

## PRILOG PRORAČUNU JAMSKE ATMOSFERE

Franica TROJANOVIĆ

*Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, YU—41000 Zagreb*

**Ključne riječi:** Jamska atmosfera, Vlažni zrak, Parcijalni tlak vodene pare, Relativna vlaga, Metoda sekante

**Key-words:** Mining atmosphere, Humid air, Partial steam pressure, Relative humidity, Secanta method

Vlažni zrak, kao neizbježna pojava u jamskoj atmosferi igra važnu ulogu u definiranju klimatskih prilika i dopuštenih uvjeta okoline za normalan rad. Zasićenost zraka vlagom sprečava mogućnost odvođenja suvišne tjelesne topline procesom isparavanja, pa je zbog toga u rudarskoj praksi od izuzetnog značaja utvrđivanje relativne vlage, bilo direktnim ili indirektnim metodama.

Određivanje postotka vlage vrši se pomoću tablica, dijagrama ili proračunom, od kojih svaki navedeni način ima prednosti i nedostatke. Klasičan proračun teče po Sprung-ovoj formuli, ali i u tom slučaju vrijednosti parcijalnih tlakova treba očitati iz tablica za vodenu paru. Ovdje je prvi put prikazan novi način direktnog proračuna bez upotrebe tablica ili dijagrama, pri čemu se parcijalni tlakovi određuju na osnovu funkcionalne zavisnosti tlaka o temperaturi na graničnoj liniji.

Humid air is an unavoidable feature of mining atmosphere, which plays a significant role in defining the climate conditions as well as permitted circumstances for normal mining work. Saturated humid air prevents heat conduction from the human body by means of evaporation. Consequently, it is of primary interest in the mining practice to establish the relative air humidity either by means of direct or indirect methods.

Percentage of water in the surrounding air may be determined in various procedures including tables, diagrams or particular calculations, where each technique has its specific advantages and disadvantages. Classical calculation is done according to Sprung's formula, in which case partial steam pressure should also be taken from the steam table. The new method without the use of diagram or tables, established on the functional relation of pressure and temperature on saturated line, is presented here for the first time.

### Uvod

Stanje jamske atmosfere općenito ima veliki utjecaj na termoregulaciju ljudskog organizma, a naročito prilikom obavljanja bilo kakvog rada. Uslijed biokemijskih procesa organizam uvijek razvija veću ili manju količinu topline, koja je tim veća što se obavlja teži fizički rad. Tako stvorenu toplinu treba na neki način odvoditi, kako bi se tjelesna temperatura održala konstantnom. Oduzimanje topline vrši se posredstvom okoline, pa je zato i stanje jamske atmosfere od velikog značaja za rudare koji obavljaju teške podzemne radove. To stanje je definirano jamskim klimatskim prilikama, pri čemu je vlaga jedan od najvažnijih parametara koji utječe na jamsku klimu.

Djelovanje vlage u jamskim uvjetima se veoma često ocjenjuje kao pozitivno jer snižava temperaturu zraka, a samim tim i rashlađuje jamu. Razlog tome je što se sadržaj vode preuzima uz konstantnu entalpiju, pa povećanje relativne vlage u zraku uzrokuje sniženje temperature. Unatoč tome je ukupni utjecaj vlage na rad u rudniku negativan jer je u zasićenom zraku onemogućeno ili veoma otežano isparavanje. Na taj način je spriječeno odvođenje

