

Projekt »Ekološki usmjeren otkopavanje mineralnih sirovina« br. 195007 financiran od Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske

VLAŽNOST I VJETRENJE PODZEMNOG SKLADIŠTA EKSPLOZIVNIH TVARI

Vladimir RENDULIĆ i Miroslav PETZEL

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Atmosferski zrak, Vlažnost, Vjetrenje, Podzemno skladište

Za podzemno skladište eksplozivnih tvari u potkopu napuštene etaže kamenoloma treba osigurati umjetnu izmjenu zraka u skladu s pogodnom relativnom vlažnosti vanjskog zraka. Uz respektiranje odgovarajućih mjera zaštite kod manipulacije u budućem skladištu važno je saznanje o hlapljenju vode iz vlažnih tvari, koje je moguće samo kod zraka koji nije zasićen vlagom. Upravljanje sustavom prozračivanja treba predvidjeti izvan skladišta.

Key-words: Atmospheric air, Humidity, Ventilation, Underground storehouse

Underground storehouse for explosives situated in the adit of an abandoned bench of quarry has to have a secure artificial air flow in accordance with appropriate humidity of the outside air. Besides the corresponding protective measures which have to be taken during the manipulation in future storehouse, it is important to consider the evaporation from wet materials and that is possible only when air is not saturated with moisture. Ventilation system should be operated from outside the storehouse.

Uvod

Atmosfera je sloj zraka koji okružuje zemlju do visine od približno 100 km. Samo najdonji dio atmosfere omogućuje disanje ljudi zbog povoljne gustoće, a gornji dio je rijedak. Atmosferski zrak je smjesa plinova od kojih su glavni dušik i kisik. Vlažan zrak predstavlja smjesu suhog zraka i vodene pare koja se naziva vlaga zraka.

Zrak blizu površine zemlje ako se iz njega ukloni vlaga i čestice prašine, sadrži: dušika 78,10 %, kisika 20,93 %, argona i dr. 0,93 %, ugljičnog dioksida od 0,03 do 0,04 % (Budryk, 1951). Glavni sastavni dio zraka je dušik, bez kojeg nema održavanja života na zemlji i plin kisik, potreban za disanje živih bića.

U blizini tvorničkih objekata i kod mjesta većeg okupljanja ljudi dolazi u atmosferu još organska i/ili mineralna prašina, izdvajaju se otrovni plinovi, aerosol, oksidi željeza, ugljika, cinka i sl. Osim toga, izdvajanje topline i vlaga znatno utječu na kakvoću zraka.

Količina vodene pare u smjesi varira od nula u suhom zraku do nekog maksimuma ovisnog od veličine zasićenja kod odgovarajuće temperature. Utjecaj vlage na klimatske prilike i zdravlje ljudi u podzemnim prostorijama je značajan. U zraku zasićenom vodenom parom nemoguće je isparavanje čovječjeg tijela, odnosno odvođenje topline s tijela znojenjem.

Sadržajem vodene pare u zraku zanimao se oko 1500. godine i Leonardo da Vinci, kada je konstruirao prvi higrometar za mjerenje vlage, u obliku kugle od pamuka ili vune. Kugla je mijenjala svoju masu upijanjem vlage iz zraka, što je registrirano otklonom na pripadajućoj vagi. Usavršeni higrometar na temelju promjene duljine ljudske kose pod utjecajem vlage konstruirao je Saussure koncem XVIII. stoljeća, koji se u sličnom obliku još i danas upotrebljava. Poznata sprava za mjerenje kondenzirane vlage ili određivanje rosišta je Daniellov higrometar, a za određivanje razlike suhog i vlažnog termometra prikladan je Assmannov ili Augustov psihrometar (Kostirko i Okolović-Grabovska, 1982).

Stupanj vlažnosti zraka određuje se u rudarstvu apsolutnom i relativnom vlažnosti. Do danas je izveden čitav niz dijagrama i nomograma za brzo određivanje vlažnosti zraka, različite točnosti. Za praktičnu upotrebu pogodan je nomogram Instituta za ventilaciju rudnika (Hauptstelle für Grubenbewetterung) iz Bochuma, kojim se može određivati relativna vlažnost zraka na temelju mjerenja suhog i vlažnog termometra.

