

УДК 622.4

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В СИСТЕМЕ ВЕНТИЛЯЦИИ  
УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ НА ОСНОВЕ ПСИХРОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

**М. Ондер<sup>1</sup>, Н. Курсуноглу<sup>2</sup>, С. Ондер<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Эскишехирский университет Османгази,  
E-mail: monder@ogu.edu.tr, 26480, г. Эскишехир, Турция  
<sup>2</sup>Батманский университет, 72100, г. Батман, Турция

Предложена стратегия решения проблемы негативного влияния высокой температуры и влажности воздуха в выработках угольной шахты. Показано, что содержание влаги существенно влияет на состояние воздуха и тепловой поток, выделяемый от различных источников тепла. Выполнен расчет объема потока воздуха при его движении по сети выработок, обеспечивающего допустимые климатические условия согласно национальному стандарту Турции EN ISO 7243:2017.

*Психрометрия, вентиляция шахты, влажность, тепловыделение*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210516

Несмотря на значительное уменьшение фатальных происшествий за последнее столетие, горнодобывающая отрасль остается наиболее опасной отраслью промышленности [1]. Из-за увеличения глубины добычи полезных ископаемых в угольных шахтах наблюдается повышение температуры и влажности [2]. Неблагоприятные условия негативно влияют на эффективность добычи, что приводит к снижению производительности [3]. Для изучения процессов, происходящих в воздушном потоке шахты, необходимо рассматривать такой параметр, как влажность. Содержание влаги существенно влияет на психрометрическое состояние воздуха и на тепловой поток от различных источников тепла, что сказывается на физическом состоянии горных рабочих [4].

Психрометрический метод чаще других применяется для определения температуры и относительной влажности воздуха. В рамках психрометрии изучается влажный воздух, а также поведение сухого воздуха и воздушно-паровой смеси при различных условиях. Данные параметры и их изменения очень важны для эффективной работы систем вентиляции по нескольким причинам. Во-первых, влажность рассматривается как важный фактор термодинамических процессов, протекающих в системе шахтной вентиляции, и психрометрических соотношений, позволяющих количественно оценить климатические изменения. Во-вторых, тепло и влажность влияют на здоровье и производительность горных рабочих, следовательно, эти параметры всегда должны контролироваться и поддерживаться на определенном уровне [4, 5].

Многие исследователи изучали процессы управления температурой и влажностью воздуха в шахтах. В [6] рассчитаны термодинамические параметры (температура, давление, плотность воздуха, содержание влаги, энтальпия и т. д.). Основным источником тепла — недавно взорванная порода и порода, окружающая забой, который разрабатывается полностью механизированным способом.

Рассмотрены источники тепла в шахтах с высокой температурой и их влияние на состояние организма человека, выполнена оценка тепловой опасности [7]. Приведены основные источники тепла в подземных шахтах и установлено, что главный источник — автокомпрессия [8]. Исследована тепловая опасность в глубокой шахте и изучены методы ее контроля, выполнено сравнение различных технологий шахтного охлаждения [3]. Проанализировано влияние изменения влажности, скорости воздуха, воздушного обмена и температуры на тепловой комфорт рабочих [9]. Разработана математическая модель и определена оптимальная скорость потока воздуха, а также установлено, что влажность — значительный фактор отклонения теплового комфорта.

Обоснованы различные технологии охлаждения и предложены три модели контроля тепловой опасности в глубоких шахтах [10]. Определены основные источники тепла в металлургических шахтах: автокомпрессия воздуха, возникающая при его оседании в вертикальных выработках, теплота породы (геотермальный градиент), тепло от техники, притока воды, взрывных работ, трения обрушающейся породы, трубопроводов и подачи кислорода, а также человеческого обмена веществ [1].

В связи с повышением уровня механизации в шахтах и использованием оборудования высокой мощности горные машины стали одним из основных источников тепла [11]. Увеличение глубины добычи привело к ужесточению требований к состоянию воздуха шахт [12]. Производительность системы вентиляции определяется балансом тепла и влажности. Для расчета параметров воздушного потока в системе вентиляции необходимо рассчитать количество высвобождаемого тепла и влаги [13].

