

УДК 622.4

**Е.С. Дударь**

**ВЛИЯНИЕ ГИГРОСКОПИЧНОСТИ ПОРОД НА ПРОЦЕСС  
КОНДЕНСАЦИИ ВЛАГИ В РУДНИЧНОЙ  
ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ**

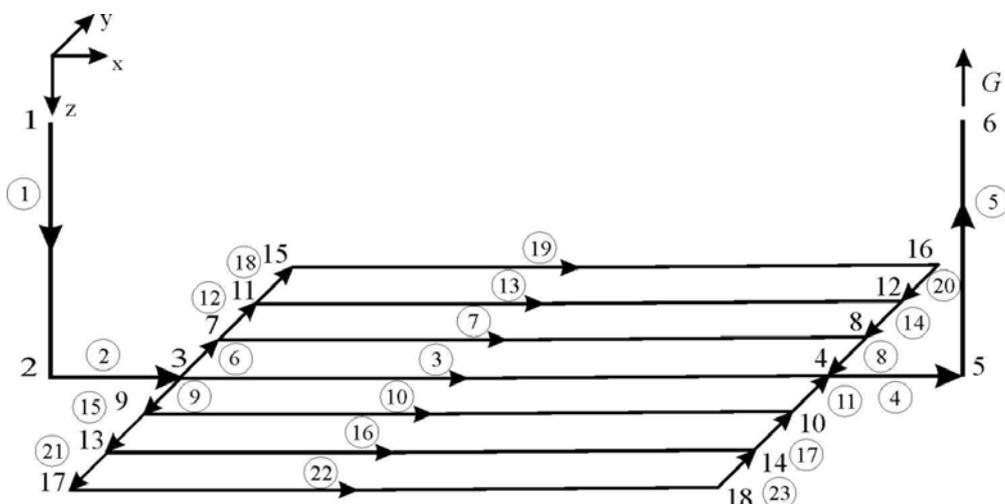
*Представлены результаты численного эксперимента, позволяющего оценить влияние гигроскопичности горных пород на количество выпадающей в руднике влаги и размер зоны конденсации.*

*Ключевые слова: конденсация влаги, вентиляционная сеть, горный массив*

---

**В** теплое время года происходит охлаждение наружного воздуха, поступающего в вентиляционную сеть рудника. При этом содержащиеся в воздухе водяные пары конденсируются, выпадая в виде влаги на стенках горного массива [1]. Конденсация может иметь место в любых проветриваемых подземных сооружениях, скважинах, пустотах, но в наибольшей степени она характерна для неглубоких калийных рудников, в которых процесс усиливается в связи с высокой гигроскопичностью пород. Влага и соль образуют агрессивную среду, которая отрицательно воздействует на шахтное оборудование, уменьшает несущую способность целиков, ведет к затоплению выработок. В условиях повышенной гигроскопичности горных пород необходима обработка воздуха, чтобы уменьшить или полностью исключить выпадение влаги из воздуха. Прогноз возможных последствий принимаемых технических решений делает актуальным проведение вычислительного эксперимента на основе разработанной математической модели [2] с целью исследования влияния гигроскопичности горных пород на процесс конденсации влаги в шахтной сети калийного рудника.

**Механизм процесса конденсации пара на гигроскопичной поверхности.** Пленочная конденсация водяного пара на водорастворимой поверхности сопровождается растворением горных пород, в результате чего образуются солевые растворы – электролиты [1]. Особенностью соляных пород является их кристаллическое строение и ионный тип кристаллической решетки. Дефекты кристаллической решетки, несущие электрический заряд, служат активными центрами сорбции воды на поверхности ионного кристалла. Чем больше дефектов на поверхности кристалла, тем выше гигроскопичность вещества. После образования жидкой пленки, состоящей из одного или нескольких слоев молекул, начинается диффузия воды и ионов солей вглубь кристалла, при этом происходит падение механической прочности кристалла, его набухание и растрескивание [3]. В литературе нет общепризнанной точки зрения на механизм гигроскопического увлажнения вещества. Принято считать [1], что при конденсации даже незначительного количества влаги на поверхности солей образуется насыщенный раствор, упругость паров воды над которым соответствует равновесному давлению.



**Рис. 1. Вентиляционная модель рудника**

Другая распространенная точка зрения [3, 4] основывается на том, что физико-химические свойства тонких слоев жидкости существенно отличаются от её свойств в объемной фазе. Считается, что в случае системы «твердое тело – вода» влияние поверхности фазового раздела на структуру жидкости способно передаваться от слоя к слою по некоторому цепному механизму так, что образуется непрерывный ряд переходных состояний от кристаллической решетки до насыщенного раствора [4]. Таким образом, на гигроскопичной поверхности будет образовываться насыщенный раствор соли с переменной концентрацией. И если по закону Рауля [3] парциальное давление насыщенного пара над раствором всегда меньше, чем над чистым растворителем, то над адсорбированным слоем оно будет еще меньше, что ведет к интенсификации процесса поглощения влаги из воздуха.

