УДК 622.4

О.И. Дударь, Е.С. Дударь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА «MINECLIMATE» ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС КОНДЕНСАЦИИ ВЛАГИ В КАЛИЙНОМ РУДНИКЕ

С помощью разработанного авторами исследовательского пакета прикладных программ «MineClimate» оценено влияние различных параметров на количество выпадающей в калийном руднике влаги и величину зоны конденсации. Для анализа процессов теплообмена и массообмена в потоке паровоздушной смеси применено решение Лайона. Для решения задачи распространения тепла в горном массиве использован метод функций Грина в сочетании с преобразованием Лапласа. Расчет вентиляционной сети проведен с помощью предложенного авторами сочетания метода конечных элементов с методом ламинарных решений. Пакет «MineClimate» позволил определить воздухораспределение в рудничной сети, параметры микроклимата, количество выпавшей при конденсации влаги и ее распределение по ветвям сети в произвольный момент времени. Результаты исследования процесса конденсации показали, что наиболее существенное влияние на процесс оказывают следующие величины: расход, среднегодовая температура атмосферного воздуха, глубина разрабатываемого горизонта, плотность идущего из недр Земли теплового потока, гигроскопичность пород. В меньшей степени влияют площадь поперечного сечения выработок и степень разветвленности сети.

Ключевые слова: пакет прикладных программ «MineClimate», калийный рудник, вентиляционная сеть, конденсация влаги, турбулентность, теплообмен, массообмен.

Введение

В теплое время года наружный воздух, поступая в подземное сооружение, охлаждается, и содержащаяся в нем влага конденсируется на стенках сооружения [1–4]. Практика показывает [1, 2], что в значительной степени конденсация характерна для неглубоких калийных рудников, в которых процесс усиливается высокой гигроскопичностью пород. Согласно [1, 2] количество выпадающей за сезон влаги может до-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 61–73.
© 2017. О.И. Дударь, Е.С. Дударь.

стигать 10000 тонн и более, что сказывается на промышленной, экологической и экономической безопасности рудников. Для обоснования технических решений, принимаемых для нейтрализации отрицательных последствий, необходимо знать, какие параметры и как влияют на протекание процесса конденсации.

Работы [5–8] посвящены теории расчета и регулирования теплового режима шахт. В работах [9–11] рассмотрены особенности формирования тепловлажностного режима шахт в условиях вечной мерзлоты. Исследования [11, 12] посвящены вопросам управления параметрами микроклимата подземных сооружений. В последние годы были разработаны пакеты прикладных программ, специально предназначенные для моделирования микроклимата в подземных сооружениях [10, 12–15].

В данной работе теоретически с помощью разработанного авторами исследовательского пакета прикладных программ «MineClimate» исследовалось влияние климатических, геофизических, геотехнологических и аэрологических параметров на суммарную массу влаги M, конденсирующейся в теплое время года в вентиляционной сети калийного рудника, и размер области L ее выпадения. В качестве климатического параметра рассматривалась среднегодовая температура T_{ay} подаваемого в рудник атмосферного воздуха; в качестве геотехнологических – глубина разрабатываемого горизонта H и степень разветвленности сети N; в качестве геофизических – гигроскопичность горных пород φ_{cr} и плотность теплового потока из недр Земли q; в качестве аэрологических – расход воздуха G и площадь поперечного сечения выработок S.

Комплекс «MineClimate» позволяет определять:

- воздухораспределение в рудничной сети;
- параметры микроклимата (давление, температуру и влажность воздуха);
- количество выпавшей влаги и ее распределение по выработкам в произвольный момент времени.

Реализованная в комплексе программ математическая модель процесса тепломассообмена между рудничным воздухом и стенками выработок описана в работе [16].

Теоретические основы исследовательского пакета «MineClimate»

В качестве элементарного исследуемого объекта (ветви) вентиляционной сети рассматривается цилиндрическая полость конечных размеров, по которой движется влажный воздух. Пред-

полагается, что воздух это несжимаемая ньютоновская жидкость, состоящая из смеси двух совершенных газов – сухого воздуха и водяного пара. Возможны ламинарный, а также гладкостенный, квадратичный и переходный режимы турбулентного движения воздуха. Движение воздуха, тепло- и массообмен в потоке рассматриваются как квазистационарные процессы, а распространение тепла в горных породах – как нестационарный процесс. Для замыкания уравнений переноса импульса, энергии и массы используется полуэмпирическая теория турбулентности Прандтля.