Разработана модель прогнозирования термального состояния в глубоких шахтах, сравнивались значения измеренной температуры по маршруту воздушного потока с допустимым предельным значением 26 °C [14]. Установлено, что эксплуатация угольных подземных шахт осуществляется в диапазоне относительной влажности 80–100 % [15]. Определены средние значения температуры (32 °C) и влажности воздушного потока (95 %) в глубокой подземной шахте [16].

Стандарт ISO 7243 ограничивает значения термальной среды по температуре влажного шарика психрометра (WBGT). Расчет тепловой нагрузки определяется исходя из уровня выделения метаболического тепла акклиматизированных и неакклиматизированных к теплу людей [17]. Выявлено, что тепловая нагрузка не возникает при WBGT < 18 °C, а при 18–23 °C она управляема [18].

Помимо постоянных психрометрических параметров воздуха в шахте необходимо определить изменение содержания теплоты и влаги в шахтах, а также ответить на вопрос: как изменяется воздух, протекающий от входа до точки сброса. С этой целью в рамках настоящей работы выполнен психрометрический анализ воздушной среды полностью механизированной угольной подземной шахты. Изучены термодинамические процессы, протекающие в системе шахтной вентиляции для определения количества тепла и влаги, которое добавляется в вентилируемый воздух при механизированной добыче. Это позволит спрогнозировать тепловую нагрузку на работающего человека и оценить эффективность работы системы вентиляции.

Для обобщения психрометрических параметров воздуха в шахте все данные сведены в таблицы. Рассчитаны и показаны изменения содержания влаги, энтропии и относительной влажности, определено общее значение тепло- и влагообмена для панелей М1, М5 и шахты в целом, объяснены причины их изменений. Для каждой панели проанализирован психрометрический процесс. Рассчитан требуемый объем воздушного потока для панели М1 с целью поддержания допустимых климатических условий в шахте по стандарту EN ISO 7243:2017.

### ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗДУХА В ПОДЗЕМНОЙ УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ

Рассматриваемая шахта находится в северной части Эгейского побережья на территории Турции. В шахте осуществляется подэтажная выработка угля полностью механизированным способом. Проектный годовой объем добычи угля составляет 2.5 млн т из лигнитового угольного пласта. Протяженность панелей 650–900 м, длина забоев 150–180 м. Объем поступающего в шахту воздуха  $70 \text{ м}^3/\text{с}$ , объем воздуха, проходящего через забой, —  $20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для анализа психрометрических параметров влажного воздуха в шахте необходимо знать температуру влажного термометра  $t_w$ , температуру сухого термометра  $t_d$  и барометрическое давление  $P$ , которые легко измерить на практике. По уравнениям из табл. 1 на основе данных величин можно рассчитать основные психрометрические параметры воздуха в шахте [5, 19].

Первый шаг психрометрического анализа — измерение величин  $t_w$ ,  $t_d$  и  $P$  с использованием психрометрического гигрометра и барометра. Психрометрический гигрометр состоит из двух термометров, первый измеряет температуру окружающего воздуха (“сухой” термометр), второй — температуру паров над поверхностью воды (“влажный” термометр) [5]. Точки измерения 1–15 распределены по всей шахте, точки 1–7, 13–15 соответствуют маршруту системы вентиляции панели М1 (рис. 1). Эти измерения использованы для расчета психрометрических параметров и последующего анализа воздуха в панели М1.

