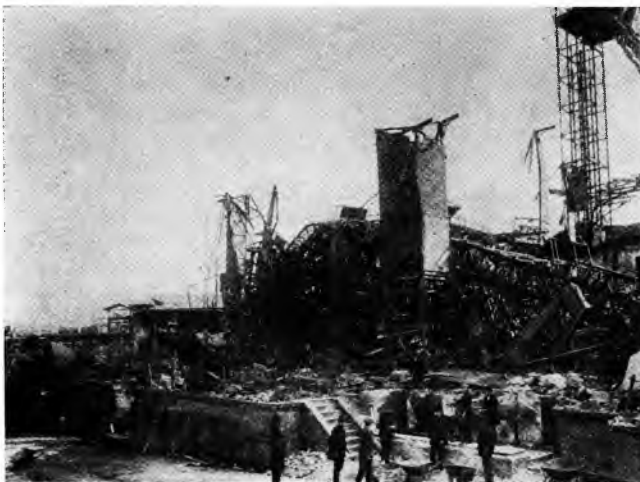


E

EKSPLOZIJE U RUDNICIMA. U podzemnim prostorijama rudnika javljaju se razni plinovi od kojih neki upaljeni gore i, pomiješani u pogodnom omjeru sa zrakom, tvore eksplozivnu smjesu. Od upaljivih plinova najčešće se u rudnicima javlja metan (CH_4), a rjeđe sumporovodik (H_2S), vodik (H_2) i etan (C_2H_6). Ovi se plinovi mogu nakupiti u većim i manjim pukotinama i šupljinama zemnih naslaga; kad se te naslage rudarskim radovima presijeku, plinovi mogu prodirati u jamske prostorije. Ugljični monoksid (CO), također upaljiv plin, nastaje u rudnicima pri sagorijevanju organske supstancije uz pristup nedovoljne količine zraka. Pri radu u rudnicima nekih vrsta ugljena može nastati i eksplozivna smjesa ugljene prašine i zraka.

U povijesti rudarstva dogodile su se brojne veće i manje katastrofe uslijed eksplozije u rudnicima. Najveća se desila 1906 u rudniku ugljena Courrières u Francuskoj, gdje je od serije eksplozija ugljenog praha poginulo 1100 ljudi. U nas su se dogodile velike eksplozije 1929 u Rtnju sa 42 žrtve, 1934 u Kaknju sa 127 žrtava, 1948 u Raši sa 85, 1961 u Zagorju sa 13 i 1965 u Kaknju sa 128 žrtava.



Sl. 1. Posljedica eksplozije u jami Gabriel: srušeni izvozni toranj rudnika (Karviná u Čehoslovačkoj, 13. IV 1924)

Svaka veća eksplozija izazove u jami pravu pustoš. U nekim je slučajevima eksplozija bila toliko snažna da su plamen i zračni udar prodrli kroz glavno okno sa ulaznom zračnom strujom i uništili izvozni toranj. Na slici 1 vide se posljedice jedne takve nesreće. Na dubini od 340 m došlo je do eksplozije praskavog plina koja je bila toliko snažna da je izbacila visok stup plamena kroz izvozno okno. Izvozni toranj visok 35 m, strojnica i ostale zgrade oko tornja bile su potpuno uništene. Oštećene su i sve okolne

pogonske zgrade, a staklo prozora razbijeno je u dalekom krugu oko rudnika. Eksplozija je imala za posljedicu i velik broj ljudskih žrtava u jami.

Eksplozija je naglo oslobađanje energije uslijed ekspanzivnog djelovanja plinova ili para, bez obzira na to da li su plinovi ili pare već prije eksplozije bili prisutni — kao npr. pri eksploziji parnog kotla — ili su tek prilikom eksplozije nastali, kao kad eksplodira eksplozivna supstancija. U potonjem slučaju plinovi ili pare nastaju reakcijom pri kojoj se velikom brzinom neka tvar ili raspada na jednostavnije sastojke ili oksidira oksidativnim sastojkom eksplozivne smjese. Da bi se reakcija mogla odvijati eksplozivno, ona mora biti egzotermna, tj. takva da se znatan dio unutarnje energije sistema pri reakciji pretvara u toplinsku energiju. To dovodi do jakog zagrijavanja produkata reakcije, koji su po pravilu najvećim dijelom plinovi. Ako sistem može da mijenja volumen, produkti se reakcije počinju ekspanzirati, te se jedan dio razvite topline pretvara u mehanički rad. Sve tvari koje se toj ekspanziji suprotstavljaju — dakle i susjedni slojevi zraka — izloženi su stoga djelovanju jakog i često katastrofalnog pritiska.

Pored egzoternosti i velike brzine reakcije, uvjet je za njezinu eksplozivnost i to da se ona spontano širi u eksplozivnoj smjesi, nakon što je inicijacijom na jednom mjestu počela. Prema brzini širenja reakcije razlikuje se deflagracija (eksplozivno gorenje), i detonacija (v. *Eksplozivi*).

Eksplozije u rudnicima o kojima je riječ u ovom članku (tj. neželjene eksplozije) posljedice su — kako je već uvodno rečeno — eksplozivnih reakcija sagorijevanja nekih plinova ili ugljenog praha s kisikom u zraku koji im je primiješan. Smjesa gorivog plina i zraka eksplozivna je (tj. može eksplodirati uz pogodnu inicijaciju) samo ako je sadržaj gorivog plina u njoj unutar određenih granica (*granica eksplozivnosti*). Ako je sadržaj gorivog plina ili praha u smjesi, u određenim uvjetima pritiska i početne temperature, manji od jedne određene vrijednosti (donje granice eksplozivnosti) ili veći od druge vrijednosti (gornje granice eksplozivnosti), smjesa neće eksplodirati. Ako su u smjesi gorivi plin ili prah i kisik prisutni u stehiometrijskoj količini (tj. ako je kisika prisutno toliko i samo toliko koliko je potrebno za potpuno sagorijevanje), maksimalna se količina topline prenosi na minimalnu količinu produkata reakcije, te se postižu najviše temperature i pritisci, tj. takva je smjesa najeksplozivnija.

Međutim, treba imati u vidu da se promjenom početnog pritiska i temperature granice eksplozivnosti mijenjaju, te neka smjesa koja pod običnim uvjetima nije eksplozivna može postati eksplozivna ako joj se povisi pritisak i/ili temperatura, a eksplozivna smjesa prestaje da bude eksplozivna ako joj se pritisak i/ili temperatura snizi. Na granice eksplozivnosti mogu utjecati

također način paljenja, vlaga, mjesto gdje su se gorivi plinovi nakupili i sastav negorivih plinova u smjesi.

Inicijaciju kod eksplozija u rudniku redovito predstavlja povišenje temperature iznad određene temperature paljenja plamenom ili iskrom. Na temperaturi paljenja mora se smjesa nalaziti izvjesno vrijeme, da bi se upalila. To vrijeme može iznositi i do 10 s, a grijanjem iznad temperature paljenja smanjuje se to više na što se višu temperaturu smjesa zagrije. Pokusima je dokazano da se gorivi plin pod sniženim pritiskom pali sporije a pod povišenim brže. Praktično to znači da je u dubokim jamama mogućnost zapaljenja gorivog plina veća nego što to pokazuju pokusi vršeni na površini zemlje.

Nagla ekspanzija plinova pri eksploziji očituje se kao snažan *zračni udar* koji prevrće jamsku podgradu i jamska kolica, oštećuje jamske pruge, zarušava jamske prostorije, obara i odbacuje ljude itd. Zračni je udar najjači na mjestu gdje je eksplozija nastala, a jenjava podalje od tog mjesta.

Nakon eksplozije plinovi se brzo hlade na temperaturu koja obično vlada u jami. Time im se volumen naglo smanjuje, vodena para u njima se kondenzira; u jami nastaje depresija koja uzrokuje kratko vrijeme nakon prvog zračnog udara drugi, *povratni udar*, koji u rudniku može napraviti isto toliku štetu i pustoš kao početni udar eksplozije.

U osnovi se razlikuju tri vrste eksplozija u rudnicima: eksplozija eksplozivne smjese metana i zraka, zvane *praskavi plin*, eksplozija požarnih plinova i eksplozija ugljene prašine. Drugi upaljivi plinovi stvaraju se u rudnicima vrlo rijetko u koncentracijama iznad donje granice eksplozivnosti.

Praskavi plin. Praskavim plinom naziva se u rudarstvu smjesa metana i zraka određenog omjera koja je zapaljiva i može eksplodirati. Pojave metana u rudnicima nisu vezane za određenu geološku formaciju, pa se metan stvara i danas u prirodi svugdje gdje su ostaci organskih tvari podvrgnuti pougljivanju bez pristupa zraka. No ima dosta rudnika, pa i rudnika kamenog ugljena, u kojima se metan ne pojavljuje.

Do prodiranja metana iz ugljena ili susjednih stijena u jamske prostorije dolazi čim se plinonosni ugljeni sloj otvori jamskim radovima. Metan pridolazi u jamski zrak jednoličnim izdvajanjem plina iz ugljena ili susjednih stijena, nenadanom jakom provalom, ispuhivanjem plina ili prodorom plina iz starih napuštenih prostorija. Iz plinonosnih naslaga metan se izdvaja neprekidno u manjoj ili većoj količini. Brzina prodiranja metana ovisi o propusnosti ugljena ili susjednih stijena i tlaku pod kojim se plin nalazi. Često se pri prodiranju plina čuje puketanje ili šum što nastaje udaranjem metana i vrlo sitnih komadića ugljena o stijenske šupljine. Pri rudarskim radovima otvaranja u jalovini može se pojaviti jednolično izviranje metana ako su naslage blizu ugljenih slojeva porozne ili rascupane.