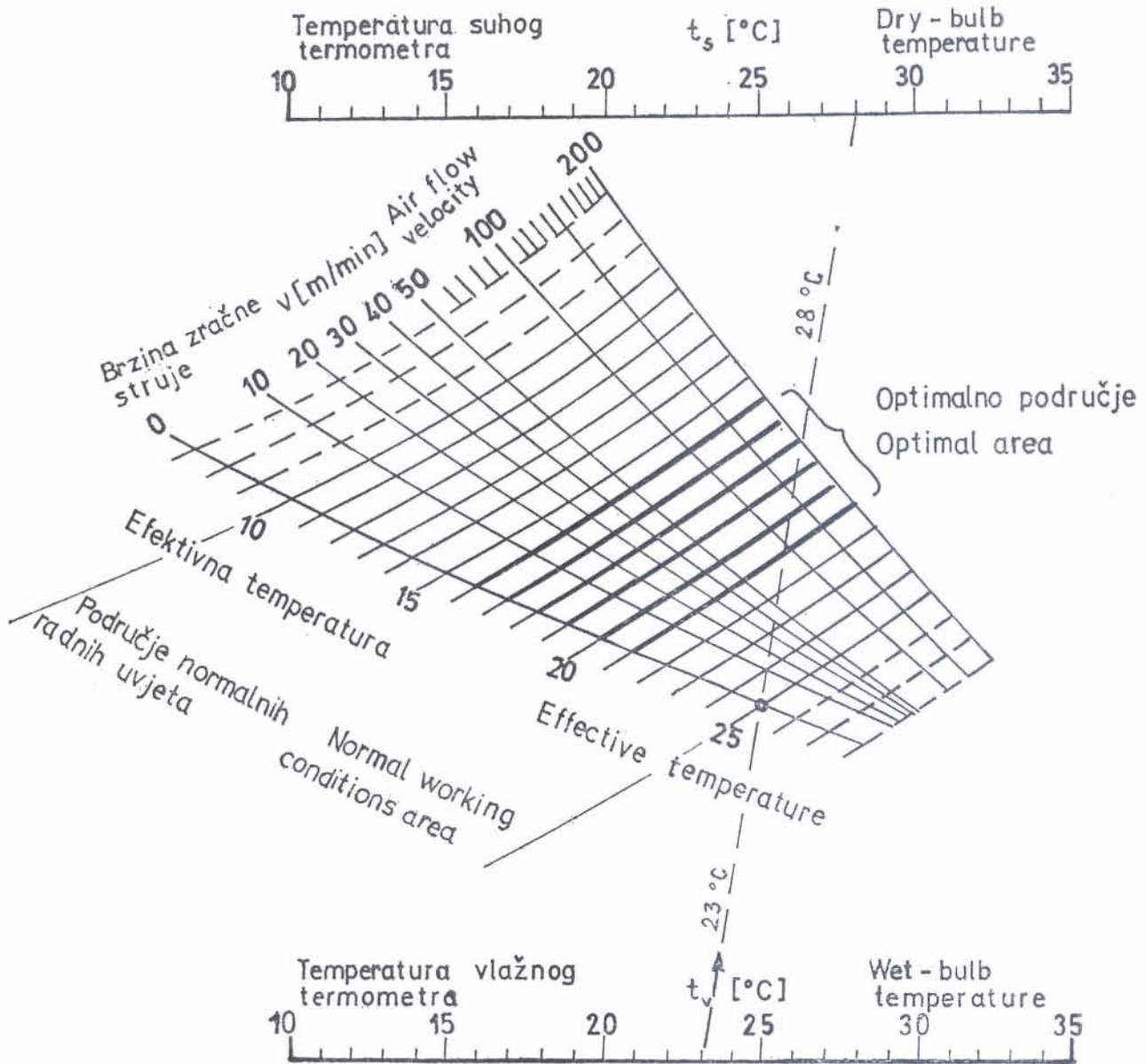
topline iz tijela, pa zato vlaga u jamskom zraku nije samo tehnički već i fiziološki problem. Složenost ove pojave vidljiva je i iz brojnih faktora koji utječu na sadržaj vlage od kojih su najznačajniji slijedeći:

1. temperatura i vlaga ulaznog atmosferskog zraka
2. barometarski tlak i dubina jame
3. količina i brzina zračne struje
4. temperatura jamskog zraka
5. vlažnost okolnih stijena i prisustvo jamske vode
6. dužina ventilacionih puteva.

Ovdje se neće ulaziti u ovisnost i utjecaj svih navedenih parametara, već je cilj ispitati različite metode određivanja sadržaja vlage.

### Ocjene klimatskih uvjeta

Definiranje jamskih klimatskih prilika je veoma složeno, budući da ih određuje čitav niz faktora kao što su: temperatura, vlaga, tlak, brzina zračne struje i zračenje. Upravo zbog toga je teško uspoređivati radna mjesta različitih klimatskih karakteristika, pri čemu



Sl. 1 Dijagram efektivne temperature  
Fig. 1 Diagram of effective temperature

za ocjenu radnih uvjeta postoje dvije glavne metode:

1. mjerenje i određivanje klimatskih faktora
2. definiranje jedne referentne vrijednosti koja obuhvaća ukupno djelovanje svih glavnih parametara.