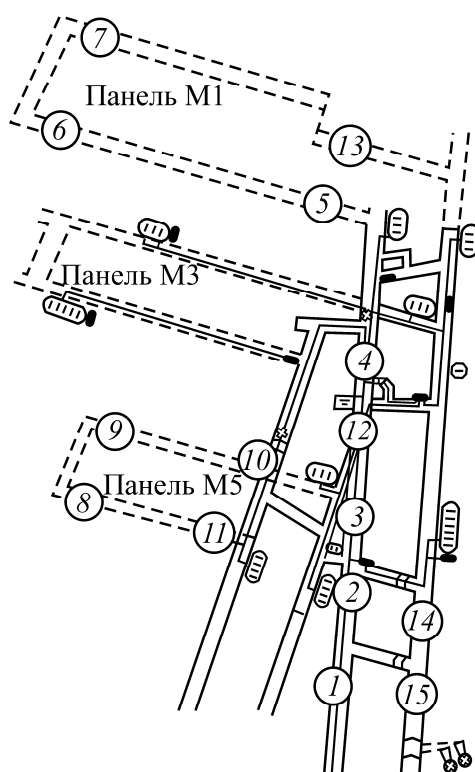


Рис. 1. Расположение точек измерения в шахте

ТАБЛИЦА 1. Основные психрометрические параметры шахты

Параметр	Единица измерения	Уравнение	Номер уравнения
Паровое давление насыщенного воздуха	Па	$e_{sw} = 610.6 \exp \frac{17.27t_w}{273.3 + r_w}$	1
Содержание влаги в насыщенном воздухе	кг/кг СВ	$X_s = 0.622 \frac{e_{sw}}{P - e_{sw}}$	2
Скрытая теплота испарения	Дж/кг	$L_w = (2502.5 - 2.386t_w) \cdot 1000$	3
Содержание влаги	кг/кг СВ	$X = \frac{L_w X_s - C_{pa}(t_d - t_w)}{L_w - C_{pv}(t_d - t_w)}$	4
Фактическое давление пара	Па	$e = \frac{PX}{0.622 + X}$	5
Фактический удельный объем	м <sup>3</sup> /кг ВВ	$V_{m(act)} = \frac{287.04(t_d + 273.15)}{P - 0.378e}$	6
Ощущаемый удельный объем	м <sup>3</sup> /кг СВ	$V_{m(app)} = \frac{287.04(t_d + 273.15)}{P - e}$	7
Фактическая плотность воздуха	кг ВВ/м <sup>3</sup>	$\rho_{m(act)} = \frac{P - 0.378e}{287.04(t_d + 273.15)}$	8
Ощущаемая плотность воздуха	кг СВ/м <sup>3</sup>	$\rho_{m(app)} = \frac{P - 0.378e}{287.04(t_d + 273.15)}$	9
Относительная влажность	%	$rh = \frac{e}{e_{sd}} \cdot 100$	10
Давление насыщенного пара при температуре сухого воздуха	Па	$e_{sd} = 610.6 \exp \frac{17.27t_d}{273.3 + r_d}$	11
Энтальпия	Дж/кг СВ	$H = C_{pa}t_d + X[C_w t_w + L_w + C_{pv}(t_d - t_w)]$	12
Энтропия	Дж/кг СВ	$S = H - XC_w t_w$	13
Массовый поток сухого воздуха	кг СВ/с	$M = Q\rho$	14
Теплообмен	кВт	$q_{12} = M(S_2 - S_1)$	15
Добавочная влага к воздуху в шахте	кг/с, л/с	$g_{12} = M(X_2 - X_1)$	16
Требуемый объем потока воздуха	м <sup>3</sup> /с	$Q = \frac{q_{12}}{\rho_{m(app)}(S_2 - S_1)}$	17

Примечание. СВ, ВВ — сухой и влажный воздух соответственно;  $C_{pa} = 1005$  Дж/кг·К — удельная теплоемкость сухого воздуха;  $C_{pv} = 1884$  Дж/кг·К — удельная теплоемкость водяного пара;  $C_w = 4187$  Дж/кг·К — удельная теплоемкость воды.

Психрометрические параметры, рассчитанные по уравнениям из табл. 1, приведены в табл. 2. Изменение параметров  $X$ ,  $S$  и  $rh$  для панели М1, согласно точкам измерения, представлено на рис. 2. Содержание влаги от входа в шахту имеет восходящий тренд. Для шахты характерна проблема самовозгорания. С целью ее устранения вода подается из донного затвора между точками 5 и 6. Между точками 6 и 7 во время добычи осуществляется распыление воды от барабана проходческого комбайна для предотвращения образования пыли. Остальные источники

влаги — протечки воды из окружающей породы и водопотребление в шахте. Выделение тепла также происходит от электродвигателя проходческого комбайна, приводящее к увеличению энтропии между точками 6 и 7. Повышение содержания влаги способствует увеличению относительной влажности. Таким образом, в точке 7 параметры  $X$ ,  $S$  и  $rh$  достигают своего максимального значения.