Osim jednoličnog naviranja metana, u ugljenokopima dolazi katkada i do nenadanih jakih provala metana. U takvom slučaju metan može pratiti i ugljični dioksid. Provala može uslijediti tako naglo da vjetrova struja u jami ne može savladati količine plina. Mogućnost ovakvih provala raste s dubinom. Provala plina može se očekivati osobito ondje gdje metan nije imao prilike da izduši. Zato su ovakvim provalama češće izvrgnuti radovi prilikom otvaranja i grube pripreme u netaknutim dijelovima rudišta. Mjesta izvora ovakvih provala mogu biti tektonski poremećaji, gdje su u sloju nastala i gnijezda ugljene prašine. Tektonskim poremećajem stvaraju se fina ugljena prašina i zrakoprazne šupljine, pa se oslobođeni metan može u velikim količinama nakupiti u tim praznim prostorima i ugljenoj prašini koja ga zbog velike sorpcione sposobnosti vezuje. Dođe li se jamskim radovima do takve zone gdje se metan nalazi pod velikim tlakom, ili se uslijed miniranja stvore pukotine, metan će se naglo osloboditi i provaliti u jamske prostorije. Ako je rudište jako ispresijecano manjim ili većim pukotinama, a ove su pukotine ispunjene plinom pod većim tlakom, plin će prodirati u jamske prostorije čim se ovakva pukotina radovima presiječe ili navrta. Ovo prodiranje plina u jamske prostorije može biti tako jako da nastane »ispuhivanje« plina. Razlika je između ispuhivanja i provala plina u količinama. U metanskim jamama plin se može nakupljati u svim jamskim prostorijama, a naročito u višim, koje nisu dovoljno provjetravane. Tu se često nakupe velike količine plina koji uslijed novog pritjecanja može

prodrijeti i u ostale jamske prostorije. Veće količine plina iz starih napuštenih prostorija mogu naglo prodrijeti u ostale prostorije i uslijed zarušavanja krovine. I visina barometarskog tlaka ima izvestan utjecaj na količinu plina i njegovo prodiranje iz starih radova. Pri jednoličnom tlaku plin će stalno izlaziti u jednakoj količini. Kad barometarski tlak raste, raste i otpor protiv izdvajanja te će se izlaženje plina smanjiti i usporiti. Kad barometarski tlak padne, prodiranje se plina pojačava. Kad metan proдре u jamske prostorije na bilo koji od opisanih načina, može se stvoriti praskavi plin.

S obzirom na stupanj opasnosti i potrebe poduzimanja odgovarajućih preventivnih mjera, jame ugrožene od metana ili dijelovi jama dijele se u tri kategorije. To su: I kategorija, s pojavom količine metana manjom od 5 m³, II kategorija, s pojavom količine metana od 5 do 10 m³, i III kategorija, s pojavom količine metana većom od 10 m³ po toni prosječne dnevne proizvodnje. Metan je lakši od zraka pa će se nakupljati u gornjim dijelovima jamskih prostorija.

Granice eksplozivnosti praskavog plina u normalnim prilikama su 5% i 14% CH₄, najeksplozivnija smjesa sadrži 9,5% CH₄. Međutim, ako se na jednom mjestu u rudniku utvrdi da je sadržaj metana izvan navedenih granica, ili da je uslijed povišenog sadržaja CO₂ ili N₂ u plinskoj smjesi ova postala neeksplozivna, iz toga se ne smije zaključiti da nema opasnosti jer metan ne mora biti svugdje jednakomjerno rasprostranjen.

U plinskoj smjesi sa više od 14% CH₄ plamen rudarske lampe se ugasi a disanje je otežano. Ni s gledišta eksplozivnosti takav jamski zrak nije neopasan jer se u jami može naći i prostor u kojem je količina metana u zraku manja; ako u tom prostoru nastane eksplozija praskavog plina, ona može atmosferu u rudniku tako uzvitali da i u prostorima s većim sadržajem metana nastaju razrijeđene eksplozivne smjese.

Isto se tako i smjesa s manje od 5% metana ne smije smatrati neopasnom; i u ovom slučaju može se smjesa djelovanjem mina ili eksplozijom ugljene prašine naglo zgusnuti i postati eksplozivna. Manje količine opasne ugljene prašine mogu u ovakvim slučajevima dostajati za pojačanje eksplozije. Svaka, pa i mala, eksplozija može se širiti kroz prostorije s manjim sadržajem metana i djelovati znatno dalje nego u čistom zraku. I najmanja pojava metana ukazuje na izvore ovog plina, a uslijed nepredviđenih i nenadanih uzroka može se naglo pojačati njegovo prodiranje iz tih izvora pa se tako i pri malom poremećaju pravilnog strujanja zraka može brzo nakupiti opasna količina metana.

Temperatura paljenja praskavog plina iznosi 650–660 °C. Na temperaturi od 1000 °C praskavi plin se zapali neizmjerljivo brzo. Temperatura eksplozije praskavog plina s optimalnim sadržajem od 9,5% iznosi 2650 °C; ta temperatura postaje sve niža kad se sastav smjese približava granicama eksplozivnosti, tako da pri sadržaju 5 i 14% CH₄ iznosi 1500 °C.

Požarni plinovi. Najneugodnija je pojava u rudniku požar. Dok se požar na površini prikladnim mjerama mahom može razmjerno brzo ograničiti i ugaziti, požar u rudniku često je vrlo teško suzbiti. Kad se jamski požar ne može ugaziti izravnim sredstvima za gašenje, potrebno je spriječiti pristup svežeg zraka do dijela jame gdje je vatra. Kad se na primjer ugljen upali u samom sloju pa je direktno gašenje nemoguće, ili ako uslijed dima, plinova i velike vrućine nije moguće približiti se mjestu požara, mora se taj dio jame zatvoriti požarnim pregradama. U zatvorenom dijelu jame požar će se konačno ugaziti zbog nedostatka kisika. Istovremeno se u području izoliranom požarnim pregradama redovno stvaraju požarni plinovi. Kemijski sastav požarnih plinova ovisi o veličini požara i intenzitetu sagorijevanja. Analizama je utvrđeno da u rudnicima ugljena požarni plinovi sadrže CO, CO₂, N₂, CH₄, a rjeđe H₂, H₂S i teške ugljikovodike. Ugljik-monoksid je utvrđen tako reći u svim požarnim plinovima u količini i do 6%. Sadržaj ugljik-dioksida varira između 0,1 i 9% a kisika između 9 i 20,5%. Dušik nema utjecaja na sagorijevanje. Količina metana varira od 0 do 95%. Vodik i teški ugljikovodici pojavljuju se razmjerno rijetko. Oni se smatraju plinovima šelovanja koji izgaraju kad se ugljen u požaru zapali. Sadržaj vodika najčešće dostiže 1% a iznimno i do 5%; teški se ugljikovodici (etilen, propilen itd.) javljaju u količinama manjim od 1%. Sumporovodik se javlja vrlo rijetko i to ne kao primarni plin već pri-

likom rastvaranja pirita. Tablica u nastavku daje pregled analiza požarnih plinova u ugljenokopima.

ANALIZE POŽARNIH PLINOVA U UGLJENOKOPIMA

Plin	Udio, %		
	najmanji	najveći	najčešći
CO	tragovi	6,0	1
O ₂	9,0	20,5	19
CO ₂	0,1	9,0	8
N ₂	2,0	93,0	78
CH ₄	tragovi	95,0	2
H ₂ i teški ugljikovodici	tragovi	5,0	1

Eksplozija požarnih plinova može nastati samo dodiranjem s plamenom požara. Eksplozija nastaje zapaljenjem mješavine više sagorivih plinova, kao što su CO, CH₄, H₂ i teški ugljikovodici. Opasnost od eksplozije u slučaju jamskih požara pri postavljanju požarnih brana nastaje u prvom redu uslijed povećanja sadržaja CH₄. Dodatne količine metana mogu nastati procesima švelovanja i koksovanja. U izvjesnim uvjetima, pri takvim procesima povećava se opasnost od eksplozije stvaranjem vodika i teških ugljikovodika. Eksplozija požarnih plinova može biti toliko snažna da razori požarne pregrade. Tada može nastati još veća opasnost jer se poremeti predviđeni tok vjetrove struje i metan iz ostalog dijela jame može se nakupiti u požarnom predjelu te stvoriti praskavu smjesu. U dodiru s plamenom doći će do nove eksplozije.

Ugljena prašina. Svaka disperzija prašine organskih tvari u zraku, pa tako i ugljene prašine, može eksplodirati. Ugljena prašina nastaje u svim rudnicima ugljena u kojima su ugljeni slojevi suhi i skloni drobljenju, a najviše se stvara u rudnicima kamenog uglja. Ugljena se prašina stvara djelomično od pritiska gorja, a djelomično kod svih vrsta rudarskih radova, počevši od rada na otkopu pa do utovara u vagone na površini. U rudniku vjetrova struja nosi ugljenu prašinu te se ona s vremenom usjeda na svim zračnim putevima po podu, bokovima, stropu i podgradama rudničkih prostorija, a i u manjim pukotinama. Kako je ova usjela prašina vrlo fina, ona se uslijed bilo kakvog zračnog udara može uzvitlati i ponovo dispergirati u jamskom zraku, stvarajući oblak opasne gustoće. U rudnicima ugljena u kojima se uz opasnu ugljenu prašinu javlja i metan, opasnost se od eksplozije povećava. Na stupanj eksplozivnosti ugljene prašine i na snagu i doseg eventualne eksplozije utječe cio niz faktora od kojih su najvažniji: kemijski sastav i fizikalna svojstva ugljena, količina usjele prašine u jamskim prostorijama, karakteristika prvotnog oblaka prašine, početni uzrok eksplozije (zapaljenja), prisutnost metana u jamskom zraku.

Da bi došlo do eksplozije ugljene prašine, potrebno je da nastane oblak određene gustoće i da se prašina u tom oblaku zapali. Da bi oblak nastao, potreban je zračni udar, a da bi se zapalio, potreban je plamen.

Stupanj eksplozivnosti dispergirane prašine u prvom redu zavisi od vrste i količine plinova nastalih prilikom zagrijavanja čestica ugljena. Prema jugoslavenskom pravilniku, prašina ugljena koja sadrži više od 14 težinskih postotaka hlapljivih sastojaka (računato na čisti ugljen) ima se smatrati eksplozivnom. Kad se ugljena prašina zagrije plamenom bilo kojeg izvora, naglo će se izlučivati hlapljivi sastojci, smjesa izlučivanih plinova i zraka upalit će se na plamenu i izazvati eksploziju. U praksi treba imati u vidu da ugljen pojedinih ploča jednog te istog ugljenog sloja može sadržati veću količinu hlapljivih sastojaka nego prosjek cijelog sloja, što ovisi i o petrografskom sastavu. Ako plamen dođe u kontakt s oblakom ugljene prašine koja sadrži manje od 14% hlapljivih sastojaka, pojavit će se izvjesno isplinjavanje, ali neće doći do koncentracije gorivog plina koja bi izazvala eksploziju. Najviše sklona eksploziji i time najopasnija jest ona ugljena prašina koja i na nižoj temperaturi otpušta veću količinu hlapljivih sastojaka s velikim sadržajem gorivih plinova.

Voda koju ugljen sadrži smanjuje eksplozivnost ugljene prašine. Isparivanje vode iz ugljena u eksploziji smanjuje koncentraciju ugljene prašine, obavlja čestice prašine opnom pare i time otežava pristup kisika. Sadržaj vode u ugljenu opada sa finoćom prašine. Tako je za neku vrstu ugljena utvrđeno da prašina

koja je prošla kroz sito s veličinom očica od 0,34 mm sadržava 4,66% vode dok prašina koja je prošla kroz sito s veličinom očica od 0,075 mm sadržava samo 2% vode.

