

INERTNI GASOVI I AEROSOLI KAO ALTERNATIVNA SREDSTVA HALONIMA ZA GAŠENJE POŽARA

INERT GASES AND AEROSOLS AS ALTERNATIVES TO HALONS FOR FIRE EXTINGUISHING

Milica Ivanović*, **Ivan Arandelović**, **Srbislav Genić**, **Aleksandar Simonović**,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

Pasivni (inertni) gasovi i aerosoli igraju važnu ulogu u savremenim sistemima za zaštitu od požara, obezbeđujući efikasno suzbijanje požara u različitim okruženjima, gde su drugi agensi za gašenje nepraktični ili predstavljaju rizik za osetljivu opremu. Određene vrste halogenih derivata alkana dokazani su kao veoma efikasna sredstva za gašenje požara, ali od Montrealskog sporazuma njihova proizvodnja i upotreba se zabranjuju, dok se samo u izuzetnim slučajevima tzv. kritične primene, ograničavaju. Postepeno ukidanje proizvodnje halona značajno je uticalo na sektor prevencije požara i eksplozija, i utrla je put istraživanju i primeni alternativnih sredstava. U radu će biti prikazane ekološki prihvatljive alternative halonima za gašenje različitih klasa požara u vidu inertnih gasova i aerosola, njihova svojstva, kompatibilnost primene u različitim prostorima i proračunske procedure za izračunavanje koncentracije sredstva date različitim standardima, sa ciljem da se istakne njihov potencijal u projektovanju instalacija za gašenje požara „čistim“ sredstvima.

Ključne reči: inertni gasovi; aerosoli; halon; zaštita od požara

Inert gases and aerosols play an important role in modern fire protection systems, providing effective fire suppression in various environments where other extinguishing agents are impractical or pose a risk to sensitive equipment. Certain types of halogen derivatives of alkanes have been proven to be very effective means of extinguishing fires, but since the Montreal Agreement their production and use are prohibited, while only in exceptional cases, the so-called critical applications, are limited. The gradual abolition of halon production had a significant impact on the fire and explosion prevention sector and significantly paved the way for the research and application of alternative fluids. The paper will present environmentally acceptable alternatives to halons for extinguishing different classes of fires in the form of inert gases and aerosols, their properties, compatibility of application in different spaces and calculation procedures for the concentration of the agent given by different standards, to highlight their potential in designing installations for extinguishing fires with "clean" agents.

Key words: inert gases; aerosols; halon; fire protection

1. Uvod

Prelazak sa halona na takozvana "čista sredstva" za gašenje požara započet je pre više od tri decenije, usvajanjem Montrealskog protokola. Uprkos učinkovitosti halona i mnogobrojnim

* Corresponding author: mivanovic@mas.bg.ac.rs
<https://orcid.org/0000-0001-6239-703X>

Ivan Arandelović: <https://orcid.org/0000-0002-7343-9538>
Srbislav Genić: <https://orcid.org/0000-0001-7792-2386>
Aleksandar Simonović: <https://orcid.org/0000-0001-7740-5055>

pozitivnim svojstvima koje ga izdvajaju naspram drugih sredstava za gašenje požara, velika štetnost za ozonski omotač i visok doprinos globalnom zagrevanju čini ih neprihvatljivim za današnju upotrebu. Odrednice pomenutog međunarodnog protokola predviđale su prestanak proizvodnje halona, kao i njihovo potpuno povlačenje iz upotrebe do početka 1994. godine u razvijenim zemljama, dok je za zemlje u razvoju povlačenje iz upotrebe propisano za početak 2010. godine. U Republici Srbiji Uredbom [1] dozvoljena je jedino još takozvana kritična upotreba halona za potrebe vojnih vozila, vojnih brodova i podmornica, u avionima, i to pretežno za zaštitu prostora u kome ne borave ljudi, zatim u naftnim i petrohemijskim postrojenjima, trgovačkim teretnim brodovima, pistama i aerodromima, postrojenjima za proizvodnju i istraživanje nuklearne energije i to za tačno određenu svrhu svake kategorije pojedinačno. Kao zamena za halone razmatrana su sredstva koja proces sagorevanja prekidaju inhibitorski: aktivni gasovi, suvi prah i pirotehnički generisani aerosoli, kao i koja proces sagorevanja prekidaju ugušivanjem: inertni gasovi i ugljen-dioksid.

