

Urszula KANIK¹, Krzysztof KUPIEC²

e-mail: kanik@agh.edu.pl

¹ Katedra Chemii Węgla w Energetyce i Przemysle, Wydział Energetyki i Paliw, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

² Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Adsorbery obrotowe

Wstęp

Istnieją różne rozwiązania konstrukcyjne do realizacji procesu adsorpcji prowadzonej w sposób ciągły. Są to:

- adsorbery ze złożem ruchomym,
- adsorbery ze złożem fluidalnym,
- adsorbery obrotowe,
- adsorbery ze symulowanym ruchem złoża.

Pierwsze trzy rodzaje urządzeń dotyczą adsorpcji w fazie gazowej. Adsorpcja w urządzeniach ze złożem ruchomym i fluidalnym została dość szeroko opisana w polskiej literaturze [1–3]. Znacznie mniej uwagi poświęcono natomiast adsorberom ze złożem obrotowym.

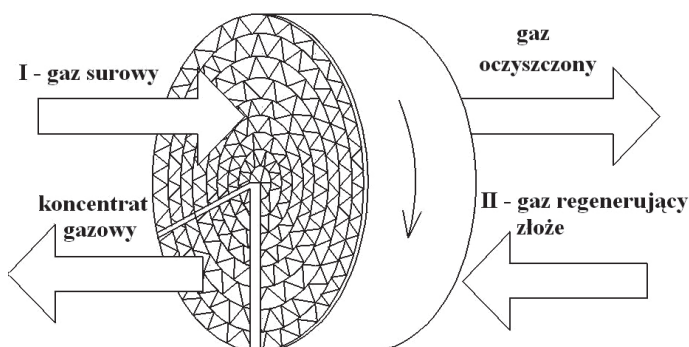
Poszczególne typy adsorberów wykazują pewne zalety i wady. Dla złóż ruchomych obserwuje się dobre wykorzystanie pojemności adsorpcyjnej. Wadą jest natomiast ścieranie ziaren szczególnie charakterystyczne dla fluidyzacji.

Dla złóż stacjonarnych ścieranie ziaren praktycznie nie występuje, ale przy przebiegu złoża jego nasycenie jest na ogół dalekie od równowagowego. Jest to spowodowane znacznym udziałem strefy przenikania masy w całkowitej wysokości złoża. Zwiększenie wysokości złoża daje wprawdzie lepsze wykorzystanie pojemności adsorbentu, ale jest niewskazane ze względu na nadmierne opory przepływu.

Wprowadzenie złoża w ruch obrotowy powoduje, że złożo porusza się względem wlotów i wylotów z urządzenia umożliwiając powstawanie stref adsorpcyjnej i regeneracyjnej. Odbywa się to bez przemieszczania się adsorbentu względem ścian urządzenia, zatem ziarna nie są narażone na ścieranie.

Budowa i zasada działania adsorberów obrotowych

Główną częścią adsorbentu obrotowego jest rotor podzielony na strefy: adsorpcyjną i desorpcyjną. W niektórych aparatach jest jeszcze dodatkowa strefa chłodzenia złoża. Każda z operacji (adsorpcja i regeneracja złoża) przeprowadzana jest równocześnie w dwóch niezależnych strefach. Dzięki ruchowi obrotowemu aparatu poszczególne części rotora przechodzą kolejno przez wszystkie strefy. Proces jest więc ciągły. Typową budowę rotora adsorbentu obrotowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Budowa typowego adsorbentu obrotowego

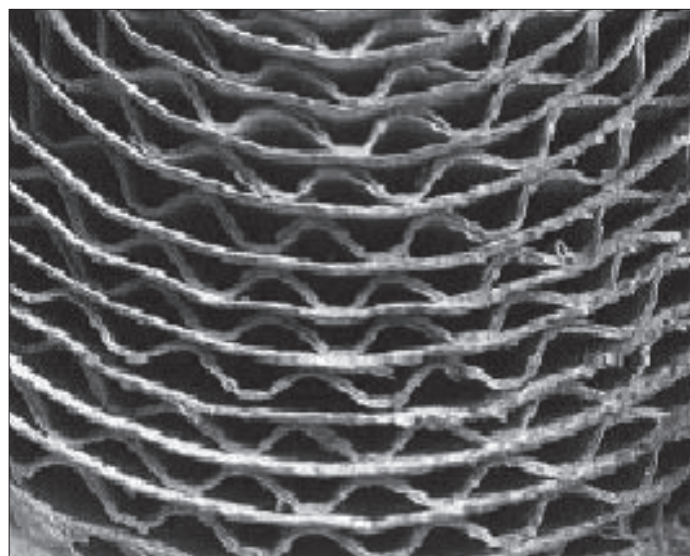
Matryca rotora obraca się ze stałą prędkością będąc cyklicznie w kontakcie z dwoma fizycznie oddzielnymi strumieniami powietrza, które mogą przepływać względem siebie zarówno przeciwnie do siebie jak rów-