Od fizikalnih svojstava prašine važni su finoća i sposobnost lebdjenja. S povećanjem finoće povećava se površina dodira sa zrakom u odnosu na volumen čestica a time pri zagrijavanju i brzina isplinjavanja. Kod finije prašine potrebna je niža temperatura za paljenje a to znači da s finoćom prašine raste i njena zapaljivost. Praktično se može reći da prašina sa česticama većim od 0,1 mm teško eksplodira. Smanjenjem krupnoće čestica povećava se sposobnost brze reakcije s kisikom i ujedno raste sposobnost lebdjenja. Prema tome, stupanj eksplozivnosti ugljene prašine raste sa smanjenjem promjera čestica ali samo do stanovite granice. Tako se najfinija prašina reda veličine čestica ispod 10 μm teže uzvitlava kod slabijih zračnih udara nego krupnija jer je otpor zraka prema gibanju čestica to veći što je manji promjer čestica. Slabiji zračni udar u jami najlakše će uzvitlati usjelu prašinu u gornjem dijelu jamskog prostora. Za padanje prašine odzgo treba manja energija udara zraka nego za njeno prodiranje iz donjih dijelova jamske prostorije naviše. Tako su kod slabog zračnog udara teži uslovi za stvaranje oblaka opasne gustoće po cijelom profilu jamske prostorije. Što je profil veći to je manja mogućnost nastanka opasnog oblaka.

Sva usjela ugljena prašina na radišću ne uzvitla se potpuno pri svakom zračnom udaru. Zato se za pojedine vrste ugljena traži granična gustoća oblaka prašine pri kojoj u dodiru s plamenom može eksplodirati. Kako je kemijski sastav pojedinih ploča jednog te istog sloja često različit, može biti različita i potrebna gustoća oblaka a može biti potrebna i različita temperatura plamena da dođe do zapaljenja.

Teorijski računato na bazi sagorijevanja čistog ugljika, naj-snažnija će se eksplozija odigrati pri koncentraciji prašine od 112 g/m³, jer će se tada sva ugljena prašina vezati sa svim kisikom iz zraka i obrazovati ugljik-dioksid. Pri tom će se razviti temperatura od 2492 °C. Praktično se uzima da je najjača eksplozivnost pri koncentraciji od oko 120-130 g/m³. Mišljenja su stručnjaka o donjoj i gornjoj granici eksplozivnosti disperzije ugljene prašine različita, jer na te granice utječe cio niz faktora, ovisnih i o mjesnim prilikama, no uzima se da one iznose 27 i 8000 g/m³. Pri normalnom radu u jami rijetko se susrećemo s gustoćom većom od donje granice; jedino u iznimnim slučajevima, kao što je prevrtanje vagoneta i sl., koncentracija prašine može naglo porasti.

Koncentracija od 100 g prašine u kubnom metru zraka daje već snažnu eksploziju. Ta količina jednakomjerno raspodijeljena i usjela na površinu od 1 m² daje sloj prašine od svega 0,1 mm debljine. Toliko tanak sloj prašine može se nalaziti gotovo po cijeloj jami. Stoga eksplozija ugljene prašine može zahvatiti velike prostore u rudniku. Redovno se na radišćima od prvog zračnog udara stvara oblak manje gustoće; ako se taj upali i eksplodira, zračni će val djelovati na usjelu prašinu u ostalim jamskim prostorijama, uzvitlati je i stvoriti guste oblake. Od plamena prve eksplozije prašina će se upaliti i nastat će dalje eksplozije. S tog razloga eksplozija ugljene prašine redovno zahvaća velika prostranstva u rudniku.

Na radišćima se nalaze neravnomjerno raspodijeljene različite količine ugljene prašine različite granulacije i različitog sadržaja nesagorivih sastojaka. Svi ti faktori utječu na mogućnost postanka prve eksplozije i prema tome razvoj eksplozije ugljene prašine ovisi o karakteristikama prvotnog oblaka: o njegovoj gustoći, temperaturi zapaljenja i energiji eksplozije.

Prisutnost metana u jamskom zraku jako olakšava nastanak eksplozije ugljene prašine. Često manja lokalna eksplozija praskavog plina uzvitlava u okolini usjelu ugljenu prašinu i svojim plamenom izaziva njenu eksploziju. Istodobna prisutnost metana i ugljene prašine u jami uvijek je vrlo opasna, jer disperzija ugljene prašine u zraku koji sadrži metan može biti eksplozivna i u slučajevima kad metan i ugljena prašina, odvojeni, ne daju sa zrakom eksplozivnu smjesu. Prašina nekog ugljena u čistom zraku, električki zapaljena, eksplodirala je u pokusnom rovu pri gustoći oblaka od 46,5 g/m³, a ista prašina uz primjesu svega 1,7% metana eksplodirala je već pri gustoći oblaka od 34 g/m³. Zato se mjere opreza u jami s opasnom ugljenom prašinom moraju znatno poostriži ako je u jami primijećena i najmanja pojava metana.

Smjesa ugljik-monoksida i zraka redovno nastaje u rudnicima ugljena kad se zapali ugljen na mjestu gdje ne prolazi dovoljna količina zraka. Veće količine ovog plina stvaraju se i pri gorenju drvene podgrade ako plamen zahvati veće količine drva, a osobito pri gašenju vodom. Ugljik-monoksid je vrlo otrovan plin i pomiješan sa zrakom u količini od 12,5% do 75% tvori eksplozivnu smjesu; međutim, ako u smjesi nema bar tragova vlage, ona ne eksplodira. Naj snažnije eksplodira smjesa u kojoj ima 28,6% ugljik-monoksida. Tako koncentrirane smjese ugljik-monoksida sa zrakom obično ne nastaju u rudnicima; zapaženo je najviše 6%. Unatoč tome potrebna je u rudnicima na stanovitim mjestima opreznost, osobito pri pregledu požarnih pregrada, gdje može biti povišena temperatura a kroz pukotine može izbijati ugljik-monoksid.

Smjesa sumporovodika i zraka. Sumporovodik nastaje pri truljenju organskih supstancija koje sadrže sumpor. U jami nastaje u starim i napuštenim jamskim prostorijama u kojima se nakuplja voda i gdje trune zaostalo drvo. Vode koje ispunjavaju pukotine ugljenonosnih naslaga također mogu sadržati ovaj plin. Pogodno je za stvaranje ovog plina da ugljen sadrži uprskani pirit. Voda vrlo pohlepno apsorbira sumporovodik: 1 l vode na 15 °C i pri normalnom barometarskom tlaku upija 3,23 l plina. Ako se voda nalazi pod većim tlakom, ona apsorbira znatno veće količine. Kad rudarski rad naide na vodom ispunjene pukotine ili staru napuštenu jamsku prostoriju, smanjuje se u njoj tlak i iz vode se oslobađaju i veće količine ovog plina. Sumporovodik je vrlo otrovan plin odvratnog vonja po pokvarenim jajima. On tvori sa zrakom eksplozivnu smjesu kad ga u njemu ima od 5,4 do 45%.

Smjesa vodika i zraka eksplozivna je u granicama od 4,1% do 74,2% vodika. Najjača eksplozija nastaje kad smjesa sadrži 28,6% vodika. Vodik se javlja u rudnicima kalijumove i kamene soli, zatim s metanom u izvorima zemnog plina, a rijetko u rudnicima kamenog ili mrkog ugljena. U rudnicima soli nalazi se katkada nakupljen u šuplinama, te može nenadano prodrijeti u rudničke prostorije s metanom, ugljik-dioksidom i dušikom. Vodik se pali na temperaturi od 580-590 °C, dakle na nižoj temperaturi nego metan. Djelovanje eksplozije praskavog plina pojačava se prisutnošću vodika.

Smjesa etana i zraka. U mnogim rudnicima ugljena javlja se katkada uz metan i etan. Očekivati se može osobito tamo gdje ispod ležišta ugljena ili u blizini njega ima pojava nafte. I najmanja primjesa etana praskavom plinu čini praskavi plin još opasnijim. Smjesa etana i zraka eksplodira mnogo snažnije od smjese metana i zraka, a može se upaliti već na temperaturi od 620 °C. Donja je granica eksplozivnosti smjese etana i zraka već kod 3,1% etana, a gornja kod 15%. Najjača eksplozija ove smjese nastaje kad ona sadrži 5,6% etana. Za utvrđivanje etana nema indikatora kao za utvrđivanje prisutnosti metana, već se etan može ustanoviti jedino kemijskom analizom.

Uzroci, širenje i posljedice eksplozije. Da se praskavi plin ili ugljena prašina zapali, potreban je dovoljno jak i vruć plamen. Redovni su uzroci zapaljenja praskavog plina ili ugljene prašine plamen rudarske svjetiljke s otvorenim plamenom, neispravna benzinska sigurnosna svjetiljka, plamen od nepravilnog miniranja, jamski požar, nedozvoljeno paljenje vatre, iskre koje nastaju pri radu ili iskre od kratkih spojeva u električnim uređajima.

Rudarske svjetiljke mogu biti iz raznih uzroka povod zapaljenja praskavog plina. Osobito su opasne, iz razumljivih razloga, otvorene svjetiljke, pogotovo i zato što se metan iznenada može pojaviti i u jamama koje su službeno proglašene nemetanskim. Nisu potpuno sigurne ni benzinske sigurnosne svjetiljke jer im se pri radu može oštetiti mrežica ili staklo cilindra, ili se pak mrežica uslijed nepravilnog rukovanja može uzariti.

Miniranje može biti uzrok zapaljenja praskavog plina ili ugljene prašine ako se primjenjuje nedozvoljena vrsta eksploziva ili nedozvoljena količina primjenljivog eksploziva, ili se vrtine nepravilno začepljuju tako da iz njih izbije plamen. Na radnim mjestima gdje se odjednom pali više mina dovoljno je da plamen samo jedne mine izbije iz vrtine pa da to uzrokuje eksploziju.

Jamski požari mogu nastati iz raznih uzroka, a najčešće nastaju uslijed oksidacionih procesa koji postepeno dovode do samozapaljenja i do samozapaljenja ugljena. Ako na žarište rudničkog

požara vjetrena struja dovede praskavi plin ili ugljenu prašinu određene koncentracije, oni će se upaliti i nastat će eksplozija.

