

dr inż. **GRZEGORZ CZERSKI¹**

Przyjęty/Accepted/Принят: 17.12.2013;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 29.01.2014;
Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2014;

OCENA WPLYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA RYZYKO ZATRUĆ PRODUKTAMI SPALANIA Z URZĄDZEŃ GAZOWYCH²

Impact Assessment of Selected Factors on the Risk of Poisoning with Combustion Products From Gas Appliances

Оценка влияния выбранных факторов на риск отравления продуктами сгорания поступающими из газовых устройств

Abstrakt

Cel: Opracowany model symulacyjny umożliwia analizę zmian składu atmosfery gazowej w pomieszczeniach mieszkalnych z urządzeniami gazowymi. Na tej podstawie można określić potencjalne zagrożenia dla bezpieczeństwa użytkowników rozpatrywanego pomieszczenia.

Metoda: Do obliczenia składu atmosfery gazowej w pomieszczeniach mieszkalnych z urządzeniami gazowymi wykorzystano model symulacyjny oparty na bilansie masowym. Przedstawiono metodologię prowadzenia obliczeń. Dla oceny bezpieczeństwa mieszkańców wybrano: stężenie tlenu węgla oraz tlenu w pomieszczeniu. Model umożliwia przeprowadzanie symulacji dla przypadków najczęściej spotykanych nieprawidłowości w pomieszczeniach z urządzeniami gazowymi. Analizę przeprowadzono dla łazienki wyposażonej w gazowy przepływowy ogrzewacz wody o mocy 20 kW. Obliczenia stężenia CO i O₂ w pomieszczeniu przeprowadzono dla czasu 15 min. Obliczenia wykonano dla różnych: objętości gazowego pomieszczenia, strumieni powietrza wentylacyjnego, stężeń tlenu węgla w spalinach oraz czasu napływu spalin do pomieszczenia.

Wyniki: Im mniejsza kubatura pomieszczenia tym wentylacja ogrywa większą rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa. W pomieszczeniu o małej kubaturze i braku lub niewystarczającej wentylacji stężenia tlenu węgla i tlenu osiągają wartości zagrażające życiu już po kilku minutach. Dla pomieszczeń o większej kubaturze i odpowiednio wentylowanych stężenia CO i O₂ również osiągają niebezpieczne poziomy grożące co najmniej ciężkim zatruciem. Im wyższe stężenie CO w spalinach tym zagrożenie większe. Niezależnie od czasu napływu spalin do pomieszczenia, pomimo odpowiedniej wentylacji, występuje przekroczenie dopuszczalnego stężenia CO w pomieszczeniu (0,008%) a użytkownikom łazienek z niesprawnymi urządzeniami grozi ciągle podtruwanie. Kluczowym elementem zapewniającym bezpieczeństwo użytkowników urządzeń gazowych jest układ spalinowy, ponieważ wentylacja nawet funkcjonująco prawidłowo nie jest w stanie zapewnić bezpiecznych stężeń CO i O₂ w pomieszczeniu.

Wnioski: Uzyskane wyniki pokazują, że niesprawność układu odprowadzania spalin sprawia, iż urządzenie gazowe wywiera niekorzystny wpływ na zdrowie mieszkańców. Na stężenie CO i O₂ w pomieszczeniu mieszkającym wyposażonym w urządzenie gazowe największy wpływ ma strumień powietrza wentylacyjnego oraz kubatura pomieszczenia. Spadek koncentracji tlenu w pomieszczeniu będzie miał miejsce niezależnie od tego czy w spalinach jest tlenek węgla czy też nie. Najskuteczniejszym sposobem, całkowicie eliminującym zagrożenie zatrucia tlenkiem węgla jest wymiana urządzeń gazowych z otwartą komorą spalania na urządzenia z zamkniętą komorą spalania.

Słowa kluczowe: zatrucie tlenkiem węgla, bezpieczeństwo użytkowników urządzeń gazowych, model symulacyjny

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Abstract

Purpose: The developed simulation model enables to analyse the changes in air composition in residential rooms with gas appliances. On this basis, one can identify potential threats to the safety of the users of such kind of rooms.

Method: The simulation model based on mass balance was used to calculate the composition of the gas atmosphere in a residential room equipped with a gas appliance. The authors presented the methodology of the calculations. For the assessment of the residents safety the authors analysed the concentrations of carbon monoxide and oxygen in the room. The model enabled the authors to

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; gczerski@agh.edu.pl / Academy of Mining and Metallurgy, Poland

² Artykuł został wyróżniony przez Komitet Redakcyjny / The article was recognised by the Editorial Committee / Эту статью наградил Редакционный Совет

carry out simulations for the cases of the most common abnormalities in rooms with gas appliances. The analysis was performed for a bathroom equipped with a gas-fired instantaneous water heater with the power of 20 kW. Each calculation of CO and O₂ concentrations in the room took 15 minutes. Calculations were made for various: gas volumes of the room, flow rates of ventilation, carbon monoxide concentrations in combustion gases and inflow times of combustion gases into the room.

Results: The role of ventilation in ensuring safety increases with a decrease in the gas volume of the room. The carbon monoxide and oxygen concentrations reach life-threatening values after a few minutes in a small room and with the lack of or insufficient ventilation. For rooms with a larger volume, and properly ventilated, the concentrations of CO and O₂ also reach dangerous levels which may cause at least a serious poisoning. The higher the concentration of CO in combustion gases is, the greater the risk becomes. The permissible concentration of CO in the room (0.008%) is exceeded regardless of the inflow time of the combustion gases into the room and despite proper ventilation, so bathroom users with malfunctioning gas appliances could be constantly poisoned. A key element for ensuring the safety of the users of gas appliances is a combustion gases evacuation system because the ventilation, even when working properly, is not able to ensure safe concentrations of CO and O₂ in the room.

Conclusions: The results show that a failure of the combustion gas evacuation system leads to the gas appliance having a negative impact on the health of the residents. The greatest impact on the concentration of CO and O₂ in the residential room equipped with a gas appliance is demonstrated by the air flow rate of ventilation and the room volume. The decrease in the concentration of oxygen in the room will take place regardless of whether carbon monoxide is, or is not present in the combustion gases. The best way to completely eliminate the risk of carbon monoxide poisoning is the exchange of gas appliances with an open combustion chamber for appliances with a closed combustion chamber.