Постановка задачи тепломассообмена при конденсации пара из движущейся паровоздушной смеси при данных предположениях описывается следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных [16]:

$$\rho_g v \cdot \nabla v = -\nabla p + \nabla \cdot \sigma_t + \mu_g \Delta v \,, \tag{1}$$

$$\nabla \cdot v = 0 \,, \tag{2}$$

$$\sigma_t = \rho_g \varepsilon (\nabla v + \nabla v^T) \,, \tag{3}$$

$$\rho_g c_g v \cdot \nabla T = \nabla \cdot q \,, \tag{4}$$

$$q = \rho c_g \left(a_g + \varepsilon_q\right) \nabla T \,, \tag{5}$$

$$v \cdot \nabla C = \nabla \cdot j \,, \tag{6}$$

$$j = \rho_g \left(D + \varepsilon_D\right) \nabla C \,, \tag{7}$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \,, \tag{8}$$

где в уравнениях (1–7), описывающих движение, тепло- и массообмен газовой фазы (влажного воздуха): v – вектор скорости; σ_t – тензор турбулентных напряжений; p – давление; q – молекулярный и турбулентный потоки тепла; j – молекулярный и турбулентный потоки массы; T – температура; C – массовая концентрация водяного пара; μ_g – коэффициент молекулярной вязкости; ε, ε_q, ε_D – коэффициенты турбулентных вязкости, температуропроводности и диффузии; a_g, ρ_g, D, c_g, – температуропроводность, плотность, коэффициент молекулярной диффузии и изобарная теплоемкость воздуха; а в уравнении (8), описывающем процесс теплопроводности в твердой фазе: ρ, c, λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность пласта горных пород.

Свойства влажного воздуха определяются как свойства бинарной смеси и, следовательно, в общем случае являются функциями температуры, давления и массовой концентрации водяного пара (влажности воздуха).

Видим, что рассматриваемая проблема распадается на три взаимосвязанные задачи: гидродинамики (1–3), тепло- и массообмена в парогазовой смеси (4–7) и теплопроводности горных пород (8). Взаимное влияние этих процессов учитывается условиями сопряжения на границе «воздух – твердое тело», конвективными слагаемыми в уравнениях энергии и диффузии, учетом влияния определяемых величин на свойства парогазовой смеси.

Для ламинарного режима движения решение уравнений (1), (2) дает на участке гидродинамической стабилизации цилиндрической полости параболический профиль скорости [17]. Для турбулентности эксперименты Никурадзе показали [17–19], что анализ турбулентного движения в шероховатой трубе можно заменить анализом пристенной турбулентности. Это при использовании (1), (2) и гипотезы пути смешения Прандтля дает в случае гладкостенного режима на участке стабилизации линейный профиль скорости для ламинарного пограничного слоя и логарифмический профиль скорости для турбулентного ядра [17, 18]. Для квадратичного режима остается только турбулентный слой с логарифмическим профилем скорости [17, 19]. В работе [20] получена формула распределения скоростей, единая для гладкостенного, квадратичного и переходного режимов, из которой вышеупомянутые формулы для гладкостенного и квадратичного режимов получаются как частные случаи. При заданном профиле скорости для ламинарного и турбулентного режимов течения воздуха задача гидродинамики сводится к определению массового расхода в цилиндрической полости и перепада давления по ее длине.