nież współprądowo. Te strumienie oznaczone jako strumień wlotowy I i strumień wlotowy II zasilają aparat dwoma przewodami oddzielnymi klinem zabezpieczającym przed ich zmieszaniem i w ten sposób dzielą matrycę na dwie sekcje przepływowe.

Obrotowa matryca jest utworzona z wielu kanałów równoległych do osi rotora o niewielkich polach powierzchni przekroju. Zanieczyszczone powietrze (strumień I) podawane jest do strefy adsorpcyjnej. Powietrze przechodzi przez kanaliki na powierzchni których zanieczyszczenia lub wilgoć są adsorbowane, a oczyszczone lub osuszone powietrze opuszcza aparat z przeciwległej strony rotora. Gorące powietrze regeneracyjne (strumień II) podawane jest w przeciwnym kierunku do strefy desorpcyjnej, w której zanieczyszczenia lub wilgoć są desorbowane.

Ze względu na podział matrycy można założyć, że w każdej chwili z częścią kanałów kontaktuje się strumień wlotowy I, podczas gdy strumień wlotowy II jest wprowadzany do pozostałych kanałów. Zatem kanał przepływowy jest w ciągłym kontakcie ze strumieniem gazu zgodnie z aktualnym położeniem.

W aparatach obrotowych złożo adsorbentu ma najczęściej strukturę przedstawioną na rys. 2. Jako adsorbent stosuje się najczęściej węgiel aktywny, zeolity lub sita molekularne w zależności od rodzaju pochłanianej substancji.



Rys. 2. Struktura złoża adsorbentowego

Zastosowanie adsorberów obrotowych

Adsorbery obrotowe znalazły zastosowanie m.in. w procesach usuwania i odzysku lotnych związków organicznych z powietrza, a także w procesach adsorbentowego osuszania powietrza.

Usuwanie i odzysk lotnych związków organicznych

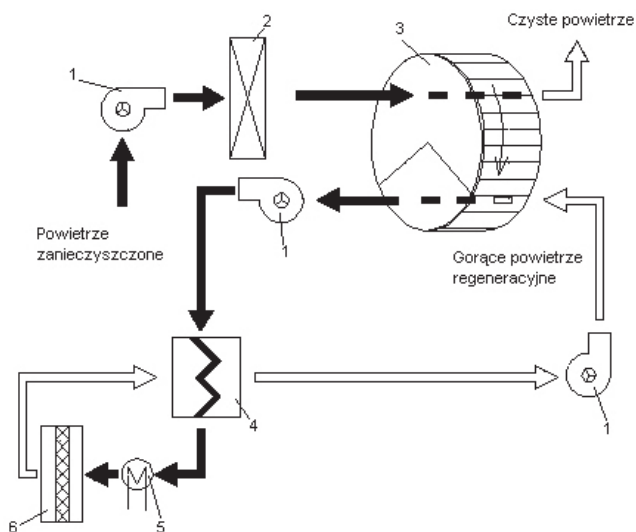
Lotne związki organiczne mogą być emitowane ze źródeł naturalnych, przemysłowych i wtórnych. Do przemysłowych źródeł emisji zalicza się procesy technologiczne, w których związki organiczne są stosowane jako rozpuszczalniki, odczynniki i reagenty, bądź też wytwarzane w nich jako produkt lub odpad. Obok konieczności obniżenia

zawartości szkodliwych substancji zanieczyszczających środowisko nie bez znaczenia jest możliwość odzyskania i ponownego wykorzystania usuniętych związków. Dlatego ciągle poszukuje się nowych i skuteczniejszych od dotychczas stosowanych, metod usuwania i unieszkodliwiania substancji szkodliwych i niebezpiecznych.

Dopuszczalna ilość LZO emitowanych do atmosfery jest ściśle określona przez akty prawne (m.in. Dz. U. nr 260 poz. 2181). Regulują one zarówno rodzaj jak i ilość emitowanych substancji w zależności od rodzaju procesu, a także rodzaju instalacji.

