенок выработок [6]; α_F – коэффициент аэродинамического сопротивления, Н·с²/м⁴; Re – число Рейнольдса; D_{ekv} – эквивалентный диаметр сечения прямолинейного участка выработки, м; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Тепловой поток q вычисляется по формуле Ньютона, а коэффициент α_T находится через критерий Нуссельта:

$$q = \alpha_T (T_S - T); \quad Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,47} B; \quad Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}; \quad Nu = \frac{\alpha_T D_{ekv}}{\lambda}; \quad (12)$$

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

где Nu – число Нуссельта; Pr – число Прандтля; T_S – температура стенки, К; α_T – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности смеси газов, Вт/(м·К); c_p – удельная теплоемкость смеси газов, Дж/(кг·К); B – поправочный коэффициент, который учитывает влияние шероховатости стенок на процесс теплообмена; l –

характерное расстояние между выступами шероховатости, м; δ – характерная величина выступа шероховатости, м.

Сопряжения горных выработок являются областями смешения вентиляционных потоков с разной концентрацией примесей и их перераспределения по всей сети шахты. В них возникают пространственные потоки с обтеканием углов, отрывными течениями и потерями давления во фронте распространяющейся ударной волны, переходящей затем в волну сжатия. Для создания быстрой математической модели принимаются следующие допущения [4]:

– давление на концах выработок, сходящихся к одному сопряжению, одно и то же, смешение потоков в сопряжениях происходит мгновенно;

– кинетической энергией смеси в сопряжениях пренебрегается ввиду ее малости по сравнению с величиной внутренней энергией смеси;

– поступлением метана со стенок сопряжения, ввиду малости их площади по сравнению с площадью боковой поверхности выработок, пренебрегается;

– течение газа в сопряжениях в зоне взрыва описывается трехмерными уравнениями газовой динамики в ячейке кубической формы (трением и теплообменом пренебрегаем из-за их малости) [2].

В зоне взрыва используются уравнения из [2] с дополнением уравнения сохранения массы метана:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{пв}}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{пв}} u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_{\text{пв}} v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_{\text{пв}} w}{\partial z} = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho C u}{\partial x} + \frac{\partial \rho C v}{\partial y} + \frac{\partial \rho C w}{\partial z} = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v h}{\partial y} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial \rho v w}{\partial z} = 0; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w^2 + p)}{\partial z} = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E + p u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v E + p v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w E + p w)}{\partial z} = 0; \quad (19)$$

$$p = \rho R_c T; \quad (20)$$

$$E = [C c_m + C_{\text{пв}} c_{\text{Г}} + (1 - C - C_{\text{пв}}) c_{\text{вх}}] T + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}; \quad (21)$$

где u, v, w – скорости вдоль осей x, y, z , м/с; E – полная энергия смеси газов, Дж/кг.

Здесь уравнения (13)-(20), дополнены уравнением сохранения массы метана (15), т.к. ударная волна, переходящая затем в волну сжатия, в зоне взрыва распространяется по горным выработкам, в которых может присутствовать метан. Уравнения также допол-

нены уравнением состояния (20) и выражением для полной энергии смеси газов (21), которая может содержать метан, воздух или продукты взрыва. Газовая постоянная смеси R_c в уравнении состояния берется из (8).

Вне зоны взрыва используются уравнения из [4] без изменений:

$$V_q \frac{d\rho_q}{dt} = \sum_i u_{iq} \rho_{iq} S_{iq}; \quad (22)$$

$$V_q \frac{d(c_v \rho_q T_q)}{dt} = \sum_i u_{iq} \rho_{iq} S_{iq} c_p T_q; \quad (23)$$

$$p_q = \left(\sum_k N_{kq} \right) R_c T_q; \quad (24)$$

$$V_q \frac{dN_{kq}}{dt} = \sum_i u_{ik} N_{k iq} S_{iq}, \quad (25)$$

где u_{iq} , ρ_{iq} – скорость, м/с, и плотность смеси газов, кг/м³, в конце i -й выработки, примыкающей к сопряжению с номером q ; ρ – плотность смеси газов, осредненная по объему узла, кг/м³; T_q – температура газов в узле, К; c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К); c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); N_{kq} – концентрация k -й компоненты в сопряжении с номером q ; $N_{k iq}$ – концентрация k -й компоненты потока в конце i -й выработки, примыкающей к сопряжению с номером q ; S_{iq} – площадь поперечного сечения i -й выработки, м²; V_q – объем сопряжения, м³; q – номер сопряжения.