Nedozvoljeno paljenje vatre, kao paljenje šibica ili upaljača, pušenje, upotreba svjetiljki za lemljenje, aparata za zavarivanje i sl., sve to daje otvoren plamen i najlakši je povod za zapaljenje eksplozivne smjese. Pojedinačne iskre od udara radnog oruđa praktično su neopasne, ali opasan uzročnik mogu biti električne iskre. Za postanak iskre potrebno je to manje struje i električna je iskra to snažnija što je niža temperatura topljenja tvari na mjestu prekida i što je manja mogućnost odvođenja topline sa tog mjesta. Kod istosmjerne struje dolazi lakše do iskara i trajnijega plamena nego kod izmjenične struje. Prema ispitivanjima, električna iskra najlakše pali praskavi plin koji sadrži 8,3% metana. Užarena žica žarulje, kad se razbije staklo, redovito upali praskavi plin. Općenito kod svih električnih uređaja u rudniku nastaje opasnost kad iz njih izbije plamen.

Za paljenje ugljene prašine potreban je veći i vrući plamen nego za paljenje praskavog plina. Svaka eksplozija ugljene prašine odigrava se u dvije međusobno povezane faze. U prvoj fazi upali se od plamena izvjesna količina najfinijih čestica ugljena. Razvijena toplina prouzrokuje pojavu destilacije i švelovanja s izdvajanjem gorivih produkata. U drugoj se fazi ti gorivi produkti nakupljaju i zapale, te se taj proces ponavlja velikom brzinom i u vrlo kratkim vremenskim razmacima. Tako se lebdeća ugljena prašina dalje pali vlastitim razvojem topline i vatre. Naglim porastom topline jako se povećava i tlak pa dolazi do pojačanog kontakta čestica prašine s molekulama kisika, čime se gorenje i dalje ubrzava. Tako se toplina i tlak stalno povećavaju, a njihovim uzajamnim djelovanjem raste brzina gorenja kojom se širi eksplozija u eksplozivnoj smjesi. Izaziva se tlačni val koji u daljim jamskim prostorijama uzvitalava ugljenu prašinu i mijenja fizikalne uslove smjese, tj. tlak i temperaturu, a time i brzinu širenja.

Brzina prijenosa plamena, odnosno širenja eksplozije, ovisi o visini tlaka i temperature praskavog plina i disperzije ugljene prašine. Što je plin ili disperzija prašine pod većim tlakom to će biti veća i brzina širenja plamena. Pri eksploziji tlak vala raste i temperatura se povisuje. Pokusima je dokazano da brzina širenja eksplozije može dosegnuti i blizu 2300 m/s.

Brzinu širenja eksplozije karakterizira brzina širenja plamena, te neki stručnjaci na bazi ispitivanja razlikuju tzv. blage eksplozije s brzinom širenja 200 m/s, srednjojake do 500 m/s i vrlo jake do 2000 m/s pa i više. Pokusima je dokazano da kod vrlo jakih eksplozija pritisak može dosegnuti i do 10 at. Kod jake i nagle eksplozije može se plamen eksplozije prenijeti preko mjesta gdje ima malo ugljene prašine, i preko mjesta gdje je uopće nema, pa na drugom mjestu opet upaliti uzvitalanu ugljenu prašinu. Zato eksplozija ugljene prašine može prostrujati gotovo kroz cijelu jamu, dok će se eksplozija praskavog plina odigrati samo tamo gdje se taj plin nalazi. Mehaničko djelovanje eksplozije ugljene prašine nije najjače na izvornom mjestu već postepeno raste s udaljenošću, do mjesta gdje je najjače stlačena smjesa koja ovako zgusnuta pod povišenim tlakom eksplodira.

Kod eksplozije ugljene prašine izgore najfinije čestice, dok grublje čestice obgore i djelovanjem se topline skokuju. Poslije eksplozije obično se po zidovima, stropu i podgradi vidi koksna kora.

Smjer djelovanja eksplozije praskavog plina ili ugljene prašine može se odrediti po smjeru prevrnutih stojki podgrade, po smjeru potisnutih zračnih vrata, prevrnutih vagoneta i prebačenih drugih predmeta za koje se zna gdje su prvotno bili. Međutim, u duljim se hodnicima događa da je jedan dio stojki prevrnut u jednom pravcu a drugi u suprotnom. To se tumači tako da je jedan dio prevrnut od djelovanja zračnog udara eksplozije a drugi dio od zračnog protudara nakon eksplozije.

Eksplozija u jami pokazuje se dimom i uzvitalanom gustom prašinom, osobito u jamskim prostorijama na strani izlazne vjetrove struje. Kemijski sastav plinova nakon eksplozije vrlo je različit već prema tome da li se radi o eksploziji samo praskavog plina ili praskavog plina i ugljene prašine ili pretežno same ugljene prašine.

Pri eksploziji potroši se stanovita količina kisika iz jamskog zraka, što ovisi o količini metana u praskavom plinu. Pri sadržaju metana od 9,5%, plinovi poslije eksplozije sastoje se od ugljik-

-dioksida i dušika. Eksplozira li praskavi plin s manje od 9,5% metana, plinovi se poslije eksplozije sastoje od ugljik-dioksida, dušika i viška kisika. Eksplozira li praskavi plin sa sadržajem metana većim od 9,5%, plinovi se poslije eksplozije sastoje od dušika, ugljik-dioksida, ugljik-monoksida i viška metana. Uslijed zračnog protudara nastali se plinovi brzo pomiješaju sa svježim zrakom izvana ili iz drugih jamskih postorija, pa se brzo poslije eksplozije može ustanoviti izvjesna količina kisika makar je u nekim prostorijama sav kisik bio utrošen na eksploziju. Kod svake veće eksplozije mora se računati također s prisutnošću veće ili manje količine ugljik-monoksida i ugljik-dioksida. Toksična granica za ugljik-monoksid iznosi 0,01%, a za ugljik-dioksid 5...6%.

U stručnoj literaturi se navodi da je prosječni sadržaj plinova poslije eksplozije praskavog plina i ugljene prašine približno ovaj: dušik 80...85%, kisik 12...17%, ugljik-dioksid 4...7%, ugljik-monoksid 0,5...1,5%.

Otrovni plinovi mogu se još izvjesno vrijeme poslije eksplozije nalaziti u jamskim prostorijama; zbog toga se u jamu ili u ugroženi dio jame smije ulaziti bez maske samo ako je uspostavljeno pravilno provjetranje jame. Ide se oprezno u smjeru ulazne svježe zračne struje.

Pored zračnog udara eksplozije i povratnog zračnog udara, eksplozija u rudniku može izazvati i požar jer će se lakoupaljive tvari, ako ima dovoljno kisika, upaliti i gorjeti. U rudničkim prostorijama zahvaćenim eksplozijom zaposleno osoblje strada od mehaničkog i termičkog djelovanja, ali obično najviše (80%) od gušenja ili trovanja plinovima.

Eksplozije drugih navedenih plinova koji sa zrakom tvore eksplozivnu smjesu događaju se u rudnicima vrlo rijetko, manjeg su obima i lokalnog značenja, te su u posljedice takvih eksplozija manje.

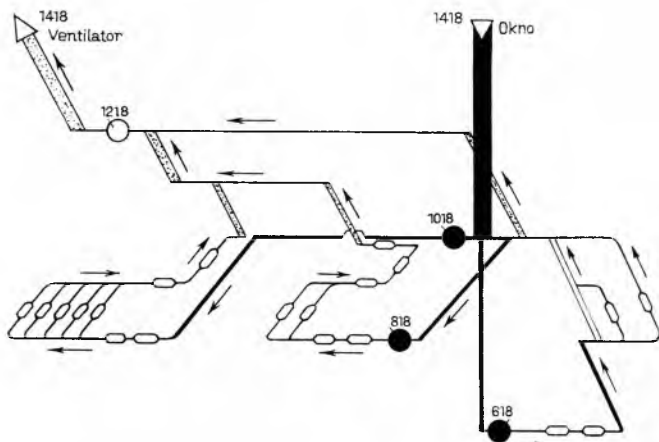
Plamenom eksplozije praskavog plina može se vrlo lako upaliti uzvitlana ugljena prašina te tako nastaje kombinirana eksplozija praskavog plina i ugljene prašine. Ta eksplozija može prouzročiti jamski požar, na kojem se može povratnim udarom doneseni još neutrošeni praskavi plin zapaliti i izazvati drugu eksploziju.

OBRANA OD EKSPLOZIJA U RUDNICIMA

Tri se osnovna načina obrane od eksplozije i njezinih posljedica paralelno provode: 1. sprečavanje stvaranja eksplozivne smjese zraka i metana, odnosno ugljene prašine, 2. obrana od same eksplozije, i 3. ograničenje nastale eksplozije na što uži prostor i sprečavanje prijenosa u dalje rudničke prostorije.

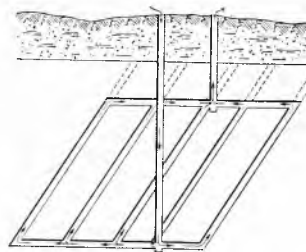
Iako su u načelu obrana od eksplozije praskavog plina i obrana od eksplozije ugljene prašine jednake, ipak postoje u pogledu načina provođenja obrane neke razlike.

Obrana od eksplozije praskavog plina. Najbolje preventivno sredstvo obrane od eksplozije praskavog plina jest sprečavanje stvaranja opasne smjese zraka i metana. U tu svrhu moraju se jamske prostorije provjetravati obilnom količinom zraka i takvom brzinom strujanja da se praskavi plin razrijedi do neopasne koncentracije metana. Metanske jame moraju se provjetravati stalno na umjetan način pomoću ventilatora, bez obzira na mogućnost prirodnog vjetrenja. Jamu treba razvijati tako da ima što više



Sl. 2. Shema ventilacije jame sa samostalnim vjetrenim odjeljenjima. (Brojke označuju nivoce nadmorske visine.)

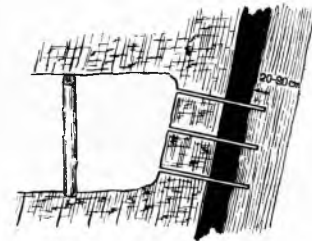
samostalnih vjetrenih odjeljenja (sl. 2) jer se tada zrak nakon prolaska kroz jedno vjetreno odjeljenje odvodi u izlaznu vjetrenu struju i ne može povući sa sobom praskavi plin iz jednog odjeljenja u drugo. Po pravilu, treba primijeniti periferno i uzlazno vjetrenje (sl. 3) jer će se metan lakše i sigurnije odvoditi budući da, kao specifično lakši od zraka, i sam odlazi u gornje dijelove jame. Metan ponajviše izlazi na čelu radilišta pripremnih hodnika a zatim i na svim novootvorenim površinama hodnika. Metan



Sl. 3. Shema uzlazne ventilacije

koji se oslobađa iz površine jamskih prostorija ima stanovite tačke infiltracije u zračnu struju. Mjesta izbijanja i količina metana u velikoj mjeri ovise o količini ugljena koji se ostavlja u krovini i podini, o pratećim tankim slojevima u krovinskim i podinskim naslagama, zatim o metodi eksploatacije i metodi ventilacije.