Prva metoda je prilično složena, a osim toga i nepouzdana, jer zahtjeva primjenu većeg broja instrumenata i brojne dodatne analize. Stoga je u rudnicima zastupljeniji drugi način koji jednim mjerenjem određuje klimatske prilike, pa su takve vrijednosti u literaturi poznate pod nazivom efektivne temperature.

Određivanje klimatskih prilika ujedno definira i uvjete radnog mjesta. Obzirom na broj-

ne parametre koji utječu na jamsku klimu, veoma je teško ocijeniti koje radno mjesto ima nepovoljnije klimatske uvjete i da li na takvom radnom mjestu treba skratiti radno vrijeme. Jedinственog kriterija za takve ocjene nema, pa zato skoro svaka država ima svoj način definiranja radnog područja. Kao primjer je prikazan dijagram američke efektivne temperature, prema Jovičić (1974), koji se smatra vrlo objektivnim mjerilom za utvrđivanje jamskih prilika budući je temeljen na empirijskim podacima.

Za graničnu vrijednost, pri kojoj se mogu ostvariti normalni učinci, uzeto je 25 efektivnih stupnjeva. Nasuprot tome jugoslavenski

propisi za klimatske prilike definiraju temperaturu suhog i vlažnog termometra. Kao granica normalnih radnih uvjeta uzima se temperatura za suhi termometar  $t_s = 28^\circ\text{C}$  a za vlažni  $t_v = 23^\circ\text{C}$ . Ove vrijednosti odgovaraju iznosu od 25 efektivnih stupnjeva po američkim propisima pri stacionarnom stanju zraka.

### Određivanje relativne vlage

Jugoslavenski propisi za klimatske prilike u rudniku ne definiraju direktno dozvoljeni sadržaj vlage, iako je to jedan od glavnih faktora koji utječe na jamsku klimu. Naime, sadržaj vlage u jamskoj atmosferi je odlučujući parametar koji određuje mogućnost odvođenja topline isparavanjem znoja, što je najefikasniji način oduzimanja suviše topline iz tijela. Osim toga poznavanje sadržaja vlage je neophodno za kompletan proračun jamske atmosfere, pa će u daljnjem tekstu biti opisana četiri načina određivanja relativne vlage:

- očitavanje iz tablica za vlažni zrak
- očitavanje iz Mollier-ovog  $i,x$ -dijagrama
- proračun uz pomoć tablica za vodenu paru
- direktni proračun metodom sekante

Prema svakom od navedenih načina odredit će se relativna vlaga za granične vrijednosti prema jugoslavenskim propisima i to uvijek za isti primjer okolnog stanja jamske atmosfere:

$$\begin{aligned} t_s &= 28^\circ\text{C} \\ t_v &= 23^\circ\text{C} \\ p_0 &= 1 \text{ bar} \end{aligned}$$

- Očitavanje iz tablica za vlažni zrak

Većina tablica se prema broju zadanih i traženih podataka može podijeliti u dvije grupe. Prvi tip tablica je određen samo jednim parametrom o kojem ovise svi ostali. Takav primjer su tablice za vodenu paru u priručniku Recknagel — Sprenger (1959), koje su definirane samo jednom veličinom stanja na graničnoj liniji pa je za prikaz ostalih podataka dovoljna linearna skala. Drugi tip sadrži tri veličine, od kojih su dvije zadane a treća se očitava. U tom slučaju tražene vrijednosti se prikazuju u koordinatnom sustavu, što se također odražava i na konstrukciji tabele. Upravo u ovakav tip spadaju i tablice za vlažni zrak. One su najčešće razriješene samo po jednoj varijabli, koja se daje u određenim koracima, pri čemu za međuvrijednosti treba izvršiti interpolacije. Slijedeći nedostatak tabelarnog prikazivanja je u tome što ne pokazuju vrstu funkcionalne zavisnosti pojedinih veličina.