Adsorbery obrotowe znalazły zastosowanie w przypadku procesów, w których natężenia przepływu zanieczyszczonego strumienia powietrza są duże (8500–680000 m³/h), a poziom zanieczyszczeń stosunkowo niski (rzędu ppm). Zazwyczaj adsorbery te nie występują samodzielnie, ale w układach z dopalaczem (katalitycznym lub termicznym) albo skraplaczem, w zależności czy chcemy odzyskać czy unieszkodliwić emitowane substancje.

Na rys. 3 przedstawiony jest schemat procesu usuwania lotnych związków organicznych ze strumienia powietrza z kanałów wentylacyjnych. Głównym zadaniem urządzenia jest skoncentrowanie zanieczyszczeń umożliwiające ich autogenne spalanie. Zanieczyszczone powietrze, wstępnie oczyszczone na filtrze, przechodzi przez kanały złoża adsorbenta, gdzie zanieczyszczenia są adsorbowane, a oczyszczone powietrze przepływa do atmosfery. W tym samym czasie jest przeprowadzana regeneracja złoża za pomocą gorącego strumienia powietrza, który przechodząc przez część regeneracyjną aparatu powoduje desorpcję zanieczyszczeń. Następnie po ogrzaniu skoncentrowanego strumienia do odpowiedniej temperatury zanieczyszczenia są spalane w dopalaczu katalitycznym, zaś spaliny – zawracane do adsorbenta jako gorący czynnik desorbujący.

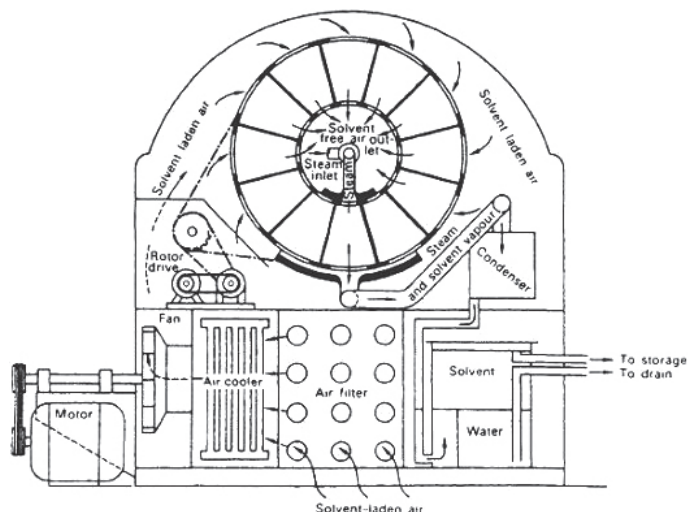


Rys. 3. Schemat procesu usuwania rozpuszczalników z powietrza [4]: 1 – wentylatory, 2 – filtr, 3 – rotor adsorbenta, 4 – wymiennik ciepła, 5 – podgrzewacz, 6 – dopalacz katalityczny

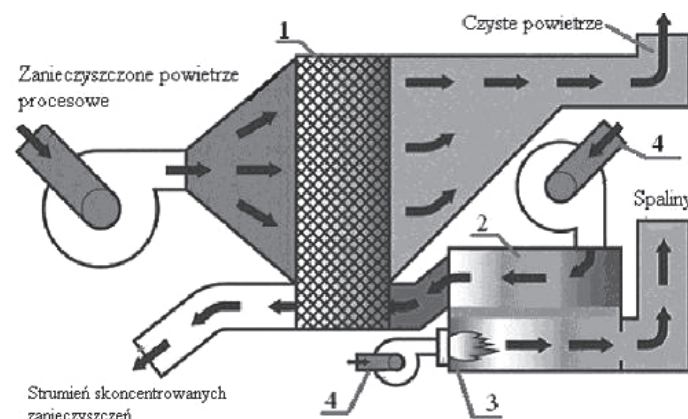
Na rys. 4 jest przedstawiony aparat o innym rozwiązaniu konstrukcyjnym, służący do usuwania i odzysku par rozpuszczalników z powietrza.

Zanieczyszczone powietrze jest podawane na obwodzie aparatu i przez złożo adsorbentu wpływa do środka bębna. Czyste powietrze opuszcza aparat przez kanał umieszczony wzdłuż osi obrotu bębna. Jedną z części aparatu podczas trwania procesu jest regenerowana przez przepływającą parę i wraz ze desorbowanymi zanieczyszczeniami jest podawana do skraplacza.