Posledica ispuštanja inertnih gasova u zatvoren prostor je snižavanje koncentracije kiseonika u njemu, do nivoa na kom se prekida proces sagorevanja [2]. Posle pirotehničke aktivacije aerosola, počinje razlaganje čvrste materije na povišenoj temperaturi, pri čemu se u vazduh oslobađaju čestice koje prekidaju proces sagorevanja inhibitorskim (antikatalitičkim) hemijskim procesom.

U ovom radu će biti izložena svojstva inertnih gasova i aerosola, njihovi mehanizmi dejstva na gašenje požara i projektni parametri koji se odnose na koncentracije sredstava, u cilju sagledavanja mogućnosti njihovog korišćenja kao zamene za halone.

1.1. Svojstva inertnih gasova

U razmatrana inertna sredstva za gašenje požara spadaju agensi koji u svom sastavu sadrže argon (Ar), azot (N₂) i ugljen-dioksid (CO₂).

Inertni gasovi gase požar tako što snižavaju koncentraciju kiseonika u prostoru zahvaćenom požarom između 10% i 14%. Netoksična su, bezbedna po životnu sredinu i nisu provodnici električne struje [2]. U Tabeli 1. prikazana su inertna sredstva obuhvaćena standardima [3-8]. Izražavanje procentalne koncentracije u radu je po zapremini, ukoliko nije drugačije navedeno.

Tabela 1. Inertna sredstva za gašenje požara obuhvaćena standardima [3-8]

Oznaka [3]	IG-01	IG-100	IG-541	IG-55
Sastav	100% Ar	100% N ₂	52% N ₂ + 40% Ar + 8% CO ₂	50% N ₂ + 50% Ar
Alternativni naziv	Argotec	NN 100	Inergen	Argonit

Fizičke osobine inertnih gasova su date u Tabeli 2.

Argon je jednoatomni gas bez boje, mirisa i ukusa, netoksičan je i hemijski inertan. U atmosferi je prisutan u koncentraciji od 0,93%. Argon se dobija rektifikacijom tečnog vazduha na temperaturi ispod -185°C. Ugljen-dioksid je gas bez boje, mirisa i blago kiselog ukusa. U vazduhu se nalazi u količini od 0,02-0,03%. U atmosferi azota ima 78,3%, dvoatomni je gas bez mirisa i ukusa, nije toksičan i reaktivan, veoma je slab provodnik toplote i elektriciteta. Najčešće se dobija rektifikacijom tečnog vazduha prema Lindeovom postupku. Inertni gasovi u sistemima zaštite od požara su tokom čitavog procesa gašenja požara isključivo u jednoj fazi.

1.2. Svojstva aerosola

Najčešće upotrebljavana supstanca koja se koristi da u procesu gašenja proizvede aerosole je kalijum-nitrat – KNO_3 , komercijalno poznat po nazivu šalitra. To je kristal, rastvorljiv u vodi, sa temperaturom paljenja od $160\text{ }^\circ\text{C}$ i topljenja na $333\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 2. Fizička svojstva inertnih gasova [3]