Tablice za vlažni zrak se u literaturi najčešće nalaze u slijedećem obliku, kojeg navodi i Voropajev (1950):

Tablica za vlažni zrak  
Table for humid air

| $t_s$<br>[°C] | Relativna vlaga $\varphi$ [%] |    |    |    | Relative humidity |    |    |    |
|---------------|-------------------------------|----|----|----|-------------------|----|----|----|
|               | $\Delta t = t_s - t_v$        |    |    |    | ↓                 |    |    |    |
|               | 0                             | 1  | 2  | 3  | 4                 | 5  | 6  | 7  |
| 15            | 100                           | 90 | 80 | 70 | 61                | 51 | 43 | 34 |
| 16            | 100                           | 90 | 80 | 70 | 61                | 53 | 45 | 37 |
| 17            | 100                           | 90 | 80 | 71 | 62                | 55 | 47 | 40 |
| 18            | 100                           | 90 | 80 | 72 | 63                | 55 | 48 | 41 |
| 19            | 100                           | 91 | 81 | 72 | 64                | 57 | 50 | 41 |
| 20            | 100                           | 91 | 81 | 73 | 65                | 58 | 50 | 42 |
| 21            | 100                           | 91 | 82 | 74 | 66                | 58 | 50 | 44 |
| 22            | 100                           | 91 | 82 | 74 | 66                | 58 | 51 | 45 |
| 23            | 100                           | 91 | 83 | 75 | 67                | 59 | 52 | 46 |
| 24            | 100                           | 91 | 83 | 75 | 67                | 59 | 53 | 47 |
| 25            | 100                           | 92 | 84 | 76 | 68                | 60 | 54 | 48 |
| 26            | 100                           | 92 | 84 | 76 | 69                | 62 | 55 | 50 |
| 27            | 100                           | 92 | 84 | 77 | 69                | 62 | 56 | 51 |
| → 28          | 100                           | 92 | 84 | 77 | 70                | 64 | 57 | 52 |
| 29            | 100                           | 92 | 85 | 78 | 71                | 65 | 58 | 53 |
| 30            | 100                           | 92 | 85 | 79 | 72                | 66 | 59 | 53 |

Za zadani primjer temperatura suhog i vlažnog termometra, očitavanje relativne vlage iznosi 64%. U ovom slučaju nisu potrebne interpolacije, ali bi bile neophodne za točniji proračun pri preciznijim očitavanjima temperatura.

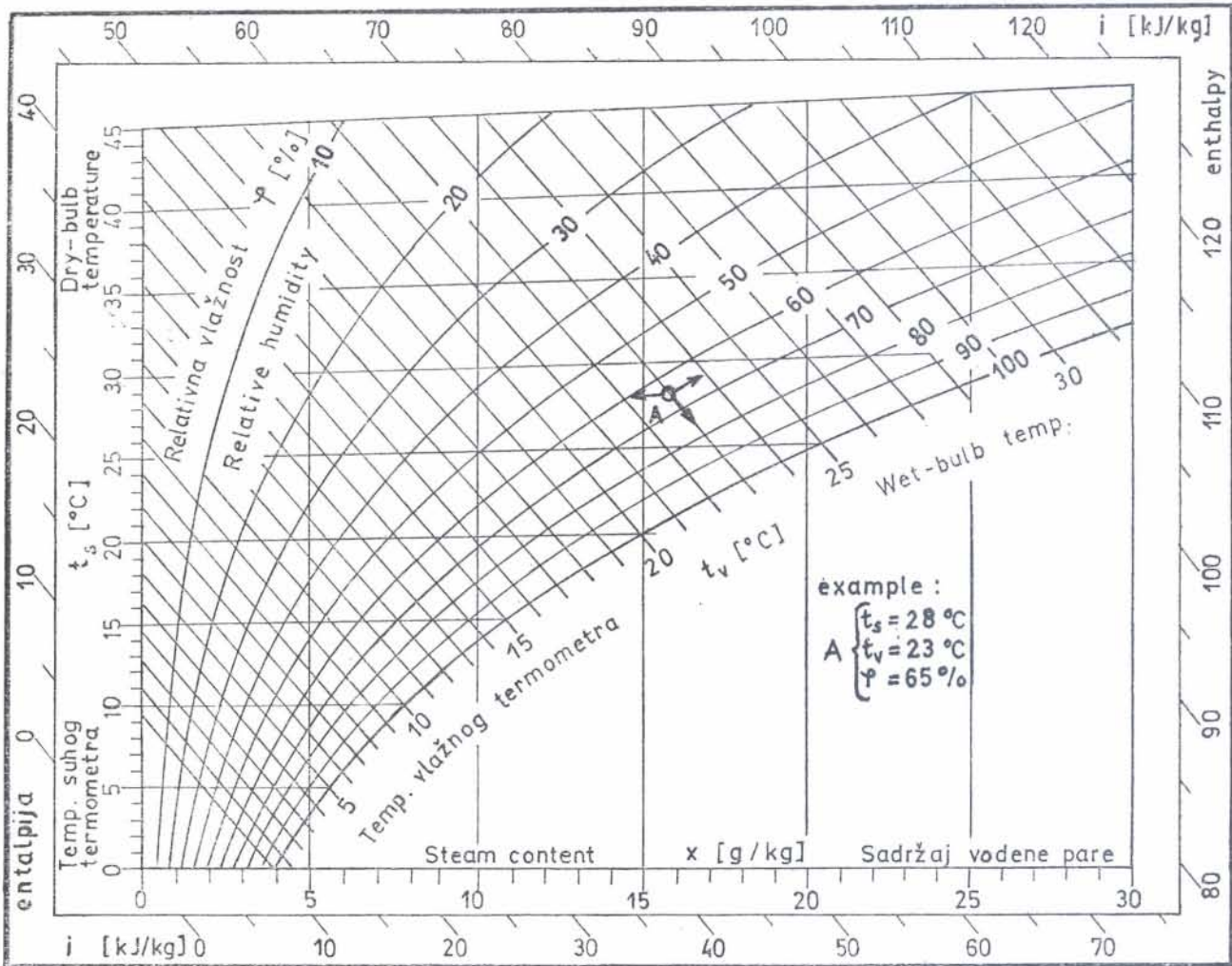
- Očitavanje iz Mollier-ovog  $i,x$ -dijagrama