Keywords: carbon monoxide poisoning, safety of gas appliances users, simulation model

Type of article: original scientific article

Аннотация

Цель: Разработанная симуляционная модель делает возможным анализировать изменения в составе газовой атмосферы в жилых помещениях с газовым оборудованием. На данной основе можно определить возможные угрозы безопасности пользователей рассматриваемого помещения.

Метод: Для измерения состава газовой атмосферы в жилых помещениях, в которых находится газовое оборудование была использована симуляционная модель основанная на массовом балансе. Была представлена методология проведения измерений. Для проведения оценки безопасности жителей были исследованы: концентрации углерода и кислорода в помещении. Модель позволяет провести симуляцию на примерах наиболее встречаемых неправильностей в помещениях с газовым оборудованием. Проведён анализ для ванной, оснащенной в газовый проточный водонагреватель мощностью 20 киловатт. Измерения концентрации СО и О₂ в помещении были проведены за 15 минут. Измерения сделаны при разных: газовых объёмах, вентиляционных струях, концентрациях углерода в выходах, а также временах притока выходов в помещение.

Результаты: Чем меньше объём комнаты тем большую роль играет вентиляция для обеспечения безопасности. В маленькой комнате при отсутствии или недостаточной вентиляции, конвертации оксида углерода (коварного газа) и кислорода достигают уровня угрожающего жизни человека за несколько минут. Для больших помещений и правильно вентилированных, концентрации СО и СО₂ также достигают опасных величин угрожающих отравлением, эффектом которого, в самом лучшем случае, есть тяжелее отравление. Чем выше концентрация СО в выходах, тем выше уровень угрозы. Независимо от времени притока вредных газов в помещение, помимо правильной вентиляции, выступает превышение допустимого уровня концентрации СО в комнате (0,008%), а пользователям ванных угрожает постоянное отравление. Ключевым элементом обеспечивающим безопасность пользователей газовых устройств является система сгорания, потому что вентиляция, даже работающая правильно не в состоянии обеспечить безопасных концентраций СО и СО₂ в помещении.

Выводы: Полученные результаты указывают, что неэффективность системы удаления выхлопных газов следует тем, что газовое устройство нарушает здоровье жителей. На концентрацию СО и СО₂ в помещении оборудованным в газовое устройство самое большое влияние играют струя вентиляционного воздуха и объём помещения. Падение концентрации кислорода в помещении будет зависеть от того, есть ли в выхлопных газах монооксид углерода или нет. Самым эффективным способом, который в целом ликвидирует угрозу отравления монооксидом углерода есть изменение газовых устройств с открытой камерой сгорания на устройства с закрытой камерой сгорания.

Ключевые слова: отравление окисью углерода, безопасность пользователей газового оборудования, симуляционная модель

Вид статьи: оригинальная научная работа

1. Wprowadzenie

W Polsce i wielu innych krajach w mieszkaniach wyposażonych w urządzenia gazowe dochodzi do dużej liczby wypadków zatruc produktami spalania, w tym niestety także śmiertelnych. Są to wypadki spowodowane toksycznym oddziaływaniem tlenku węgla, ale także spadkiem zawartości tlenu w atmosferze pomieszczeń. Do zatruc szczególnie często dochodzi w trakcie sezonu grzewczego. Korporacja Kominiarzy Polskich, która zbiera dane z mediów, komend straży pożarnych i policji szacuje całkowitą liczbę wypadków zatruc CO w Polsce na kilka tysięcy rocznie, a zatruc ze skutkiem śmiertelnym na kilka-

set. Z kolei wg [1] zatrucia CO powodują 300-400 zgonów rocznie. Według analizy przeprowadzonej w publikacji [2] śmiertelnych zatruc tlenkiem węgla pochodzącym z urządzeń gazowych było ok. 120 rocznie w latach 1991-1997, a ich liczba spadła w latach 1998-2002 do ok. 70, ale sam autor tej analizy ma wątpliwości, czy uzyskane liczby nie są zaniżone. Znacznie trudniej jest oszacować liczbę wypadków niekończących się śmiercią. Według doświadczeń zebranych w Wałbrzychu przez Stację Sanitarno-Epidemiologiczną na jeden wypadek śmiertelny przypada pięć niekończących się zgonem [3]. Liczba przyjęć do szpitali z powodu zatruc tlenkiem węgla w la-

tach 2005-2011 wahała się w przedziale od 2,5 do 5 tys. rocznie [1]. Nie sposób jest natomiast oszacować liczbę osób, które ulegają podtruwaniu, doznają uszczerbku na zdrowiu, lecz nie są hospitalizowane. Dla porównania w Stanach Zjednoczonych dochodzi corocznie do około 4 tys. wypadków śmiertelnych związanych z samobójczymi i przypadkowymi zatruciami CO, z tym że większość z nich spowodowana jest pracą silników benzynowych napędzających różnego rodzaju maszyny [4]. Z kolei w wielkiej Brytanii zanotowano rocznie 1000 śmiertelnych ofiar zatruc CO, we Francji z tego powodu 5000-8000 osób podano hospitalizacji, a we Włoszech odnotowano ok. 6000 ofiar zatruc i ponad 300 przypadków zgonu. Śmiertelność dla jednej populacji badań obejmujących zatrucia CO wynosiła 31%, a dla innej tylko 1-2% [5].

Praca urządzeń gazowych znajdujących się w pomieszczeniach mieszkalnych może wywierać istotny wpływ na skład atmosfery gazowej tych pomieszczeń, tj. obniżenie koncentracji tlenu oraz pojawienie się toksycznego tlenku węgla, a nawet tlenku azotu [6]. Dotyczy to urządzeń z otwartą komorą spalania, czyli np. kuchenek gazowych czy gazowych przepływowych ogrzewaczy wody. Szczególnie niebezpieczne są gazowe przepływowe ogrzewacze wody usytuowane zazwyczaj w pomieszczeniach (najczęściej łazienkach) o małej kubaturze i często niedostatecznym napływie powietrza, a największa liczba wypadków ma miejsce w wielokondygnacyjnych budynkach mieszkalnych. Dla bezpieczeństwa użytkowników takich pomieszczeń szczególne znaczenie ma prawidłowe funkcjonowanie układu odprowadzania spalin oraz układu wentylacyjnego. Ich sprawne działanie winno skutecznie chronić przed zagrożeniami wynikającymi z użytkowania urządzeń gazowych i zapewniać odpowiedni, bezpieczny skład atmosfery gazowej [7]. Realizowany na szeroką skalę proces termomodernizacji budynków przyczynił się w znacznym stopniu do ograniczenia napływu powietrza do pomieszczeń mieszkalnych [8]. Sytuacja ta skutkuje brakiem dostatecznej ilości powietrza gwarantującej bezpieczne, zupełne spalanie w urządzeniach gazowych. Badania wykazały, że gazowe przepływowe ogrzewacze wody są bardzo wrażliwe na niedostateczny napływ powietrza. W przypadku braku dostatecznej ilości powietrza w spalinach pojawia się tlenek węgla [9-10]. Zdarza się też, że wentylacja czy też układ odprowadzania spalin są zaprojektowane i wykonane prawidłowo jednak eksploatowane są w sposób niewłaściwy, ponieważ użytkownicy urządzeń gazowych nie posiadają wiedzy odnośnie działania tych zapewniających im bezpieczeństwo układów.

