

## WPLYW ADSORPCJI ZANIECZYSZCZEŃ NA JAKOŚĆ POWIETRZA W POMIESZCZENIACH

Jerzy SOWA

*Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Wentylacji i Klimatyzacji  
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: [jerzy.sowa@is.pw.edu.pl](mailto:jerzy.sowa@is.pw.edu.pl)*

**Streszczenie:** W wielu przypadkach ograniczenie się jedynie do procesów adwektywnych przy modelowaniu jakości powietrza prowadzi do znacznych błędów. W artykule przedstawiono podstawowe zależności uproszczonego modułu adsorpcji, który mogły być stosowany z klasycznymi modelami jakości powietrza w skali makro. Przeanalizowano także wpływ adsorpcji zanieczyszczeń powietrza na stężenia zanieczyszczeń dla hipotetycznego pomieszczenia biurowego przy różnych założeniach. Na podstawie przeprowadzonych analiz, a także na podstawie badań literaturowych, przedstawiono uwagi odnośnie wpływu adsorpcji zanieczyszczeń na jakość powietrza w pomieszczeniach.

**Słowa kluczowe:** Jakość powietrza, adsorpcja, modelowanie, węgiel aktywny.

### 1. WPROWADZENIE

Gwałtowny wzrost zainteresowania badaniami nad jakością powietrza wewnętrznego, jaki dokonał się w ostatnich 20 latach XX w., wywołał konieczność opracowania nowych modeli i narzędzi komputerowych do analizowania tych zjawisk [5].

Początkowo programy uwzględniały jedynie adwektywne procesy transportu zanieczyszczeń. Zgodność pierwszych symulacji z wynikami pomiarów była zatem bardzo zróżnicowana w zależności od rodzaju związku chemicznego oraz typu materiałów stosowanych w budynkach. Szybko okazało się jednak, że modelowanie jakości powietrza musi uwzględniać procesy heterogeniczne, w tym adsorpcję i desorpcję zanieczyszczeń powietrza przez materiały budowlane i elementy wyposażenia wnętrza.

Ta konieczność wynika z faktu, iż w pomieszczeniach emitowane jest coraz więcej lotnych związków organicznych, które łatwo ulegają adsorpcji, a dodatkowo coraz powszechniej stosowane są materiały budowlane o dużym potencjale sorpcyjnym jak: płyty gipsowe, gazobeton, porowate płyty stropów akustycznych, wykładziny dywanowe itp.

Zazwyczaj procesy sorpcji i desorpcji analizuje się w komorach do badania emisji zanieczyszczeń z materiałów budowlanych. Przeniesienie wyników badań ze skali komór badawczych do skali rzeczywistych pomieszczeń okazuje się jednak dość trudne [1], [7]. Wynika to przede wszystkim z braku możliwości kontrolowania i modelowania wielu parametrów w budynkach rzeczywistych (np. w komorach badawczych można precyzyjnie określić zarówno wymiary jak i inne parametry materiałowe). W komorach badawczych analizuje się także na ogół jedno zanieczyszczenie, a nie mieszaniny zanieczyszczeń występujące w budynkach rzeczywistych.

W warunkach rzeczywistych silny wpływ na procesy adsorpcji i desorpcji ma wilgotność powietrza. Wzrost wilgotności względnej powoduje spadek pojemności adsorpcyjnej większości adsorbentów.

Jakość powietrza w pomieszczeniach może być także kształtowana poprzez stosowanie adsorpcji wymuszonej (np. na złożach węgla aktywnego). Początkowo filtry węglowe, poza zastosowaniami militarnymi, były wykorzystywane jedynie w instalacjach przemysłowych. Ostatnio jednak coraz więcej producentów oferuje filtry węglowe przystosowane do stosowania w instalacjach wentylacji mechanicznej lub klimatyzacji.