ТАБЛИЦА 2. Психрометрический анализ панели М1

Точка измерения	$t_w, ^\circ\text{C}$	$t_d, ^\circ\text{C}$	$P, \text{кПа}$	$X, \text{кг/кг СВ}$	$S, \text{Дж/кг СВ}$	$rh, \%$
1	3.5	4.0	95.9	0.005	16318.25	92.74
2	8.0	11.0	99.0	0.006	24956.01	67.13
3	10.5	13.5	97.7	0.007	30836.06	69.83
4	13.0	16.0	98.8	0.008	36720.17	71.85
5	13.5	16.0	98.7	0.009	38033.39	76.35
6	19.5	21.5	98.7	0.014	55495.54	83.43
7	22.0	23.0	98.1	0.017	64304.74	91.86
13	20.5	21.5	98.8	0.015	58773.56	91.56
14	17.5	19.0	97.5	0.012	49630.67	86.72
15	16.0	17.0	95.2	0.012	45916.21	90.67

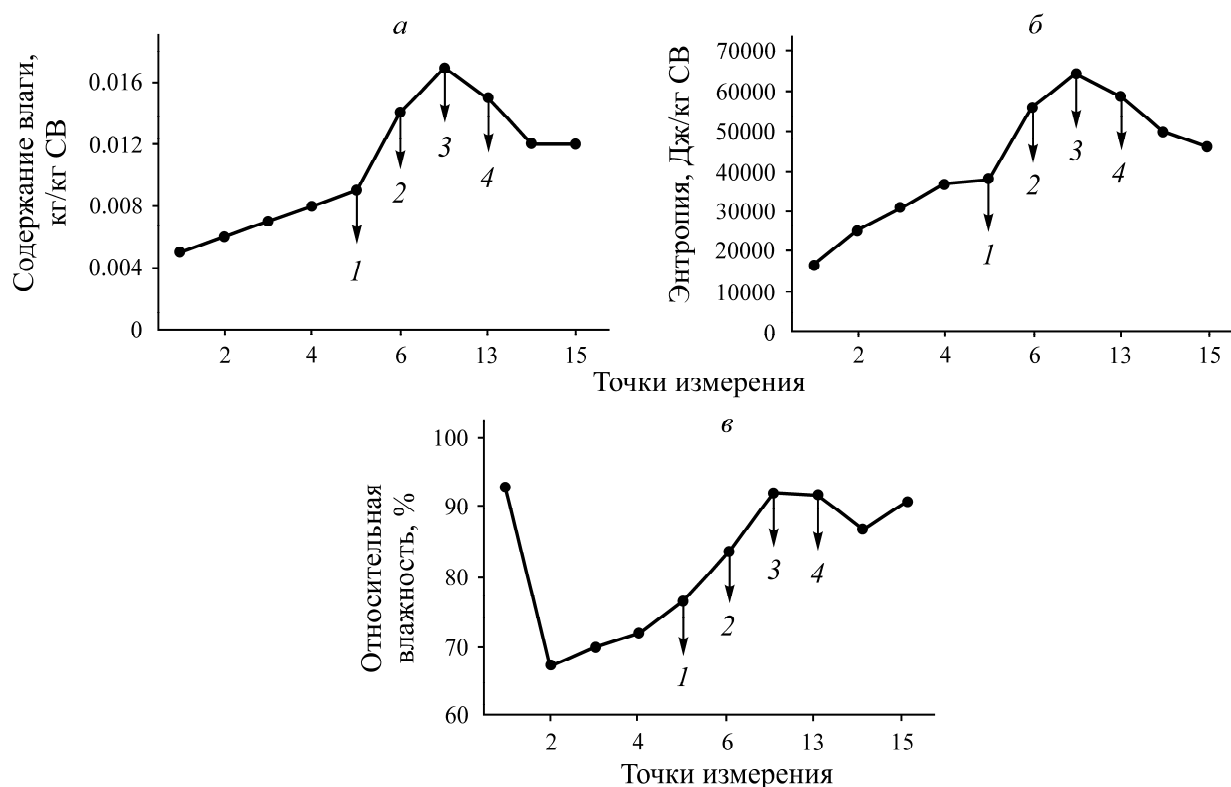


Рис. 2. Изменение содержания влаги (а), энтропии (б) и относительной влажности в панели М1 (в): 1 — точка входа потока воздуха в панель М1; 2 — точка входа потока воздуха в забой; 3 — точка выхода потока воздуха из забоя; 4 — точка выхода потока воздуха из панели М1

Так как на момент измерения добыча угля в панели М5 не проводилась, была возможность исследовать влияние механизированной и немеханизированной добычи на климат в шахте. Точки 1, 2, 3, 4, 10, 11, 8, 9, 12, 14, 15 соответствуют маршруту системы вентиляции панели М5 (рис. 1). Психрометрический анализ панели М5 представлен в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Психрометрический анализ панели М5