Pojawienie się nawet niewielkich stężeń tlenku węgla w atmosferze wskutek napływu do pomieszczenia spalin z niesprawnego urządzenia gazowego (niezupełne spalanie paliwa gazowego) stwarza niebezpieczeństwo zatrucia. Wg [11] dopuszczalne stężenie tlenku węgla w pomieszczeniach mieszkalnych wynosi 10 mg/m³ dla czasu ekspozycji 30 minut i 3 mg/m³ dla 24-godzinnej ekspozycji, czyli odpowiednio 0,008% vol. i 0,0027% vol., jednak ww. wartości w Polsce są nieaktualne. Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej od chwili wejścia w życie konstytucji RP straciło moc prawną (nie jest Ustawą ani Rozporządzeniem), a odpowiedzialny Minister nie wydał (i nie prowadzi prac nad wydaniem) no-

wej regulacji w tej dziedzinie. Stopień zatrucia CO zależy od: jego stężenia w atmosferze, czasu działania, aktywności, jak również wieku i stanu zdrowia osoby narażonej na jego działanie. Wpływ zawartości tlenku węgla na organizm człowieka przedstawiono w tabelicy 1. Warto w tym miejscu wspomnieć, iż według [12, 13] oddziaływanie niskich stężeń CO w długim okresie czasu jest nawet bardziej szkodliwe niż krótkotrwałe przebywanie człowieka w pomieszczeniach z wysoką zawartością tlenku węgla. Niedocenianym problemem jest więc narażenie na chroniczne podtruwanie, dla którego objawy przybierają postać grypopodobną, a zatrucie to jest często mylone z zespołem chronicznego zmęczenia. W trakcie wdychania tlenek węgla jest wchłaniany przez płucia do krwiobiegu, gdzie wiąże się trwale z hemoglobina, tworząc tzw. karboksyhemoglobinę (COHb). Zawartość COHb poniżej 10% przebiega zazwyczaj bezobjawowo; dla 10-30% mogą pojawić się objawy zatrucia CO takie jak: ból i zawroty głowy, osłabienie, nudności, dezorientacja i zaburzenia widzenia; dla 30-50% występują duszności, wzrost tętna i oddechów, omdlenia; a powyżej 50% mogą wystąpić utrata przytomności, drgawki i zatrzymanie krążenia [14]. Jako poziom śmiertelny przyjmuje się 60% COHb we krwi. Do oceny zawartości COHb we krwi można wykorzystać np. równanie Coburn-Forster-Kane'a [15], które jest zaawansowanym podejściem do modelowania COHb we krwi, a do jego wad zaliczyć należy użycie dużej liczby zmiennych, z których wiele musi być obliczona z dodatkowych równań.

W świetle obowiązujących norm jako kryterium sprawności urządzenia gazowego przyjmuje się graniczne stężenie CO w suchych, nierozcieńczonych spalinach na poziomie 0,1% vol. Spadek koncentracji tlenu jest powodowany zużyciem go w procesie spalania, jak też ewentualnym napływem spalin do pomieszczenia. Zakłada się, że koncentracja tlenu w pomieszczeniu nie powinna spadać poniżej 19,5%, a jako tzw. stężenie śmiertelne przyjmuje się poziom 16% [17]. Nierzadko dopuszczalne stężenia tlenku węgla dla przepływowych ogrzewaczy wody są przekraczane, a zawartość CO w spalinach nie musi być skorelowana z działaniem systemu wentylacyjnego. Jak pokazują wyniki pomiarów przedstawionych m.in. w publikacji [18], stężenia CO w spalinach dla niesprawnych urządzeń przy wymaganej ilości powietrza do spalania mogą osiągać bardzo wysokie poziomy. W ww. publikacji w przypadku 7 z 11 przebadanych urządzeń został przekroczony dopuszczalny poziom stężenia tlenku węgla w suchych nierozcieńczonych spalinach (1000 ppm), a wartości stężenia CO wahały się w granicach 5 750-43 950 ppm. Napływ spalin do pomieszczenia ma najczęściej miejsce przy ciągu wstecznym w przewodzie spalinowym i w takiej sytuacji nawet sprawne urządzenia stają się wytwornicami tlenku węgla, a stężenia CO mogą sięgać kilku procent [19].

Wartość strumienia powietrza przepływającego przez łazienkę z wentylacją grawitacyjną uzależniona jest od szeregu czynników takich jak: szczelność przegród zewnętrznych oraz ich ilość i wielkość, drożność i wysokość kanału wentylacyjnego, temperatura powietrza wewnątrz i na zewnątrz, opory przepływu powietrza na całej jego drodze, położenie budynku, wpływ wiatru itd.

W literaturze dostępne są modele opracowane w celu oceny efektywności wentylacji dla budynków przemysłowych czy też garaży oraz tuneli [20-22]. Modelowanie pracy wentylacji naturalnej pomieszczeń opisano w cyklu publikacji A. Bzowskiej [23-25]. Do oceny ilości powietrza wentylacyjnego można wykorzystać również model zaprezentowany w pracy [26]. Natomiast stosunkowo mało jest informacji na temat dyspersji CO w zamkniętych pomieszczeniach. Warto przytoczyć publikację [27], w której autorzy wykorzystują numeryczny model CFD do oceny stężenia CO w pomieszczeniu sąsiadującym z urządzeniem gazowym.

Tabela 1.

Wpływ zawartości tlenku węgla na organizm człowieka [16]

Table 1.

