

Ozono pritekėjimo iš lauko į patalpą dėsningumų tyrimas

Vaida Vasiliauskienė*

Generolo Jono Žemaičio Lietuvos karo akademija, Šilo g. 5A, LT-10322 Vilnius, tel. 861460052
el. paštas: Vaida.Vasiliauskiene@lka.lt

(Gauta 2023 m. balandžio mėn.; atiduota spaudai 2023 m. balandžio mėn.; prieiga internete nuo 2023 m. gegužės 10 d.)

Anotacija

Kadangi žmonės didžiąją laiko dalį praleidžia patalpose, tai patalpų aplinkoje esantis ozonas gali būti vienas iš pagrindinių teršalų, turinčiu neigiamą poveikį žmonių sveikatai. Tyrimas atliktas patalpoje, analizuojant ozono pritekėjimą iš lauko į patalpą, kai ozono generavimo prietaisai neveikė. Nustatyta, kad po 5 minučių nuo lango atidarymo pasiekama nekintanti ozono koncentracijos patalpoje vertė, o visišką šio teršalo suirimą įvyksta per 90 minučių po lango uždarymo. Didžiausia lauko įtaka patalpos ozono koncentracijos lygiui stebima iki 2 m atstumu nuo lango.

Reikšminiai žodžiai: ozonas, patalpa, laukas, kaupimasis, irimas.

Abstract

Since people spend most of their time indoors, indoor ozone may be one of the main pollutants that have a negative impact on human health. The study was carried out indoors by analyzing ozone transport from outdoors to indoors when the ozone generating devices were not operated. It has been found that a constant value of ozone concentration indoors is reached 5 minutes after opening the window, and the complete decomposition of this pollutant occurs within 90 minutes after closing the window. The indoor ozone concentration is mostly affected by the indoor air at a distance of up to 2 m from the window

Key words: Ozone, indoors, outdoors, accumulation, decay

Įvadas

Ozonas yra stipraus oksidavimosi savybėmis pasižyminčios dujos, kurios būtinos stratosferoje, nes saugo žemę nuo kenksmingų ultravioletinių spindulių, bet nepageidaujamos troposferoje, kadangi gali lengvai reaguoti su daugybe junginių ir tokiu būdu susiformuoti oksiduotos organinės rūšys bei dalelės (Salonen et al., 2018). Pažemio ozonas susidaro vykstant atmosferoje deguonies, azoto oksidų (NO_x) ir lakiųjų organinių junginių (LOJ) fotocheminėms reakcijoms. Priešingai nei kitų oro teršalų koncentracijos, kurios palaipsniui mažėja, ozono koncentracijos visame pasaulyje arba mažėja labai lėtai arba išlieka nepakitusios, arba netgi didėja, nepriklausomai nuo visų pastangų jas kontroliuoti (Stowell et al., 2017; Wang et al., 2017; Abeleira and Farmer, 2017.). Labiausiai užterštose Europos vietovėse, tokiose kaip Jungtinė Karalystė, Centrinė ir Pietinė Europos sritys, sezoninė ozono koncentracijos kitimo amplitudė siekia 100–140 μg/m³. Girgždienė ir Girgždys (2003) nustatė, kad Lietuvoje ozono koncentracija atmosferos ore apie 9 % laiko viršija 100 μg/m³.

Patalpose yra du pagrindiniai ozono šaltiniai: ozonas iš lauko, kuris patenka į patalpas per natūralų vėdinimą, mechaninį vėdinimą ir infiltraciją per pastato atitvarų plyšius (Chen and Zhao, 2011), ir vidaus šaltiniai, kuriuos skleidžia kai kurie elektros prietaisai. Dažniausiai naudojami ozono emisijos prietaisai patalpose yra fotokopijavimo, spausdinimo, oro valymo, dezinfekavimo įrenginiai ir kt. (Zhang and Jenkins, 2017; Nicole et al., 2006; Singh et al., 2014). Ozono emisijos patalpose mechanizmai gali būti klasifikuojami į dvi kategorijas: fotocheminius ir vainikinio išlydžio. Dėl patalpose esančių šaltinių ozonas dažniausiai susidaro vieno iš toliau nurodytų procesų metu. Vienas jų – vainikinis išlydis. Jo metu į ploną vielą ar adatą nukreipta aukšta įtampa krūvi turinčias molekules pagreitina taip, kad joms susidūrus su neutraliomis molekulėmis suyra cheminiai ryšiai. Šio proceso metu atsilaisvinę deguonies atomai gali susijungti su dviatome deguonies molekule sudarydami ozoną. Antrojo proceso metu dėl ultravioletinių spindulių poveikio susidaro laisvieji deguonies atomai, kuriems reakcijos metu susijungus su deguonies molekule susidaro ozonas (Guo et al., 2019).