Węgiel aktywny otrzymuje się z różnorodnych materiałów pochodzenia organicznego jak drewno, torf, lignina, pestki owoców, skorupy orzechów, węgle kopalne i inne. Zazwyczaj surowce te poddawane są najpierw procesowi karbonizacji tj. pirolizy, który polega na obróbce termicznej w wysokiej temperaturze bez dostępu powietrza i bez udziału czynników chemicznych. W trakcie karbonizacji następuje rozkład substancji organicznej i usunięcie części lotnych, w wyniku czego uzyskuje się karbonizat, półprodukt o strukturze porowatej. Ze względu na to, że wytworzone pory są szerokie, materiał ten ma niewielkie właściwości chłonne (powierzchnia właściwa rzędu kilku m<sup>2</sup>/g). Aby uzyskać dobry adsorbent, poddaje się go aktywacji. Proces ten polega zwykle na działaniu na karbo-

nizat parą wodną, dwutlenkiem węgla i tlenem w wysokiej temperaturze (aktywacja fizyczna), lub prażeniu surowca zmieszanego z czynnikami chemicznymi, takimi jak: chlorek cynku, kwas fosforowy (aktywacja chemiczna). Proces aktywacji powoduje wytworzenie systemu mikroporów, który nadaje produktowi pożądane właściwości sorpcyjne. Powierzchnia właściwa (całkowita powierzchnia materiału biorąca udział w procesie adsorpcji odniesiona do jednostki masy adsorbentu) węgla aktywnych osiąga wartości od 500-1500 m<sup>2</sup>/g.

## 2. ZJAWISKA ADSORPCJI W MODELACH JAKOŚCI POWIETRZA SKALI MAKRO

Zakładając izotermiczność procesu wentylacji oraz fakt, iż rozpatrywane są niskie stężenia lotnych związków organicznych nie wpływające na gęstość powietrza bilans masy dla analizowanego zanieczyszczenia w pojedynczym pomieszczeniu wentylowanym jedynie przy pomocy powietrza zewnętrznego może być opisany równaniem

$$V \frac{dC}{dt} = K_g \cdot A(C_s - C) + V_w(C_o - C) \quad (1)$$

gdzie:

- $V$  - objętość pomieszczenia,
- $A$  - zewnętrzna powierzchnia materiału adsorbującego,
- $K_g$  - średni współczynnik wymiany masy w warstwie granicznej,
- $C$  - stężenie zanieczyszczenia w powietrzu,
- $C_o$  - stężenie zanieczyszczenia w powietrzu zewnętrznym,
- $C_s$  - stężenie zanieczyszczenia w powietrzu w warstwie granicznej,
- $V_w$  - strumień powietrza wentylacyjnego,

Proces adsorpcji na powierzchni materiału budowlanego jest traktowany jako proces odwracalny przy pomocy liniowej izotermi adsorpcji

$$Y_s = C_s \cdot K_s \quad (2)$$

gdzie:

- $Y_s$  - stężenie zanieczyszczenia na zewnętrznej powierzchni materiału adsorbującego,
- $K_s$  - stała równowagi dla adsorpcji powierzchniowej.

Równanie bilansu masy dla zanieczyszczenia na powierzchni materiału przedstawia się następująco

$$A \frac{dC_s}{dt} = A \frac{K_g}{K_s} (C - C_s) + A \frac{D}{K_s \cdot \Delta x} (C_{i=1} - C_s) \quad (3)$$

gdzie:

- $D$  - współczynnik dyfuzji gazowej w materiale,
- $\Delta x$  - odległość stosowana do obliczeń wewnątrz materiału,
- $C_{i=1}$  - stężenie zanieczyszczenia w odległości  $\Delta x$  od powierzchni zewnętrznej materiału

Określanie intensywności dyfuzji w warstwie granicznej dla różnych konfiguracji może być dokonywane przy wykorzystaniu równań kryterialnych.

Jeżeli w pomieszczeniu występuje emisja niezależna od materiałów sorpcyjnych  $G_c$ , lub powietrze czerpane z zewnątrz jest filtrowane ze skutecznością  $\eta_c$  oraz występuje dodatkowy zanik zanieczyszczenia  $S_c$  (np. w urządzeniach oczyszczających) równanie (1) należy uzupełnić o te dodatkowe składniki

$$V \frac{dC}{dt} = K_g \cdot A(C_s - C) + V_w((1 - \eta_c)C_o - C) + G_c - S_c C \quad (4)$$

## 3. SYMULACJA WPŁYWU ADSORPCJI NA STĘŻENIA ZANIECZYSZCZEŃ W POMIESZCZENIU

Analizie poddane jest klimatyzowane pomieszczenie o powierzchni 10 m<sup>2</sup> i kubaturze 30 m<sup>3</sup>. Pomieszczenie użytkowane jest w godzinach 8:00 – 17:00. Instalacja klimatyzacyjna, która pracuje w godzinach 6:00 – 18:00, doprowadza do pomieszczenia powietrze świeże w ilości 60 m<sup>3</sup>/h (co odpowiada krotności wymiany powietrza 2 1/h). W okresie gdy klimatyzacja jest wyłączona przyjęto wyminę powietrza przez infiltrację 6 m<sup>3</sup>/h (0.2 1/h).