Точка измерения	$t_w, ^\circ\text{C}$	$t_d, ^\circ\text{C}$	$P, \text{кПа}$	$X, \text{кг/кг СВ}$	$S, \text{Дж/кг СВ}$	$rh, \%$
1	3.5	4.0	95.9	0.005	16 318.25	92.74
2	8.0	11.0	99.0	0.006	24 956.01	67.13
3	10.5	13.5	97.7	0.007	30 836.06	69.83
4	13.0	16.0	98.8	0.008	36 720.17	71.85
10	15.5	18.5	99.3	0.010	43 255.86	73.66
11	17.0	19.5	99.3	0.011	47 551.66	78.41
8	20.5	21.5	99.5	0.015	58 498.35	91.54
9	19.5	20.5	99.6	0.014	55 163.61	91.33
12	18.5	19.5	98.8	0.013	52 269.38	91.14
14	17.5	19.0	97.5	0.012	49 630.67	86.72
15	16.0	17.0	95.2	0.012	45 916.21	90.67

Изменение параметров  $X$ ,  $S$  и  $rh$  для панели М5 по точкам измерения представлено на рис. 3. Видно, что эти параметры отличаются от панели М1, на выходе из забоя наблюдается снижение содержания теплоты и влаги в воздухе.

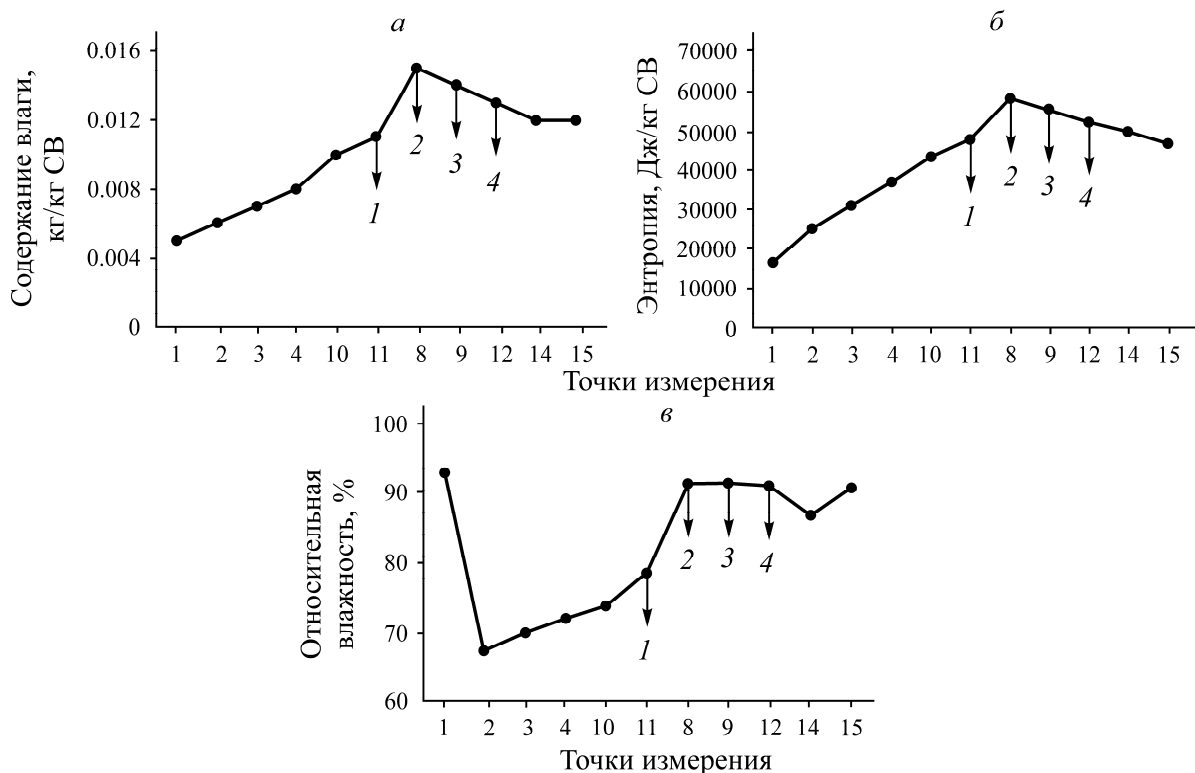


Рис. 3. Изменение содержания влаги (а), энтропии (б) и относительной влажности в панели М5 (в): 1 — точка входа потока воздуха в панель М5; 2 — точка входа потока воздуха в забой; 3 — точка выхода потока воздуха из забоя; 4 — точка выхода потока воздуха из панели М5