Svojstvo	IG-01	IG-100	IG-541	IG-55
Molarna masa [g/mol]	39,9	28,0	34,0	33,95
Tačka ključanja na 1.01325 bar [$^\circ\text{C}$]	-189,85	-195,8	-19,6	-190,1
Tačka mržnjenja na 1.01325 bar [$^\circ\text{C}$]	-189,35	-210,0	78,5	-199,7
Kritična temperatura [$^\circ\text{C}$]	-122,3	-146,9	/	-134,7
Kritični pritisak [kPa]	4,903	3,399	/	4,150
Specifična toplota parne faze (1.01325 bar, $25\text{ }^\circ\text{C}$) [kJ/kg $^\circ\text{C}$]	0,519	1,04	0,574	0,782
Specifična toplota ključanja [kJ/kg]	163	199	220	181
Rastvorljivost u vodi na $25\text{ }^\circ\text{C}$	0,006%	0,0013%	0,015%	0,006%

Nema štetnog dejstva na ozonski omotač, nije korozivan i bezbedan je pri transportu i rukovanju. Ne zahteva instalaciju sa cevima i visokim pritiskom i njime se lako rukuje. Koncentracija kiseonika pri gašenju požara ostaje ista. Ne apsorbuje vlagu i ne proizvodi štetne ostatke pri ralaganju. Ekonomski i ekološki aspekti korišćenja ovog sredstva su povoljni.

1.3. Primena

Inertni gasovi se koriste za gašenje požara u sredinama gde je od važnosti očuvanje stanja osetljivih predmeta i opreme. Kao takvi, koriste se u telekomunikacionim objektima, server sobama i *data* centrima, električnim ormarima i kontrolnim sobama, studijima, transformatorskim stanicama, brodovima i platformama na moru za zaštitu mašinskih prostorija i drugih kritičnih odeljenja, zatim muzeja i arhiva, bankarskih trezora i kovnica novca, objekata za skladištenje hemikalija, laboratorija i čistih soba. Inertni gasovi za gašenje požara se koriste u okruženjima gde je potrebno brzo i "čisto" gašenje požara, bez produkata raspadanja i kontaminacije.

Sistemi za gašenje požara aerosolom primenjuju se za gašenje požara u transformatorskim i generatorskim prostorijama, skladištima, garažama, prostorijama proizvodnih pogona, računskim centrima, razvodnim ormanima, bibliotekama, mlinovima i silosima, na elektroinstalacijama i uređajima koji su pod naponom do 10 kV. Ne upotrebljavaju se za gašenje požara hemijskih materija i polimernih jedinjenja koja su sklona tinjanju i sagorevanju bez prisustva vazduha, gorućih materija sklonih samozapaljnu, požara reaktivnih metala (magnezijuma, litijuma i dr). Takođe, ne primenjuju se za prostorije preko $5\ 000\ \text{m}^3$, visine preko 12 m, ali jesu vrlo povoljna za gašenje požara na velikoj visini gde vatrogasne jedinice ne mogu dopreti.

2. Projektni parametri

2.1. Inertni gasovi

Proces sagorevanja većine materija prestaje kada zapreminski udeo kiseonika u vazduhu padne ispod 15%. Međutim za neke posebne materije i posebne tipove prostora (trasformatorske stanice, tekstilnu industriju, server sale, skladišta materijala koji gore sa stvaranjem žara,...) ta granica se snižava i do 8%, što se utvrđuje eksperimentalno i definiše se tehničkim propisima. Minimalni zapreminski udeo inertnog gasa u atmosferi šticeenog prostora, pri kome prestaje proces sagorevanja, obeležava se sa C_0 i izračunava po formuli:

$$C_0 = \frac{[(21-p)]}{21} \cdot 100\%, \quad (1)$$

gde je sa p obeležen zapreminski udeo kiseonika u atmosferi šticeenog prostora, pri kome prestaje proces sagorevanja. Ova količina se iz razloga sigurnosti obično uvećava za 20%, jer posle ispuštanja inertnog gasa u šticeeni prostor dolazi do povišenja pritiska u njemu, što uzrokuje oticanje inertnog gasa iz šticeenog prostora kroz vrata, prozore, ventilacione otvore i slično. Za $p = 15\%$ dobija se

$$C_0 = \frac{[(21-15)]}{21} \cdot 100\% = 28,57\% \quad (2)$$

odakle se posle uvećanja od 20% dobija da je $C_0 = 34\%$. Napominjemo da formule (1) i (2) važe i za proračun zapreminskog udela ugljen – dioksida.