Skirtingi mokslininkai tyrė ryšį tarp patalpų ir lauko ozono koncentracijų. Pvz., Weschleris (1989) penkis mėnesius (gegužės–spalio) stebėjo ozono koncentraciją patalpoje (trijuose biuruose) ir lauke. Tyrimo rezultatai parodė, kad priklausomai oro kaitos greičio ozono koncentracija patalpose sudarė nuo 20 iki 80 % lauke esančio ozono koncentracijos, kuomet patalpoje nėra ozono emisijos šaltinių. Weschler (2000) nustatė, kad ozono koncentracija lauke labai skiriasi priklausomai nuo vietos, ir laiko. Dažniausiai vidutinė ozono koncentracija lauke maža stebima ryte ir naktį, o didelė – vidurdienį. Didesnė ozono koncentracija registruojama pavasarį ir vasarą, o žemesnė – rudenį ir žiemą. Ozono pusėjimo trukmė patalpose < 10 minučių (McClurkin, et al., 2013), kuriai turi įtakos nusėdimo ant skirtingų paviršių greitis ir oro mainų greitis (Shen and Gao, 2018).

Atlikti tyrimai rodo, kad per didelė ozono koncentracija žmonėms gali sukelti kvėpavimo takų ligas, susilpnėjusią plaučių funkciją, vietinį ar sisteminį uždegimą, širdies ir kraujagyslių ligas bei vėžį (Farhat et al., 2013; Cohen et al., 2017; Liu et al., 2017; Goodma et al., 2018; Niu et al., 2018). Nustatyta, kad 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ padidinus 1 valandos maksimalų ozono kiekį, žmonių mirtingumo vidurkis padidėja 0,21%, kai nėra kontroliuojami kiti oro teršalai (Levy et al., 2005). Ozono koncentraciją atmosferoje kontroliuoti sudėtingiau nei kitų oro teršalų, nes jis yra antrinis teršalas ir jo susidarymo procesai priklauso ne tik nuo pirmtakų įvairovės bei koncentracijų, bet ir nuo kitų veiksnių, tokių kaip regionas, sezonas ar paros laikas.

Siekiant apsaugoti žmonių sveikatą nuo ozono žalingo poveikio, Pasaulinė sveikatos organizacija nustatė 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vertę kaip didžiausią 8 valandų vidutinę ozono koncentraciją (WHO, 2006). Vyriausybės organizacijos išleido rekomendacijas ir standartus dėl ozono koncentracijos lauke. Europoje ribinė ozono koncentracijos vertė yra 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (maksimalus dienos 8 valandų vidurkis, kuris neturi būti viršijamas daugiau kaip 25 dienas per kalendorinius metus), tuo tarpu 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 valandos vidurkis) jau yra laikomas pavojaus slenksčiu (E.C. Ozone Directive, 2016). Jungtinėse Valstijose, Nacionaliniame oro kokybės standarte (angl. NAAQS) numatyta ribinė ozono vertė yra 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 valandų vidurkis) (US EPA, 2018). Australijoje, Nacionaliniame oro kokybės standarte numatyta ribinė ozono vertė yra 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4 valandų vidurkis) (Australian Government, 2018). Gyvenamųjų patalpų orui Kanados sveikatos departamentas „Health Canada“ nustatė 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 valandų vidurkį) (Health Canada, 2010).

Tyrimo tikslas – išanalizuoti ozono pasiskirstymo patalpoje, esant atidarytam langui, dėsningumus bei nustatyti šio teršalo koncentracijos viduje ir lauke santykį.

Tyrimo metodika

Eksperimentui atlikti pasirinkta standartinė 20 m^2 patalpa. Elektriniai prietaisai, kuriems veikiant susidaro ozono (lazerinis spausdintuvas, kopijavimo aparatas ir pan.), eksperimento metu neveikė.

Eksperimentas atliktas vasaros sezono metu, pradžioje matuojant ozono koncentraciją atmosferos ore. Paskui buvo atidaromas langas ir matuojama ozono koncentracija patalpoje. Lango plotas, kurį plačiai atidarius ozono pritekėjo į patalpą, buvo 1,44 m^2 . Kai ozono koncentracija patalpoje nusistovi, langas buvo uždaromas. Ozono koncentracija patalpoje buvo matuojamos tol, kol ozonas visiškai suirdavo. Ozono kaupimuisi ir suirumui patalpoje įvertinti pasirinktas taškas, esantis už 1 m nuo lango ir 0,5 m aukštyje nuo lango apačios. Praėjus 1 minutei po lango atidarymo, ozono koncentracijos patalpoje matavimai atlikti ir skirtingu atstumu nuo lango esančiuose taškuose (0 – 5 m).