Начальные условия во всех горных выработках, проветриваемых за счет общешахтной депрессии, задаются, как и в «Нестационарной вентиляции» [4]: начальное давление, плотность, концентрация метана и скорость. Начальные условия в зоне взрыва (горные выработки и сопряжения, если они находятся в зоне взрыва) в момент мгновенного воспламенения метановоздушной смеси стехиометрического состава задаются аналогично [2]:

$$p(x, 0) = P_0, \quad T(x, 0) = T_0, \quad \rho_{пв}(x, 0) = \rho_0, \quad u(x, 0) = 0; \quad (26)$$

$$p(x, y, z, 0) = P_0, \quad T(x, y, z, 0) = T_0, \quad \rho_{пв}(x, y, z, 0) = \rho_0; \quad (27)$$

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad (28)$$

где P_0 – давление газа в момент взрыва, Па; T_0 – температура газа в момент взрыва, К; ρ_0 – плотность газа в момент взрыва, кг/м³.

Предполагается, что в горных выработках, как и в [1], расставлены вентиляционные сооружения и изолирующие перемычки.

Граничные условия для зоны взрыва – уравнения (1)-(10) и (13)-(21) – задаются в соответствии с [2]. Если граница зоны взрыва тупик, вентиляционная или изолирующая перемычка, то ставится условие непротекания:

$$u(t)|_{Гр} = 0. \quad (29)$$

Если граница зоны взрыва выходит на поверхность, то на ней задается давление и плотность атмосферного воздуха:

$$p(t)|_{\text{Гр}} = p_{\text{атм}}, \quad \rho(t)|_{\text{Гр}} = \rho_{\text{атм}}. \quad (30)$$

Если выработка в зоне взрыва граничит с сопряжением, то используются значения потоков массы, импульса и энергии, определяемые из решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа:

$$M|_{\text{Гр}} = M(t), \quad I|_{\text{Гр}} = I(t), \quad E|_{\text{Гр}} = E(t). \quad (31)$$

Если на стороне сопряжения нет примыкающей выработки, то используется условие непротекания – нормальная составляющая скорости на соответствующей стороне сопряжения равна нулю.

Граничные условия для горных выработок, проветриваемых за счет общешахтной депрессии – уравнения (1)-(10) и (22)-(25) – задаются в соответствии с [4]. Так, на вентиляторе главного проветривания, работающим на всасывание, задается скорость потока $u_{\text{вент}}$, которая берется для аналогичной сети горных выработок по программе «Вентиляция» [1]:

$$u(t)|_{\text{Гр}} = u_{\text{вент}}. \quad (32)$$

Если вентилятор главного проветривания работает на нагнетание, то задаются скорость, давление и температура нагнетаемого воздуха $u_{\text{вент}}$, $P_{\text{вент}}$ и $T_{\text{вент}}$:

$$u(t)|_{\text{Гр}} = u_{\text{вент}}, \quad P(t)|_{\text{Гр}} = P_{\text{вент}}, \quad T(t)|_{\text{Гр}} = T_{\text{вент}}. \quad (33)$$

В тупиках, на вентиляционных и изолирующих перемычках – условие непротекания:

$$u(t)|_{\text{Гр}} = 0. \quad (34)$$

Если поток в выработке свободно выходит в атмосферу:

$$p(t)|_{\text{Гр}} = p_{\text{атм}}, \quad \rho(t)|_{\text{Гр}} = \rho_{\text{атм}}. \quad (35)$$

Если поток поступает в выработку из атмосферы, дополнительно задается его энтропия:

$$p(t)|_{\text{Гр}} = p_{\text{атм}}, \quad \rho(t)|_{\text{Гр}} = \rho_{\text{атм}}, \quad \varepsilon(t)|_{\text{Гр}} = \varepsilon_{\text{атм}}. \quad (36)$$

Если выработка граничит с сопряжением, то используются значения потоков массы, импульса и энергии, определяемые из решения задачи о распаде произвольного разрыва в параметрах газа аналогично (31).

Граница зоны взрыва вычисляется из кинематического уравнения:

$$\frac{dx}{dt} = u + a, \quad a = \sqrt{k_a \frac{p}{\rho}}, \quad x(0) = X_0, \quad (37)$$

где x – координата положения границы зоны взрыва, совпадающая с распространяющимся фронтом затухающей ударной волны, или волной сжатия, m ; a – скорость звука

в зоне взрыва, м/с; k_a – показатель адиабаты; X_0 – координата границы зоны взрыва в начальный момент, м.

Проведение расчета

Таким образом задача о распространении газодинамических возмущений, вызванных взрывом, сводится, как и в [2, 4], к численному решению системы уравнений (1)-(10) в каждой выработке с начальными и граничными условиями (26)-(36) и стыковкой полученных решений в сопряжениях, в которых течение описывается уравнениями (13)-(25). Учитываются также пространственные углы соединения выработок, что необходимо при расчетах в зоне взрыва, т.к. величина угла поворота высокоскоростного потока в сопряжении влияет на перераспределение энергии в нем и на падение давления во фронте ударной волны или волны сжатия [2, 6].

Учитывая положительный опыт практического применения программных комплексов [2, 4], в качестве разностной схемы для численного решения предлагаемой математической модели целесообразно использовать хорошо зарекомендовавшую себя схему С.К. Годунова, в основу которой положено решение задачи о распаде произвольного разрыва, и учесть рекомендации, сделанные в [7], по постановке граничных условий для одномерных задач.