Apsolutna vlažnost (φ_a) zraka ili gustoća vodene pare je masa pare sadržane u jedinici volumena vlažnog zraka. Može se odrediti odnosom

$$\varphi_a = \frac{m_{v.p.}}{V}, \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

gdje su:

φ_a – apsolutna vlažnost, kg/m^3

$m_{v.p.}$ – masa vodene pare sadržane u vlažnom zraku, kg

V – volumen vlažnog zraka, m^3

Ravnotežni tlak vodene pare je veći na višoj temperaturi. Postiže se kada je zrak zasićen vlagom tj. kada je broj molekula koje prelaze u paru jednak broju koji se vraća u tekuću fazu.

U tehnici kondicioniranja za određivanje sastava vlažnog zraka, koristi se jedinica sadržaja vlage (x). Sadržaj vlage je masa vodene pare sadržane u jedinici mase suhog zraka, kg/kg .

$$x = \frac{\rho_{v.p.}}{\rho_g} = \frac{m_{v.p.}}{m_g} \quad (2)$$

gdje su:

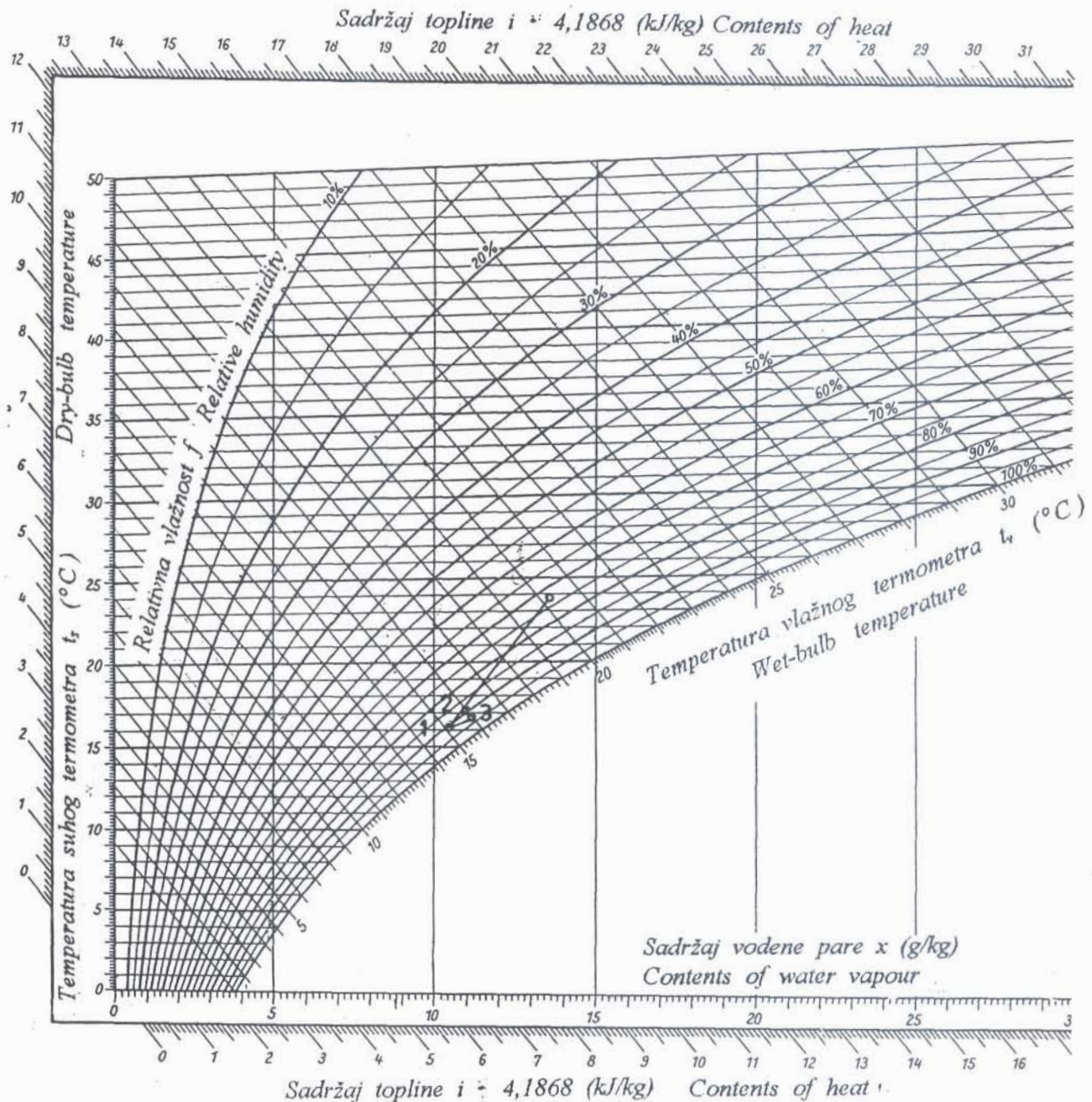
$m_{v.p.}$ – masa vodene pare, kg

m_g – masa suhog zraka, kg

$\rho_{v.p.}$ – gustoća vodene pare, kg/m^3

ρ_g – gustoća suhog zraka, kg/m^3

Relativna vlažnost (φ) zraka je odnos parcijalnog tlaka vodene pare (e) u nezasićenom zraku i tlaka vodene pare



1

Sl. 1. Isječak Mollierovog i, x diagrama po Weuthem, tlak 100 kPa.
Fig. 1. Molliers i, x diagram section by Weuthem, the pressure 100 kPa.

(E) kod temperature potpunog zasićenja. Izračunata u postocima (%), relativna vlažnost iznosi:

$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100\% \quad (3)$$

Parcijalni tlak vodene pare (e) u nezasićenom zraku može se odrediti i analitički, upotrebom Sprungove empirijske formule do temperature 50°C uz podatke mjerenja suhog i vlažnog termometra psychrometrom i tlaka barometrom, a koja preračunata u mjerne jedinice Međunarodnog sustava (SI), ima praktičan oblik:

$$e = E' - 0,00066225 p (t - t') \text{ Pa} \quad (4)$$

gdje su:

E' – tlak vodene pare u zasićenom zraku kod temperature vlažnog termometra, Pa

$(t - t')$ – razlika temperature, suhog i vlažnog termometra psychrometra, $^\circ\text{C}$

p – barometrijski tlak; Pa

E – tlak vodene pare u zasićenom zraku kod odgovarajuće temperature suhog termometra, Pa.

U slučaju kad parcijalni tlak vodene pare poraste toliko da postane $e = E$, relativna vlažnost iznosi 100%.

Ovakav način proračuna odgovara za određivanje relativne vlažnosti, samo je put dugotrajan. Za brze, praktične potrebe, određivanje relativne vlažnosti

obavlja se pomoću dijagrama i nomograma različitih izvora, ili se iz tablica uzimaju gotove vrijednosti.

Količina vlage na 1 kg suhog zraka (apsolutna vlažnost) računa se prema formuli

$$x_{s,z} = \frac{0,62256 \cdot \varphi \cdot E}{p - \varphi \cdot E}, \text{ kg vlage/kg suhog zraka} \quad (5)$$

Istraživanja rudničke klime u podzemnim prostorijama pokazala su apsolutnu vlažnost veću ljeti nego zimi. Relativna vlažnost veća je zimi i kreće se u vjetrenim hodnicima i oknima jame od 90 do 100% što ovisi o naravi jame, količini vode u zraku, intenzivnosti vjetrenja, mjerodavne temperature i drugih okolnosti. U rudnicima soli zbog povećane higroskopnosti, zrak je izuzetno suh s relativnom vlažnosti od 15 do 25%. Osjećaj normalnog zraka u jami postiže se kod relativne vlažnosti od 60 do 80%.