Для панелей М1 и М5, а также всей шахты рассчитаны значения тепло- и влагообмена по уравнениям из табл. 1. В табл. 4 представлены входящие и выходящие психрометрические параметры для панелей М1 и М5. Исходя из расчетов, добавочные значения теплоты и влаги для панели М1 составили 201.19 кВт и 0.069 кг/с, потери теплоты и влаги для панели М5 — –76.57 кВт и –0.023 кг/с соответственно. Получено отрицательное значение  $q_{89}$ , так как на момент измерений в панели М5 добыча не осуществлялась и окружающая порода поглотила часть тепла из шахты. Между точками 8 и 9 наблюдается снижение содержания влаги (добыча не осуществлялась). Установлено, что панель М1 является областью нагрева и насыщения влагой воздушного потока, панель М5 — областью его охлаждения и осушения. Для исследования изменения климатических условий во всей шахте в целом проанализированы психрометрические параметры в точках 1 и 15. Результаты представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 4. Психрометрические параметры воздуха на входе и выходе панелей М1 и М5

Уравнение	Параметр	Вход	Выход
Панель М1			
Измерение	$P$ , Па	98 700	98 100
Измерение	$t_d$ , °С	21.5	23
Измерение	$t_w$ , °С	19.5	22
5	$e$ , Па	2138.80	2579.84
9	$\rho_{m(app)}$ , кг СВ/м <sup>3</sup>	1.142	1.123
13	$S$ , кДж/кг СВ	55.495	64.304
4	$X$ , кг/кг СВ	0.014	0.017
14	$M_6$ , кг СВ/с		22.84
Повышение энтропии $S_7 - S_6$ , кДж/кг СВ			8.809
15	$q_{67}$ , кВт	201.19	
Повышение содержания влаги $X_7 - X_6$ , кг/кг СВ			0.003
16	$g_{67}$ , кг/с		0.069
Панель М5			
Измерение	$P$ , Па	99 500	99 600
Измерение	$t_d$ , °С	21.5	20.5
Измерение	$t_w$ , °С	20.5	19.5
5	$e$ , Па	2345.70	2201.87
9	$\rho_{m(app)}$ , кг СВ/м <sup>3</sup>	1.148	1.155
13	$S$ , кДж/кг СВ	58.498	55.163
4	$X$ , кг/кг СВ	0.015	0.014
14	$M_8$ , кг СВ/с		22.960
Снижение энтропии $S_9 - S_8$ , кДж/кг СВ			–3.335
15	$q_{89}$ , кВт	–76.570	
Снижение содержания влаги $X_9 - X_8$ , кг/кг СВ			–0.001
16	$g_{89}$ , кг/с		–0.023

ТАБЛИЦА 5. Психрометрические параметры воздуха на входе и выходе шахты в целом

Уравнение	Параметр	Вход	Выход
Измерение	$P$ , Па	95 900	95 200
Измерение	$t_d$ , °C	4	17
Измерение	$t_w$ , °C	3.5	16
5	$e$ , Па	753.980	1756.280
9	$\rho_{m(app)}$ , кг СВ/м <sup>3</sup>	1.196	1.121
13	$S$ , кДж/ кг СВ	16.318	45.916
4	$X$ , кг/кг СВ	0.005	0.012
14	$M_1$ , кг СВ/с		83.720
Повышение энтропии по маршруту вентиляции $S_{15} - S_1$ , кДж/кг СВ			29.598
15	$q_{1-15}$ , кВт		2477.950
Повышение содержания влаги по маршруту вентиляции $X_{15} - X_1$ , кг/кг СВ			0.007
16	$g_{1-15}$ , кг/с		0.586

Для всей шахты добавочное значение теплоты составило 2477.95 кВт, содержание влаги — 0.586 кг/с. Выявлено, что количество теплоты и влажность увеличились. Основные источники тепла — механизированная добыча и окружающая порода, что соответствует информации из научной литературы. Основные источник влаги — утечки воды из окружающей породы, водопотребление в шахте, вода, доставленная к рабочему забою для предотвращения самовоспламенения и система подавления пыли. Для соблюдения допустимых климатических условий в шахте необходимо контролировать тепло и влагу, высвобождаемые из различных источников.