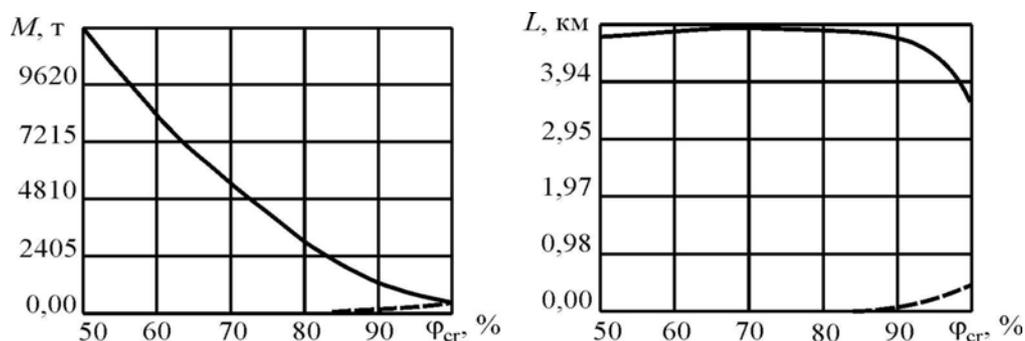
Безусловно, что модель «адсорбированного слоя» [3] является более сложной, так как в ней наряду с разбавлением насыщенного раствора

(конденсация) учитывается одновременно происходящее растворение твердой фазы. В рамках данной работы сорбированная вода рассматривается как насыщенный раствор соли с постоянной при данной температуре упругостью водяных паров над ним. Таким образом, увлажнение соли происходит, когда парциальное давление паров воды в окружающей атмосфере больше упругости пара над насыщенным раствором той же соли при той же температуре.

Количественно гигроскопичность можно учесть через критическую относительную влажность (гигроскопическую точку), то есть влажность, при которой начинается выпадение влаги из воздуха. Критическая относительная влажность определяется по формуле [1]:

$$\varphi_{cr} = \frac{p_{cr}}{p_{sat}(T_w)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\varphi_{cr}$  – гигроскопическая точка;  $p_{cr}$  – упругость водяных паров над гигроскопичной поверхностью;  $p_{sat}(T_w)$  – упругость насыщенных паров воды в



**Рис. 2. Зависимость количества выпадающей влаги и размера зоны конденсации от гигроскопичности пород**

воздухе. Таким образом, чем меньше  $\varphi_{cr}$ , тем при меньшей концентрации водяного пара в воздухе начнется конденсация влаги.

**Метод исследования.** Для оценки этого влияния гигроскопичности пород на процесс конденсации рассматривалась модельная задача, в которой рудничную сеть моделировали системой параллельных выработок, как показано на рисунке 1. Считалось, что массовый расход поступающего в рудник воздуха  $G = 350 \text{ кг/с}$  и его среднегодовая температура  $T_{ay} = 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Глубина разрабатываемого горизонта принята  $H = 400 \text{ м}$ . В расчетах оставались неизменными следующие величины: площади поперечного сечения стволов ( $36 \text{ м}^2$ ) и выработок ( $20 \text{ м}^2$ ); длина параллельных выработок (10 км) и их количество (7); амплитуда годового гармонического колебания среднесуточной температуры атмосферного воздуха ( $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ); график изменения относительной влажности воздуха. Для стволов предполагалось наличие бетонного покрытия ( $\varphi_{cr} = 100 \%$ ). Рассматривался только теплый период года (с 15 апреля по 15 октября).

При теоретическом исследовании на основе разработанного комплекса

программ, рассматривалось влияние критической относительной влажности воздуха  $\varphi_{cr}$  на суммарную массу влаги  $M$ , выпадающую в течение теплого полугодия в руднике, и на предельный размер зоны конденсации  $L$ .

Реализованная в комплексе программ математическая модель основана на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных, включающих в себя: уравнения движения турбулентной жидкости (паровоздушной смеси); уравнения нестационарного конвективного теплообмена между воздухом и горными породами; уравнения турбулентной диффузии пара к стенкам выработки с образованием на ней жидкой фазы.

Постановка задачи и алгоритм решения описаны в работе [2]. При решении определялись поля температур, массовой концентрации пара, плотность потока массы на стенке выработки. Интегрирование плотности потока по площади позволило определить количество выпадающей влаги.

Результаты исследования. Результаты расчета показаны на рисунке 2. Видно, что при малых значениях  $\varphi_{cr}$  выпадает большое количество влаги (до 12000 тонн при  $\varphi_{cr} = 50 \%$ ), а

размер зоны конденсации остается примерно постоянным и равным 5 км. Затем с увеличением  $\varphi_{cr}$  и масса выпадающей влаги  $M$ , и размер зоны конденсации  $L$  начинают стремиться к нулю, но не достигают его, так как  $\varphi_{cr}$  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 разработки 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 [5].

### **Выводы**

Исследования показали, что гигроскопичность пород оказывает существенное влияние на процесс конденсации. Так при  $\varphi_{cr} = 56$  % (карналлит) выпадет около 9500 тонн влаги, при  $\varphi_{cr} = 67$  % (сильвинит) – около 6000 т, а для каменной соли ( $\varphi_{cr} = 77$  %) количество выпавшей влаги составит около 3500 т. Наиболее активно процесс конденсации происходит в выработках, пройденных по карналлиту, так как он более гигроскопичен, чем каменная соль и сильвинит.

---

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Медведев И.И.* Проветривание калийных рудников. – М.: Недра, 1970. – 204с.
2. *Дударь Е.С.* Особенности формирования и расчет термовлажностного режима выработок калийных рудников // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2009. №4, с.10 – 14.
3. *Кувшинников И.М.* Минеральные удобрения и соли: свойства и способы их улучшения. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
4. *Тихонович З.А.* Изучение гигроскопических свойств минеральных солей и удобрений: Автореф. дис. канд. хим. наук. – М., 1973. – 18 с.
5. *Knothe S., Nowak B., Szlajak M.* Wplyw wilgotnosci na przeplyw powietrza w glebokosci szybach wentylacyjnych // Arch. Gorn. – 1986. – 31, № 2. – P. 289–303. **ГИАБ**

---

### **Коротко об авторе**

*Дударь Е.С.* – кандидат технических наук, доцент, Пермский государственный технический университет, elendudar@yandex.ru