Analitičko proračunavanje prema navedenim formulama može se zamijeniti očitanim podacima iz Mollierovog dijagrama. Prema Weithemu predloženi su dijagrami za tlakove 100, 106,66, 113,32 i 120 kPa. Glede točnosti ovi rasponi tlaka zadovoljavaju, jer utjecaj tlaka na proračunavanje nije toliko osjetljiv (Teply, 1990).

Prikazan Mollierov dijagram (sl. 1) sadrži na apscisi vrijednosti apsolutne vlažnosti x , g/kg suhog zraka, a na ordinati temperaturu zraka izmjerenu na suhom termometru. Izoterme nezasićenog područja završavaju na krivulji zasićenosti gdje su i granice hlađenja označene temperaturama vlažnog termometra.

Na temelju izmjerenih temperatura suhog i vlažnog termometra može se iz i, x dijagrama, odrediti relativna vlažnost φ , apsolutna vlažnost x i entalpija i , čime je stanje zraka svake izmjerene točke određeno.

Skladište eksplozivnih tvari

Skladište u granicama eksploatacijskog polja tvornice cementa Koromačno u Istri, smješteno je na samoj morskoj obali, udaljeno 50 m od mora, tako da treba računati sa značajnijim isparavanjem vodene površine i utjecajem vlage na njegovu mikroklimu. Velika relativna vlažnost nepovoljno će utjecati na radno osoblje i tvari pa objekt treba vjetriti. Vrijeme vjetrenja treba uskladiti s odnosom temperature i vlage tako da relativna vlažnost bude minimalna. Ponekad vjetrenje treba i izbjegavati zbog kakvoće uskladištenih eksplozivnih tvari koje mnogo puta zahtijevaju normalnu vlagu u zraku.

Za situaciju skladišta eksplozivnih tvari mjerenjem je određeno stanje zraka prije rekonstrukcije. Mjerenje je izvela ekipa Zavoda za zaštitu od požara i zaštitu čovjeka okoline d.o.o. Rijeka mjeseca srpnja 1996. god. kojom prilikom su izmjerene tri točke u skladištu i jedna vani na ulazu. Izmjereni su podaci na suhom i vlažnom termometru psihrometra i barometrijski tlak, čime je određeno stanje zraka u skladištu:

vani	$t_s = 23,9^\circ\text{C}$	$t_v = 20,2^\circ\text{C}$	$\varphi = 73\%$
točka 1	$t_s = 16,1^\circ\text{C}$	$t_v = 15,2^\circ\text{C}$	$\varphi = 90\%$
točka 2	$t_s = 17,2^\circ\text{C}$	$t_v = 16,1^\circ\text{C}$	$\varphi = 90\%$
točka 3	$t_s = 16,9^\circ\text{C}$	$t_v = 16,0^\circ\text{C}$	$\varphi = 90\%$

Koncepcija vjetrenja

Za slučaj potrebe većeg intenziteta vjetrenja prostorija radi uskladištenja uvećane količine eksplozivnih tvari i radi uklanjanja eventualno kondenzirane vlage, predložena je nova koncepcija vjetrenja podzemnog skladišta:

– vjetrenje se sada predviđa umjetno pomoću vjetrenih cijevi i ventilatora na površini;

– ventilator će izmjenjivati istrošeni zrak separatno, sisajućim načinom, preko montiranog cjevovoda trasom od vjetrenog potkopa do komora s eksplozivnim tvarima u skladištu;

– lokacija ventilatora bit će na površini, 10 metara od ulaza u vjetreni potkop;

– vjetreni potkop kao i ostale prostorije skladišta podgradit će se betonskom oblogom i izolirati protiv vlage.

Uvjeti vjetrenja

Skladište treba vjetriti tako da se onemoguću zgušnjavanje vlage i stvaranje rose u objektu. Stoga, temperatura zraka u skladištu treba biti viša od temperature točke rose vanjskog zraka.

U doba najvećih žega potrebno je i snižavati temperaturu zraka u skladištu, kada je tijekom dana od 25 do 30°C.