Oro paėmimui tiriamame taške naudotas iš O_3 41M analizatoriaus išvestas tefloninis vamzdelis. Analoginio signalo konvertavimui į skaitmeninį naudotas didelės skiriamosios gebos 8 kanalų ADC – 16 duomenų kaupiklis. Temperatūra matuota lauke ir patalpoje, naudojant temperatūros nustatymui 0,1 $^\circ\text{C}$ skiriamosios gebos DrQAQ duomenų kaupiklį.

Ozono koncentracijos matavimai atlikti su ultravioletinės sugertiems principu veikiančiu O_3 41M ozono analizatoriumi. Analizatoriaus jautris – 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Šiuo prietaisu galima aplinkos ore



matuoti iki $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ozono koncentraciją. Ozono analizatorius veikia plačiame temperatūrų ($0 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$) ir slėgio ($0,608 - 1,22$) $\cdot 10^5 \text{ Pa}$ intervale. Ozono koncentracijos patalpoje ir lauke matavimai vykdyti nenutrūkstamai, kompiuteryje fiksuojant 1 minutės vidutines ozono vertes. Ozono koncentracijos registravimui ir analizei naudota PicoLog programinė įranga.

Teoriniam ozono nusėdimo greičiui patalpoje įvertinti naudotos šios šešios lygtys. Ozono koncentracijos pokytį aprašo eksponentinė lygtis (Britigan et al., 2006).

$$C(t) = C(0)e^{-\beta t} \quad (1),$$

čia: $C(t)$ – ozono koncentracija laiko momentu t , $\mu\text{g}/\text{m}^3$; $C(0)$ – ozono koncentracija laiko momentu $t = 0$, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; β – ozono suirimo konstanta, s^{-1} ; t – laikas, s.

(1) priklausomybę galima užrašyti diferencialine forma:

$$\frac{-dC}{dt} = \beta C \quad (2)$$

Antra vertus, ozono koncentracijos pokytis proporcingas jo srautui Q :

$$\frac{-dC}{dt} \sim Q \quad (3)$$

Ryšys tarp ozono koncentracijos C ir srauto Q apibūdina nusėdimo greitis v_g (Hayes 1991):

$$Q = v_g C \quad (4)$$

čia: Q – srautas į paviršiaus vienetą per laiko vienetą, $\mu\text{g}/\text{s} \cdot \text{m}^2$, v_g – nusėdimo greitis, m/s.

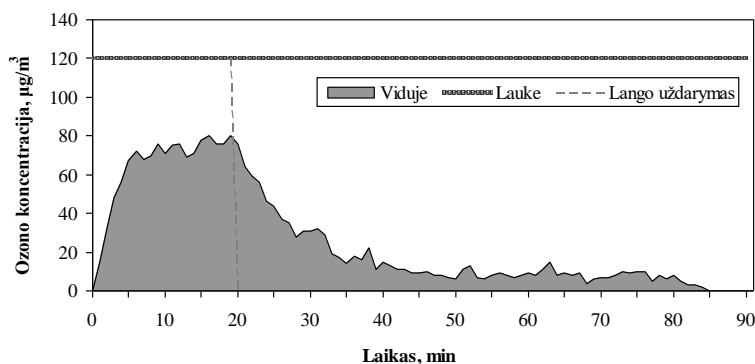
$$\frac{-dC}{dt} = b v_g C \quad (5)$$

čia: b – koeficientas, apibrėžiamas paviršiaus ploto S , ant kurio nusėda ozonas, ir patalpos, iš kurios pašalinama ozonas, tūrio V santykiu:

$$b = \frac{S}{V} \quad (6)$$

Rezultatai ir jų aptarimas

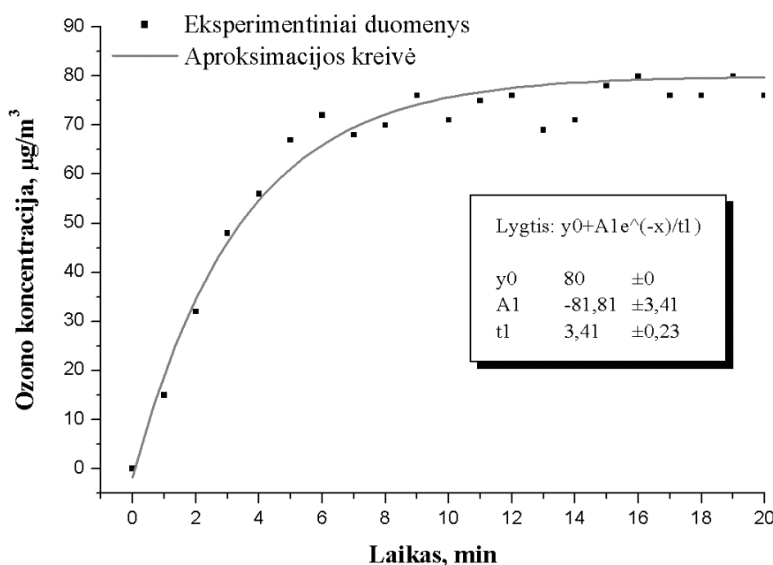
Stebint ozono pritekėjimą iš lauko į vidų pro atidarytą langą patalpoje, atlikta ozono kaupimosi ir suirimo mechanizmų analizė. Tyrimui pasirinktas vasaros sezonas, kuomet pažemio atmosferoje kartais registruojamos žmogaus sveikatai pavojingos ozono koncentracijos. Lauko ozono indėlio šio teršalo koncentracijai patalpoje nustatyti, visi galimi prietaisai, kuriems veikiant vyksta išlydis ir susidaro šis oro teršalas, patalpoje nedirbo. Tyrimo metu lauke registruota $25 \text{ }^\circ\text{C}$, o patalpoje – $22 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūra. Prieš atidarant langą ozono koncentracija patalpoje buvo mažesnė nei $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ozono kaupimosi ir irimo patalpoje rezultatai, gauti atidarius ar uždarius langą, pateikti 1 paveiksle.



1 pav. Ozono kaupimasis ir irimas patalpoje
Fig. 1. Ozone formation and decay in a room



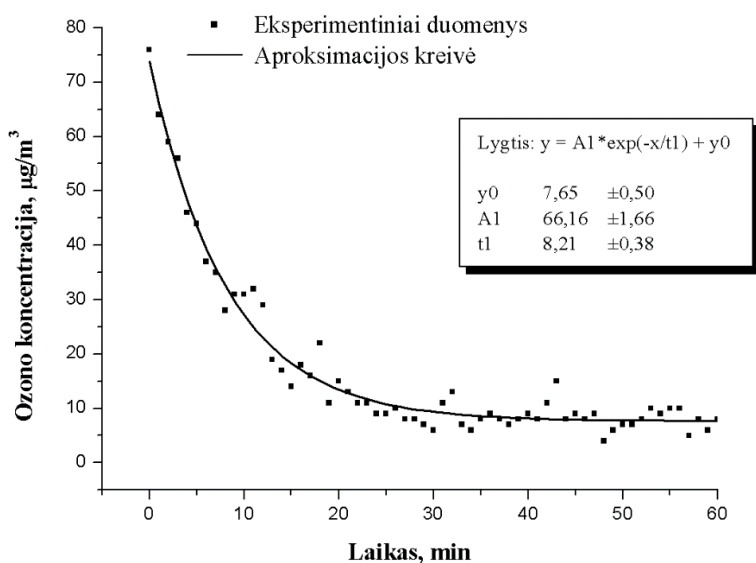
Siekiant suprasti ozono pritekėjimo iš lauko į patalpą mechanizmą ir šio teršalo kaupimosi patalpoje dėsningumus, atliktas ozono koncentracijos patalpoje, atidarius joje langą, matavimas ir vertinimas (2 pav.).



2 pav. Ozono kaupimasis patalpoje
Fig. 2. Ozone accumulation in a room

Sparčiausias ozono pritekėjimas iš lauko į patalpą vyksta per pirmąsias 2 minutes po lango atidarymo, kuomet pasiekama $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ozono koncentracija. Šiame etape ozono kaupimąsi patalpoje charakterizuoja tiesinė priklausomybė. Ozono patekimas pro atidarytą langą į patalpą nuo 2 iki 5 minučių nebevyksta taip intensyviai kaip tik atidarius langą. Iš gautų tyrimo duomenų matyti, kad po 5 minučių nuo lango atidarymo patalpoje nusistovi pastovi $75 \pm 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ozono koncentracija.

Dėl vykstančių lauko oro mainų su patalpos oru, ozono koncentracijos patalpoje stabilumui užtikrinti, langas paliktas atidarytas dar 15 minučių, kai buvo nustatyta, kad po 5 minučių ozono koncentracija patalpoje nusistovi. Uždarius patalpoje langą, atlikta ozono suirimo proceso patalpoje analizė (3 pav.).



