

Studii privind îmbunătățirea contactului bifazic la coloanele cu umpluturi structurate

ANDRA TĂMA^a, NADIA POP, ZENO GROP^a IAN

Universitatea Politehnică Timișoara, Facultatea de Chimie Industrială și Ingineria Mediului, Str. Piața Victoriei, Nr. 2, 300006, Timișoara, România

In this paper is being studied the behaviour of structured packing subjected to certain chemical, thermal or electrochemical treatments, in specified conditions (temperature and exposure time). The wettability of the materials used has a direct effect on the liquid layer, being influenced by the density, viscosity and surface tension of the liquid as well as the surface condition, which has allowed the comparison of the thickness experimental values with those determined analytically. The treatments applied had in view the possibility of improving or regenerating the packing efficiency as a result of the changes that occur on the contact surface. The characterization was done after each treatment. Also, it was established the number of equilibrium stages related to one packing element used in the separation process.

Keywords: separation, structured packing, wettability

În coloanele cu umplutură este necesar să se asigure un contact continuu între faza lichidă și gazoasă care circulă în contracurent, iar în acest sens elementele de umplură trebuie să prezinte suprafață specifică și volum liber cât mai mari, să asigure distribuția uniformă a fazelor și amestecarea bună a acestora. Comparând principalele caracteristici ale tipurilor de umpluturi se constată că cele structurate prezintă valori mai mari ale suprafeței specifice și volumului liber, comparativ cu cele ale diferitelor forme geometrice, având din această cauză și eficacitate mult mărită. De asemenea, oferă avantajele unor pierderi de presiune scăzute și posibilitatea operării cu debite mari ale fazelor [1].

La contactul direct dintre un lichid și o suprafață solidă, între cele două faze apar interacțiuni a căror intensitate depinde de proprietățile lichidului (vâscozitate, densitate, tensiune superficială, temperatură), tipul suprafeței (unghiul de contact, rugozitate) și condițiile de operare (debitul specific de lichid) [2]. Mărirea suprafeței efective de transfer de masă diferă aparent de suprafața geometrică, datorită efectelor produse de condițiile hidraulice, precum și a unor interacțiuni fizice care influențează dispunerea lichidului pe elementul de umplură (tensiunea superficială, forțele de capilaritate, efectul de condensare). În principiu, diferența dintre suprafața udată și aria interfacială efectivă constă în faptul că suprafața udată încorporează aria suprafețelor "moarte", pe când aria interfacială efectivă include nu doar aria filmului de lichid de la suprafața umplurii ci și suprafețele picăturilor, a jetului de lichid pulverizat etc [3,4].

Elementele de contact de tip umplură sunt realizate într-o gamă geometrică variată și, de asemenea, foarte diverse sunt și materialele din care se confecționează. Îmbunătățirea eficacității de separare prin rectificare sau absorbție a unei umpluturi se realizează prin mărirea gradului de udabilitate al suprafeței de contact față de lichidul descendent din coloană. Eficacitatea umpluturilor metalice, din punct de vedere al udabilității, este influențată de poziția pe care metalul o ocupă în sistemul periodic, iar experimental s-a constatat că oxizii metalici au energii de adeziune mai mari decât metalele pure corespunzătoare. Straturile oxidice de la suprafața umplurii pot fi obținute prin încălzirea materialelor la

temperaturi ridicate în curent de aer, udabilitatea oxizilor formați fiind îmbunătățită pe măsura creșterii temperaturii de oxidare, deci a grosimii stratului rezultat. Oxidarea suprafețelor metalice poate fi realizată și pe cale termochimică utilizând diverși reactanți: apă oxigenată, soluții de permanganat de potasiu, bicromat de potasiu, acid fosforic etc [5].

Parte experimentală

Studiile privind eficacitatea umpluturilor structurate în procese de separare prin rectificare, după activarea suprafeței metalice prin diverse procedee, au fost realizate pe umpluturi structurate tip B7 (figura 1) provenind de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice (INCDTCI) Rm. Vâlcea.