В настоящей работе проанализирована допустимость климатических условий по стандарту EN ISO 7243:2017 путем его сравнения с предельными значениями, обозначенными в литературе. В стандарте EN ISO 7243:2017 регламентирован метод оценки тепловой нагрузки, которой подвергается рабочий, а также метод определения наличия или отсутствия такой нагрузки. В качестве показателя окружающей среды выбрана WBGT (температура влажного шарика психрометра), которая рассматривается совместно с метаболическим теплом для оценки тепловой нагрузки среды [20]. Для большинства подземных шахт и практических ситуаций WBGT определяется при значении мокрого термометра 0.7, а сухого 0.3 [21, 22]. Значения влияния одежды (CAVs) добавляются к WBGT для получения эффективного значения  $WBGT_{eff}$ . В стандарте EN ISO 7243:2017 указаны значения  $WBGT_{ref}$  пяти классов выделения метаболического тепла и WBGT CAVs для различных форм одежды. Пограничные значения  $WBGT_{ref}$  определяются исходя из выделения метаболического тепла:

$$\text{для акклиматизированных людей — } WBGT_{ref} = 56.7 - 11.5 \log_{10} M,$$

$$\text{для неакклиматизированных — } WBGT_{ref} = 59.9 - 14.1 \log_{10} M.$$

где  $M$  — выделение метаболического тепла, Вт.

Подземные горнодобывающие работы характеризуются высоким уровнем выделения метаболического тепла, равного 520 Вт. Все рабочие одеты в специальную форму, поэтому  $CAVs = 0$  [20]. Исходя из данных условий, предельное значение WBGT для акклиматизированных к теплу людей составило 25 °C, для неакклиматизированных — 20 °C. По уравнению (17) рассчитан



объем потока воздуха, обеспечивающий данные значения, где значение  $t_w$  не должно превышать 18 °С,  $t_d$  — 21 °С. При данных температурах WBGT составляет 18.9 °С и не превышает границу температуры для неакклиматизированных к теплу людей. Энтропия для допустимой температуры составляет 50.9582 кДж/кг СВ. Для панели М1 рассчитано добавочное значение тепла (201.19 кВт). Требуемый объем потока воздуха, необходимый для сокращения энтропии от 64.30474 кДж/кг СВ до 50.9582 кДж/кг, составляет 13.46 м<sup>3</sup>/с. Рассчитанный объем потока воздуха обеспечивает допустимые климатические условия. Производительность существующей системы вентиляции достаточная для удаления тепла и влаги в небольшом объеме. Тем не менее если в шахте планируется разработка глубокозалегающих горизонтов механизированным способом, то в ней возникнут проблемы с производственным климатом. Климатические условия шахты могут ухудшаться в летний сезон.

### ВЫВОДЫ

Выполнен психрометрический анализ воздуха в полностью механизированной угольной шахте. Определены изменения содержания влаги, энтропии и относительной влажности в точках измерения. Сделан вывод о том, что механизированная добыча значительно повышает содержание теплоты и влаги. Психрометрический анализ позволяет выявить участки с высоким содержанием теплоты и влаги и разработать варианты решения данной проблемы. Для рабочих участков шахты, в которых наблюдаются условия высокой температуры и влажности, следует применять международный стандарт EN ISO 7243:2007, регламентирующий допустимые климатические условия. В нем отчетливо ограничивается окружающая температура для деятельности с различным уровнем выделения метаболического тепла. Так как рабочие условия в шахте требуют высокого уровня человеческого труда, температура WBGT для акклиматизированных к теплу людей не должна превышать 25 °С, для неакклиматизированных — 20 °С. Показана необходимость выполнения психрометрического анализа совместно с проектированием системы вентиляции для обеспечения безопасных и комфортных климатических условий работы в шахте.