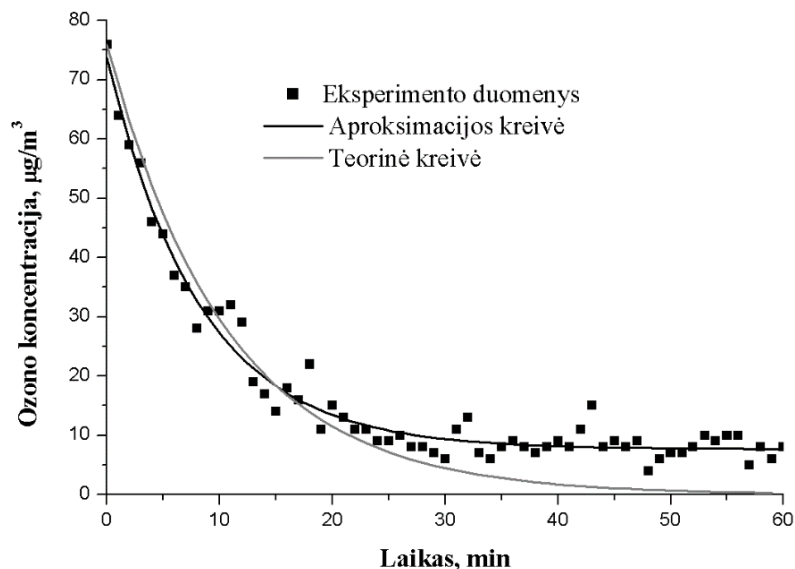
3 pav. Ozono irimas patalpoje
Fig. 3. Ozone decay in a room



Pastebėta, kad didžiausias ozono suirimas yra tik uždarius langą ir tęsiasi iki 5 minutės, kol suyra pusė viso patalpoje esančio ozono. Vėliau šio teršalo irimo greitis mažėja ne taip sparčiai. Apskaičiuota tirtoje patalpoje ozono pusėjimo trukmė (7 minutės) sutampa kitų autorių (Fadeyi et al., 2015) gautomis ozono pusėjimo trukmės (7–10 minučių) patalpose vertėmis. Kadangi į patalpą iš lauko patekęs ozonas visiškai suiro per 1,5 valandos, vadinasi lauko ozono patalpoje esančiam žmogui įtaka stebima 90 minučių laikotarpyje.

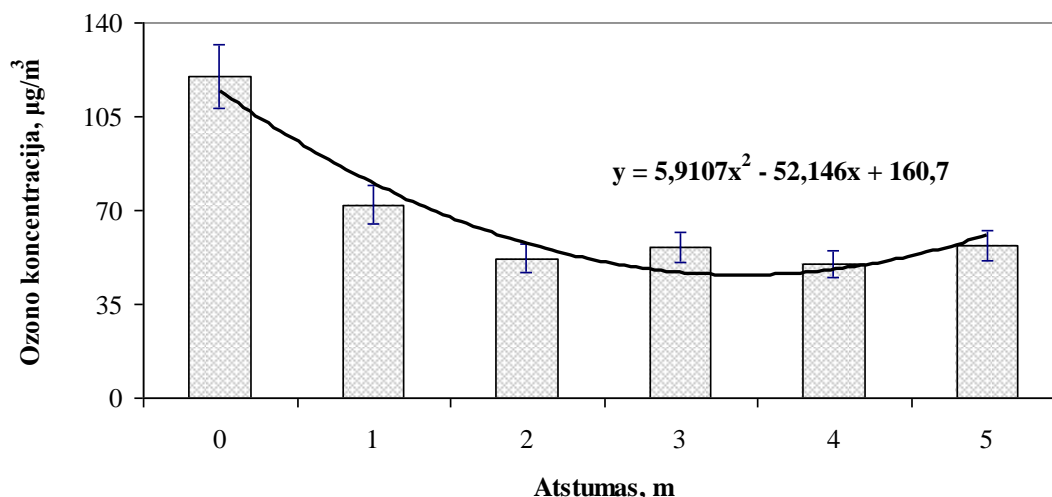
Tiriant ozono pritekėjimą iš lauko į patalpą pro atidarytą langą, daroma prielaida, kad ozonas suyra tik dėl nusėdimo ant paviršių v_g , o koncentracijos pokytis dėl homogeninių cheminių reakcijų yra mažas. Ozono nusėdimo greitis skaičiuotas 90 m^2 paviršiaus ploto ir 20 m^3 tūrio patalpai, kurioje patalpos ir tūrio santykis lygus $0,045 \text{ cm}^{-1}$, naudojantis 1–6 lygtimis. Teoriškai apskaičiuotas ozono nusėdimo tirtoje patalpoje ant joje esančių paviršių greitis lygus $0,035 \text{ cm/s}$. Tirtoje patalpoje nustatytas ozono nusėdimo greitis artimas kitų mokslininkų gautoms šio teršalo nusėdimo standartiškai apstatytose patalpose vertėms $0,001–0,2 \text{ cm}$ (Nazaroff, 1989). Tuo tarpu eksperimentiškai nustatytas ozono nusėdimo ant patalpoje esančių paviršių greitis lygus $0,045 \text{ cm/s}$. Teoriškai apskaičiuoto ir eksperimentiškai nustatyto nusėdimo ozono greičio nesutapimą galima būtų paaiškinti tuo, kad teoriniame nusėdimo greičio skaičiavimo modelyje įvertintas tik nusėdimas ant paviršių. Ozono suirimą patalpoje galėjo paveikti ir šio teršalo reakcijos su organinėmis bei kitomis priemaišomis esančiomis patalpos ore, todėl teoriškai ir eksperimentiškai nustatytas ozono nusėdimo ant paviršių greitis gali skirtis. Be to, įvairūs paviršiai lemia nevienodus ozono nusėdimo ant jų greičius, o tirtoje patalpoje paklotiniai paviršiai buvo labai skirtingi (metalas, medis, plastikas, popierius, stiklas, linoleumas ir t. t.).