Influence of carbon monoxide concentration on human body [16]

Zawartość CO w powietrzu w % obj. / Percentage of CO concentration in the air	Czas wchłaniania / Time of absorption	Objawy zatrucia / Symptoms of poisoning
0,02	2 ÷ 3 godziny / 2 ÷ 3 hours	lekki ból głowy / slight headache
0,04	1 ÷ 2 godziny / 1 ÷ 2 hours	czołowy ból głowy / forehead pain
	2,5 ÷ 3,5 godziny / 1 ÷ 2 hours	rozległy ból głowy / extensive headache
0,08	45 minut / 45 minutes	zawroty głowy, nudności i konwulsje / faintness, sickness, convulsions
	2 godziny / 2 hours	utrata przytomności / syncope
0,16	20 minut / 20 minutes	bóle i zawroty głowy, mdłości / headaches, faintness, nausea
	2 godziny / 2 hours	śmierć / death
0,32	5 ÷ 10 minut / 5 ÷ 10 minutes	bóle i zawroty głowy, mdłości / pains, faintness, nausea
	30 minut / 30 minutes	śmierć / death
0,64	1 ÷ 2 minut / 1 ÷ 2 minutes	bóle i zawroty głowy / pains and faintness
	10 ÷ 15 minut / 10 ÷ 15 minutes	śmierć / death
1,28	1 ÷ 3 minut / 1 ÷ 3 minutes	śmierć / death

Opracowany model symulacyjny oparty na bilansie masowym umożliwia analizę zmian składu atmosfery gazowej w pomieszczeniach mieszkalnych z urządzeniami gazowymi. Na tej podstawie można określić potencjalne zagrożenia dla bezpieczeństwa użytkowników rozpatrywanego pomieszczenia. Symulację można przeprowadzać dla różnych sytuacji, a wyniki uzyskane dzięki takiej

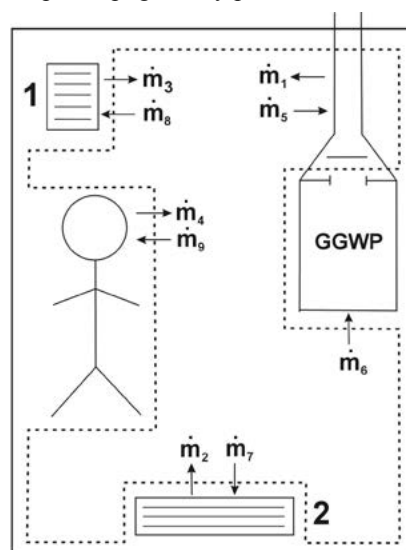
symulacji umożliwiają określenie okoliczności, w jakich w danym pomieszczeniu może wystąpić niebezpieczeństwo dla lokatorów [28].

2. Metoda

Poziom zagrożenia stwarzanego przez urządzenia gazowe determinowany jest przez następujące czynniki:

- moc urządzenia gazowego,
- sprawność techniczna urządzenia (zawartość CO w spalinach),
- kubatura pomieszczenia, w którym urządzenie się znajduje,
- wielkość przepływu powietrza przez pomieszczenie (wentylacja),
- funkcjonowanie układu odprowadzania spalin.

W celu oszacowania wpływu tych czynników na ryzyko zatrucia CO, autor opracował model symulacyjny oparty na bilansie masowym. Umożliwia on analizę zmian składu atmosfery gazowej w pomieszczeniach mieszkalnych z urządzeniami gazowymi. Dla oceny bezpieczeństwa mieszkańców wybrano: stężenie tlenku węgla oraz tlenu w pomieszczeniu. Model umożliwia przeprowadzanie symulacji dla przypadków najczęściej spotykanych nieprawidłowości w pomieszczeniach z urządzeniami gazowymi. Analizę przeprowadzono dla łazienki wyposażonej w gazowy przepływowy ogrzewacz wody, ponieważ największa liczba wypadków zatrucia produktami spalania ma właśnie miejsce w takich warunkach. Ogrzewacz wody wyposażony jest w przerywacz ciągu i przewód spalinowy, którym spaliny odprowadzane są do kanału spalinowego (urządzenie typu B₁₁). Pomieszczenie posiada wentylację grawitacyjną i jest wyposażone w kratkę wentylacyjną oraz otwór nawiewu pośredniego, umieszczony w dolnej części drzwi. Przebieg osłony kontrolnej bilansowanego układu w sposób poglądowy przedstawiono na ryc. 1.



Ryc. 1. Schemat analizowanego układu:

(1 - kratka wentylacyjna; 2 - otwory i nieszczelności w drzwiach; m_1 - m_9 – poszczególne strumienie bilansu masowego; linia przerywana – osłona kontrolna bilansowanego układu)

Fig. 1. A schema of the analyzed system :

(1 - ventilation, 2 - holes and leakiness in the door, m_1 - m_9 – particular flow rates of mass balance; dashed line – border of balance system)

W bilansie uwzględniono następujące pozycje:

Strumienie wchodzące do układu bilansowego

- strumień spalin wypływających z nagrzewnicy piecyka gazowego (\dot{m}_1);
- strumień nawiewu pośredniego przez otwory i nieszczelności w drzwiach (\dot{m}_2);
- strumień powietrza doprowadzanego do pomieszczenia kanałem wentylacyjnym przy odwróconym ciągu (\dot{m}_3);
- strumień powietrza wydychanego przez osoby w pomieszczeniu (\dot{m}_4).

Strumienie opuszczające układ bilansowy

- strumień gazów odlotowych (spaliny + powietrze zasane w przerywaczu ciągu) wypływających do kanału spalinowego (\dot{m}_5);
- strumień powietrza zużywanego dla spalania paliwa gazowego (\dot{m}_6);
- strumień gazów wypieranych z pomieszczenia wskutek napływu do niego spalin; wypływ ten może odbywać się przez otwory i nieszczelności w drzwiach, przez otwór wentylacyjny jak też obydwoma drogami równocześnie (\dot{m}_7);
- strumień gazów odprowadzanych kanałem wentylacyjnym wywołany ciągiem naturalnym w tym kanale (\dot{m}_8);
- strumień powietrza wdychanego przez osoby obecne w pomieszczeniu (\dot{m}_9).
- Stosując podane oznaczenia, równanie bilansu masy dla rozpatrywanego okresu czasu ($\Delta\tau$) przyjmuje następującą ogólną postać:

$$\left(\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_4\right) \cdot \Delta\tau + m_p - \left(\dot{m}_5 + \dot{m}_6 + \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9\right) \cdot \Delta\tau - m_k = 0 \quad (1)$$