Obzirom na iznesene nedostatke tablica, dijagrami su puno prihvatljiviji za inženjersku praksu jer omogućavaju kompletan pregled svih veličina. Pri tom se za određivanje relativne vlažnosti zraka najčešće upotrebljava Mollier-ov  $i,x$ -dijagram koji daje međusobnu zavisnost temperature suhog i vlažnog termometra, apsolutne i relativne vlage i entalpije. Jedan od nedostataka ovih dijagrama je u tome što su konstruirani samo za određeni tlak, pa pri promjenama okolnog stanja za svako mjerenje treba upotrebiti drugi dijagram. Pri tom su tlakovi dati u određenim koracima kao na primjer od 67 mbara (50 Torra), pa se za međuvrijednost oba dijagrama ponovo javlja problem interpolacije. Osim toga mnogi  $i,x$ -dijagrami nemaju mogućnost očitavanja parcijalnih tlakova vodene pare, koji su neophodan podatak za proračun gustoće jamskog zraka.

U odabranom primjeru unošenjem odgovarajućih temperatura u Mollier-ov dijagram za tlak okoline od 1 bara, dobiva se relativna vlaga kako slijedi iz sl. 2.

- Proračun uz pomoć tablica za vodenu paru

Relativna vlaga zraka definirana je omjerom parcijalnih tlakova vodene pare vlažnog



Sl. 2 Mollierov  $i, x$  — dijagram  
 Fig. 2 Mollier's  $i, x$  — diagram

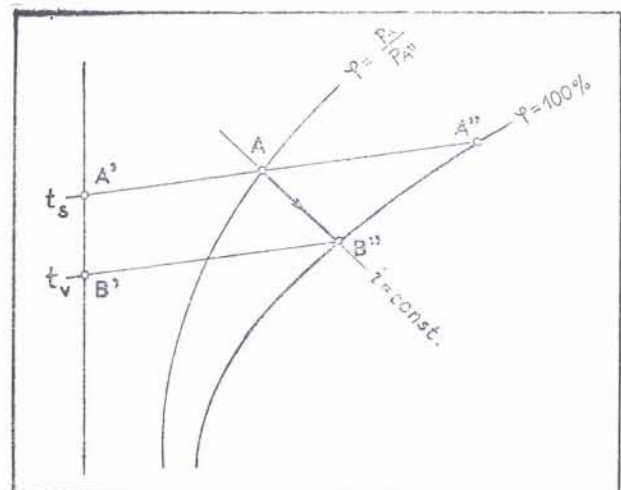
$i$  zasićenog zraka. U toj relaciji je glavna nepoznanica parcijalni tlak vlažnog zraka koji proizlazi iz parcijalnog tlaka vodene pare pri određenoj temperaturi. Ovaj tlak se u proračunu pojavljuje dva puta i to prvi put kao funkcija temperature suhog a drugi put temperature vlažnog termometra. Oba tlaka se mogu očitati iz tablica za vodenu paru. Daljnji račun teče po Sprung-ovoj formuli, K r i s c h e r — K r ö l l (1963), iz koje se dobiva parcijalni tlak vlažnog zraka, ali ne i njegova relativna vlažnost, koja slijedi iz omjera oba tlaka.