Atlikta ozono suirimo tirtoje patalpoje, ozonui patenkant iš lauko į vidų pro atidarytą langą, teoriškai nustatytų ir eksperimentiškai gautų duomenų lyginamoji analizė (4 pav.).



4 pav. Ozono irimo patalpoje eksperimentiniai duomenys, teorinė ir aproksimacijos kreivės
Fig. 4. Experimental data, theoretical and approximation curves of ozone decay in a room

Lyginant teorinę kreivę su eksperimentine stebimas geras duomenų sutapimas ozono irimo pradžioje (4 pav.). Praėjus 30 min nuo suirimo proceso pradžios, teorinė kreivė daug sparčiau artėja prie nulio nei eksperimentinė. Čia teoriniai ir eksperimentiniai duomenys nesutampa vidutiniškai $\pm 8\%$. Pastebėta, kad eksperimentinius duomenis aprašanti aproksimacijos kreivė gerai sutampa su teorine kreive, o koreliacijos koeficientas tarp ir eksperimentiškai aproksimuotų ir teorinių duomenų yra $+0,993$.



5 pav. Ozono koncentracija patalpoje esant atviram langui
Fig. 5. Ozone concentration in a room with an open window

Tirtoje patalpoje įvertintas ozono koncentracijos patalpoje ($75 \pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ir lauke ($120 \pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) santykis, kuris gauta lygus $0,63 \pm 0,04$. Artimi rezultatai gauti ir kitų mokslininkų tyrime, kai ozono koncentracijos patalpoje ir lauke santykis, atidarius langą, nustatytas $\sim 0,65$ (Sabersky et al., 1973).

Siekiant nustatyti atstumą, kuriame lauko ozonas nebeturi įtakos ozono koncentracijos lygiui patalpoje, atlikti ozono koncentracijos skirtingu atstumu nuo atidaryto lango patalpoje matavimai ir analizė (5 pav.). Ozono koncentracijos patalpoje, esant atviram langui, matavimai rodo, kad lauko ozonas didžiausią įtaką ozono koncentracijos kaitai patalpoje turi iki 2 m atstumu nuo lango. Ozono koncentracijos 2 – 5 m atstumu nuo lango kitimas ($50 - 57 \mu\text{g}/\text{m}^3$) neženklaus. Nustatyta, kad ozono koncentracija prie pat lango 67 % didesnė nei 1 m atstume ir 130 % didesnė nei 2 m atstume.