gdzie: m_p – masa gazów w pomieszczeniu na początku rozpatrywanego okresu, kg

m_k – masa gazów w pomieszczeniu po czasie $\Delta\tau$, kg

W oparciu o wzór (1) wyznaczyć można udział masy dowolnego składnika x_i atmosfery gazowej pomieszczenia:

$$\left(\dot{m}_1 \cdot x_{i-1} + \dot{m}_2 \cdot x_{i-2} + \dot{m}_3 \cdot x_{i-3} + \dot{m}_4 \cdot x_{i-4}\right) \cdot \Delta\tau + m_p \cdot x_{i-p} - \left(\dot{m}_5 \cdot x_{i-5} + \dot{m}_6 \cdot x_{i-6} + \dot{m}_7 \cdot x_{i-7} + \dot{m}_8 \cdot x_{i-8} + \dot{m}_9 \cdot x_{i-9}\right) \cdot \Delta\tau - m_k \cdot x_{i-k} = 0 \quad (2)$$

gdzie; $x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_{i-9}$ – ułamek masy i-tego składnika w danym strumieniu, -

x_{i-p} – ułamek masy i-tego składnika w pomieszczeniu na początku rozpatrywanego okresu, -

x_{i-k} – ułamek masy i-tego składnika w pomieszczeniu po czasie $\Delta\tau$, -

Jeśli przyjąć, iż x_{i-j} dla każdego strumienia opuszczającego układ jest równe zawartości tego składnika na koń-

cu rozpatrywanego okresu, to zawartość i-tego składnika w atmosferze pomieszczenia po czasie $\Delta\tau$ określa wzór:

$$x_{i-k} = \frac{\left(\dot{m}_1 \cdot x_{i-1} + \dot{m}_2 \cdot x_{i-2} + \dot{m}_3 \cdot x_{i-3} + \dot{m}_4 \cdot x_{i-4}\right) \cdot \Delta\tau + m_p \cdot x_{i-p}}{\left(\dot{m}_5 + \dot{m}_6 + \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9\right) \cdot \Delta\tau + m_k} \quad (3)$$

Przeliczenia zawartości i-tego składnika wyrażonej ułamkiem masowym na koncentrację tego składnika wyrażoną w procentach objętościowych (c_i) można dokonać za pomocą wzoru:

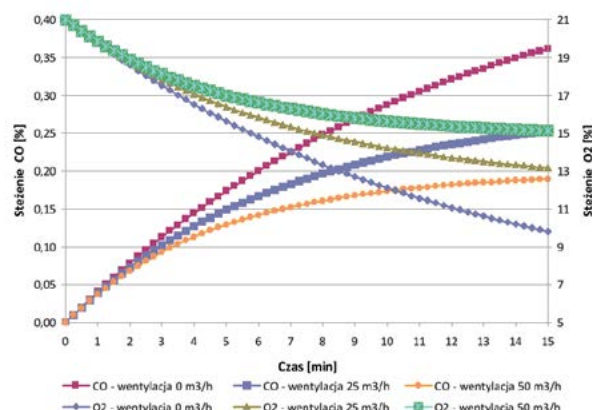
$$c_i = \frac{x_i \cdot \rho_i^{-1}}{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \rho_i^{-1})} \cdot 100 \quad (4)$$

gdzie: ρ_i – gęstość rzeczywista i-tego składnika w warunkach temperatury i ciśnienia panujących w analizowanym pomieszczeniu, kg/m³

3. Wyniki i dyskusja

W celu zilustrowania możliwości opracowanego modelu przedstawiono przykładowe symulacje dla najczęściej występujących nieprawidłowości w pomieszczeniach wyposażonych w urządzenia gazowe takie jak: nieodpowiedni napływ powietrza oraz niesprawna wentylacja, brak lub ograniczony ciąg w kanale spalinowym (wychłodzenia kanału spalinowego, niedrożności kanałów spalinowych, odwrócenie kierunku ciągu przez wiatr), niesprawne urządzenie gazowe oraz mała kubatura pomieszczenia. Analizowana łazienka wyposażona jest w gazowy przepływowy ogrzewacz wody o typowej mocy tj. 20 kW. Do obliczeń przyjęto spotykane w praktyce w niesprawnych urządzeniach gazowych stężenia CO w spalinach (dla większości obliczeń 0,5%), bazując na doświadczeniu własnym oraz rezultatach uzyskanych w publikacjach [18, 19]. Obliczenia przeprowadzono dla czasu napływu spalin do pomieszczenia 15 min.

Wpływ wartości strumienia wentylacji na koncentrację CO i O₂ w pomieszczeniu przedstawiono na ryc. 2 oraz 3. Obliczenia przeprowadzono dla różnych objętości gazowych pomieszczenia (tj. kubatury łazienki pomniejszonej o objętość znajdujących się tam mebli, wyposażenia i człowieka) oraz strumieni wentylacyjnych.



Ryc. 2. Wpływ strumienia wentylacji na stężenie CO i O₂ w pomieszczeniu o objętości gazowej 6,5 m³

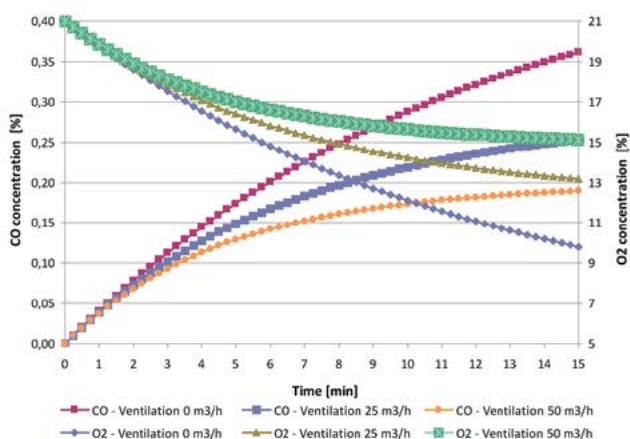
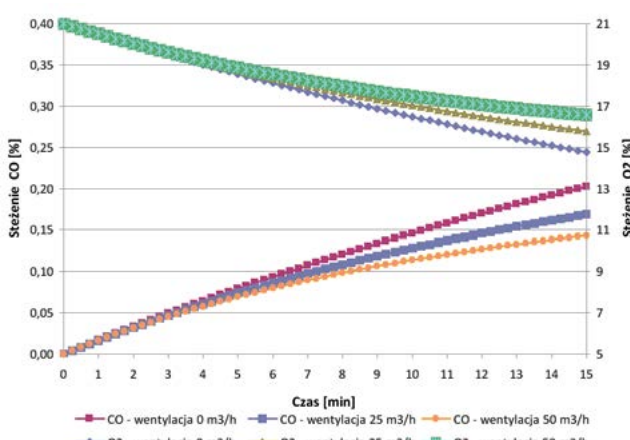