Poznato je da se sniženje temperature jamskog zraka u skladištu može postići i bez primjene sprava za rashlađivanje, sljedećim načinom:

– sprečavanjem eventualnih oksidacijskih procesa u skladištu;

– izolacijom vjetrenih putova specijalnim oblogama;

– povećanjem količine strujanja zraka u prostorijama skladišta;

– vjetrenjem skladišta noću (rano ujutro), kada je temperatura vanjskog zraka niža. Kod vjetrenja je »kapak« na komori potkopa otvoren, a zatvara se danju kada je temperatura zraka viša i parcijalni tlak vodene pare opečeno viši.

Vjetrenje skladišta treba zabraniti u slučaju magle, kada pada kiša, snijeg i kada puše jaki vjetar (»jugo«), zatim, kada je temperatura točke rose zraka u skladištu viša od temperature vanjskog zraka, ili kada je temperatura točke rose vanjskog zraka viša od temperature zraka u skladištu.

Trajanje izmjene zraka iznositi će oko 60 min i više kod manje depresije. Izmjena zraka može se i povećati ako se poveća vrijeme trajanja izmjene, što ovisi od realnih uvjeta mikroklimu u skladištu.

U ljetnom periodu temperatura zraka u skladištu obično će rasti, u odnosu na vanjsku temperaturu, za oko 3 do 6° ovisno od veličine izdvajanja topline u prostoriji skladišta, njenoj visini, načinu rješenja tlačne ili sisajuće ventilacije. Zimi na pr. grijanje vanjskog zraka izaziva sniženje relativne vlažnosti u prostoriji.

Čovjek se ugodno osjeća kod temperature zraka od 18 do 20°C i relativne vlažnosti od 50 do 60%.

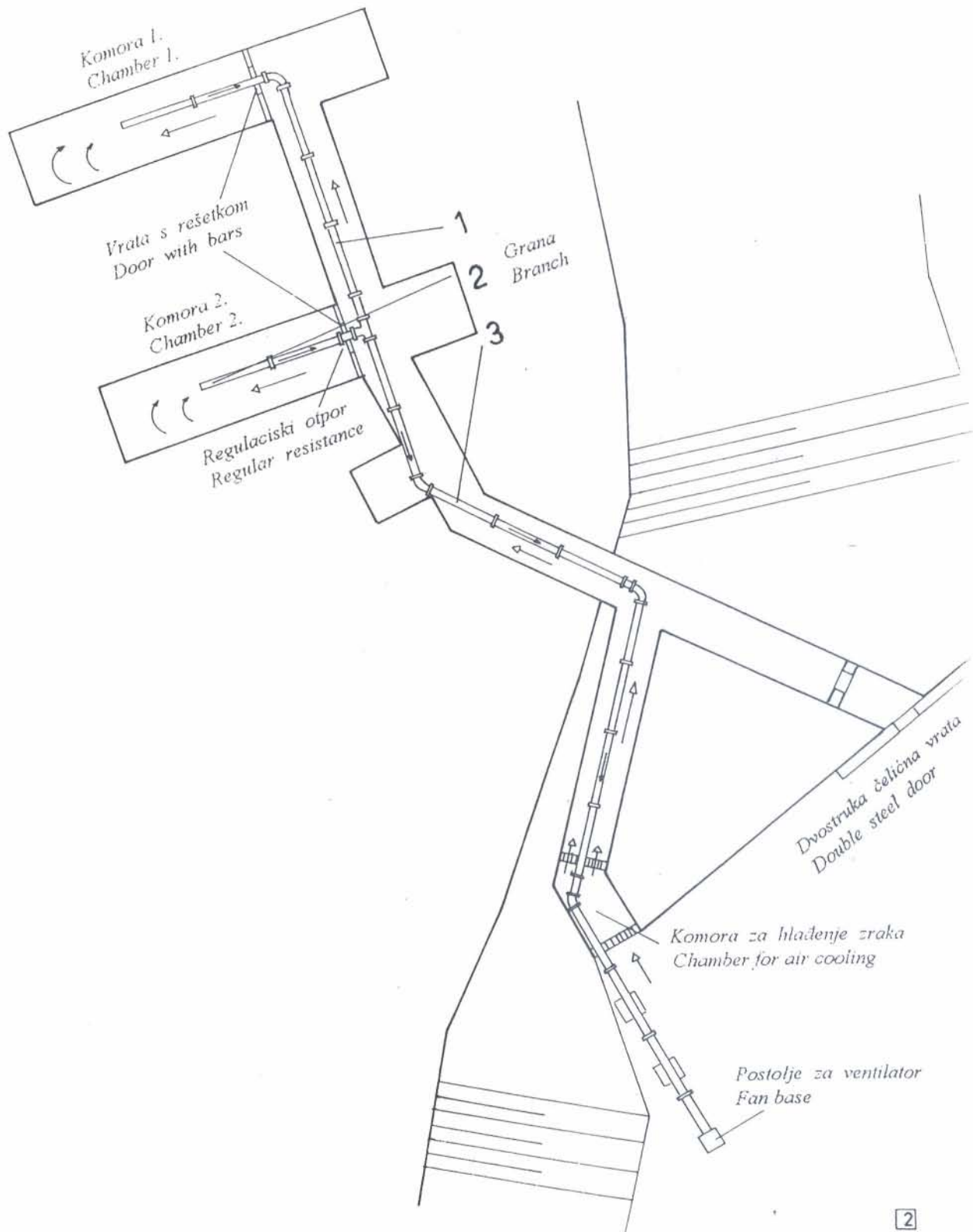
Prema W. Budryku, osjećaj vlažnog zraka u jami dobiva se kod relativne vlažnosti od 80 do 100%. Veliki utjecaj na vlažnost u jami ima promjena temperature atmosferskog zraka na površini, naročito ako je jama plitka.