Išvados

1. Kai patalpoje nėra tiesioginių ozono emisijos šaltinių, lauko ozonas priskiriamas prie lokalių oro taršos ozonu viduje šaltinių, o ozono koncentracijos viduje ir lauke santykis lygus $0,63 \pm 0,04$. Lauko ozonas gali padidinti šio teršalo koncentracijos lygį patalpoje iki 80 kartų.
2. Nustatyta, kad intensyviausias ozono kaupimasis ir suirimas patalpoje vyksta pradiniu lango atidarymo ar uždarymo momentu, o nebekintanti šio teršalo koncentracija viduje užfiksuota po 5 minučių, o visiškas suirimas – po 90 minučių.
3. Eksperimentiškai įvertintas ozono nusėdimo patalpoje greitis ($0,045 \text{ cm}/\text{s}$) 1,3 karto didesnis už teoriškai apskaičiuotą ($0,035 \text{ cm}/\text{s}$), o nesutapimą galėjo lemti paklotinių paviršių patalpoje įvairovė.
4. Gautas statistiškai labai stiprus ryšys tarp eksperimentiškai aproksimuotų ir teorinių duomenų, apskaičiuotas teigiamas Pirsono koreliacijos koeficientas tarp šių kintamųjų 0,993.
5. Reikšmingi ozono koncentracijos pokyčiai patalpoje, tiriant ozono pritekėjimą iš lauko į patalpą pro atidarytą langą, nustatyti iki 2 m atstumu nuo lango. Ozono koncentracija patalpoje 1 m atstumu nuo lango 0,60 karto, o 2 m atstumu – 0,43 karto mažesnė nei prie pat lango.

Literatūra

1. Abeleira, A.J., Farmer, D.K. (2017). Summer ozone in the northern Front Range metropolitan area: weekend-weekday effects, temperature dependences, and the impact of drought. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(11), 6517–6529.
2. Australian Government. (2018). Air Quality Standards. <http://environment.gov.au/protection/air-quality/air-quality-standards> Australian Government, Department of the Environment and Energy (accessed 9 April 2018).



3. Britigan, N., Alshawa, A., Nizkorodov, S. A. (2006). Quantification of ozone levels in indoor environments generated by ionization and ozonolysis air purifiers. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(5), 601–610.
4. Chen, C. and Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45(2), 275–288.
5. Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R. et al. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study. *Lancet*. 2017, 389(10082), 1907–1918.
6. E. C. Ozone Directive. (2016). The current ozone directive and other relevant legislation. <http://www.eea.europa.eu/publications/TOP08-98/page006.html> ((accessed 12 March 2018). 2016. in: Commission E., Ed.)
7. Fadeyi, M.O. (2015). Ozone in indoor environments: Research progress in the past 15 years. *Sustainable Cities and Society*, 18, 78–94.
8. Farhat, S.L., Almeida, M.B., Silvafilho, L.F., Farhat, J., Rodrigues, J.C., Braga, A.F. (2013). Ozone is associated with an increased risk of respiratory exacerbations in patients with cystic fibrosis. *Chest*, 144(4), 1186–1192.
9. Girgzdiene, R. and Girgzdys, A. (2003). Variations of the seasonal ozone cycles in the Preila station over the 1988–2001 period, *Environmental and Chemical Physics*, 25(1), 11–16.
10. Goodman, J.E., Zu, K., Loftus, C.T., Lynch, H.N., Prueitt, R.L., Mohar, I., Shubin, S.P., Sax, S.N. (2018). Short-term ozone exposure and asthma severity: Weight-of-evidence analysis. *Environmental Research*, 160, 391–397.
11. Guo, C., Gao, Z., Shen, J. (2019). Emission rates of indoor ozone emission devices: A literature review. *Building and Environment*, 158, 302–318.
12. Hayes, R. S. (1991). Use of an Indoor Air Quality Model (IAQM) to Estimate Indoor Ozone Levels. *Journal of Air and Waste Management Association*, 41(2), 161–170.
13. Health Canada. (2010). Residential indoor air quality guideline - ozone. Available online at: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/residential-indoor-air-quality-guideline-ozone.html> ((accessed 12 March 2018). Ottawa: Health Canada. Government of Canada).
14. Levy, J.I., Chemerynski, S.M., Sarnat, J.A. (2005). Ozone exposure and mortality an empiric Bayes Metaregression analysis. *Epidemiology*, 16(4), 458–468.
15. Liu, M., Huang, Y., Ma, Z., Jin, Z., Liu, X., Wang, H., Liu, Y., Wang, J., Jantunen, M., Bi, J. et al. (2017). Spatial and temporal trends in the mortality burden of air pollution in China: 2004–2012. *Environment International*, 98, 75–81.
16. McClurkin, J.D., Maier, D.E., Ileleji, K.E. (2013). Half-life time of ozone as a function of air movement and conditions in a sealed container. *Journal of Stored Products Research*, 55, 41–47.
17. Nazaroff, W. N. (1989). Mathematical modeling and control of pollutant dynamics in indoor air. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. California Institute of Technology, Pasadena, California.
18. Nicole, B., Ahmad, A., Nizkorodov, S.A. (2006). Quantification of ozone levels in indoor environments generated by ionization and ozonolysis air purifiers. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56(5), 601–610.
19. Niu, Y., Cai, J., Xia, Y., Yu, H., Chen, R., Lin, Z., Liu, C., Chen, C., Wang, W., Peng, L. et al. (2018). Estimation of personal ozone exposure using ambient concentrations and influencing factors. *Environment International*, 117, 237–242.
20. Sabersky, R. H., Sinema, D. A., Shair, F. H. (1973). Concentrations, Decay rates and Removal of Ozone and Their Relation to Establishing Clean Indoor Air, *Environmental Science and Technology*, 7(4), 342–346.
21. Salonen, H., Salthammer, T., Morawska, L. (2018). Human exposure to ozone in school and office indoor environments. *Environment International*, 119, 503–514.
22. Shen, J. and Gao, Z. (2018). Ozone removal on building material surface: A literature review. *Building and Environment*, 134, 205–217.
23. Singh, B.P., Kumar, A., Singh, D., Punia, M., Kumar, K., Jain, V.K. (2014). An assessment of ozone levels, UV radiation and their occupational health hazard estimation during photocopying operation. *Journal of Hazardous Materials*, 275, 55–62.
24. Stowell, J.D., Kim, Y.M., Gao, Y., Fu, J.S., Chang, H.H., Liu, Y. (2017). The impact of climate change and emissions control on future ozone levels: implications for human health. *Environment International*, 108, 41–50.
25. US EPA. (2018). NAAQS table. Available online at: <https://www.epa.gov/criteria-airpollutants/naaqs-table> ((accessed 12 March 2018). United States Environmental Protection Agency).