Fig. 2. Influence of ventilation flow rate on CO and O₂ concentrations in a room with 6.5 m³ gas volume



Ryc. 3. Wpływ strumienia wentylacji na stężenie CO i O₂ w pomieszczeniu o objętości gazowej 16 m³

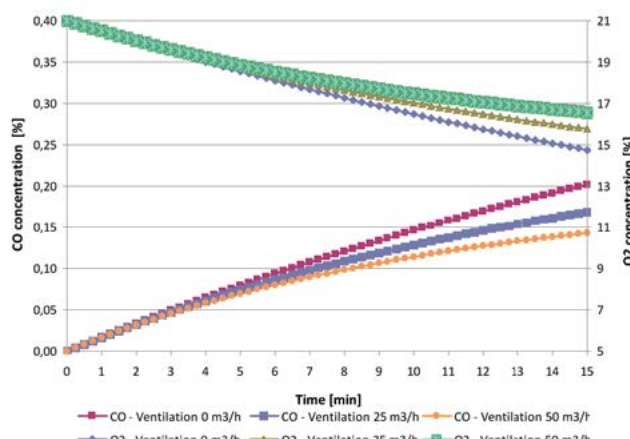


Fig. 3. Influence of ventilation flow rate on CO and O₂ concentrations in a room with 16 m³ gas volume

Założone wartości objętości gazowych kształtowały się następująco:

- 6,5 m³ – rzeczywista objętość gazowa pomieszczenia o minimalnej dopuszczalnej kubaturze 8 m³;
- 16 m³ – pomieszczenie dwukrotnie większe od minimalnej dopuszczalnej kubatury;

Zgodnie z wymaganiami odnośnie wentylacji pomieszczeń z urządzeniami gazowymi strumień powietrza

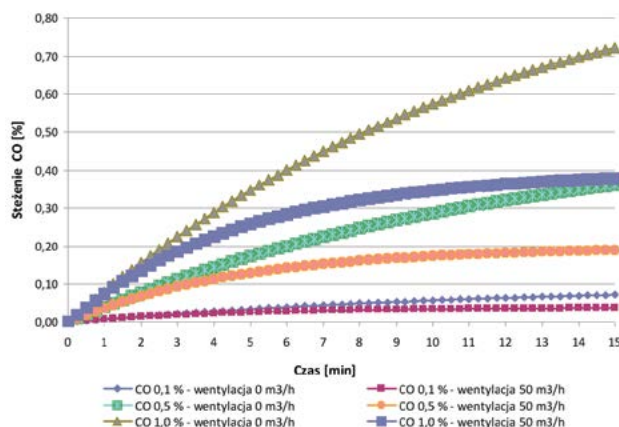
dla łazienki powinien wynosić 50 m³/h, stąd do obliczeń założono następujące wartości:

- 0 m³/h – brak wentylacji;
- 25 m³/h;
- 50 m³/h.

Założone wartości są zgodne z rezultatami pomiarów powietrza przepływającego przez wentylacyjny kanał łazienkowy zaprezentowanymi w publikacji [26]. Uzyskane strumienie powietrza przy zamkniętych oknach na parterze czterokondygnacyjnego budynku w zależności od temperatury na zewnątrz wynosiły od 10 do 80 m³/h. Można domniemywać, iż w przypadku wyższych kondygnacji strumienie powietrza będą mniejsze.

Im mniejsza kubatura pomieszczenia tym wentylacja odgrywa większą rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa. W pomieszczeniu o małej kubaturze i braku lub niewystarczającej wentylacji stężenia tlenku węgla i tlenu osiągają wartości zagrażające życiu już po kilku minutach. W małych łazienkach prawidłowa wentylacja nie zapewnia jednak bezpieczeństwa przy napływie spalin do pomieszczenia, a bardzo niebezpieczne stężenia CO i O₂ osiagane są po kilkunastu minutach. Dla pomieszczenia o kubaturze dwukrotnie większej od wymaganej stężenia CO i O₂ również osiagają niebezpieczne poziomy grożące co najmniej ciężkim zatruciem. Można więc stwierdzić, iż kluczowym elementem zapewniającym bezpieczeństwo użytkowników urządzeń gazowych jest układ spalinowy, ponieważ wentylacja nawet funkcjonująca prawidłowo nie jest w stanie zapewnić bezpiecznych stężeń CO i O₂ w pomieszczeniu.

Dalsze obliczenia przeprowadzono dla pomieszczenia o małej kubaturze, ponieważ takie łazienki dominują w budownictwie wielokondygnacyjnym. Dotychczasowe obliczenia przeprowadzono dla stężania CO w spalinach na poziomie 0,5%. Na ryc. 4 przedstawiono wpływ koncentracji CO w spalinach na stężenie tlenku węgla w pomieszczeniu o małej kubaturze przy braku oraz odpowiedniej wentylacji.



Ryc. 4. Wpływ koncentracji CO w spalinach na stężenie CO w pomieszczeniu o objętości gazowej 6,5 m³

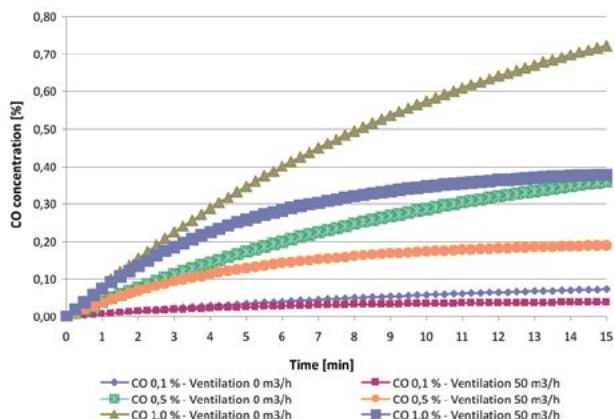
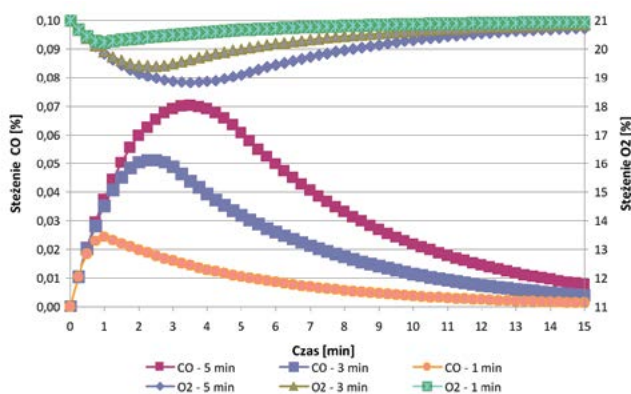