Rudnici s naglim provalama većih količina metana pod visokim tlakom preventivno se osiguravaju predvrtavanjem na čelima radilišta. Pri tom se kontrolira da li iz vrtnice izlazi plin i kakvom snagom. Kod radova otvaranja potrebno je predvrtavati osobito onda kad se čelo radilišta približava ugljenom sloju (sl. 4). U metanskim jamama preporučljivo je pret hodno otplinjavanje, što se radi bušotinama iz jame ili s površine. U mnogim je slučajevima tako smanjen sadržaj metana do dozvoljene granice te je omogućen rad u jami.



Sl. 4. Predvrtavanje kod radova otvaranja

Sigurnost u metanskim jamama najviše ugrožava upotreba eksploziva; u tim se jamama smije minirati samo metanski sigurnim eksplozivom. Na radilištima dozvoljeno je paliti mine samo ako u zraku ima manje od 2,5% metana. Vrtine dozvoljeno je puniti samo određenom količinom metanski sigurnog eksploziva, u nas maksimalno 600...800 g. Mine se pale isključivo električnim putem pomoću upaljača, strojeva za električno paljenje i vodova. U ovakvim jamama vodovi za paljenje mina moraju biti izolirani, stroj za paljenje mina mora biti osiguran da iskrom ne može upaliti praskavi plin i smiju se upotrebljavati samo upaljači u kojih su svi dijelovi, osim punjenja, nesagorivi.

Budući da miniranje u opasnim jamama najviše ugrožava sigurnost, u novije se vrijeme u rudnicima ugljena upotrebljavaju strojni uređaji za dobivanje koji potpuno nadomještaju miniranje. O tome v. *Dobivanje (rudarsko) bez upotrebe eksploziva*.

I jamski požari mogu biti uzročnici eksplozije praskavog plina. Rasstvaranje, priprema, otkopavanje i vjetrenje rudnika moraju se planirati i izvoditi tako da ne može doći do jamskog požara. Stupanj sklonosti ugljena samozapaljenju treba unaprijed utvrditi u laboratoriju i prema tome izraditi projekt za suzbijanje požara.

Nije dopušteno u ugrožene rudnike unositi šibice ni cigarete, ni upotrebljavati bilo kakve naprave koje rade otvorenim plamenom. Svi električni strojevi i uređaji (elektromotori, transformatori, rasvjetna tijela, sklopke i dr.) moraju biti zatvorene izvedbe i posebno izvedeni po naročitim propisima, tzv. S-propisima, i prije upotrebe ispitani. Tom izvedbom ne može se spriječiti da eksplozivne smjese ulaze u kućišta ovih strojeva i uređaja ni da tamo nastane eksplozija, ali zatvorena izvedba sprečava da se odane eksplozija prenese na okolinu uređaja.

Obrana od eksplozije ugljene prašine. U rudnicima s opasnom ugljenom prašinom brzina vjetrene struje ne predstavlja, kao u rudnicima s praskavim plinom, efikasnu preventivnu mjeru protiv eksplozije, nego ona, naprotiv, povećava opasnost od eksplozije. Intenzivna vjetrena struja isušuje jamu, a to omogućuje jače stvaranje i lakše lebdenje ugljene prašine.

Osnovno je pravilo na svakom radilištu svodenje mogućnosti stvaranja prašine na najmanju mjeru. Tu se je kao osobito povoljan

pokazao postupak natapanja vodom cijelih stubova ugljena. Kroz posebne bušotine cijevima se utiskuje voda pod pritiskom od 15...20 at, u ovisnosti o raspucalosti i tvrdoći ugljena, pa ona putem pukotina i šupljina natopi cijeli ugljeni stub. Bušotine, promjera 40...45 mm i dubine 2...2,5 m, lociraju se na razmacima od 5...6 m, a natapanje traje 4...6 h.

U rudnicima u kojima se iz bilo kojih razloga ne može primijeniti natapanje treba tehniku miniranja prilagoditi postojećim uslovima tako da se onemogućiti stvaranje oblaka prašine opasne gustoće. Kao i u obrani od eksplozije praskavog plina, u jamama s opasnom ugljenom prašinom prvenstveno se moraju upotrebljavati strojevi s potiskujućim djelovanjem, da bi se razarajuće djelovanje miniranja svelo na najmanju moguću mjeru. Po pravilu, svi strojevi za dobivanje, transport i bušenje treba da budu opremljeni uređajima za automatsko hvatanje ili obaranje prašine. Korisna je i primjena raspršivača vode radi ovlaživanja čitavog čela radilišta i stvaranja sitnih kapljica koje izvjesno vrijeme lebde u zraku, sljepljuju se s česticama prašine i tako ih obaraju.

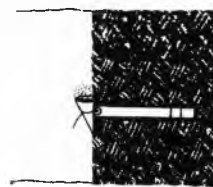
Kao i kod sprečavanja eksplozije praskavog plina, moraju se poduzeti sve mjere da se ne stvori jak i vruć plamen, a osim toga treba spriječiti stvaranje oblaka ugljene prašine opasne gustoće. Ako se stvaranje oblaka prašine ne može spriječiti, treba napraviti takvu mješavinu ugljene prašine i prašine nesagorivih tvari koja se nikakvim plamenom ne može upaliti. To su načelne postavke obrane od same eksplozije ugljene prašine.

Ovlaživanjem jamskih prostorija, pored toga što se sprečava stvaranje oblaka prašine, lebdećoj se ugljenoj prašini i oduzima sposobnost da eksplodira. Polijevanje i odstranjivanje ugljene prašine ima se osobito pomno vršiti na utovarnim mjestima u hodnicima, na važnijim križanjima i na svim mjestima gdje se smjer vjetrove struje naglo mijenja. Međutim, postupak obrane pomoću ovlaživanja ima i velikih nedostataka. Uvijek se mora računati s tim da izvjesna količina ugljene prašine ipak lebdi, a prašina se nekih posebno hidrofobnih vrsta ugljena teško veže ili nikako ne veže s vodom. Osim toga, ugljena prašina nošena vjetrovom strujom dospjeva u pukotine i nepristupne zakutke u jami gdje se usjeda, a takva se mjesta ne mogu polijevati. I ovlažena se ugljena prašina osuši pa ponovo postaje opasna i sposobna za lebdjenje.

U novije se vrijeme za obaranje ugljene prašine upotrebljava i kamena sol. Jamske se prostorije pospu tankim slojem soli (2...4 cm) koji se ovlaži vodom. Iz nastale otopine se pri isparavanju vode izlučuju solni kristalici koji potpuno obaviju ugljene čestice i tako onemogućuju njihovo uzvitlanje i lebdjenje. Postupak se može primijeniti u razmjerno suhim prostorijama, s relativnom vlagom između 55 i 75%, jer bi veća vlažnost zraka onemogućila isparavanje otopine. U vlažnim jamskim prostorijama upotrebljava se kalcijum-klorid, CaCl_2 , koji je higroskopan pa zračnoj struji oduzima vodu i njome vlaži čestice prašine, čime se onemogućuje njihovo lebdjenje. I kalcijum-klorid nanosi se na pod kao sloj (u vidu ljuščica), dok se bokovi, podgrada i strop prskaju pastom kalcijum-klorida i vode.

Najefikasnija, pa zato i danas još najviše primjenjivana obrana od eksplozije ugljene prašine sastoji se u zaprašivanju radilišta i ostalih jamskih prostorija kamenom prašinom. Ova se prašina dobiva mljevenjem suhog materijala u posebnoj mlinu, a mora ispunjavati ove uslove: kroz sito veličine očica 0,5 mm mora proći bez ostatka, a na situ veličine očica 0,075 mm smije biti najviše 50% ostatka; ne smije imati više od 15% gorivih sastojaka; ne smije biti higroskopna i mora biti neškodljiva za zdravlje ljudi. Ovim uslovima najbolje odgovara prašina dobivena mljevenjem vapnenca, pa se ona gotovo isključivo i upotrebljava. Samljevena se prašina ručno (lopatama) ili mehanički (uređajem na komprimirani zrak) raspraši u jamskim prostorijama, i to tako da lebdi u zraku kao i ugljena prašina. Dobiva se mješavina kamene i ugljene prašine, pri čemu se mora paziti da udio negorivih materija bude veći od 50%, jer tek takav sastav sprečava prijenos plamena i eksploziju. Kamena prašina vežući toplinu sprečava paljenje ugljena i prigušuje gorenje eventualno upaljene ugljene prašine ne dozvoljavajući da eksplozija postigne puno djelovanje. Ako se mješavina kamene i ugljene prašine koja je usjela i u nepristupnim zakucima jame ponovo uzvitla, ona ne predstavlja nikakvu opasnost jer nije zapaljiva.

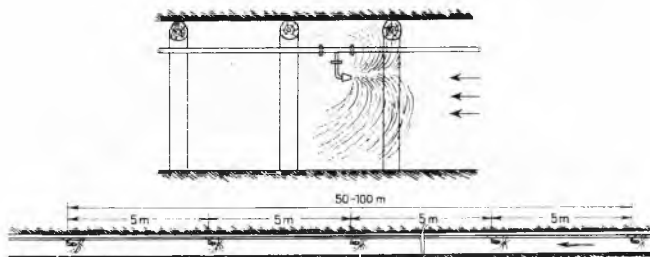
Radilište na ugljenu mora se prašiti najvećom pažnjom jer se tu stvara najviše prašine. Prije paljenja mina izdašno se praši u krugu od 5 m oko vrtine s bar 5 kg kamene prašine za svaku minu ili 10 kg ako se pali samo jedna mina. Pored toga svaka mina ima vanjski zalag kamene prašine, i to u jamama bez metana od 1 kg, a u jamama s metanom najmanje od 1,5 kg na svaku minu. Vanjski zalag kamene prašine postavi se tako da prašina stoji na samom otvoru vrtine te se smjesta pri eksploziji ili ispuhu mine uzvitla i okolinu vrtine učini neupaljivom. Takav vanjski zalag s otvorenim fišekom prikazan je na slici 5.