Na rys. 5 przedstawiono zintegrowany koncentrator składający się z adsorbenta obrotowego, palnika oraz wymiennika ciepła. Powietrze regeneracyjne, podawane w przeciwnym kierunku do strumienia procesowego jest ogrzewane w wymienniku ciepła, w którym czynnikiem grzew-



Rys. 4. Schemat adsorbenta ze złożem obrotowym [5]



Rys. 5. Schemat przepływu powietrza w adsorbencie obrotowym [6]: 1 – rotor, 2 – wymiennik ciepła, 3 – palnik, 4 – wentylatory

czym są spaliny powstające przy spalaniu paliwa w palniku. W wyniku desorpcji zanieczyszczeń za pomocą kontrolowanej ilości gorącego powietrza, powstaje skoncentrowany strumień zanieczyszczeń, który następnie może być unieszkodliwiony.

Usuwanie wilgoci

Utrzymywanie określonego poziomu wilgoci jest bardzo ważne w wielu gałęziach przemysłu, dlatego stosuje różnego typu urządzenia do usuwania wilgoci. Są to osuszacze kondensacyjne wykorzystujące zjawisko wykraplania wody przy chłodzeniu powietrza do temperatury poniżej punktu rosy lub osuszacze adsorpcyjne wykorzystujące zjawisko sorpcji wilgoci na materiale higroskopijnym. Urządzenia adsorpcyjne stosuje się tam gdzie wymagana jest bardzo duża wydajność lub utrzymanie wysokich reżimów technologicznych związanych z parametrami powietrza np.:

- dla zapobiegania uszkodzeniom wrażliwych na wilgoć podzespołów elektronicznych,
- w przemyśle farmaceutycznym,
- w przemyśle spożywczym (np. przy produkcji makaronu).

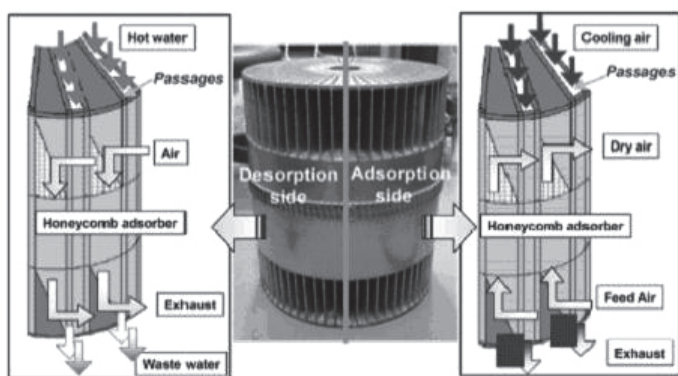
Jednym z typów osuszaczy adsorpcyjnych są adsorbery obrotowe, które mają szerokie zastosowanie w obróbce powietrza: osuszaniu i odzyskiwaniu ciepła. W pierwszym przypadku powietrze procesowe jest pozbawiane wilgoci po przepływie przez rotor, który obraca się pomiędzy strumieniem procesowym, a strumieniem gorącego powietrza regeneracyjnego. Przy odzyskiwaniu ciepła czynnikami procesowymi są: zewnętrzne powietrze świeże (powietrze procesowe) i powietrze wylotowe z pomieszczenia. Ciepło i wilgoć są odzyskiwane z powietrza

wylotowego w zimie a nadmiar ciepła i wilgoci jest przenoszony do powietrza wylotowego dla suszenia i chłodzenia powietrza procesowego latem.

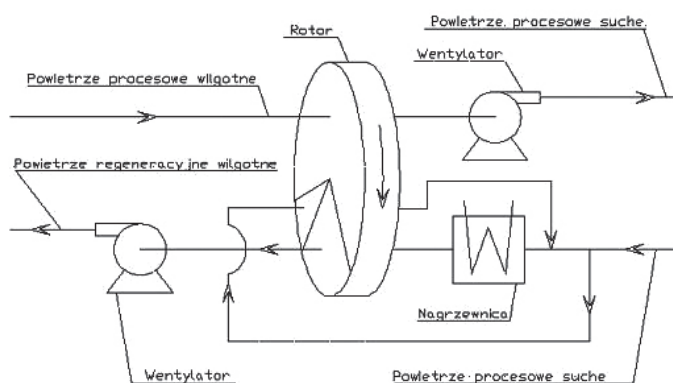
Na rys. 6 przedstawiono rotor adsorbera obrotowego, w którym zanieczyszczone powietrze jest podawane na obwodzie aparatu. Składa się z pakietów zeolitów o strukturze plastra miodu i kanałków z aluminium, ułożonych naprzemiennie. W etapie regeneracji gorąca woda przepływa przez kanałki w celu ogrzania adsorbentu. Równocześnie zewnętrzne powietrze jest dostarczane we współprądzie do warstwy adsorbentu dla odprowadzenia desorbowanej wilgoci. Z drugiej strony, w etapie adsorpcji, generowane ciepło może być odzyskane przez powietrze przechodzące przez kanały. Parowanie wody pozostałej w kanałach przyspiesza chłodzenie adsorbentu.