Za zadani primjer, prema priloženoj shemi očitavanja iz tablica za vodenu paru, S c h m i d t (1979), daju slijedeće parcijalne tlakove:

$$p_{A''} = 0,03778 \text{ bar}$$

$$p_{B''} = 0,02808 \text{ bar}$$

Parcijalni tlak vodene pare vlažnog zraka po Sprung-ovoj formuli:



Sl. 3 Odnosi vlažnog zraka  
 Fig. 3 Humid air relations

$$p_A = p_{B''} - 0,5 \cdot (t_s - t_v) \cdot \frac{p_0}{750}$$

$$p_A = 0,02808 - 0,5 \cdot (28 - 23) \cdot \frac{1}{750} =$$

$$= 0,02475 \text{ bar}$$

relativna vlaga:

$$\varphi = \frac{p_A}{p_{A''}} = \frac{0,02475}{0,03778} = 0,65502 = 65,5 \%$$

Gornji proračun nije moguće provesti bez upotrebe tablica za vodenu paru, koje za tu svrhu moraju biti razriješene po temperaturi.

#### d) Direktni proračun metodom sekante

Metoda sekante, koja je ovdje prvi put prikazana, omogućava proračun jamske atmosfere i bez upotrebe tablica za vodenu paru. U tu svrhu je potrebno poznavati funkcionalnu zavisnost tlaka o temperaturi, koja se može definirati raznim polinomima nepogodnim za inženjersku praksu. Sličnih pokušaja bilo je i ranije u termodinamičkoj literaturi, pa tako na primjer Unwin (1886) predlaže jednadžbu slijedećeg oblika:

$$\log p = a - \frac{b}{t^n}$$

Točnija i jednostavnija zavisnost se dobiva primjenom jednadžbe potencija općeg oblika:

$$p = p_0 \cdot T^a$$

Ovakav izraz zadovoljava unutar određenih intervala, ali se metodom sekante dobro može definirati cijelo područje koje je od interesa za proračun jamske atmosfere. Na osnovu mjernih podataka, iz tablica za vodenu paru u koraku od po jednog stupnja temperaturne razlike, izračunate su multiplikacione konstante i pripadajuće potencije za tri temperaturna područja. Pri tome je metoda sekante primjenjena tako da su za sva tri intervala uravnotežena odstupanja od mjernih vrijednosti na krajevima i sredini krivulje da maksimalno odstupanje ne prelazi pola posto.

temperaturno područje      jednadžba tlaka

|   |   |
|---|---|
| I. $3 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 17 \text{ }^\circ\text{C}$ | $p = \frac{4 \cdot T^{18,96}}{10^{49}}$ |
|---|---|

|   |   |
|---|---|
| II. $17 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 32 \text{ }^\circ\text{C}$ | $p = \frac{3,6 \cdot T^{17,96}}{10^{46}}$ |
|---|---|

Primljeno: 20. I. 1989.

Prihvaćeno: 6. III. 1989.

$$\text{III. } 32 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 50 \text{ }^\circ\text{C} \quad p = \frac{1,69 \cdot T^{16,69}}{10^{43}}$$

Za naprijed navedeni primjer, proračun parcijalnih tlakova metodom sekante daje slijedeće vrijednosti:

$$p_A = \frac{3,6 \cdot T^{17,76}}{10^{46}} = \frac{3,6 \cdot 301^{17,76}}{10^{46}} = 0,037639 \text{ bar}$$

$$p_{B''} = \frac{3,6 \cdot T^{17,76}}{10^{46}} = \frac{3,6 \cdot 296^{17,76}}{10^{46}} = 0,027954 \text{ bar}$$