Za proračun koncentracije inertnog gasa u atmosferi šticeenog prostora, koji dovodi do prekida procesa sagorevanja primenom američkih i evropskih tehničkih propisa [3-8] koriste se formule:

$$K = 2,303 \cdot \log_{10}\left(\frac{100}{100-C_0}\right) = \ln\left(\frac{100}{100-C_0}\right) \quad (3)$$

$$X = \frac{s_0}{s} \cdot K = \frac{294}{273+t} \cdot K \quad (4)$$

a za neophodnu masu inertnog gasa W [kg], za prekid sagorevanja u zatvorenom šticeenom prostoru zapremine V [m³]:

$$W = \frac{V}{s} \cdot K \quad (5)$$

gde je:

s_0 [m³/kg] –specifična zapremina inertnog gasa pri temperaturi od 21°C i pritisku 1,013 barA;

s [m³/kg] –specifična zapremina inertnog gasa pri minimalnoj projektovanoj temperaturi šticeenog prostora i pritisku 1,013 barA;

C_0 [% vol] –projektovani zapreminski udeo inertnog gasa u atmosferi šticeenog prostora;

t [°C] –minimalna projektovana temperaturi šticeenog prostora.

Tabela 3. Određivanje faktora s [m³/kg]

oznaka	formula	standard	formula [3]
Ig01	$s = 0,56119 + 0,0020545 \cdot t$	[5]	$s = 0,5685 + 0,00208 \cdot t$
Ig100	$s = 0,79968 + 0,00293 \cdot t$	[6]	$s = 0,7997 + 0,00293 \cdot t$
Ig55	$s = 0,6598 + 0,002416 \cdot t$	[7]	$s = 0,6598 + 0,00242 \cdot t$
Ig541	$s = 0,65799 + 0,00239 \cdot t$	[8]	$s = 0,65799 + 0,00239 \cdot t$

Postoje minimalne razlike između rezultata dobijenih pri proračunu po američkom propisu [3] i rezultata dobijenih po evropskim standardima [5 – 8], koje nastaju zato što američki propisi specifičnu zapreminu određuju pri temperature od 21°C, a evropski pri temperaturi od 20°C.

Udeo inertnog inertnog gasa C [vol%] koja će se dostići u zatvorenom štíćenom prostoru zapremine V [m³] posle ispuštanja inertnog gasa mase W [kg] i specifične zapremine s [m³/kg], izračunava se primenom formule:

$$C = 100 \frac{e^{\left(\frac{W \cdot s}{V}\right)} - 1}{e^{\left(\frac{W \cdot s}{V}\right)}} \quad (6)$$

2.2. Aerosoli

Mehanizam dejstva aerosola na požare je hemijska inhibicija koja nastaje taloženjem stvorenog kalijum-karbonata i drugih negorivih jedinjenja kalijuma (kalijum-bikarbonat) na gorivu materiju, sprečavajući tako dalja isparenja.

Projektovanje sistema sa aerosolima za gašenje požara zasniva se na određivanju mase punjenja za obezbeđivanje efikasnog gašenja, određivanje broja aerosolnih generatora, njihovog tipa i razmeštaja. Aerosolni generator se sastoji od termootpornog kućišta, u kome se nalazi supstanca koja sagorevanjem stvara aerosol i uređaj za inicijalno paljenje sa ili bez rashladnog sredstva (hemijsko jedinjenje koje apsorbuje toplotu oslobođenu pri obrazovanju aerosola). Masa punjenja se određuje prema jednačini [4]:

$$M = K \cdot c \cdot V \quad (7)$$

gde je:

M [kg] – masa punjenja;

V [m³] – zapremina štíćenog prostora;

K – koeficijent koji obuhvata neravnomernosti raspoređivanja aerosola po visini prostorije i nehermetičnost prostorije;

c [m³/kg] – koncentracija aerosola koja prekida proces sagorevanja data proizvođačkom specifikacijom, a koja se određuje eksperimentalno za svaki tip aerosolnog generatora.