При конденсации процессы тепло- и массообмена взаимосвязаны и протекают в смежных фазах. Учитывая, что толщина образующейся пленки конденсата на стенке полости (горной выработки) мала по сравнению с ее радиусом, перепадом температуры в пленке жидкости можно пренебречь. Плотности теплового потока, потока массы и свойства парогазовой смеси вдоль оси полости изменяются достаточно медленно, поэтому их можно рассматривать как кусочно-постоянные функции продольной координаты. Приведенные упрощающие гипотезы и подобие граничных условий позволяют применить аналогию процессов тепло- и массообмена, а именно известное решение

Лайона для задачи теплообмена [21] использовать как для решения задачи теплообмена так и массообмена [16]. Отметим, что задача массообмена решается только с момента начала конденсации, определяемого условием равенства температуры стенки полости температуре насыщения для данной концентрации водяных паров в воздухе. До начала процесса конденсации происходит только изменение температуры поступающего в полость воздуха. Интеграл Лайона позволяет вычислить коэффициенты теплообмена и массообмена в произвольном сечении цилиндрической полости. Теплота парообразования, выделяющаяся при конденсации, учитывается добавлением соответствующего слагаемого в приведенный коэффициент теплообмена.

Метод функций Грина в сочетании с преобразованием Лапласа использовался для получения решения задачи (8) о распространении тепла в бесконечном горном массиве от движущегося в цилиндрической полости потока воздуха при произвольном изменении его среднемассовой температуры [22]. Были рассмотрены три важных для решения задачи (1–8) частных случая изменения температуры воздуха со временем: температура постоянна, температура изменяется по линейному закону, температура изменяется по гармоническому закону [22]. В работе [22] приведены полученные численным интегрированием графики входящих в решения функций, выражающихся через несобственные интегралы от выражений, содержащих функции Бесселя и Неймана.

Для расчета всей шахтной сети, состоящей из элементарных ветвей типа рассмотренной выше, используется метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод, примененный Д. Норри и Ж. де Фризом для сетей с ламинарным движением, был на основании обнаруженной авторами аналогии процессов упругого и пластического растяжения стержня процессам ламинарного и турбулентного движения жидкости в трубе распространен на случай произвольного режима течения жидкости [16]. Эта же аналогия позволила преобразовать метод секущих модулей, как вариант метода упругих решений, используемый для анализа нелинейного процесса пластического деформирования стержня, в метод ламинарных решений (МЛР), который может быть использован для анализа нелинейного процесса турбулентного течения жидкости в любом (гладкостенном, квадратичном, переходном) режиме. Аналогия позволяет также распространить доказательство сходимости метода секущих модулей [23] на случай применения метода МКЭ-МЛР к задаче движения воздуха в шахтной сети.

В соответствии с МКЭ сеть разбивается на отдельные элементы (ветви), стыкующиеся друг с другом в узлах. Элементы сети делятся на активные (вентиляторы) и пассивные [16]. К пассивным ветвям относятся участки с постоянным поперечным сечением, не содержащие вентиляторов. При расчете сети МКЭ искомыми величинами являются давления в узлах сети.

Результаты исследования

Рудничную сеть моделировали системой параллельных выработок (рис. 1). В качестве базовых были приняты следующие значения варьируемых параметров, в большинстве своем характерные для Верхнекамских калийных месторождений [1, 2]: $G = 350$ кг/с, $T_{ау} = 0{,}7$ °С, $H = 400$ м, $\varphi_{ст} = 0{,}06$ Вт/м^2, $q = 67\%$, $N = 7$, $S = 20$ м^2. Далее каждый параметр варьировался при фиксированных значениях остальных параметров. В расчетах оставались неизменными следующие величины: площадь поперечного сечения стволов (36 м^2), длина параллельных выработок (10 км), амплитуда годового гармонического колебания среднесуточной температуры атмосферного воздуха (17 °С), график изменения относительной влажности воздуха, приведенный в СНиП 23-01-99 «Строительная климатология». Для стволов предполагалось наличие бетонного покрытия ($\varphi_{ст} = 100\%$). Рассматривался только теплый период года (с 15 апреля по 15 октября).