Analizowanym zanieczyszczeniem jest toluen, zanieczyszczenie obecne w powietrzu zewnętrznym (komunikacja) oraz emitowane przez wiele elementów i urządzeń wyposażenia wnętrz. Przyjęto, że stężenie toluenu w powietrzu zewnętrznym wynosi 30 µg/m<sup>3</sup>.

W okresie gdy pomieszczenie jest użytkowane intensywność emisji toluenu wynosi 10000 µg/h, a w okresie gdy ludzie nie przebywają w pomieszczeniu 2000 µg/h.

Ponadto przyjęto, że przegrody pomieszczenia posiadają dość dużą zdolność do adsorpcji i desorpcji zanieczyszczeń (sufit i ściany pomieszczenia wyłożone są płytami gipsowymi o grubości 13 mm i gęstości 760 kg/m<sup>3</sup>).

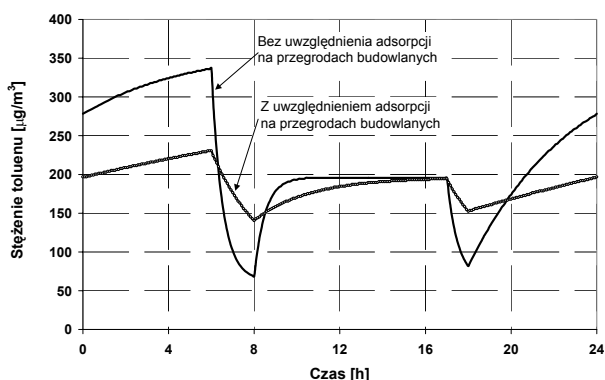
Dla sufitu określono współczynnik wymiany masy w warstwie przyściennej na 4.485 m/s okresie dnia (prędkość powietrza pod sufitem 0.5 m/s) oraz 0,35 m/s w nocy (bezruch powietrza - 0.01 m/s). Dla ścian uzyskano odpowiednio 1.56 m/s dla dnia (założona prędkość powietrza 0,2 m/s) i 0,35 m/s w nocy

W analizie uwzględniono opcjonalnie także dwa rozwiązania techniczne służące do adsorpcji zanieczyszczeń gazowych w sposób aktywny. Sprawdzone jak zachowy-

wało by się opisywane pomieszczenie wyposażone w oczyszczacz powietrza (miejscowe urządzenie filtracyjne o przepływie powietrza 100 m<sup>3</sup>/h) z filtrem z węgla aktywnego o sprawności usuwania toluenu wynoszącej 96 %, a także jaki efekt wywołałoby zainstalowanie w przewodzie powietrza nawiewanego w instalacji klimatyzacyjnej filtra z węgla aktywnego o takiej samej sprawności usuwania toluenu.

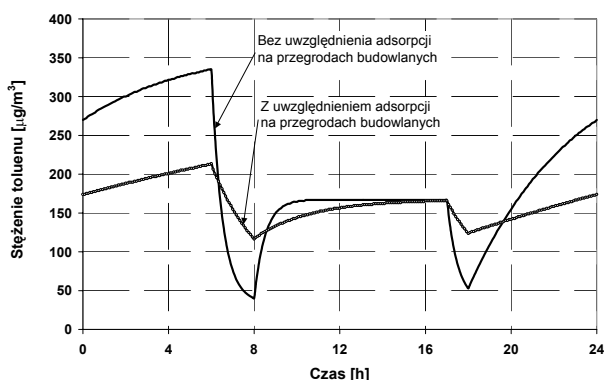
Symulacje przeprowadzono przy wykorzystaniu programu CONTAMW ver 2.4. [3].

Porównanie przebiegu stężenia toluenu dla omawianego pomieszczenia bez stosowania wymuszonej adsorpcji przedstawia rys. 1. Wpływ adsorpcji zanieczyszczeń na jakość powietrza w przypadku zastosowania filtra węglowego w strumieniu powietrza nawiewanego do pomieszczenia przedstawiono na rys. 2, a w przypadku zastosowanie oczyszczacza pokojowego na rys. 3.



Rys. 1. Porównanie stężenia toluenu dla omawianego pomieszczenia, wariant bez stosowania wymuszonej adsorpcji.

Fig. 1. The comparison of toluene concentration in analysed room, option without any forced adsorption.