Potrebna količina zraka i cjevovod

Za osiguravanje odgovarajuće mikroklimu u skladištu te uklanjanje eventualno kondenzirane vlage predviđa se peterostruka izmjena (+5) zraka tijekom jednog sata.

Volumen projektiranog skladišta nakon rekonstrukcije iznosi približno 450 m³, a količina zraka za peterostruku izmjenu trebala bi iznositi oko 0,6 m³/s.

Ako se ova količina zraka usvoji kao mjerodavna, koju treba svake sekunde izvlačiti iz skladišta ventilatorom na površinu, u cjevovodu promjera 300 mm bit će postig-



Sl 2. Tlocrt vjetroenog cijcovoda
Fig. 2. Ground plan of air duct

Tablica 1 Proračun razgranatog vjetrenog cjevovoda
Table 1 Calculation of Air duct expand

Grana Branch	Brzina zraka v, m/s Velocity of Air	Duljina cjevovoda L, m Duct Length	Linijski otpor R, Ns ² /m ⁸ Linear Resistance	Σ lokalnih otpora R _l Ns ² /m ⁸ Σ loc. res.	Dodatni otpor ΔR, Ns ² /m ⁸ Additional Resistance	Ukupni otpor R, Ns ² /m ⁸ Total Resistance	Protočna količina Q, m ³ /s Flow Quantity	Depresija ukupna h _{tot} , Pa Total Pressure
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,24	18	198	256	-	454	0,3	30
2	4,24	7	77	252	125	329	0,3	30
3	8,49	41	451	190	-	641	0,6	188

nuta brzina veća od 8 m/s, a ulazna brzina vjetrene struje u vjetrenom potkopu iznositi će oko 0,15 m/s.

Za separadni cjevovod izabrane su azbestcementne cijevi tipa KA s monolitnim naglavkom, proizvod d.d. SALONIT VRANJIC.

Osim poznatih prednosti azbestcementnog cjevovoda cijevi su neosjetljive i na štetan utjecaj eventualnih lutajućih električnih struja. Za brtvljenje cijevi upotrebljava se plastičan i nepropustan materijal. Najviše se upotrebljava kudelja i bitumen, a u novije vrijeme plastični kitovi raznih proizvođača. Montaža cjevovoda predviđenom trasom može otpočeti tek nakon pažljivog pregleda cijevi i fazonskih dijelova zbog utvrđivanja njihove ispravnosti. Učvršćivanje cijevi u cjevovod obavlja se čeličnim obujmicama i šipkama za ovjes.