Для базового варианта на рис. 2, *а* и 2, *б* показано изменение интенсивности выпадения влаги (расхода конденсирующейся жидкости $G_ж$) и размера зоны конденсации в течение теплого

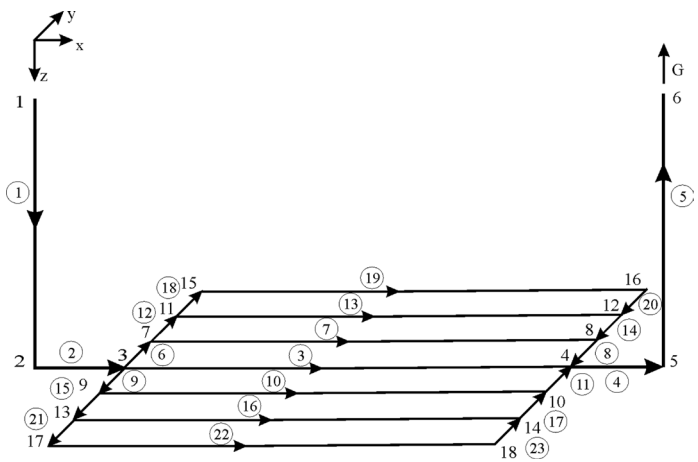

Рис. 1. Модель вентиляционной сети рудника

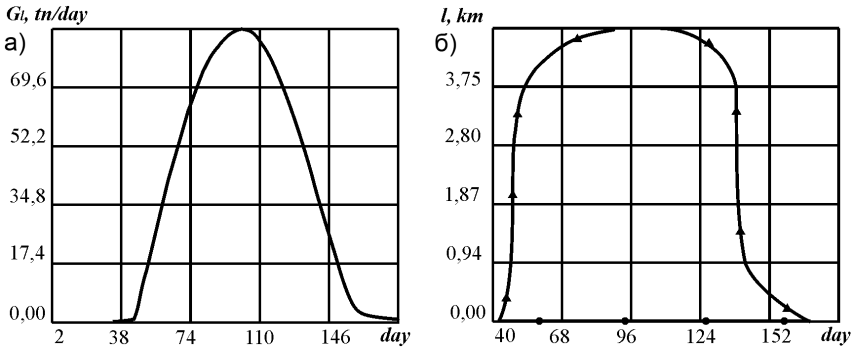

Рис. 2. Изменение расхода конденсирующейся влаги (а) и размера зоны конденсации (б) в теплый период года: ▲ – конец конденсации; ● – начало конденсации

полугодия. Размер зоны конденсации определялся вдоль пути, задаваемого ветвями *1–2–3–4–5*. Так как бетонное покрытие ствола *1* препятствует конденсации, то в подавляющем числе случаев конденсация начиналась от узла *2* – начала горизонтальных выработок и прекращалась между узлами *3* и *4* горизонтальной ветви *3*. В ограниченном числе случаев наблюдалось смещение точки начала конденсации как назад вверх, вдоль ствола *1*, так и вперед вдоль ветвей *2–3*.

Видно, что пиковые значения рассмотренных величин приходятся на середину июля. Далее для оценки процесса конденсации в целом будем использовать две величины: суммарное количество выпавшей влаги M, численно равное площади под кривой $G_ж(t)$ (рис. 2, *а*), и максимальный размер зоны конденсации L, которому соответствует пиковое значение величины l, то есть $L = l_{max}$ (рис. 2, *б*).

Влияние исследуемых параметров на величины M и L показано на рис. 3. Из представленных результатов видно, что массовый расход G воздуха и его среднегодовая температура T_{ay} влияют на процесс конденсации одинаковым образом (рис. 3, *а*, 3, *б*, 3, *в*, 3, *г*), а именно: с увеличением G и T_{ay} величины M и L возрастают по закону, близкому к линейному. Такой характер зависимостей объясняется тем, что с увеличением количества поступающего в рудник воздуха и его температуры возрастает вносимая в рудник масса влаги. Это хорошо подтверждается натурными наблюдениями. Так в работах А.Н. Щербаня [5] отмечается, что в угольных шахтах Донбасса в наиболее жаркие дни конденсация происходит настолько интенсивно, что образует-