Rys. 2. Porównanie stężenia toluenu dla omawianego pomieszczenia, wariant z filtrem węglowym w przewodzie nawiewnym.

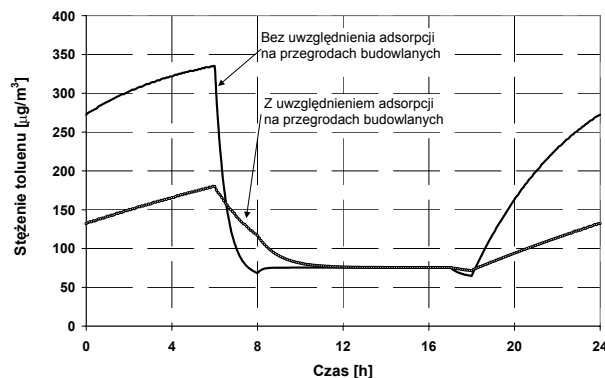
Fig. 2. The comparison of toluene concentration in analysed room, option with carbon filter in supply duct.

Analiza rys. 1-3 wskazuje, że w przypadku działania instalacji działających w sposób okresowy, najwyższe stężenia mogą występować (i jest to częste zjawisko) nie w czasie pracy, ale bezpośrednio przez uruchomieniem instalacji wentylacji po okresie nocnym [6]. W tym kontekście wymagania uruchamiania instalacji z pewnym wyprzedzeniem w stosunku do godzin wykorzystania pomieszczenia są jak najbardziej słuszne.

Na rys. 1-3 można zaobserwować, że w pewnych okresach na skutek desorpcji stężenia toluenu mogą być większe niż w przypadku gdy sorpcja nie występuje (np. w chwili rozpoczęcia użytkowania o godz. 8:00). Jednocześnie znacznie mniejszy kąt nachylenia krzywych wzrostu lub spadku stężenia toluenu wskazuje, że sorpcja zanieczyszczeń zwiększa stałą czasową procesu.

Porównanie rys. 1-2 wskazuje, że efekt stosowania filtra w przewodzie zawiewnym nie jest szczególnie zauważalny. Wynika to z faktu, że z analizowanego systemu usuwany jest jedynie toluen doprowadzany do pomieszczenia z powietrzem zewnętrznym.

W przypadku zastosowania oczyszczacza powietrza rys. 3 usuwaniu podlega toluen, który zarówno przedostał się do pomieszczenia z zewnątrz, został wyemitowany w pomieszczeniu przez urządzenia oraz został uwolniony do powietrza w wyniku procesu desorpcji. Zmienia to w sposób zdecydowany kształt krzywych przedstawiających stężenia zanieczyszczeń. Zbliżony efekt można by zaobserwować w przypadku instalacji klimatyzacji powietrznej z recyrkulacją i zastosowaniu filtra w kanale powietrza nawiewanego.



Rys. 3. Porównanie stężenia toluenu dla omawianego pomieszczenia, wariant z filtrem węglowym w pokojowym oczyszczaczu powietrza.

Fig. 3. The comparison of toluene concentration in analysed room, option with carbon filter in room air cleaner.

#### 4. WNIOSKI

Przetawiona analiza nie może służyć do jakichkolwiek uogólnień o charakterze ilościowym. Jednakże założenia

zostały dobrane w taki sposób aby można było sformułować wnioski o charakterze jakościowym.

Zjawisko sorpcji zanieczyszczeń powietrza przez materiały budowlane ogranicza zarówno krótkotrwałe piki stężeń zanieczyszczeń powietrza (co jest szczególnie ważne w przypadku związków o działaniu drażniącym) jak też i ekspozycję ludzi na lotne związki organiczne (co ma znaczenie szczególnie w przypadku związków o działaniu kumulującym się).

Należy także pamiętać, że materiały sorpcyjne zanieczyszczone lotnymi związkami organicznymi mogą także wywoływać zagrożenie dla użytkowników na skutek dotyku (problemy skórne) lub wchłonięcia do układu pokarmowego (zatrucia organizmu) [7].

Badania nad odczuwalną jakością powietrza (oceną jakości powietrza za pomocą subiektywnych odczuć ludzi) wykazały, że adsorpcja lotnych związków organicznych na niektórych materiałach budowlanych w znaczący sposób może poprawić jakość powietrza. Zjawisko to mogłoby prowadzić do weryfikacji i/lub zmniejszenia dodatkowych strumieni powietrza wymaganych w celu rozcieńczenia zanieczyszczeń emitowanych przez materiały budowlane bez zmniejszenia założonego poziomu akceptowalności powietrza. [4].