Cjevovod treba izvesti s nagibom od oko 5‰, na stranu prema ventilatoru da se omogući odvod eventualno kondenzirane vode.

Regulacija količine zraka i izbor ventilatora

Promjer cjevovoda iznosi d=0,3 m, a procijenjeni koeficijent otpora a=0,0042 Ns²/m⁴ pa su za mjerodavnu lokaciju cjevovoda (sl. 2) određeni traženi čimbenici vjetrenja.

Kod sisajuće umjetne ventilacije svježi vanjski zrak ulazi u skladište kroz postojeće otvore i pukotine. Kao rezultat sisajuće ventilacije u skladištu se tlak zraka snižuje.

Takav način vjetrenja može se dopustiti u toplo doba godine. Ako se vjetri u hladnije vrijeme može se nedopušteno sniziti temperatura u prostorijama skladišta, a snažno strujanje hladnog zraka može izazvati maglu u eventualno vlažnim prostorijama.

Na ovu činjenicu treba u pogonu obratiti naročitu pozornost i kod hladnijeg vremena treba zabraniti izmjenu zraka, a predviđena ulazna mjesta za zrak nepropusno zatvoriti.

Zbog mogućeg negativnog djelovanja toplinske depresije ili zbog mogućeg povećanja otpora uslijed nekih naknadnih prepreka u vjetrenju mreži usvojiti će se ventilator nešto veće depresije, slijedećih karakteristika: Q=0,6 m³/s i h=350 Pa. Snaga motora takvog ventilatora treba iznositi oko 0,5 kW.

Ovim zahtjevima odgovara centrifugalni krovni ventilator tipa SV₃, proizvod KLIMA-CELJE Slovenija, ili neki drugi ventilator istih karakteristika.

Proizvođač je predvidio u svojem programu i jače tipove centrifugalnih krovnih ventilatora kao na pr. SV₄ i SV₅ koji pokrivaju područje kapaciteta od 1,5 do 2,5

m³/s. Krovni ventilatori tipa SV izrađuju se na poseban zahtjev i u eksplozijsko zaštićenoj izvedbi, s motorom atestiranim za odgovarajuću zonu opasnosti.

Zaključak

Vjetrenje skladišta eksplozivnih tvari za gospodarsku upotrebu regulirano je Zakonom objavljenim u Narodnim novinama 12/94.

Predmetno skladište projektirano je na razini površine okolnog terena u potkopu nekadašnje etaže tupinoloma. Objekt skladište izveden je s natkopom visine i preko 20 metara što zahtjeva razmatranje skladišta i kao podzemnog objekta.

Sustav prozračivanja skladišta eksplozivnih tvari projektiran je kao umjetni (prisilni), a upravljanje sustavom je izvan skladišta. Upotreba azbestcementnog, stacionarnog, vjetrenog cjevovoda u sustavu ima velike prednosti pred drugim vrstama cijevi, jer on ne podliježe koroziji, lagano se pili i buši, ne gori, a neosjetljiv je na štetan utjecaj lutajućih struja. Fazonski dijelovi iz metalnog lima ugrađeni u azbestcementni vjetreni cjevovod moraju biti propisno uzemljeni kao što moraju biti uzemljene i sve ostale metalne mase u objektu.

Mogućnost stvaranja eksplozivnih smjesa naročito je izražena kod manipulacije u skladištima eksplozivnih tvari. Za skladište je vrlo važno saznanje da eksplozivne smjese mogu nastati i u nedovoljno ventiliranom prostoru, ili tamo gdje je prisilna ventilacija slaba. Eksplozivne smjese mogu nastati i miješanjem zraka sa sitnom prašinom krutih gorivih tvari u određenim uvjetima. Uzvišena količina prašine nalazi se u ventilacijskim sustavima obično, ako je brzina strujanja zraka >0,2 m/s.