Fig. 4. Influence of CO concentration in combustion gases on CO concentrations in a room with 6.5 m³ gas volume

Im wyższe stężenie CO w spalinach, tym zagrożenie większe, a wentylacja nie jest w stanie uchronić przed zatruciem. Przy relatywnie niskim stężeniu CO w spalinach (0,1%) nie dojdzie do ciężkiego zatrucia, niemniej jednak użytkownik urządzenia gazowego będzie podtruwany.

Przeprowadzone poprzednio symulacje dotyczyły skrajnych przypadków (niezdolność układu odprowadzania spalin i niesprawne urządzenie gazowe). W praktyce takie sytuacje występują rzadko, natomiast często mamy do czynienia z przypadkiem, kiedy układ odprowadzania spalin nie funkcjonuje w ograniczonym okresie czasu. Może być to spowodowane wychłodzeniem kanału spalinowego w początkowym okresie pracy urządzenia lub może wynikać z oddziaływania wiatru na kanał. Z tego powodu w kolejnym etapie symulacji uwzględniono różne czasy opóźnienia rozpoczęcia odprowadzania spalin (pojawienia się skutecznego ciągu) dla pomieszczenia o małej kubaturze i odpowiednio wentylowanego.



Ryc. 5. Wpływ długości czasu napływu spalin do pomieszczenia na stężenie CO i O₂ w pomieszczeniu o objętości gazowej 6,5 m³ i wentylacji 50 m³/h

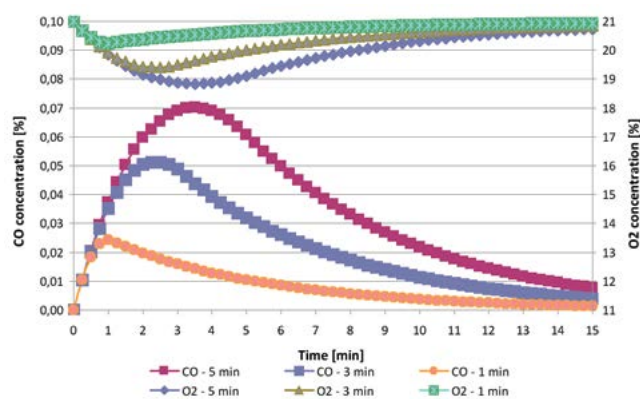


Fig. 5. Influence of inflow time of combustion gases on CO and O₂ concentrations in a room with 6.5 m³ gas volume and 50 m³/h flow rate of ventilation

Na ryc. 5 można zaobserwować, iż w każdym z analizowanych przypadków pomimo odpowiedniej wentylacji występuje przekroczenie dopuszczalnego stężenia CO w pomieszczeniu (0,008%). Uzyskane wartości pokazują, że użytkownikom takich łazienek z niesprawnymi urządzeniami grozi ciągle podtrawanie CO, nawet podczas mycia rąk. Warto w tym miejscu wspomnieć, iż oddziaływanie niskich stężeń CO w długim okresie czasu jest nawet bardziej szkodliwe niż krótkotrwałe przebywanie człowieka w pomieszczeniach z wysoką zawartością tlenu węgla. Koncentracja tlenu w pomieszczeniu spadła poniżej dopuszczalnej wartości 19,5% dla czasu napływu spalin 3 i 5 min.

4. Podsumowanie

Przedstawiony model, oparty na bilansie masowym, może być wykorzystywany dla symulacji różnych przypadków pracy urządzeń gazowych w pomieszczeniach mieszkalnych. Uzyskane wyniki pokazują dobitnie, że niesprawność jednego tylko elementu, jakim jest układ odprowadzania spalin, sprawia, iż urządzenie gazowe wywierało niekorzystny wpływ na zdrowie mieszkańców. Na stężenie CO i O₂ w pomieszczeniu mieszkalnym wyposażonym w urządzenie gazowe największy wpływ ma strumień powietrza wentylacyjnego oraz kubatura pomieszczenia. Warto pamiętać, iż spadek koncentracji tlenu w pomieszczeniu będzie miał miejsce niezależnie od tego, czy w spalinach jest tlenek węgla, czy też nie. Obliczenia autora dotyczyły jedynie pomieszczenia łazienki z urządzeniem gazowym, natomiast ww. praca [27] wykazuje, że na zatrucie CO narażone są również osoby przebywające w sąsiednich pomieszczeniach.

Istnieją różnorodne sposoby ograniczania lub nawet eliminacji zagrożenia zatruciem tlenkiem węgla w pomieszczeniach mieszkalnych z urządzeniami gazowymi. Szczegółowo poszczególne rozwiązania omówiono w publikacji [29], natomiast najskuteczniejszym sposobem, całkowicie eliminującym zagrożenie zatrucia tlenkiem węgla jest jednak wymiana urządzeń gazowych z otwartą komorą spalania na urządzenia z zamkniętą komorą spalania [30, 31]. Urządzenia te z powodzeniem można stosować również w budynkach wielokondygnacyjnych [32].