Masa sredstva dobijena jednačinom (7) uvećava se za 10%, a takođe se pri određivanju zapremine ne oduzima zapremina opreme koja je smeštena u prostoriju. Aktivacija ovih sistema vrši se automatski, ručno ili kombinovano. Sistem gašenja sa aerosolima može da se samoaktivira shodno tački paljenja aerosolnog generatora, ukoliko otkáže sistem automatske detekcije požara, a zaštićena zona nakon gašenja sprečava povratno paljenje do 2h.

3. Uticaj na ljude

Izloženost atmosferi sa sniženom koncentracijom kiseonika može dovesti do asfiksije (gušenja) i hipoksije (smanjeno snabdevanje tkiva kiseonikom), a oštećenja koja nastaju su uglavnom privremena. Međutim, NFPA standard [3] ograničava granicu izloženosti ovakvoj atmosferi shodno koncentraciji kiseonika prikazanoj u Tabeli 3. Određena istraživanja su pokazala da se kognitivne sposobnosti ljudi ne menjaju dok je koncentracija kiseonika iznad 14%, ali se značajno degradiraju kada koncentracija padne ispod 10%. Snižavanjem koncentracije kiseonika na 15% dolazi do gašenja požara većine zapaljivih materija procesom ugušivanja. Količina oslobođenog inertnog gasa zbog toga uvek treba za definisani prostor biti pažljivo određena, kako bi se dobio projektovani nivo kiseonika za efekat ugušivanja, a da se izbegnu mogući efekti hipoksije u slučaju dužeg vremena

evakuacije ljudi. Fiziološki efekti na kojima je zasnovano formiranje granica u standardu određene su na osnovu vrednosti NEL - *No Effect Level** [%] i LEL – *Low Effect Level** [%]. Ove veličine su funkcionalni ekvivalenti NOAEL (*No-observed-adverse-effect level*) i LOAEL (*Lowest-observed-adverse-effect level*) veličinama i odgovaraju vrednostima za minimalnu koncentraciju kiseonika od 12% za NEL i 10% za LEL datim u Tabeli 4.

Tabela 4. Granica izloženosti ljudi u atmosferi sa sniženom koncentracijom kiseonika

Koncentracija gašenja (%vol.)	Odgovarajuća ekvivalentna koncentracija O ₂ na nivou mora (%vol.)	Granica izloženosti
<43%	12%	≤ 5 min
43% ≤ C <52%	10% ≤ C <12%	≤ 3 min
52% ≤ C ≤ 62%	8% < C <10%	≤ 30 s
C >62%	C ≤ 8%	isključivo u prostorima bez ljudi
* No Effect Level = 43% inertnih gasova u zapremini		
* Low Effect Level = 52% inertnih gasova u zapremini		

U inergenu prisutan ugljen-dioksid dovodi do stimulacije refleksa disanja (“CO₂ efekat disanja”), međutim on u zatvorenom prostoru ne bi trebalo da prelazi granicu od 5%, iznad koje se javljaju štetni efekti po ljudski organizam [10]. Istraživanje [11] je potvrdilo da vremensko izlaganje ljudi sa hroničnom opstruktivnom bolesti pluća atmosferi sa inergenom (10-12.5% O₂ i 3.5-4% CO₂) može da bude i do 30 minuta. Stoga se inergen u odnosu na druge inertne gasove preporučuje kao sredstvo za gašenje prostora u kojima borave ljudi.