Sl. 5. Vanjski zalag s kamenom prašinom

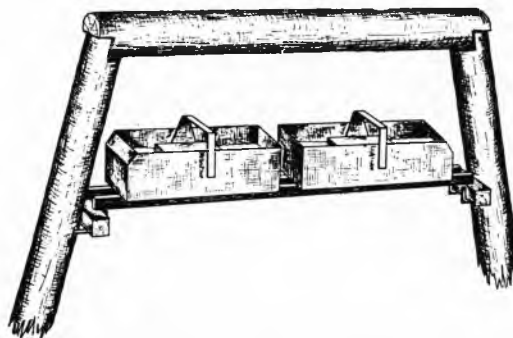
Ograničenje eksplozije na što uži prostor sastoji se u tom da se na određenim mjestima u jami postavljaju brane koje će u slučaju eksplozije u jednom dijelu jame pogasiti plamen i spriječiti prijenos plamena, a time i eksplozije, u drugi dio jame. U osnovi razlikuju se dva načina prostornog ograničenja eksplozije, i to ograničenje vodom i ograničenje kamenom prašinom.

Pri ograničenju vodom stvaraju se na određenim mjestima u jami mokre zone s količinom vode dovoljnom da u slučaju eksplozije sigurno ugasi plamen. Razlikuju se dva načina stvaranja umjetnih mokrih zona. Jedan je da se permanentno ovlažuje stanoviti dio hodnika, a drugi da se mokra zona obrazuje tek u slučaju eksplozije. Za permanentno ovlaživanje postavljaju se na odgovarajućim mjestima u hodniku raspršivači vode koji preko cijelog profila hodnika u stanovitoj duljini stalno stvaraju vodenu maglu. Raspršivači se postavljaju u smjeru protivnom vjetrovoj struji, da se vodena magla što bolje rasprostire po cijelom profilu hodnika (sl. 6). Redovito su ovakve zone duge najmanje 50 m,



Sl. 6. Stvaranje mokre zone permanentnim ovlaživanjem raspršivačima

a često i 100 m. Za stvaranje mokre zone u slučaju eksplozije postavljaju se na određenim mjestima u hodnicima posude napunjene vodom. Posude su postavljene labilno, pa se u slučaju eksplozije uslijed zračnog udara prevrnu i stvore slap vode koji treba da ugasi plamen eksplozije. Dvije takve posude vide se na slici 7.



Sl. 7. Posude s vodom, prevrću se uslijed zračnog udara

Glavne vodene brane postavljaju se između vjetrovih odjeljenja, a moraju ukupno sadržavati najmanje 200 l vode po četvornom metru otvorene jamske prostorije. Unutar vjetrovih odjeljenja postavljaju se sporedne brane koje moraju sadržavati najmanje 100 l vode po četvornom metru jamske prostorije.

Za ograničenje eksplozije kamenom prašinom također se na odgovarajućim mjestima u jami postavljaju brane. Količina kamene

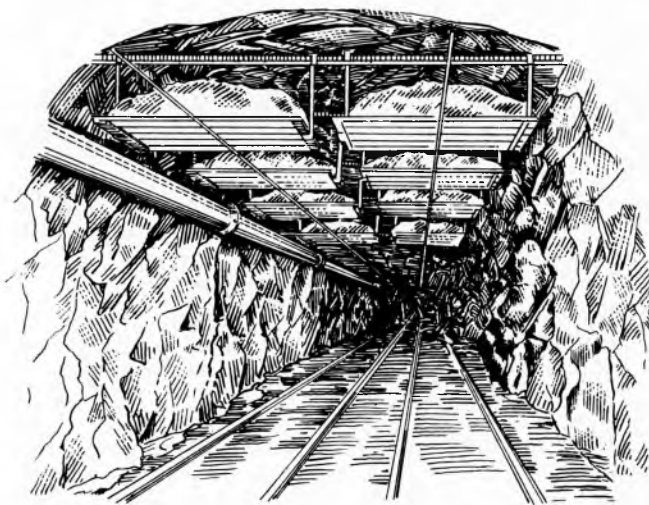


Sl. 8. Polica s kamenom prašinom

prašine na branama ovisi o veličini jamske prostorije. Kamena će se prašina na branama raspršiti uslijed zračnog udara od eksplozije, stvoriti gust oblak prašine i spriječiti dalji prijenos plamena. Redovno se jedna brana sastoji od više policia, jer na jednu policu nije uputno stavljati više od 300 kg kamene prašine. Razmak između policia iznosi najmanje 2 m. Policu s kamenom prašinom prikazuje sl. 8 a cijelu branu sl. 9. Police su obično od dasaka,

primjenjuju se i police oblika korita. One su uvijek postavljene labilno.

Glavne brane u jami bez metana sadrže 200 kg kamene prašine a sporedne 50 kg, a u jami s metanom glavne brane sadrže 400 kg a sporedne 80 kg po četvornom metru otvorene jamske prostorije.



Sl. 9. Brana kamene prašine

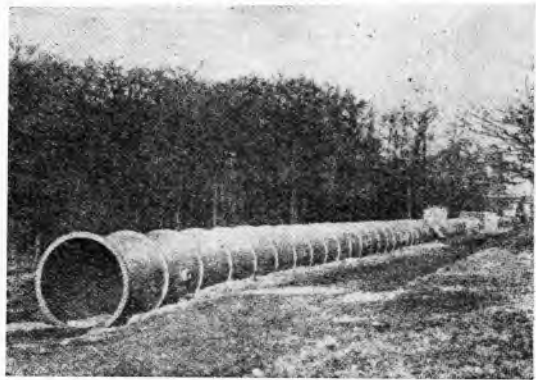
Eksplozije u briketarnicama i separacijama. Pri radu u briketarnicama i separacijama može se također stvoriti oblak prašine opasne gustoće koji, upaljen od otvorenog plamena, užarenih predmeta ili električne iskre, može eksplodirati. U briketarnicama su osobito opasni mlinovi za mljevenje ugljena jer u njima može doći čak i do samozapaljenja ugljene prašine. Svi uređaji u kojima se stvara ugljena prašina moraju biti zatvoreni. Zidovi i stropovi moraju biti glatki i svijetlo obojeni. U radnim prostorijama ne smije se pušiti ni ložiti vatra, u njih se ne smije ulaziti s otvorenim svjetlom. Svi električni uređaji moraju biti zatvorene izvedbe, kao i u rudnicima ugroženim od praskavog plina. Usjela ugljena prašina mora se redovno odstranjivati uz prethodno vlaženje, tako da se ne uzvitlava.

Ispitivanja radi obrane od eksplozija u rudnicima vrše se u laboratorijima, pokusnim stanicama ili rovovima i u samim rudnicima.

U pokusnim stanicama ili rovovima ispituje se eksplozivnost praskavog plina i ugljene prašine, kao i mjere koje u danom slučaju treba poduzeti da se spriječi prijenos nastalog plamena. Pokusni se rovovi po obliku, veličini, duljini i klimatskim uvlovaima što više moraju približiti stvarnim prilikama u jami. Takav pokusni rov u vidu 200 m duge željezne cijevi promjera 1,8 m prikazan je na sl. 10. Svrha je ispitivanja u pokusnim rovovima da se utvrde uslovi u kojima lebdeća ugljena prašina može eksplodirati.

U eksplozionalnoj komori na početku rova stvara se pomoću posebnog ventilatora oblak fine samljevene ugljene prašine i zapali se. Mogu se dodavati i određene količine metana, a utvrđuje se gustoća oblaka koji će eksplodirati. U sam rov unose se određene količine ugljene prašine i pomoću kronografa mjeri se brzina ši-

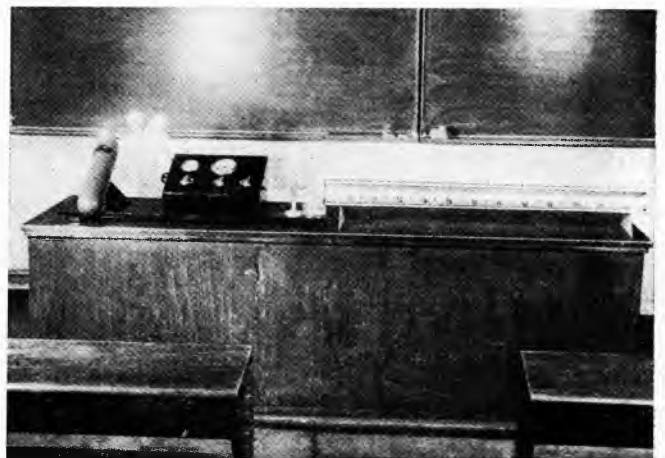
renja plamena. Nadalje se ispituje djelovanje određene kamene prašine kao i pravilno postavljanje brana s kamenom prašinom.



Sl. 10. Pokusni rov

Pomoću laboratorijskih ispitivanja može se razmjerno brzo utvrditi donja granica količine ugljene prašine u smjesi sa zrakom pri kojoj ova postaje eksplozivna, kao i količina određene kamene prašine potrebna da se uzvitlana i usjela ugljena prašina učine neopasnom. Nadalje se može utvrditi kako s porastom sadržaja metana opada koncentracija ugljene prašine na donjoj granici eksplozivnosti.

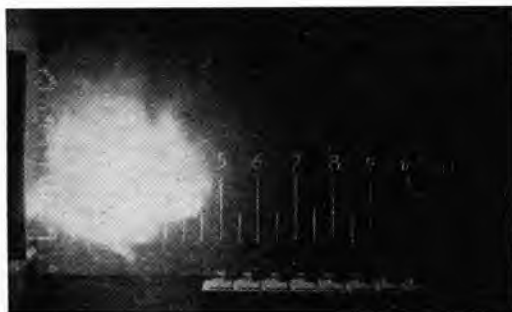
Jedan od prvih aparata za takva ispitivanja konstruirao je Taffanel. Sastoji se od boce s kisikom, manometra, cjevčice za ispuh, plamenika i mjerila (sl. 11). Pred cjevčicom naspe se 1 g ispitivane ugljene prašine ili smjese ugljene i kamene prašine. Kad se naglo otvori pipac, kisik otpuhne ugljenu prašinu na plamen plamenika, gdje se upali, te plamen dosegne izvjesnu duljinu ovisnu o svojstvu prašine. Plamen se fotografira pa se po njegovoj dužini i jačini određuje stepen upaljivosti prašine odnosno mješavine (sl. 12). Pokusi s ovim aparatom nisu mogli dati pouzdane rezultate jer se je plamen razvijao u otvorenom prostoru. Ovaj nedostatak uklonio je Šimek ugradnjom cijevi. Na osnovu ovih aparata izrađivani su i usavršavani novi, pa ih danas postoji cio niz [Godbert-Greenwaldov aparat, aparat Riessa, »Eksploziona cijev« u izradi SMRE (Safety in Mines Research Establishment) i drugi].