Acestea au structură ordonată, realizată din fășii de plasă din bronz fosforos și prezintă următoarele caracteristici [6]:

- compoziția bronzului fosforos: Cu = 95,1%, Sn = 4,23%, P = 0,23%;
- țesătură 4x1 ițe cu diametrul firului 0,16 mm;
- număr de ochiuri: 24 x 42/cm², dimensiunea ochiului 0,14 x 0,071 mm;



Fig. 1. Umpluturi structurate realizate din fășii de bronz fosforos (dxh = 56x50 mm), tip A

* email: andra.tamas@chim.upt.ro; Tel.: 0040256-404222

Tabelul 1
TIPURILE DE TRATAMENTE APLICATE UMPLUTURILOR STRUCTURATE

Nr. probei	Tipul tratamentului
0	Umplutura netratată
1	Chimic: sol. apoasă NaOH 10%, t = 20°C, timp de expunere 96 ore
2	Termic: t = 300°C, timp de expunere 3 ore
3	Chimic + termic în condițiile probelor 1 și 2
4	Chimic: sol. apoasă 5% Na ₂ CO ₃ – 5% KHCO ₃ , t = 20°C, timp de expunere 60 zile
5	Electrochimic: sol. apoasă NaOH 1M, densitate de curent 9.85 A m ⁻² , timp 10 minute
6	Electrochimic: sol. apoasă NaOH 1M, densitate de curent 4.97 A m ⁻² , timp 10 minute

-diametrul orificiilor: 4 mm, distanța între acestea 10 mm;

-unghiul între pliuri 75°, înălțimea acestora 4,5 mm, pasul 7 mm;

-densitatea aparentă: $\rho = 430 \text{ kg m}^{-3}$;

-suprafața specifică: $\sigma = 1650 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$;

-volum liber: $V_1 = 0,952 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$;

În lucrare s-a studiat, comparativ, eficacitatea acestui tip de umpluturi pe baza următoarelor determinări:

a) aprecierea reținerii diferitelor lichide pe suprafața umpluturii și determinarea grosimii stratului reținut (experimental și prin calcul);

b) comportarea la rectificarea, apreciată prin determinarea înălțimii echivalente a talerului teoretic, respectiv, calculul numărului de talere corespunzătoare unui element de umplutură.

Studiul udabilității suprafețelor s-a realizat prin aprecierea gradului de reținere pe acestea a diferitelor lichide, respectiv, determinarea grosimii stratului rezultat, în condiții de temperatură și durată precizată a expunerii. Tipurile de tratamente la care au fost supuse elementele de umplutură sunt redată în tabelul 1.

Aprecierea udabilității umpluturilor s-a efectuat în raport cu următoarele medii: apă, soluții alcool metilic-apă, soluții NaOH-apă, solvenți organici (benzen, toluen).

Umplutura imersată în lichid a fost extrasă lent, cu ajutorul unei cremaliere, astfel încât să nu fie deranjat echilibrul dintre forța de aderență datorată tensiunii superficiale și vâscozității, respectiv, forța gravitațională. Prin cântărire a rezultat masa și s-a calculat volumul de lichid reținut, care a fost raportat la suprafața teoretică a elementului de umplutură, fapt ce a permis calcularea grosimii peliculei de lichid, δ_{exp} . Determinările au fost realizate la diferite temperaturi, luând în considerare modificarea tensiunii superficiale și a vâscozității lichidului.

În continuarea determinărilor experimentale s-a urmărit efectul concentrării vaporilor, prin rectificare, pe o porțiune din coloană corespunzătoare unuia sau mai multor elemente de umplutură, în corelare cu modificarea temperaturii și compoziției acestora conform echilibrului lichid-vapori realizat. S-a utilizat sistemul alcool metilic-apă, cu concentrația inițială 10% mol alcool etilic.

Instalația experimentală a cuprins:

a) balon de distilare (blaz) cu posibilitatea măsurării temperaturii lichidului ($t_{w,l}$) și a vaporilor ($t_{w,v}$);

b) coloană cu umplutură structurată, la care se determină temperatura vaporilor îmbogății, la ieșirea din strat ($t_{D,v}$);

c) condensator care asigură refluxul total la o densitate de stropire $0,5 - 0,7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Metoda s-a dovedit a fi sensibilă, diferența între temperatura vaporilor din blaz ($t_{w,v}$) și cea la ieșirea vaporilor din stratul de umplutură ($t_{D,v}$) fiind cuprinsă între 15 și 21°C, pentru un element de umplutură, cu precizia măsurării de 0,1°C.

În determinările experimentale s-au folosit elementele de umplutură tip A ($d_{xh} = 56 \times 50 \text{ mm}$) tratate în condițiile precizate (tabelul 1), studiindu-se comparativ influența tipului de tratament aplicat asupra eficacității separării prin rectificare.