Авторы выражают благодарность студенту Эмре Акгуна за большой вклад в проведенное исследование.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Roghanci P., Kocsis K. C., and Sunkpal M.** Sensitivity analysis of the effect of airflow velocity on the thermal comfort in underground mines, *J. Sustainable Min.*, 2016, Vol. 15, No. 4. — P. 175–180.
2. **Güyağüler T.** High temperature and humidity problem in underground coal mining, *The Sixth Coal Congress of Turkey, Zonguldak*, 1988. — P. 133–141.
3. **Xiaojie Y., Qiaoyun H., Jiewen P., Xiaowei S., Dinggui H., and Chao L.** Progress of heat-hazard treatment in deep mines, *Min. Sci. Technol.*, Xuzhou, China, 2011, Vol. 21, No. 2. — P. 295–299.
4. **Watson A. G.** The contribution of conveyed coal to mine heat problems, *University of Nottingham*, 1981. — 290 с.
5. **McPherson M. J.** *Subsurface ventilation and environmental engineering*, Chapman and Hall, 1993. — 891 p.

6. **Zhongpeng X.** Distribution law of high temperature mine's thermal environment parameters and study of heat damage's causes, *Procedia Eng.*, 2012, Vol. 43. — P. 588–593.
7. **Zhao-gui S., Zhong-an J., and Zhong-Qiang S.** Study on the heat hazard of deep exploitation in high-temperature mines and its evaluation index, *Procedia Earth Planet. Sci.*, 2009, Vol. 1, No. 1. — P. 414–419.
8. **Maurya T., Karena K., Vardhan H., Aruna M., and Raj M. G.** Potential sources of heat in underground mines — a review, *Procedia Earth Planet. Sci.*, 2015, Vol. 11. — P. 463–468.
9. **Sunkpal M., Roghanchi P., and Kocsis K. C.** A method to protect mine workers in hot and humid environments, *Safety Health Work*, 2018, Vol. 9, No. 2. — P. 149–158.
10. **Man-Chao H.** Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control, *Min. Sci. Technol.*, Xuzhou, China, 2009, Vol. 19, No. 3. — P. 269–275.
11. **Pickering A. J. and Tuck M. A.** Heat: sources, evaluation, determination of heat stress and heat stress treatment, *Min. Technol.*, 1997, Vol. 79. — P. 147–156.
12. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., Kosykh P. V., and Russky E. Y.** Substantiation of life extension method for two-stage axial flow fans for main ventilation, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55, No. 3. — P. 478–493.
13. **Kiyanytsa L. A.** On the calculation of air flow rates to ventilate closed-type stations in subway with the double-track tunnel, *IOP Conf. Series Earth and Env. Sci.*, 2018, Vol. 134. — Article ID 012027.
14. **Levin L. Y., Semin M. A., and Zaitsev A. V.** Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations, *J. Min. Sci.*, 2014, Vol. 50, No. 2. — P. 371–378.
15. **Khanal M., McPhee R., Belle B., Brisbane P., and Kathage B.** Preliminary investigation on using IS approved real time dry bulb and relative humidity sensors in underground coalmines, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55, No. 1. — P. 169–174.
16. **Li X. and Fu H.** Development of an efficient cooling strategy in the heading face of underground mines, *Energies*, 2020, Vol. 13, No. 5. — Article ID 1116.
17. **Parsons K. C.** Environmental ergonomics: a review of principles, *Methods and Models, Appl. Ergonomics*, 2000, Vol. 31, No. 6. — P. 581–594.
18. **Zare S., Shirvan H. E., Hemmatjo R., Nadri F., Jahani Y., Jamshidzadeh K., and Paydar P. A.** Comparison of the correlation between heat stress indices (UTCI, WBGT, WBGT, TSI) and physiological parameters of workers in Iran, *Weather and Climate Extremes*, 2019, Vol. 26. — Article ID 100213.
19. **Onder M.** Climatic condition simulation of underground mines, Osmangazi University, 2001.
20. **EN ISO 7243:2017.** Ergonomics of the thermal environment — assessment of heat stress using the WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) Index, 2017. — 18 p.
21. **Howes M. J. and Nixon C. A.** Development of procedures for safe working in hot conditions, *Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Mine Ventilation Congress, Soc. for Min., Metal. and Explorat.*, 1997.
22. **Schutte P. C. and Kielblock A. J.** Heat stress protection in abnormally hot environments, *Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Mine Ventilation Congress, Society for Min., Metal. and Explorat.*, 1997.

*Поступила в редакцию 17/XII 2018*

*После доработки 10/VI 2021*

*Принята к публикации 10/IX 2021*