Rotor adsorbera obrotowego może być podzielony na trzy strefy: adsorpcyjną (osuszającą), desorpcyjną (regeneracyjną) i chłodzącą. Uproszczony schemat osuszania powietrza przy użyciu aparatu o takiej konstrukcji przedstawiono na rys. 7.

Wilgotne powietrze regeneracyjne przechodzi przez część osuszającą gdzie wilgoć jest adsorbowana i osuszone powietrze opuszcza aparat. W przeciwnym kierunku podawane jest powietrze regeneracyjne, które najpierw przechodzi przez część chłodzącą przygotowując rotor do procesu adsorpcji, a następnie po podgrzaniu do odpowiedniej temperatury – przez część regeneracyjną i ze zdesorbowaną wilgocią opuszcza aparat.



Rys. 6. Adsorber obrotowy do usuwania wilgoci [7]



Rys. 7. Schemat procesu osuszania powietrza

Elementy modelowania adsorberów obrotowych

Tworzenie modeli matematycznych jest racjonalną metodą analizy wyników pracy zarówno samego adsorbera obrotowego jak i całego systemu. Modele mogą więc być używane zarówno przy interpretacji wyników doświadczalnych takich jak np. badania wpływu właściwości sorpcyjnych adsorbentu czy wielkości rotora na efektywność osuszania powietrza jak również przy projektowaniu i optymalizacji systemu np. ustalaniu najkorzystniejszej prędkości obrotowej rotora.

Opis pracy adsorpcyjnego osuszacza obrotowego równaniami matematycznymi wymaga wielu założeń i ewentualnych uproszczeń. Rzeczywisty mechanizm przenoszenia masy i ciepła, ze względu na ruch obrotowy aparatu jest bardzo skomplikowany. Należy wziąć również pod uwagę budowę samego aparatu. Najczęściej osuszacze obrotowe mają budowę jak na rys. 1, ale są również aparaty o innym rozwiązaniu konstrukcyjnym. Autorzy dostępnych w literaturze modeli matematycznych analizowali także pracę aparatów pracujących pod zwiększonym ciśnieniem, gdzie podczas procesu regeneracji może zachodzić kondensacja wilgoci.

Przy modelowaniu przyjmuje się najczęściej następujące założenia upraszczające:

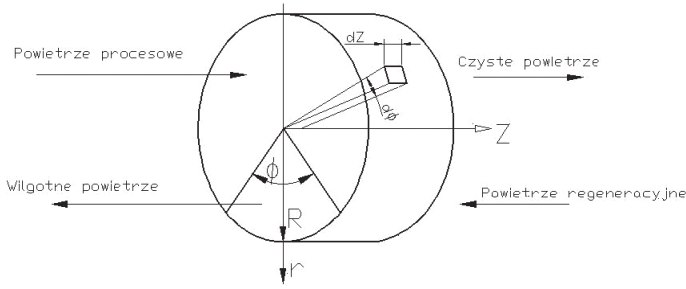
1. zaniebdywane są efekty ruchu ciepła przez promieniowanie ze względu na stosunkowo niskie temperatury,
2. brak reakcji chemicznych w układzie oraz innych źródeł energii wewnątrz układu,
3. zaniebdywane są siły grawitacyjne,
4. przepływ przez kanał jest nieściśliwy i zaniebdywana jest lepkościowa dyssypacja energii,
5. wszystkie kanały są identyczne i jednolicie rozmieszczone,
6. właściwości strumieni na wlocie są jednorodne oraz gęstość strumienia masy suchego gazu jest stała w każdym miejscu na wlocie,
7. przenoszenie ciepła i masy pomiędzy sąsiednimi kanałami jest zaniebdywane podobnie jak przenoszenie ciepła i masy od urządzenia do otoczenia,
8. strata ciśnienia spowodowana tarciem jest niewielka w porównaniu z ciśnieniem całkowitym,
9. przepływ przez kanał jest laminarny i w pełni rozwinięty, konwekcyjne przenoszenie ciepła i masy pomiędzy kanałami i powierzchnią pochłaniającą może być rozważane przy użyciu właściwości rdzenia gazu i współczynników wnikania,
10. składniki mieszaniny gazowej są traktowane jako gazy doskonałe ze stałymi właściwościami fizycznymi,
11. mieszaniny gazowe są roztworami rozcieńczonymi,
12. porowata warstwa pochłaniająca jest homogeniczna i izotropowa; stężenie materiałów innych niż sorbat jest nieistotne.