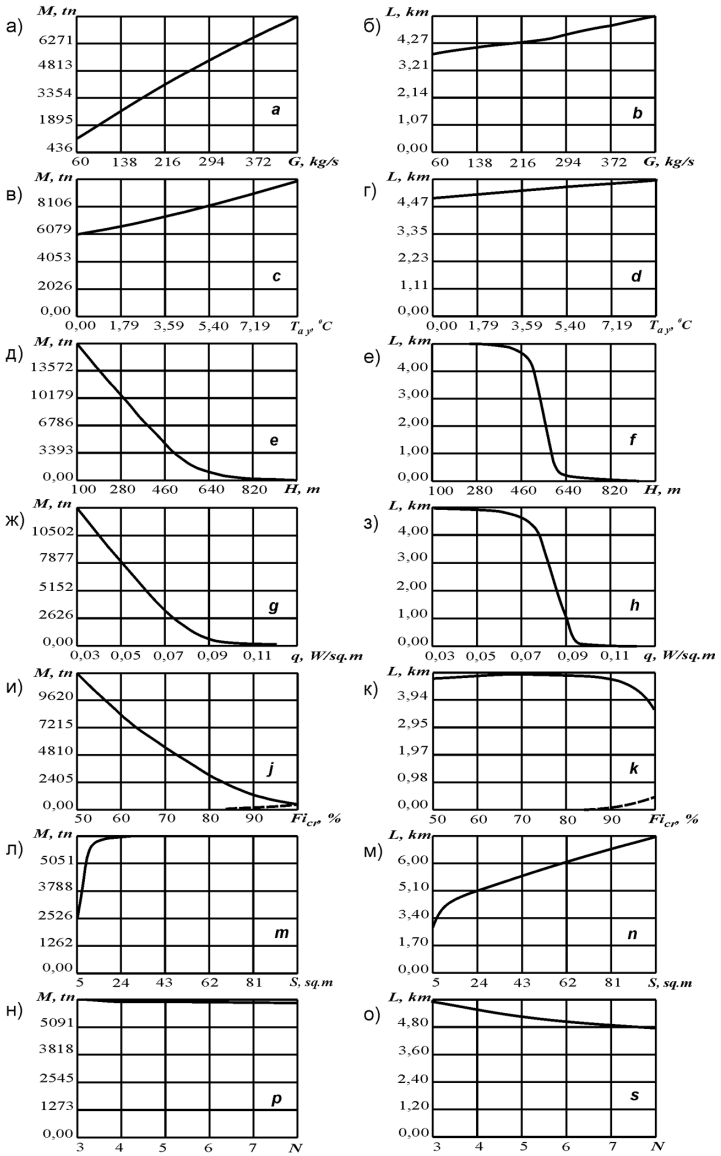

Рис. 3. Зависимость количества выпадающей влаги и размера зоны конденсации от параметров: расхода воздуха (а, б); среднегодовой температуры (в, г); глубины разработки (д, е); теплового потока (ж, и); гигроскопичности пород (к, л); площади сечения выработок (м, н); разветвленности сети (п, р); ——— – значения для рудничной сети; - - - - – значения в стволе, выдающем воздух

ся туман. Образование тумана отмечают и на канадских шахтах [3].

Одинаково влияет на M и L и другая пара параметров – глубина разрабатываемого горизонта H и плотность теплового потока из недр Земли q (рис. 3, *д*, 3, *е*, 3, *ж*, 3, *и*). При малых значениях H и q конденсируется очень большое количество влаги (порядка 15 000 т). С увеличением этих параметров суммарная масса M стремится к нулю приблизительно по параболическому закону, так что при $H > 800$ м и $q > 0{,}1$ Вт/м^2 конденсация практически отсутствует. Интересными являются и зависимости $L(H)$ и $L(q)$: при малых значениях H и q размер зоны конденсации остается постоянным и равным примерно 5 км.

Затем, начиная с $H \approx 300$ м и $q \approx 0{,}05–0{,}06$ Вт/м^2, размер зоны конденсации резко снижается практически до нулевого уровня (при $H \approx 800$ м и $q \approx 0{,}1$ Вт/м^2). Одинаковый характер влияния на конденсацию глубины H и плотности теплового потока q объясняется тем, что оба эти параметра определяют естественную температуру пород на данной глубине. В свою очередь превышение температуры поступающего воздуха над естественной температурой пород определяет интенсивность процесса конденсации.