Artykuł został przygotowany w ramach pracy statutowej Wydziału Energetyki i Paliw AGH

Literatura

1. Krzyżanowski M., *Zatrucia tlenkiem węgla w Polsce i Europie*, Międzynarodowa Konferencja „Czujka dymu i czujnik tlenku węgla, czyli mała inwestycja w duże bezpieczeństwo”, Warszawa 8-9.10.2013.
2. Żurański J. A., *Zatrucia tlenkiem węgla z urządzeń gazowych w budownictwie mieszkaniowym w latach 1991-2002*, II Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Eko-Komin „Nowoczesne i bezpieczne systemy kominowe i wentylacyjne w budownictwie mieszkaniowym”, Kraków, 2006, 77-85.
3. Żurański J. A., *Wentylacja naturalna mieszkań z paleniskami gazowymi a śmiertelne zatrucia tlenkiem węgla*, Forum Wentylacja 2003, Warszawa 13-15 marca 2003, 50-60
4. Varon J., Marik P., *Carbon monoxide poisoning and gas powered equipment*, The Journal of Emergency Medicine, Vol. 21 No. 3 (2001) 283-284.
5. Mannaioni P. F., Vannacci A., Masini E., *Carbon monoxide: the bad and the good side of the coin, from neuronal death to anti-infl ammatory activity*, Inflammation Research, 55 (2006) s. 261-273.
6. Jarvis D., Chinn S., Luczynska Ch., Burney P., *Association of respiratory symptoms and lung function in young adults with use of domestic gas appliances*, The Lancet, vol. 347 Issue: 8999 (1996) 426-431.
7. Czernski G., *Analiza zmian składu atmosfery pomieszczeń z urządzeniami gazowymi za pomocą modelu symulacyjnego opartego na bilansie masowym*, Nafta Gaz, R. 61 nr 6 (2005) 248-256.
8. Nantka M. B., *Relacje między szczelnością okien a realizacją zadań tradycyjnej wentylacji budynków wielorodzinnych*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 1 i nr 2 (2004) 21-24 i 16-20.
9. Gebhardt Z., *Normalizacja a bezpieczeństwo urządzeń gazowych typu B_{11BS}*, Gaz, Woda, Technika Sanitarna, nr 7 (2007) 23-25.
10. Hopkowicz M., Mikołajewski J., *Badania szczelności mieszkań metodą podciśnieniową w aspekcie niepełnego spalania gazu w GGWP*, XV Konferencja Naukowo-Techniczna „Wentylacja, klimatyzacja, ogrzewnictwo i zdrowie”, Zakopane-Kościelisko 2004, 247-262.
11. Oparczyk G., Koniecznyński J., *Tlenek węgla w pomieszczeniach jako efekt eksploatacji kuchni gazowych*, Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce 2001, Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002, s. 251-258.
12. Sedda A. F., Rossi G., *Death scene evaluation in a case of fatal accidental carbon monoxide toxicity*, Forensic Science International, 164 (2006) 164-167.
13. Peterson J.E., Stewart R.D., *Predicting the carboxyhemoglobin levels resulting from carbon monoxide exposures*, J. Appl. Physiol., 39 (1975) 633-638.
14. Pach J., Targosz D., *Aktualne problemy diagnostyki, leczenia i orzecznictwa zatruc tlenkiem węgla*, Sympozjum „Techniczne, medyczne i prawne aspekty bezpieczeństwa użytkowników pomieszczeń z urządzeniami gazowymi w budynkach mieszkalnych”, AGH Kraków, 2003, 27-45.
15. Sokal J.A., Pach J., *Acute carbon monoxide poisoning in Poland – research and clinical experience*, Carbon Monoxide Toxicity, Boca Raton USA, D. E. Penney (Ed.), CRC Press, 2000, 311-333.
16. Hopkowicz M., Mikołajewski J., *Czadowe igraszki ze śmiercią*, Rynek Instalacyjny nr 7 i nr 8 (2003) 9-13.
17. *Instalacje gazowe na paliwa gazowe*, Cobo-Profil, Warszawa 2000, s. 223.
18. Czernski G., Butrymowicz Cz., Tałach Z. A., *Badania użytkowanych gazowych przepływowych ogrzewaczy wody*, Gaz, Woda, Technika Sanitarna, nr 3 (2011) 9-82
19. Rataj M., *Bezpieczeństwo użytkowania gazowych urządzeń grzewczych z otwartą komorą spalania*, Nafta Gaz, nr 6 (2013) 455-462.
20. Papakonstantinou K. et al., *Air quality in an underground garage: computational and experimental investigation of ventilation effectiveness*, Energy and Buildings, 35 (2003) 933-940.
21. Duci A. et al., *Numerical approach of carbon monoxide concentration dispersion in an enclosed garage*, Building and Environment, 39 (2004) 1043-1048.
22. Modic J., *Air velocity and concentration of noxious substances in a naturally ventilated tunnel*, Tunneling and Underground Space Technology, 18 (2003) 405-410.
23. Bzowska D., *Fizyka przepływu powietrza w pomieszczeniach z naturalną wentylacją*, 1 (2003) 21-27.
24. Bzowska D., *Wybrane zagadnienia wentylacji naturalnej pomieszczeń*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, nr 2 (2003) 21-27.
25. Bzowska D., *Wymiana powietrza w pomieszczeniach z naturalną wentylacją*, nr 12 (2003) 15-19.
26. Leciej-Pirczewska D., Szafflik W., *Działanie wentylacji grawitacyjnej w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, nr 12 (2006) 32-35.
27. Chang W.R., Cheng C.L., *Carbon monoxide transport in an enclosed room with sources from a water heater in the adjacent balcony*, Building and Environment, 43 (2008) 861-870.
28. Czernski G., *Ocena zagrożeń zatruc tlenkiem węgla użytkowników urządzeń gazowych w oparciu o bilans masowy pomieszczenia*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 11 (2005) 2-4.
29. Czernski G., *Ocena oraz sposoby eliminacji zagrożeń zatruc tlenkiem węgla*, Rynek Instalacyjny, nr 3 (2006) 70-73.
30. Czernski G., Strugała A., Gebhardt Z., *Urządzenia gazowe z zamkniętą komorą spalania do przygotowania c.w.u. – wymagania i metody badań*, Gaz, Woda, Technika Sanitarna, nr 10 (2007) 14-18.
31. Czernski G., *Bezpieczne i efektywne wytwarzania ciepłej wody użytkowej przy pomocy urządzeń gazowych*, Polski Instalator, nr 10 (2012) 38-43.
32. Czernski G., Gebhardt Z., Strugała A., Butrymowicz Cz., *Gas-fired instantaneous water heaters with combustion chamber sealed with respect to the room in multi-storey residential buildings - Results of pilot plants test*, Energy and Buildings 57 (2013) 237-244.

dr inż. Grzegorz CZERSKI – absolwent Wydziału Paliw i Energii Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Od 2002 r. jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Energetyki i Paliw AGH, obecnie na stanowisku adiunkta. Zajmuje się tematyką dotyczącą technologii paliw, ze szczególnym uwzględnieniem zgazowania i odgazowania paliw, a także zagadnieniami dotyczącymi bezpieczeństwa użytkowników urządzeń gazowych w pomieszczeniach mieszkalnych.