Zjawiska transportu występujące w tym układzie są zwykle analizowane poprzez rozważenie pojedynczego kanału ograniczonego adiabaticzną i nieprzepuszczalną powierzchnią usytuowaną w kierunku prostopadłym do strumienia procesowego. To pociąga za sobą eliminację promieniowego przewodzenia ciepła pomiędzy sąsiednimi kanałami. Pomimo obrotów rotora kanały są rozważane jako stacjonarne. Ściany kanałów są zbudowane z sorbującej włókniny lub kartonu znajdujących się na nieprzepuszczalnej strukturze (suporcie). Poprzeczne efekty dyfuzyjne we włókninie są rozważane tylko w jednym kierunku – prostopadłym do powierzchni włókniny. To pociąga za sobą zaniebdanie strumieni wzdłuż kierunku stycznego co jest słuszne pod warunkiem, że efekty krzywizny są niewielkie. A więc należy oczekiwać, że jeżeli grubości ściany i włókniny są małe w porównaniu do średnicy hydraulicznej, szybkość transportu może być dokładnie określona bez uwzględniania efektów krzywizny. Porowata włóknina jest traktowana jako porowate medium składające się ze sztywnej matrycy i porów, w których współistnieją zarówno gaz jak również faza zaadsorbowana.

Stężenie pary wodnej jest charakteryzowane stosunkiem masowym odniesionym do części suchej. Dla fazy gazowej używana jest zmienna Y opisująca masę pary wodnej (sorbatu) do pozostałego składnika w fazie gazowej. Dla fazy stałej zmienna W jest stosunkiem masy wody (sorbatu) w fazie zaadsorbowanej do masy suchego sorbentu. Ponadto, ponieważ stałą część włókniny stanowi zarówno sorbent jak i materiał inerty, ilość określająca udział masowy sorbentu jest określona jako f .

Ogólne równania procesu formułuje się bazując na cylindrycznym układzie o trzech współrzędnych: osiowej (z), radialnej (r) i obwodowej (φ). Cylindryczny układ współrzędnych i reprezentatywną objętość przedstawiono na rys. 8.

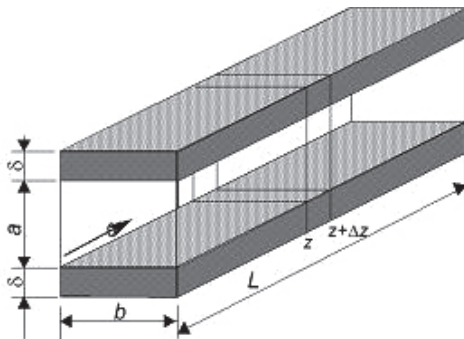
Dla uproszczenia przyjęto tylko osiowy ruch masy i ciepła, a równania bilansowe przedstawione są poniżej. W najprostszych modelach



Rys. 8. Cylindryczny układ współrzędnych i objętość kontrolna

przyjmuje się, że opór przenoszenia masy występuje tylko w fazie gazowej (GSR – Gas Side Resistance Model). W poniższym opisie przyjęto, że adsorpcji ulega para wodna z powietrza.

Rozważa się pojedynczy kanał przedstawiony na rys. 9 o wymiarach: wysokość a , szerokość b i długość L . Obszar bilansowania dotyczy elementu kanału o długości Δz .



Rys. 9. Pojedynczy kanał adsorbentu obrotowego

Masa powietrza zawartego w elemencie wynosi: $ab\Delta z\rho_a$, zaś masa matrycy: $2\delta b\Delta z\rho_m$. Bilans masowy wilgoci jest następujący:

$$\frac{\dot{m}_a}{n} Y_z - \frac{\dot{m}_a}{n} Y_{z+\Delta z} = \frac{d}{dt} (ab\Delta z\rho_a Y + 2\delta b\Delta z\rho_m fW) \quad (1)$$