26. Wang, T., Xue, L., Brimblecombe, P., Lam, Y.F., Li, L., Zhang, L. (2017). Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. *Science of The Total Environment*, 575, 1582–1596.
27. Weschler, C.J., Shields, H.C., Naik, D.V. (1989). Indoor Ozone Exposures. *Air and Waste Management Association*; 39(12), 1562–1568.
28. Weschler, C.J. (2000). Ozone in indoor environments: Concentration and chemistry. *Indoor Air*, 10(4), 269–288.
29. WHO. (2006). Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf> ((accessed 12 March 2018), World Health Organization).
30. Zhang, Q., Jenkins, P.L. (2017). Evaluation of Ozone Emissions and Exposures from Consumer Products and Home Appliances. *Indoor Air*, 27(2), 389–397.

Study of the Patterns of Ozone Transport from Outdoors to Indoors

(Received in April, 2023; Accepted in April, 2023; Available Online from 10th of May, 2023)

Summary

As a result of growing urbanization, the pace of automobilization and industrial development is also increasing and leads to the increased atmospheric pollution, including ozone. Although there are no direct sources of ozone emission in the atmosphere, it is formed from ozone precursors (volatile organic compounds, nitrogen oxides) when they are exposed to sunlight. Outdoor ozone plays a major role in changing the concentrations of this pollutant indoors when there are no direct sources of ozone generation. Although the concentration of ozone indoors where people spend most of their time is usually lower than that outdoors, the variety and wide use of electrical devices may significantly increase the levels of this pollutant indoors. Ozone is becoming one of the most important air pollutants in Lithuania because its concentrations are increasing not only outdoors, but also indoors, therefore people are not protected from the harmful effects of this pollutant anywhere. This study is important because it allowed to evaluate the ozone concentrations both outdoors and indoors, as well as the patterns of ozone transport indoors, and can be used to predict the dispersion of this pollutant indoors at different ozone concentrations outdoors.

In order to evaluate the contribution of outdoor ozone to the level of indoor ozone, the experiment was carried out during the summer season, when the ozone concentration is higher than during other seasons of the year. A room with an area of 20 m² was chosen for the study, and the transport of ozone from outdoors to indoors through a fully opened window of 1.44 m² was recorded. During the study, electrical devices that may generate ozone during their operation were turned off, so the main source of this pollutant indoors was outdoor ozone. During the study, ozone concentration measurements were made with an O₃ 41M analyzer, and temperature was measured with a DrDAQ data logger. By observing ozone transport from outdoors to indoors through the window, the processes of ozone accumulation, decay and dispersion indoors were analyzed.

During the study, the half-life of indoor ozone was estimated: it is equal to 7 minutes. Having analyzed the exchange mechanism of outdoor and indoor ozone, it was calculated that the ratio of outdoor/indoor ozone is equal to 0.63. When observing the entry of this pollutant from outdoors through an open window, significant fluctuations in indoor ozone concentration were recorded at a distance of up to 2 m from the window. It was found that the indoor ozone concentration at a distance of 2 m from the window decreases by 57 %.