Сходным образом влияет на процесс конденсации и критическая относительная влажность воздуха φ_{cr} (рис. 3, *к* и 3, *л*), то есть при малых значениях выпадает большое количество влаги (до 12 000 т при $\varphi_{cr} = 50\%$), а размер зоны конденсации остается примерно постоянным и равным 5 км. Затем с увеличением φ_{cr} и масса M, и размер зоны конденсации L начинают стремиться к нулю, но не достигают его, так как φ_{cr} не может превышать 100%. Отметим, что при $\varphi_{cr} > 85\%$ наблюдается явление вторичной конденсации, то есть после того, как процесс конденсации в выработках прекратился, он вновь возобновляется в стволе *5*, выдающем воздух из рудника. Явление объясняется тем, что с уменьшением глубины понижается естественная температура горных пород. Тем самым в стволе вновь создаются благоприятные условия для конденсации, которая будет иметь место, если по каким-то причинам не произошло значительное выпадение влаги на начальном участке 2–3, рудника. Расчеты показывают, что это явление имеет место и при малых расходах подаваемого в рудник воздуха (при $G < 70$ кг/с). Натурные наблюдения подтверждают этот эффект, возникающий при проветривании небольших шахт Севера. Выпадение влаги в стволе, выдающем воздух, отмечалось и на польских шахтах [4].

Геометрический параметр – площадь поперечного сечения S и топологический параметр – число параллельных выработок N на значительном интервале практически не влияют на величину выпадающей влаги (рис. 3, *м*, 3, *п*). Только при малых значениях $S < 20$ м^2 величина M быстро понижается с уменьшением S. Последнее объясняется уменьшением площади контакта поступающего воздуха со стенками выработок и вследствие этого ухудшением условий конденсации. На величину зоны конденсации L влияют оба параметра (рис. 3, *н*, 3, *р*), но разнонаправлено. С ростом S величина L увеличивается, так как при фиксированном расходе увеличение S означает снижение скорости движения воздуха, а значит и интенсивности теплообменных процессов. С увеличением уменьшается расход в каждой из параллельных веток, а значит, уменьшается L (см. рис. 3, *б*).

Выводы

Рассмотрено влияние различных параметров на процесс конденсации влаги в рудничной вентиляционной сети. Результаты исследования показали, что наиболее существенное влияние на процесс конденсации оказывают следующие величины: расход G и среднегодовая температура T_{ay} воздуха на входе в сеть; глубина разрабатываемого горизонта H и плотность теплового потока q, идущего из недр Земли; критическая относительная влажность воздуха φ_{cr}, характеризующая гигроскопичность пород. При малых значениях площади поперечного сечения выработок ($S < 20$ м^2) существенно влияет и этот параметр. За исключением H и q все эти параметры могут быть использованы для управления процессом конденсации. Степень разветвленности сети N практически не влияет на количество выпадающей влаги, но может быть использована для управления размером зоны конденсации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев И. И.* Проветривание калийных рудников. – М.: Недра, 1970. – 204 с.

2. *Мохирев Н. Н.*, *Казаков Б. П.*, *Стукалов В. А.* Испытание системы осушения воздуха в руднике АО «Уралкалий» // Горный журнал. – 1998. – № 6. – С. 47–49.

3. *Hall A. E.*, *Gangel M. K.*, *Stewart S. B. V.* Atmospheric fog in Canadian mines // CIM Bull. 1989. 82, № 921. pp. 52–55.

4. *Knothe S., Nowak B., Szlazak M.* Wplyw wilgotnosci na przeptyw powietrza w glebokicii szybach wentylacyjnych // Arch. Gorn. 1986. 31, № 2. pp. 289–303.

5. *Щербань А. Н.*, *Кремнев О. А.* Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Т. 1. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – 425 с.

6. *Carslaw H. S.*, *Jaeger J. C.* Conduction of Heat in Solids. Oxford: Clarendon Press, 1959. 450 p.

7. *Галицын А. С.* Краевые задачи теплофизики подземных сооружений. – Киев: Наук. думка, 1983. – 236 с.

8. *McPherson M. J.* Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. London: Chapman and Hall, 1993. 905 p.