Człony po lewej stronie wyrażają odpowiednio masowe natężenie dopływu i odpływu pary wodnej do/od rozważanego elementu. Prawa strona równania przedstawia akumulację pary wodnej w fazie gazowej oraz w matrycy związanych z rozważanym elementem o długości Δz . Dla $\Delta z \rightarrow 0$ otrzymuje się po przekształceniach:

$$\rho_a a \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\dot{m}_a}{nb} \frac{\partial Y}{\partial z} + 2\delta\rho_m f \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Szybkość adsorpcji wilgoci $\partial W/\partial t$ można określić na podstawie równania przenoszenia masy. Zakładając, że opory dyfuzyjne występują wyłącznie w fazie gazowej, równanie ma postać:

$$\delta\rho_m f \frac{\partial W}{\partial t} = K_Y (Y_a - Y_m) \quad (3)$$

przy czym wyrażenie $\delta\rho_m f$ jest stosunkiem masy pochłaniacza $2\delta b\Delta z\rho_m f$ do powierzchni kontaktu gazu z pochłaniaczem $2b\Delta z$.

Bilans cieplny ma postać:

$$\frac{\dot{m}_a}{n} H_z - \frac{\dot{m}_a}{n} H_{z+\Delta z} = \frac{d}{dt} (ab\Delta z\rho_a H_g + 2\delta b\Delta z\rho_m H_m) \quad (4)$$

Człony po lewej stronie wyrażają odpowiednio masowe natężenie dopływu i odpływu ciepła do/od rozważanego elementu. Prawa strona równania przedstawia akumulację ciepła w fazie gazowej oraz w matrycy związanych z rozważanym elementem o długości Δz . Dla $\Delta z \rightarrow 0$ otrzymuje się po przekształceniach:

$$\rho_a a \frac{\partial H_g}{\partial t} + \frac{\dot{m}_g}{nb} \frac{\partial H_g}{\partial z} + 2\delta\rho_m \frac{\partial H_m}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

Szybkość przenoszenia ciepła określa równanie:

$$\delta\rho_m \frac{\partial H_m}{\partial t} = h(T_a - T_m) + Q_{st} K_Y (Y_a - Y_m) \quad (6)$$

Wyrażenie $\delta\rho_m$ jest stosunkiem masy matrycy $2\delta b\Delta z\rho_m$ do powierzchni kontaktu gazu z pochłaniaczem $2b\Delta z$. Pierwszy człon dotyczy ciepła przeniesionego przez wnikanie od gazu do powierzchni pochłaniacza, zaś drugi – jest ciepłem transportowanym przez parę wodną przy międzyfazowym przenoszeniu masy.

W dokładniejszych modelach uwzględnia się w równaniach bilansowych człony dyspersyjne. Ponadto rozpatruje się uogólniony kształt kanału charakteryzując jego wymiar poprzeczny średnicą hydrauliczną:

$$d_e = \frac{4A}{P} \quad (7)$$

Równanie bilansu wilgoci w powietrzu jest wtedy następujące:

$$d_e \rho_a \left(\frac{\partial Y}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial z} \right) = K_Y (Y_m - Y_a) \quad (8)$$

Bilans energii dla powietrza jest opisany jako:

$$d_e c_{pa} \rho_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial t} + u \frac{\partial T_a}{\partial z} - \frac{k_a}{c_{pa} \rho_a} \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} \right) = h(T_m - T_a) + c_{pv} K_Y (Y_m - Y_a) (T_m - T_a) \quad (9)$$

Bilans wilgoci w fazie stałej:

$$\rho_d \delta \left(\frac{\partial W}{\partial t} - D_e \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) = K_Y (Y_m - Y_a) \quad (10)$$

Bilans energii w fazie stałej:

$$c_{pd} \rho_d \delta \left(\frac{\partial T_d}{\partial t} + \frac{k_d}{c_{pd} \rho_d} \frac{\partial^2 T_d}{\partial z^2} \right) = h(T_a - T_m) + K_Y (Y_a - Y_m) Q_{st} + c_{pv} K_Y (Y_a - Y_m) (T_a - T_m) \quad (11)$$