Paljenje eksplozivne smjese u povoljnim uvjetima može nastati, uslijed:

- električne iskre ili luka kod otvaranja ili zatvaranja strujnog kruga;
- vodiča koji se griju prolazom električne struje;
- elektrostatskih pražnjenja;
- mehaničke iskre.

Ventilator eksplozijsko zaštićene izvedbe za prisilnu ventilaciju skladišta lociran je na površini u ograđenom prostoru skladišta na udaljenosti oko 10 m od ulaza vjetrene struje. Elektrostatička pražnjenja mogu nastati kod ventilatora ako je sastavljen od dijelova iz plastičnog materijala. Protiv iskrenja ventilator mora biti posebno izveden tako da je rotirajući dio kao i usisno ušće obloženo neiskrećim materijalom (bakar, mjed i sl.).

Ventilator mora biti u eksplozijsko zaštićenoj izvedbi, s motorom atestiranim za odgovarajuću zonu opasnosti.

Za nabavu je predviđen jedan komplet ventilatora s rezervnim motorom.

Eksplozivne tvari u skladištu jesu velika latentna opasnost u slučaju nastanka požara. U skladištu međutim nema nikakvih instalacija niti tvari koje bi mogle inicirati požar uz pridržavanje mjera zaštite na radu i uz pravilan način rukovanja kod manipulacije s eksplozivnim tvarima.

U skladištu eksplozivnih tvari ne smije se upotrebljavati alat i pribor koji može stvarati iskre. Svi otvori za ventilaciju moraju biti s vanjske strane zatvoreni metalnim mrežicama i zaštićeni protupožarnim bubrežim masama. Električne instalacije se izbjegavaju za skladište, a za osvjetljenje treba upotrebljavati atestirane sigurnosne, akumulatorske svjetiljke.

Za gašenje početnog požara mora se u krugu skladišta predvidjeti propisan broj aparata za gašenje, plastična bačva s vodom, pijesak, lopata i metla od prirodnih vlakana.

Na daljini 50 m od ulaznih vrata skladišta i u samom skladištu nesmije se držati nikakav zapaljivi materijal. Otpornost na vatru izvan skladišta postiže se uporabom neropirivih materijala.

Za projektiranje ventilacije treba snimanjem postojećeg stanja utvrditi utjecajne činioce klime u skladištu, a naknadno treba poduzeti odgovarajuće mjere za njezino poboljšanje.

Prije puštanja u pogon novog vjetrog postrojenja na lokaciji skladišta, potrebno je obaviti mjerenje vjetrog struje u objektu.

Primljeno: 1999-03-10

Prihvaćeno: 1999-09-14

LITERATURA

- Budryk, W. (1951): Wentylacja kopalni. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Katowice, 371 pp, Katowice
- Kostirko, K., & Okolović-Grabovska B., (1982): Izmernenie i regulirovanie vlažnosti v pomšččnijah. Moskva Strojizdat, 211 pp, Moskva.
- Rendulić, V. (1998): Glava D. Ventilacija podzemnih prostorija. »Glavni projekt rekonstrukcije skladišta eksplozivnih tvari Tvornice cementa Koromačno«. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb, Zagreb (neobjavljeno).
- Теплы, Е., (1990): Rudnička ventilacija. Sveučilište u Zagrebu, 356 pp, Zagreb.

Humidity and Ventilation of an Underground Explosive Materials Storehouse

I. Rendulić and M. Petzel

This paper describes the basic influence of humidity of climate conditions in the storehouse. Enclosed Mollier's diagram describes the analytic and graphic determination of humidity degree.

We propose ventilation concept for storehouse for explosives: suction ventilation using air duct and a fan on the surface is planned. Asbestos-cement air duct will be used for the flow of the exit air current.

Time-limited ventilation depends on climate conditions of external air. We have chosen a centrifugal roof fan type SV₃, KLIMA make. Explosive proof fan constructed for separate ventilation is located on the surface in a fence, 10 m from the entering point of the storehouse air current.