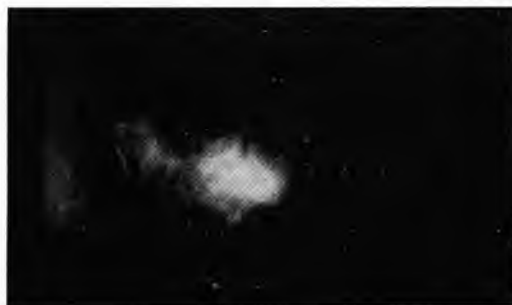
Sl. 11. Aparatura za utvrđivanje stupnja eksplozivnosti smjese zraka i ugljene prašine (prema Taffanelu)

Ispitivanja na rudnicima obuhvaćaju, s obzirom na praskavi plin, određivanje prisutnosti i mjerenje količine metana (metanometriju), a s obzirom na ugljenu prašinu, određivanje fizikalnih i kemijskih svojstava ugljena, količine lebdeće ili usjele prašine pri normalnom radu u određenom vremenu (npr. u jednoj smjeni), svojstava kamene prašine i sastava jamskog zraka.

Indiciranje metana ili metanometrija. Metan se u znatnom broju rudnika, većinom ugljenokopa, izdvaja u većim ili manjim



Kameni ugljen



Lignit

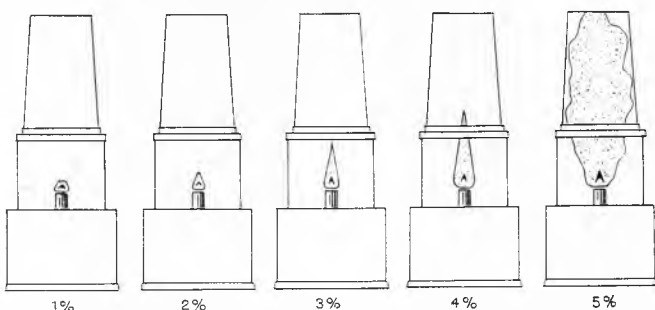
Sl. 12. Pokusne eksplozije smjese zraka i ugljene prašine u Taffanelovoj aparaturi

količinama. Naglo izdvajanje može izazvati i ugušenje ljudi uslijed pomanjkanja kisika, a pri količini većoj od 5% može izazvati eksploziju. Opasnost se naglog prodiranja velikih količina metana ponekad ne da izbjeći jer je metan nakupljen u naslagama teško otkriti. Uspješna borba iziskuje u prvom redu tačne instrumente i određen način opažanja već prema prilikama u jami.

Za utvrđivanje pojave i određivanje sadržaja plinova u jamskom zraku postoje dva načina: pomoću kemijske analize i pomoću indikatora.

Kemijska analiza jamskog zraka najsigurniji je način za utvrđivanje količine metana u zraku. U jamama sa stalnom pojavom metana treba povremeno uzimati uzorke i utvrditi sastav jamskog zraka na određenim mjestima, a osobito u izlaznoj vjetrovoj struji, i na taj način kontrolirati ukupnu količinu metana u odnosu prema ukupnoj količini zraka u jami. Iako spor, ovaj je postupak neophodan, ali usporedo treba na određenim mjestima stalno i neposredno utvrđivati količinu metana indikatorima.

Indikatori se mogu klasificirati prema načinu njihove upotrebe i prema načinu određivanja metana. Prema načinu upotrebe razlikuju se indikatori za nadzor i kontrolu i indikatori za automatsku zaštitu; prema načinu određivanja metana razlikuju se uglavnom indikatori kojih se djelovanje temelji na različitom indeksu loma svjetlosti zraka i zapljinjene atmosfere; indikatori kojih se djelovanje temelji na apsorpciji infracrvenog zračenja u nekim plinovima, odnosno na razlici apsorpcije metana i usporedbenog plina (zraka); indikatori kojih se djelovanje temelji na razlici toplinske vodljivosti plinova. Može se reći da se danas za nadzor i kontrolu najviše



Sl. 13. Plamen benzinske sigurnosne svjetiljke prema postotku metana u zraku

u upotrebi nalaze benzinska sigurnosna svjetiljka, eksplozimetar i interferometar.

Benzinska sigurnosna svjetiljka još uvijek je u upotrebi iako je danas sve više potiskuju moderniji instrumenti. Na reduciranom plamenu metan sagorijeva stvarajući proziranu plavkastu aureolu po visini koje se ocjenjuje sadržaj metana, kako se to vidi u shematskom prikazu na sl. 13.

Eksplozimetar je uređaj koji se zasniva na sagorijevanju metana na užarenoj niti koja tvori jednu granu Wheatstoneovog mosta. Sagorijevanjem metana povisuje se temperatura užarene niti i time se poremeti ravnoteža Wheatstoneovog mosta. Uslijed toga se kazaljka mjernog instrumenta pomakne iz nultog položaja i na skali se direktno može očitati sadržaj metana. Na sl. 14 vidi se eksplozimetar M. S. A., a na sl. 15 shematski prikaz njegovog djelovanja.

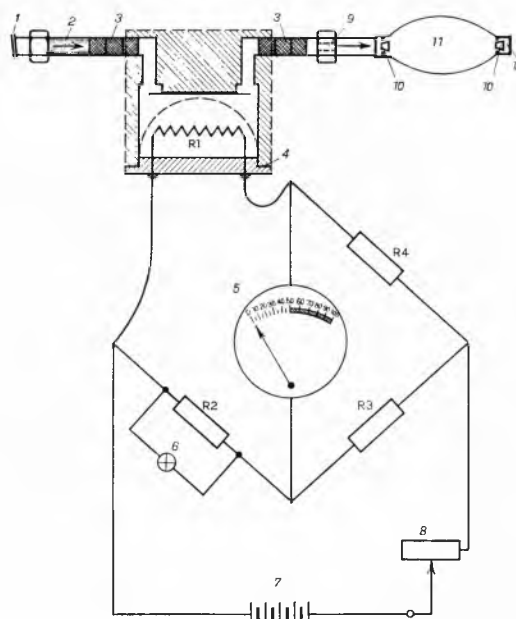
Interferometar je optički indikator kojim se razlika indeksa loma svjetlosti čistog zraka i smjese metana i zraka mjeri pomoću pomaka dobivene interferencijske slike.

Na osnovu navedenih načina određivanja metana razvijeni su danas aparati koji mogu registrirati metan i na veće udaljenosti. Ovakvi uređaji mogu biti priključeni na alarmni uređaj ili direktno na uređaj za iskopčavanje električne energije, a mjerni se podaci znaju prenositi i na dispečerski stol.

Aparati za određivanje količine ugljene prašine u zraku rade na različitim principima. Upotrebljava se, npr., brojač prašine



Sl. 14. Eksplozimetar MSA



Sl. 15. Shema eksplozimeta MSA. 1 Ulaz, 2 filtar, 3 zaštitna mrežica, 4 brtva, 5 galvanometar, 6 balastna lampica, 7 baterija suhih ćelija, 8 regulacijski otpornik, 9 regulator protoka, 10 ventil, 11 usisna optika, 12 izlaz, R1 detektorska nit promjenljivog otpora, R2, R3, R4 nepromjenljivi otpornici

po Owensu, koji kombiniranim načinom mjerenja određuje količinu i dimenzije čestica. U aparat se usisava određeni volumen zraka, pa prašina sedimentira na stakalce ili na vlažni filter-papir za odvagu. Tindaloskopom utvrđuje se broj čestica prašine na bazi disperzije svjetlosti. Zeissovim konimetrom utvrđuje se broj čestica na kubni centimetar pomoću posebne tehnike prebrojavanja pod mikroskopom. Aparat Aera vrlo je pogodan za utvrđivanje količine prašine u jamskom zraku. Sastoji se uglavnom od reduktora, ejektora sa Venturijevom cijevi, boce za komprimirani zrak, manometra, sekundometra, cjevčice za uzimanje uzorka i gumene cijevi kroz koju se usisava zrak u aparat. Pruža mogućnost utvrđivanja količine težinski, ali ne pruža mogućnost utvrđivanja dimenzija čestica.

Navedeno je već da je u pogledu mogućnosti nastanka eksplozije u jami opasna usjeda ugljena prašina. Zato je potrebno utvrditi koliko se ugljene prašine usjeda po jamskim prostorijama pri određenom načinu rada na radilištu i pri određenoj brzini vjetrove struje. To se utvrđuje na jednostavan način tako da se na strani izlazne vjetrove struje iza radilišta položi čist papir određene površine. Kroz jednu ili dvije produktivne smjene ugljena će se prašina usjedati, pa se količina odvagne. Da se dobije pravilan prosjek, potrebno je postavljati više ovakvih papira. Kako se ugljena prašina ne usjeda samo na tu već i na svim neravnim ploham, količina se prašine na papiru pomnoži najmanje sa 1,5.

LIT.: A. Zambelli, Tehnika sigurnosti u rudarstvu, I, Beograd 1950. — J. J. Forbes, G. W. Grove, Protection against mine gases, Washington, D. C. 1954. — F. Plasche, Wetterlehre und Brandbekämpfung im Bergbau, Leipzig 1955. — A. M. Терпугов, Горное дело, Энциклопедический справочник, т. 6, Москва 1959. — G. H. Fritzsche, Bergbaukunde, I, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959. — G. Šebor, I. Hofbauer, Chemické způsoby předcházení a zdořování důlních požarů, Praha 1960. — B. Kozłowski, J. Sobola, Walka z pyłem węglowym w kopalniach węgla kamiennego, Katowice 1966.