Система уравнений (1)-(10) описывает проветривание не только за счет общешахтной депрессии, создаваемой вентиляторами главного проветривания, но и в расширяющейся зоне взрыва, где из-за повышенного давления проветривание выработок прекращается. Уравнения (1)-(10), описывающие течение в этих двух областях, отличаются только правыми частями, в которых характер силового и теплового взаимодействия потока со стенками горных выработок определяется типом течения газа в этих областях. При численной реализации данной задачи, при возникновении взрыва в какой-то части сети горных выработок переход к правым частям уравнений, описывающим течение в расширяющейся зоне взрыва, происходит согласно кинематическому уравнению (37). При затухании взрыва, когда давление в зоне взрыва снижается и уравнивается с давлением в соседних выработках, происходит переход к правым частям уравнений, описывающих потокораспределение за счет общешахтной депрессии.

Заключение

Предложенная нестационарная математическая модель вентиляции (1)-(37) при взрыве метана в горных выработках по своей сложности и заложенным в ней возможностям выводит математическое моделирование аварийных ситуаций в угольной промышленности на более высокий уровень. С ее помощью можно уже более точно рассчитывать изменение во времени основных газодинамических параметров: давления, температуры, скорости вентиляционного потока, концентрации метана и продуктов взрыва в любой точке шахты. Появляется возможность корректно рассчитывать переходные процессы в вентиляции, вызванные взрывами в горных выработках, что позволяет уже при составлении планов ликвидации аварии предвидеть значительно большее число возможных осложнений аварийной ситуации и принимать более эффективные пути ее разрешения еще до приезда горноспасателей. А возможность быстрого прогноза характера перераспределения аэродинамических потоков на аварийном участке, выполняемого ВГСЧ в ходе ликвидации аварии, повышает безопасность ведения горноспасательных работ и сокращает их длительность. Однако это накладывает главное требование на численную реализацию предлагаемой математической модели – выдавать на персональном компьютере результаты расчетов в сжатые сроки, позволяющие быстро принимать управляющие решения на командном пункте ВГСЧ в ходе ликвидации аварии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. – 2007. – № 6 (76). – С. 20-23.
2. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / под ред. И.М. Васенина. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2006. – 322 с.
3. Палеев Д.Ю. Необходимость разработки газодинамического метода и программного комплекса для расчёта нормального и аварийного проветривания угольных шахт при взрывах метана и угольной пыли в нестационарной постановке // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2024. – № 10. – С. 249-257.
4. Ващилов В.В. Разработка газодинамической модели и метода расчета нестационарных режимов проветривания угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Ващилов Валерий Валерьевич. – Кемерово, 2010. – 126 с.: ил.
5. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. Рудничная аэрология. – М.: Недра, 1978. – 440 с.: ил.
6. Палеев Д.Ю., Васенин И.М., Костеренко В.Н., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю., Лукашов О.Ю., Руденко Ю.Ф. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 312 с.: ил.
7. Численное решение многомерных задач газовой динамики / под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.: ил.

УДК 622.253.3

DOI:10.7242/echo.2024.3.12

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МОДЕЛЕЙ
ПРИ ОПИСАНИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В ГРУНТАХ**

М.А. Семин, С.А. Бублик
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: При теплотехническом расчёте ледопородных ограждений, формируемых вокруг строящихся подземных сооружений, одним из ключевых процессов является фазовое превращение поровой воды в лёд. Корректный учёт этого процесса во многом зависит от того, насколько точно и детализированно задана зависимость количества незамёрзшей воды от температуры. В статье рассмотрены две наиболее популярные модели (van Genuchten-Mualem и Brooks-Corey), описывающие температурную зависимость количества незамёрзшей воды в замораживаемых грунтах и используемые при проектировании подземных сооружений. На основе анализа показано, что модель van Genuchten-Mualem лучше описывает поведение незамёрзшей воды, в то время как для песков обе модели дают сопоставимые результаты.

Ключевые слова: искусственное замораживания грунтов, ледопородное ограждение, количество незамёрзшей воды.

При строительстве подземных сооружений в неустойчивых и обводнённых грунтах и породах применяются специальные способы. Одним из наиболее распространённых является искусственное замораживание грунтов. При проходке стволов калийных рудников это, как правило, единственный возможный способ [1].

Проектирование замораживания грунтов требует выполнения теплотехнического расчёта ледопородного ограждения (ЛПО), на основании которого определяются характеристики замораживающей станции и время формирования ЛПО необходимой толщины вокруг горной выработки. Ключевым физическим процессом, который необходимо учитывать при теплотехническом расчёте, является фазовое превращение поровой воды в лёд. Скрытая теплота кристаллизации поровой воды, выделяющаяся при образовании ЛПО, сравнима с теплотой охлаждения сухого скелета пород от начальной температуры до температуры формирования прочного ЛПО [2].