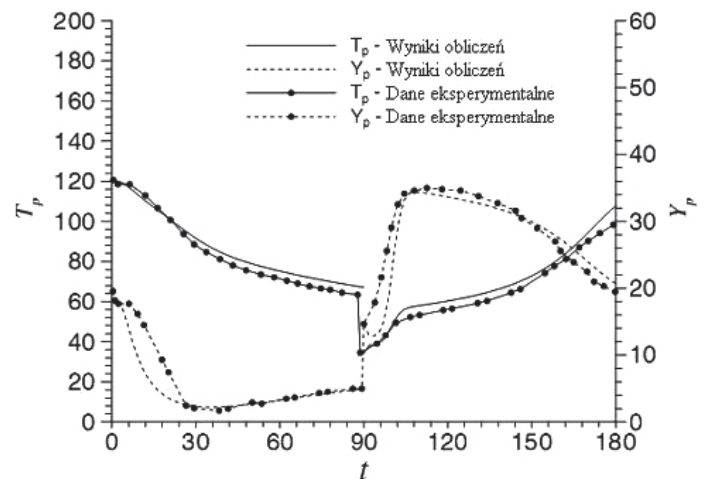
Przedstawione powyżej równania uwzględniają tylko ruch osiowy. Model dwuwymiarowy przedstawiono m.in. w pracy [8].

Innym problemem rozważanym w bardziej rozbudowanych modelach jest uwzględnienie oporu przenoszenia masy w fazie stałej lub w obydwu fazach jednocześnie (GSSR – Gas and Solid Side Resistance Model).

Symulacja cyfrowa procesu

W pracy [9] sprawdzano czy rezultaty symulacji procesu przy użyciu zaproponowanego modelu prowadzą do wyników zgodnych z danymi eksperymentalnymi.

Na rys. 10 przedstawiono porównanie obliczonych i zmierzonych wartości wyjściowej temperatury T_p oraz wilgotności Y_p w funkcji czasu. Jak widać przebieg krzywych doświadczalnych jest w dużym stopniu



Rys. 10. Porównanie rezultatów symulacji z danymi eksperymentalnymi. [9]

niu zgodny z wynikami symulacji. Największe rozbieżności występują w okresie początkowym.

Wnioski

Modelowanie adsorberów obrotowych jest bardziej złożone niż klasycznych adsorberów ze złożem stacjonarnym. Powoduje to, że nie wszystkie prawidłowości oraz nie wszystkie możliwości wykorzystania tych urządzeń są już wystarczająco poznane. Zatem wysiłek podjęty w zakresie badań teoretycznych i doświadczalnych adsorberów obrotowych może zaowocować znalezieniem dalszych potencjalnych możliwości w zastosowaniu tych urządzeń oraz polepszeniem efektywności pracy aparatów istniejących.

Oznaczenia

A – pole przekroju poprzecznego kanału,
 c_p – ciepło właściwe,
 f – udział masy substancji pochłaniającej w matrycy,
 H_g – entalpia powietrza,
 H_m – entalpia matrycy,
 h – współczynnik przenoszenia ciepła w powietrzu,
 k – współczynnik przewodzenia ciepła,
 K_y – współczynnik przenoszenia masy w gazie,
 \dot{m}_a – natężenie przepływu powietrza suchego,
 \dot{m}_g – natężenie przepływu powietrza wilgotnego,
 m_m – całkowita masa matrycy ($2\delta\rho_m n b L$),
 n – liczba kanałków przepływowych dla gazu,
 P – obwód kanału,
 Q_{st} – ciepło sorpcji,

T – temperatura,
 r – promień aparatu,
 u – prędkość powietrza,
 W – zawartość wody w substancji pochłaniającej,
 Y – wilgotność bezwzględna powietrza,
 ρ_a – gęstość powietrza suchego,
 ρ_m – gęstość matrycy,
 δ – grubość warstwy adsorbentu.

Indeksy dolne

a – suche powietrze,
 d – adsorbent,
 m – matryca.

LITERATURA

- [1] *J. Pikoń*: Aparatura chemiczna, PWN 1983.
- [2] *J. Warych*: Aparatura chemiczna i procesowa, Oficyna Wydawnicza PW, 1996.
- [3] *N. W. Kielcew*: Podstawy techniki adsorpcyjnej, WNT, 1980.
- [4] *W. J. Thomas, B. Crittenden*: Adsorption Technology and Design, Butterworth-Heinemann, 1998.
- [5] *P. C. Wankat*: Large-scale adsorption and chromatography, CRC Press 1986.
- [6] http://www.thecmmgroup.com/Rotary_Concentrator_Systems.aspx (20.04.2009).
- [7] *A. Kodama*: Adsorption 11, 603 (2005).
- [8] *T. S. Ge, Y. Li, R. Z. Wang, Y. J. Dai*: Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 1485 (2008).
- [9] *L. A. Sphaier, W. M. Worek*: International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 3415 (2004).

Praca częściowo finansowana z badań statutowych AGH (11.11.210.125).