Daljnji račun se odvija prema poznatoj Sprung-ovoj formuli za vlažni zrak:

$$p_A = p_{B''} - 0,5 \cdot (t_s - t_v) \cdot \frac{p_0}{750}$$

$$p_A = 0,027954 - 0,5 \cdot (28 - 23) \cdot \frac{1}{750} =$$

$$= 0,02462 \text{ bar}$$

Iz gornjih parcijalnih tlakova slijedi relativna vlaga:

$$\varphi = \frac{p_A}{p_{A''}} = \frac{0,02462}{0,037639} = 0,65413 = 65,413 \%$$

#### Zaključak

Novi postupak utvrđivanja relativne vlage metodom sekante uspoređen je s tri uobičajene metode koje obuhvaćaju tablice za vlažni zrak, Mollier-ov i,x-dijagram i klasičan proračun. Ne samo da tablice često zahtijevaju dodatne interpolacije rezultata, nego su time opterećeni i dijagrami vlažnog zraka. Za točno očitavanje sadržaja vode u zraku potrebne su interpolacije među dijagramima, budući su oni konstruirani za razna barometarska stanja. Preciznije određivanje stanja slijedi iz Sprung-ove formule, odakle se dalje dobiva relativna vlaga. U tim relacijama se pojavljuju parcijalni tlakovi vodene pare, koji se u klasičnom proračunu očitavaju iz tablica. Nova metoda zaobilazi dijagrame i tablice, jer se tlak vodene pare računa direktno iz funkcionalnog odnosa tlaka i temperature. Najtočnija aproksimacija se dobiva metodom sekante u odabranom intervalu, pri čemu razlike na krajevima i sredini krivulje ne prelaze pola posto. Daljnji postupak slijedi Sprung-ovu formulu, pa odnos parcijalnih tlakova daje relativnu vlagu za zadane uvjete jamske atmosfere.

LITERATURA

- Jovičić, V. (1974): Ventilacija rudnika. Izdavačko informativni centar studenata, 72 str., Beograd.
- Krischer, O. (1963): Trocknungstechnik Bd. I 2. Aufl.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag Berlin [Göttingen] Heidelberg, 238 str., Berlin.
- Sprenger, E. (1959): Taschenbuch für Heizung, Lüftung und Klimatechnik. Gesamtherstellung R. Oldenbourg, 54 str., München.
- Schmidt, E. (1979): Properties of Water and Steam in SI-Units. Springer-Verlag Berlin — Heidelberg — New York, 22 str., München.
- Unwin, W. C. (1886): The relations of Pressure, Temperature and Volume in saturated Vapours. *Engineering* Vol. XLI, 218—227, London.
- Voropajev, A. F. (1950): Teplovaja depresija šahtnoj ventilaciji. Izdateljstvo Akademii nauk SSSR, 30 str., Moskva.

**Contribution for Mining Atmosphere Calculation**

*F. Trojanović*

Humidity effect in underground pit conditions is very often judged as positive, because it lowers the air temperature, and therefore makes the mine colder. The reason for this is, that the water content is taken at the constant enthalpy, so the increase of relative humidity in the air causes temperature reduction. In spite of that, total humidity influence on the mining activity is negative, because the evaporation in saturated air becomes either impossible or very difficult. In that way heat conduction from human body is prevented, so the humidity in the mine rooms is not only technical but also physiological problem.

It is rather complex procedure to define mine climate conditions, as they are determined by several parameters, such as: temperature, humidity pressure, air stream velocity and radiation. For limit value, at which normal effects can be realised, Yugoslav regulations define temperature of dry  $t_s = 28^\circ\text{C}$  and wet thermometer  $t_v = 23^\circ\text{C}$ . For such example relative humidity is defined in four ways:

- a) reading from the tables for humid air
- b) reading from Mollier's  $i,x$ -diagram
- c) calculation by means of steam tables
- d) direct calculation by secanta method

Defining of relative humidity from the tables and diagrams, beside the advantages of quick reading, has also many disadvantages. In both cases, for more precise calculation, interpolations which mainly don't have linear character should be done, what makes the whole procedure much slower. So it is necessary, for more precise humidity definition, to do the calculation according to Sprug's formula, from which relative humidity results. By these relations partial steam pressures are expressed, whose values are read from the tables in the classical calculation. The secanta method is presented here, which enables the calculation of pit atmosphere without using tables and diagrams. Functional pressure dependence on temperature is defined by equation of potentions. Partial steam pressure can be simply calculated from that equation, resulting in percentage of relative humidity.