Toksičnost aerosola koji potiču od kalijum-nitrata je mala. Inhalacija agensa tokom 20 minuta izaziva slabo dejstvo na sluznicu nosa i ždrela, preko 20 minuta može izazvati kašalj i iritaciju očiju. Ulazak ljudi u prostor koji je bio izložen dejstvu mlaza iz aerosolnih generatora dozvoljen je 30 minuta posle provetravanja prostora.

4. Zaključak

Kao zamena za halone u sistemima za gašenje požara prihvatljiva sredstva su: aktivni gasovi, suvi prah i pirotehnički generisani aerosoli, koja proces sagorevanja prekidaju inhibitori kao i sredstva koja proces sagorevanja prekidaju ugušivanjem: inertni gasovi i ugljen-dioksid. U ovom radu su razmatrani inertni gasovi i pirotehnički generisani aerosoli. U poređenju sa aktivnim gasovima inertni gasovi zahtevaju veći prostor za skladištenje i cevovode i armature projektovane za najmanje tri puta više pritiske. Međutim inertni gasovi i pirotehnički generisani aerosoli se mogu koristiti i u prostorima u kojima borave ljudi, a ne mogu ih brzo napustiti (po tome najbolje karakteristike ima inergen), što je velika prednost u odnosu na ugljen dioksid i sve aktivne gasove osim HFC 23 i FC-3-1-10, koji imaju veliki doprinos globalnom zagrevanju.

5. Literatura

- [1] ***, Uredba o postupanju sa supstancama koje oštećuju ozonski omotač, kao i o uslovima za izdavanje dozvola za uvoz i izvoz tih supstanci, Službeni glasnik Republike Srbije 114/2013, 23/2018, 44/2018 (dr. zakon), 95/2018-267 (dr. zakon)

- [2] **Zou, J., Vahdat N., Collins M.**, Fire Protection with Bromoalkene/Nitrogen Gaseous Mixtures, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001, 40, 4649–4653.
- [3] ***, *NFPA 2001:2022, Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems*, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts 2022.
- [4] ***, SRPS EN 15004–1:2019 – Инсталације за гашење пожара – Системи за гашење гасом – Део 1: пројектовање, уградња и одржавање, Институт за стандардизацију Србије, Београд 2019.
- [5] ***, SRPS EN 15004–7:2018 – Инсталације за гашење пожара – Системи за гашење гасом – Део 7: Физичке особине и пројектовање система за гашење гасом за средство IG541, Институт за стандардизацију Србије, Београд 2019.
- [6] ***, SRPS EN 15004–8:2018 – Инсталације за гашење пожара – Системи за гашење гасом – Физичке особине и пројектовање система за гашење гасом за средство IG100, Институт за стандардизацију Србије, Београд 2019.
- [7] ***, SRPS EN 15004–9:2018 – Инсталације за гашење пожара – Системи за гашење гасом – Део 9: Физичке особине и пројектовање система за гашење гасом за средство IG55, Институт за стандардизацију Србије, Београд 2019.
- [8] ***, SRPS EN 15004–10:2018 – Инсталације за гашење пожара – Системи за гашење гасом – Део 10: Физичке особине и пројектовање система за гашење гасом за средство IG541, Институт за стандардизацију Србије, Београд 2019.
- [9] ***, *Pravilnik o tehničkim zahtevima za sisteme za gašenje požara pirotehnički generisanim aerosolom*, *Službeni list Savezne Republike Jugoslavije*, 58/1999.
- [10] **Hu, X.; Kraaijeveld, A.; Log, T.** Numerical Investigation of the Required Quantity of Inert Gas Agents in Fire Suppression Systems. *Energies* 2020, 13, 2536.
- [11] **Laursen, T.**, Fire protection for weak citizens. In *Proceedings of the Nordic Fire and Safety Days*, Copenhagen, Denmark, 20-21 August 2019.