9. *Дядькин Ю. Д.*, *Шувалов Ю. В.*, *Гендлер С. Г.* Тепловые процессы в горных выработках. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1978. – 104 с.

10. *Хохолов Ю. А.* Математическое моделирование процессов теплообмена в подземных выработках криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – ОВ. – С. 102–111.

11. *Шувалов Ю. В.*, *Галкин А. Ф.* Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 8. – С. 365–370.

12. *Danko G.* Ventilation and climate control of deep mines / Yearbook of Science and Technology. McGraw-Hill. 2012. pp. 296–299.

13. *Danko G., Bahrami D., Mousset-Jones P.* Ventilation and climate simulation with the MULTIFLUX code // Journal of Coal Science & Engineering. 2011. Vol. 17, no. 3. pp. 243–250.

14. *Ventsim* Visual User Guide. Ventsim, 2009. http://www.ventsim.com, 2011-02-11.

15. *Bahrami D., Rostami P., Danko G.* Ventilation and climate simulation of development ends in metal mines / SME Annual Meeting and Exhibition. Denver, Preprint. 2011. No. 11–135.

16. *Дударь Е. С.*, *Дударь О. И.*, *Мохирев Н. Н.* Расчет параметров микроклимата с учетом конденсации влаги в рудничной вентиляционной сети // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S7. – С. 331–344.

17. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

18. *Nikuradse J.* Gesetzmäβigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren // Forschungsheft 356. Beilage zu “Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens”. Ausgabe B, Bd. 3. Berlin, 1932. S.1–36.

19. *Nikuradse J.* Strömungsgesetze in rauhen Röhren. // Forschungsheft 361. Beilage zu „Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens“. Ausgabe B, Bd. 4. Berlin, 1933. S.1–22.

20. *Дударь О. И.* Закон сопротивления и распределение скоростей при переходном режиме турбулентного движения воздуха в горной выработке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S7. – С. 47–54.

21. *Теория* тепломассообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. – М.: Высшая школа, 1979. – 495 с.

22. *Дударь О. И.*, Дударь. Е. С., *Осипенко М. А.* Определение изменения температуры стенки полости в твердом теле при изменении температуры движущего в полости газа // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2013. – Т. 13, Вып. 4, ч. 1. – С. 66–74.

23. *Киликовская О. А.* О сходимости метода секущих модулей для материалов возрастающей жесткости / Задачи механики твердого деформируемого тела: сборник научных статей. – М., 1985. – С. 16–19. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Дударь Олег Иосифович[1] – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: olegdudar@yandex.ru,
Дударь Елена Сергеевна[1] – кандидат технических наук, доцент, e-mail: elendudar@yandex.ru,
[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990 Пермь,

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 3, pp. 61–73.

UDC 622.4

O.I. Dudar', E.S. Dudar'

APPLICATION OF «MINECLIMATE» PACKAGE FOR ESTIMATING INFLUENCE OF SOME PARAMETERS ON MOISTURE CONDENSATION PROCESS IN A POTASH MINE

Influence of various parameters on amount of the moisture which is dropping out in potash mine and the condensation zone size is considered. Research is executed with the help of the research application program package "MineClimate" developed by authors. Theoretical framework of the package "MineClimate" is represented. The solution of the hydrodynamic problem is based on use of the formula of velocity distribution which is universal for smooth-pipe, quadratic and transitional regimes of turbulent air flow in mine working. For the analysis of heat and a mass transfer processes in vapor-air mixture flow Lyon's solution is applicated. The method of Green's functions in combination with Laplace's transformation is used for solving the problem of heat conductivity in rocks. Calculation of a ventilation network is fulfilled by means of the combination of the finite element method and the laminar solutions method offered by authors. The package "MineClimate" allows to determine distribution of airflows in a ventilation network, microclimate parameters, amount of the condensed water and its distribution at the network in arbitrary instant. Results of research showed that the following quantities have the most essential influence on the condensation process: the mass flow rate, the average annual temperature of atmospheric air, the mining depth, the heat flow rate from the Earth's core, hygroscopicity of rocks. The cross section area of workings and degree of the network branching influence on the condensation in a less degree. Research allowed estimating the influence of each parameter and possibility of its use for controlling the condensation process.