Jakkolwiek przedstawione analizy wydają się wskazywać, że stosowanie oczyszczaczy powietrza jest zdecydowanie lepsze od stosowania filtrów węglowych w przewodach nawiewnych systemów wentylacji (działających bez recyrkulacji powietrza) to jednak inwestycje takie powinny być analizowane nie tylko z punktu widzenia normalnych warunków wykorzystania pomieszczenia ale także z perspektywy zdolności do ograniczenia zagrożeń w sytuacjach nadzwyczajnych (katastrofy przemysłowe, transportowe). Filtr węglowy mógłby w takim przypadku stać się doskonałym zabezpieczeniem dla użytkowników pomieszczenia przed chmurą toksycznych gazów.

Inne zagrożenie wynika obserwowanych kilkakrotnie już prób wykorzystania gazów trujących lub patogennych mikroorganizmów do ataków terrorystycznych:

- 20 marzec 1995 r Tokyo. Atak terrorystyczny przy użyciu sarinu. Ponad 5000 osób zainfekowanych, 12 osób zabitych, 53 osoby poważnie ranne.
- 26 październik 2002 r Moskwa. Akcja uwolnienia zakładników z moskiewskiego teatru na Dubrowce. Podczas szturm użyto gazu, od działania którego zginęło 117 zakładników, 500 osób zostało zainfekowanych.

Okazało się, że niewystarczająco zabezpieczony system wentylacyjny stwarza możliwość łatwego rozprzestrzenienia się trujących gazów po całym budynku oraz zainfekowanie przebywających w nim ludzi.

W maju 2002 w USA, w ramach programu koordynowanego przez Biuro Bezpieczeństwa Narodowego, NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) wydał wytyczne dotyczące ochrony środowiska w budyn-

kach przed atakami wykorzystującymi zanieczyszczenia chemiczne, biologiczne i radioaktywne [2]. Jedno w wy-magań określa, że dobrze zaprojektowany system adsorp-cji powinien charakteryzować się skutecznością usuwania zanieczyszczeń w zakresie 95-98 % dla związków che-micznych spotkanych w przemyśle o stężeniach rzędu 500-2000 ppm, a w przypadku wysoko toksycznych związków skuteczność ta powinna być jeszcze wyższa.

## 5. PODZIĘKOWANIE

Niniejszy artykuł powstał w trakcie realizacji projektu badawczego „Zrównoważona termomodernizacja budynków publicznych - STEP” (PL0077) finansowanego w ramach mechanizmów finansowych EEA/Norway Grants.

### INFLUENCE OF POLLUTANTS' ADSORPTION ON IN-DOOR AIR QUALITY

**Summary:** In many cases limitation just to advective processes during modelling indoor air quality leads to substantial errors. The paper presents basic relations of simplified adsorption model, that could be applied together with classic indoor air quality models of macro scale. The behaviour of hypothetical office has been analysed for different combination of assumptions. On the base of both performed analysis and literature studies some qualitative remarks have been formulated.

### Literatura

- [1] Hansson P., Stymne H., *VOC Sorption of Activity Related Contaminants – Influence of Boundary Layer Diffusion*, Proceedings: Indoor Air 2002, III pp. 546-551, Monterey, USA
- [2] NIOSH, *Guidance for Filtration and Air-Cleaning Systems to Protect Building Environments from Airborne Chemical, Biological, or Radiological Attacks*, Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, April 2003,
- [3] NISTIR, *CONTAM W* ver 2.4b National Institute of Standards and Technology, 2006
- [4] Sakr W., Weschler C. J., Fanger P.O. *The impact of sorption on perceived indoor air quality*, Indoor Air; 16 (2006): pp. 98–110 Blackwell Munksgaard
- [5] Sowa J., *Symulacja procesu migracji zanieczyszczeń powietrza w budynkach - możliwości i ograniczenia*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, Nr 1 Styczeń 1997. str. 36-42.
- [6] Sowa J., *Kontrolowanie jakości powietrza wewnętrznego przy pomocy wentylacji okresowej*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, Nr 5 Maj 2006, str. 30-35.
- [7] Won D, Corsi R.L., Rynes M, *Sorptive Interactions between VOCs and Indoor Materials*, Indoor Air, 11 (2001) pp 246-256, Munksgaard.