A. Zambelli

EKSPLOZIVI, tehnički proizvodi sastavljeni isključivo ili pretežno od *eksplozivnih tvari*, tj. spojeva ili smjesa koje mogu kemijskom reakcijom vrlo brzo razviti velike količine energije u obliku topline i mehaničkog rada. U eksplozivnim tvarima se kemijska reakcija, započeta (potaknuta, *inicirana*) na jednom mjestu, vrlo brzo rasprostire po cijeloj masi, pri čemu nastaju plinovi pod visokim pritiskom u tako kratko vrijeme da nastaje eksplozija. (Za definiciju eksplozije v. str. 520.) Reakcija koja dovodi do eksplozije može se inicirati zagrijavanjem, udarom, trenjem ili drugim lokalnim utjecajima na eksplozivnu tvar. Eksplozivne tvari mogu biti jedinstveni kemijski spojevi (individuumi), npr. trinitrotoluen, glicerilnitrat, olovo-azid, ili smjese, kao crni barut, praskavi plin. (O eksploziji plinskih smjesa i disperzija v. i članak *Eksplozije u rudnicima*.) Reakcija koja dovodi do eksplozije jedinstvenog eksplozivnog spoja jest raspad njegove molekule na termodinamički stabilnije tvari, po pravilu plinovite (molekule organske eksplozivne tvari raspadaju se, u idealnom slučaju, na CO₂, H₂O i N₂); pri eksploziji eksplozivnih smjesa posrijedi je reakcija među sastojcima smjese, po pravilu oksidacija jednih sastojaka smjese drugima. Eksplozivi, kao tehnički produkti, mogu sadržati, pored eksplozivne tvari ili sastojaka eksplozivne smjese, također sastojke koji im poboljšavaju djelovanje, olakšavaju preradu i/ili smanjuju osjetljivost (lakoću iniciranja) te time omogućavaju sigurno rukovanje njima. Prema brzini kojom se reakcija, nakon inicijacije, rasprostire po eksplozivnoj tvari u eksplozivu, razlikuju se *progresivni eksplozivi*, u kojima se reakcija širi sporije, i *brizantni eksplozivi*, koji se raspadaju odn. reagiraju u cijeloj masi praktički trenutno. Radi sigurnog rukovanja, eksplozivi po pravilu moraju biti slabo ili umjereno eksplozivni, tj. razmjerno neosjetljivi prema inicijaciji, ali proizvode se i eksplozivi koji su ne samo vrlo brizantni nego i vrlo eksplozivni, tj. osjetljivi na udar, trenje i povišenje temperature; to su tzv. inicijalni eksplozivi. Oni se bez velike opasnosti mogu preradivati samo u malim količinama.

Progresivni eksplozivi upotrebljavaju se danas najviše kao pogonsko gorivo kojim se stavljaju u kretanje projektili u cijevima vatrenog oružja (propulzivi, baruti) i za upalna sredstva za sve vrste eksploziva. Brizantni eksplozivi upotrebljavaju se poglavito za miniranje u rudarstvu, građevinarstvu, kamenolomima itd. i kao razorno punjenje projektila, mina, bombi, torpeda itd. Inicijalni eksplozivi, kao što im ime kaže, upotrebljavaju se u ma-

lim količinama da se izazove inicijalni udar kojim se daje poticaj za raspad odn. reakciju unutar slabije eksplozivne tvari.

Ne zna se tačno kada je izrađen i prvi put upotrijebljen eksploziv. Poznato je da su Bizantinci 673 pomoću tzv. grčke vatre uništili arapsku flotu koja je opsjedala Carigrad i da je grčka vatra stoljećima bila snažno oružje Bizantinaca. Tačan sastav te smjese nije poznat. Bizantinski pisci spominju upaljive strijele i grčku vatra za koju kažu da se sastoji od smole, voska, nafte i sumpora, ali salitru ne spominju, iako nema sumnje da je bila jedan od glavnih sastojaka grčke vatre. Pretpostavlja se da su salitru još ranije upotrebljavali Kinezi za izradu vatrometnih smjesa u kojima je bilo i sumpora i ugljena, tj. svih sastojaka crnog baruta. Te smjese Kinezi ne upotrebljavaju u ratne svrhe prije X st., kada su one poznate već i na zapadu. U arapskim vrelima ima podataka o eksplozivnim smjesama sličnim crnom barutu (npr. smjesi sumpora, salitre i ugljena od lipovine u odnosu 2 : 3 : 6). Koncem XIII st. već su poznate lakoupaljive eksplozivne smjese na osnovi salitre kojima su se zapaljivi predmeti mogli upaliti i poput raketa izbacivati na stanovitu udaljenost. Daljnja je primjena eksplozivnih smjesa u to vrijeme izbacivanje kugli i klipova iz željeznih cilindara pomoću plinova nastalih eksplozijom salitrene smjese. Prema starim rukopisima ovo oružje su prvi upotrebljavali Arapi. Francuzi u obrani Cambrata 1339 već imaju 10 topova s metalnim cijevima iz kojih izbacuju ljevene metalne kugle.

Izum baruta neopravdano se pripisava kaluđeru Bertholdu Schwarzu (~1380 — ~1450), njemačkom alkemikaru koji je slučajno sastavio smjesu crnog baruta. Međutim, crni barut je u njegovo vrijeme već bio poznat u mnogim evropskim zemljama, proizvodio se u velikim količinama i upotrebljavao se za vatrena oružja. Od XIII do XIX st. crni barut je jedini poznati eksploziv. Metode proizvodnje se usavršavaju a razvika oružja i tehnike proširuje njegovu primjenu. Crni barut se ne troši samo za razorna punjenja bombi i mina, pogonska i razorna punjenja artiljerijske municije, pogonska punjenja pušane municije, već i u rudnicima, u izgradnji putova, tunela i kanala. Tek u drugoj polovini XIX st. crni barut se zamjenjuje nitrocelulozom i nitroglicerinskim barutom i novim brizantnim eksplozivima.

Već 1846 pronašao je F. Schönbein iz Basela eksplozivnu supstanciju koja je nastala djelovanjem dušične kiseline na pamuk. U isto vrijeme do istih rezultata došao je Otto Böttcher; potonji je ovu supstanciju nazvao praskavim pamukom. Kasnije je ustanovljeno da se praskavim pamukom, zbog njegove kemijske nestabilnosti i brzog izgaranja, ne može sasvim zamijeniti crni barut. Vieille je 1886 uspio praskavi pamuk otopiti u smjesi etera i alkohola i tako dobiti želatinoznu masu; time je smanjena brzina izgaranja praskavog pamuka, što je omogućilo njegovu primjenu u balističke svrhe; osim toga, usavršavanjem postupka za stabilizaciju otklonjena je opasnost od samozapaljenja. Srobrero je 1846 u Torinu prvi dobio glicerilnitrat (nitroglicerini) nitriranjem glicerina i upoznao njegove eksplozivne osobine, ali se glicerilnitrat u ono vrijeme nije mogao tehnički upotrijebiti zbog njegove velike osjetljivosti. Alfred Nobel prvi je uspio 1863 glicerilnitrat učiniti manje osjetljivim time što je njime natopio neaktivni anorganski materijal (diatomit, infuzorijsku zemlju). Nobel je tako dobio plastičnu i na udar manje osjetljivu eksplozivnu supstanciju koju je nazvao dinamitom. Ova je eksploziv mnogo trošio za rudarske i građevinske radove, ali je imao ozbiljnih nedostataka: na vlažnim mjestima izlučivao se iz dinamita glicerilnitrat a na temperaturi nižoj od 13 °C pretvarao se u čvrstu kristalnu masu koju je trebalo prije upotrebe zagrijavati. To je iziskivalo mnogo vremena, a događale su se i nesreće zbog detonacije izlučenog glicerilnitrata. Da bi uklonio te nedostatke, Nobel je glicerilnitrat vezao za celulozni nitrat (nitrocelulozu) s niskim postotkom dušika (kolodijev pamuk) i tako dobio tzv. praskavu želatinu, osnovu za izradu želatinskih dinamita koji su potpuno zamijenili diatomit. Od aromatičnih nitrospojeva otkriven je 1788 trinitrofenol (pikrinska kiselina) a 1863 trinitrotoluen (trinitrotoluol), ali tek 1886 Eugène Turpin u Parizu uspijeva pikrinsku kiselinu dovesti do detonacije pomoću inicijalnog eksploziva, praskave žive, koju je 1799 pripravio Howard. Praskava živa se već 1815 upotrebljava kao punjenje upaljivih kapšala. Pikrinskom kiselinom u lijevanom ili presovanom stanju pune se različite vrste municije; kasnije je djelomično zamijenjena trinitrotoluenom (tritolom), koji je od početka 1904 najvažniji vojni eksploziv. Pikrinska kiselina se, zbog izvanredne brizantnosti, zadržava, uz trinitrotoluen, za izradu razornih punjenja municije.

Eksplozivna istraživanja pod konac XIX i početkom XX st. omogućuju brzi razvika tehnike eksploziva i baruta. Na tom području najviše zasluga imaju Berthelot, Vieille, Dixon, Dautriche, Kost i Sopošnikov, jer su kvantitativno proučili karakter eksplozivnih pojava dajući definicije veličina bitnih za te pojave. Ovim spadaju pokusi da se umjesto ili osim pikrinske kiseline i trinitrotoluen upotrijebe različiti drugi organski aromatski nitrospojevi (nitrirani benzen, ksilen, anilin, krezol, naftalin) kao osnovne tvari za izradu eksploziva. Međutim, u tome nisu postignuti naročiti uspjesi; tako dobiveni eksplozivi imaju razliku primjenu za specijalne svrhe, osobito za sekundarna punjenja rasprsnih kapšala, i detonatora, zatim za prijenosna punjenja, te za izradu različitih eksplozivnih smjesa.

Vatrena oružja su se sve do pred kraj XIX st. punila crnim barutom, koji se od tada postepeno zamjenjuje različitim tipovima malodimnih nitrocelulozom i nitroglicerinskih baruta. Poslije prvoga i drugog svjetskog rata tehnika vatrenog oružja dostiže visoki stupanj razvika i savršenosti a uporedno se razvija i tehnika eksploziva i baruta. Velika brzina gadanja, velike početne brzine i daleki dometi — osobito brodskih i obalnih topova — tražili su, pored odličnog konstrukcijskog materijala, najsavršeniji barut kao pogonski materijal. Malodimni nitrocelulozni i osobito nitroglicerinski barut, te diglikolski i nitroguanidinski baruti različitih oblika, modela i masa odgovaraju danas svim zahtjevima moderne ratne tehnike.

SVOJSTVA I DJELOVANJE EKSPLOZIVA

Prema naprijed rečenom, reakcija koja dovodi do eksplozije eksplozivne tvari (*eksplozivna reakcija*) mora se sama, bez daljeg djelovanja izvana, nastavljati kad je inicijacijom započela na jednom mjestu i mora davati (isključivo ili pretežno) plinovite produkte pod visokim pritiskom. Dakle, ona mora, pored toga što daje plinovite produkte, razvijati i toplinu, tj. ona mora biti egzotermna. Rad koji se može vršiti eksplozijom određene količine eksploziva zavisi od volumena plinova koji nastaju eksplozivnom reakcijom i od temperature na koju se oni razvatom toplinom zagrijavaju, prema jednadžbi: $W = p \Delta V = f(T)$, gdje je W rad, p pritisak, ΔV povećanje volumena pri reakciji (za tekuće i čvrste eksplozive praktički jednako volumenu razvijenih plinova), T apsolutna temperatura. Temperatura T je to viša (a prema tome i rad W to veći) što je veća toplina razvita pri reakciji odre-