Key words: application program package "MineClimate", potash mine, ventilation network, turbulence, moisture condensation, heat transfer, mass transfer.

AUTHORS

Dudar' O.I.[1], Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, e-mail: olegdudar@yandex.ru,
Dudar'E.S.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: elendudar@yandex.ru,
[1] Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia.

REFERENCES

1. Medvedev I. I. *Provetrivanie kaliynykh rudnikov* (Potash mine aerology), Moscow, Nedra, 1970, 204 p.

2. Mokhirev N. N., Kazakov B. P., Stukalov V. A. *Gornyy zhurnal*. 1998, no 6, pp. 47–49.

3. Hall A. E., Gangel M. K., Stewart S. B. V. Atmospheric fog in Canadian mines. *CIM Bull*. 1989. 82, no 921, pp. 52–55.

4. Knothe S., Nowak B., Szlazak M. Wplyw wilgotnosci na przeptyw powietrza w glebokicii szybach wentylacyjnych. *Arch. Gorn*. 1986. 31, no 2, pp. 289–303.

5. Shcherban' A. N., Kremnev O. A. *Nauchnye osnovy rascheta i regulirovaniya teplovogo rezhima glubokikh shakht*. T. 1 (Scientific basis of calculation and regulation of thermal regimes in deep mines, vol. 1), Kiev, Izd-vo AN USSR, 1959, 425 p.

6. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford: Clarendon Press, 1959. 450 p.

7. Galitsyn A. S. *Kraevye zadachi teplofiziki podzemnykh sooruzheni*y (Boundary value problems of a thermal physics of the underground constructions), Kiev, Naukova dumka, 1983, 236 p.

8. McPherson M. J. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. London: Chapman and Hall, 1993. 905 p.

9. Dyad'kin Yu. D., Shuvalov Yu. V., Gendler S. G. *Teplovye protsessy v gornykh vyrabotkakh* (Heat processes in mine workings), Leningrad, Izd-vo LGI, 1978, 104 p.

10. Khokholov Yu. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2005. Special edition, pp. 102–111.

11. Shuvalov Yu. V., Galkin A. F. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 8, pp. 365–370.

12. Danko G. Ventilation and climate control of deep mines. *Yearbook of Science and Technology*. McGraw-Hill. 2012. pp. 296–299.

13. Danko G., Bahrami D., Mousset-Jones P. Ventilation and climate simulation with the MULTIFLUX code. *Journal of Coal Science & Engineering*. 2011. Vol. 17, no. 3. pp. 243–250.

14. *Ventsim Visual User Guide*. Ventsim, 2009. http://www.ventsim.com, 2011-02-11.

15. Bahrami D., Rostami P., Danko G. Ventilation and climate simulation of development ends in metal mines. *SME Annual Meeting and Exhibition*. Denver, Preprint. 2011. No 11–135.

16. Dudar' E. S., Dudar' O. I., Mokhirev N. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2011, no S7, pp. 331–344.

17. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* (Boundary layer theory), Moscow, Nauka, 1974, 711 p.

18. Nikuradse J. Gesetzmäβigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren. Forschungsheft 356. *Beilage zu "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens"*. Ausgabe B, Bd. 3. Berlin, 1932. S.1–36.

19. Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauhen Röhren. Forschungsheft 361. *Beilage zu „Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens"*. Ausgabe B, Bd. 4. Berlin, 1933. S.1–22.

20. Dudar' O. I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no S7, pp. 47–54.

21. *Teoriya teplomassoobmena*. Pod red. A. I. Leont'eva (Heat and mass transfer theory. Leont'ev A. I. (Ed.)), Moscow, Vysshaya shkola, 1979, 495 p.

22. Dudar' O. I., Dudar'. E. S., Osipenko M. A. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Matematika. Mekhanika. Informatika*. 2013, vol. 13, issue 4, part 1, pp. 66–74.

23. Kilikovskaya O. A. *Zadachi mekhaniki tverdogo deformiruemogo tela: sbornik nauchnykh statey* (Problems of the mechanics of a solid deformable body: collection of research papers), Moscow, 1985, pp. 16–19.