Rezultate și discuții

Aprecierea caracteristicilor funcționale ale umpluturii structurate s-a realizat, în prealabil, prin determinarea pierderilor de presiune raportate la un metru liniar de umplutură (fig. 2 și 3). Măsurătorile au fost efectuate pe elemente de umplutură cu dimensiunea $d_{xh} = 56 \times 50 \text{ mm}$ (tip A), respectiv $30 \times 50 \text{ mm}$ (tip B).

Pentru coloana uscată se constată, în ambele cazuri, creșterea exponențială a pierderilor de presiune în funcție de viteza masică a gazului și păstrarea alurei curbelor pe

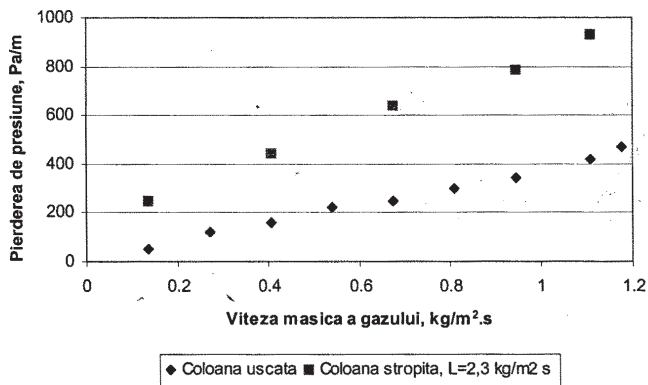


Fig. 2. Pierderea de presiune în coloane cu umpluturi structurate - coloană cu diametrul 56mm, 4 elemente de umplură 56 x 50 mm, tip A

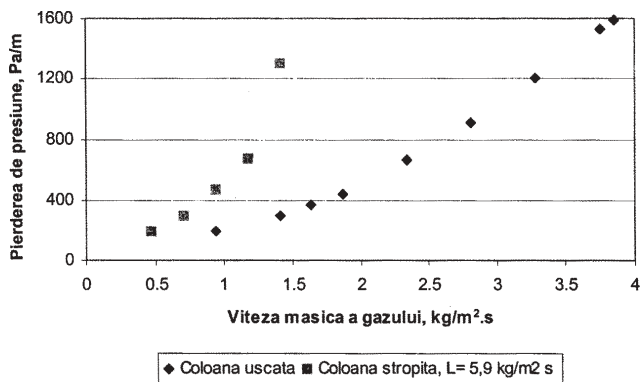


Fig.3. Pierderea de presiune în coloane cu umpluturi structurate - coloană cu diametrul 30 mm, 10 elemente de umplură 30 x 50 mm, tip B

un domeniu larg de viteze, creșterea fiind mai accentuată la umplutura cu diametru mai mic (tip B). La coloana stropită prevăzută cu umplură tip B se sesizează punctul de inflexiune al curbei corespunzător regimului de înecare.

Din analiza rezultatelor au fost deduse următoarele dependențe analitice între pierderea de presiune Δp și viteza masică a gazului w_m :

- coloana cu umplură tip A:

uscată

$$w_m \in (0 \div 1,1) \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}; \quad \Delta p = 369 \cdot w_m^{0,93}; \quad \text{Re}_g < 170 \quad (1)$$

stropită

$$w_m \in (0 \div 1,1) \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}; \quad L = 2,3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}; \quad \Delta p = 842 \cdot w_m^{0,68} \quad (2)$$

- coloana cu umplură tip B:

uscată,

$$w_m \in (0 \div 3,3) \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}; \quad \Delta p = 160 \cdot w_m^{1,68}; \quad \text{Re}_g < 506 \quad (3)$$

stropită

$$w_m \in (0 \div 1,2) \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}; \quad L = 5,9 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}; \quad \Delta p = 524 \cdot w_m^{1,49} \quad (4)$$

La analiza udabilității suprafețelor, valoarea δ_{exp} calculată cu relația 5 a fost comparată cu grosimea peliculei calculată analitic, δ_{anal} , conform relației 6:

$$\delta_{\text{exp}} = \frac{V}{A_{\text{teor.}}} = \frac{m_l}{\rho_l \cdot A_{\text{teor.}}} \quad (5)$$

$$\delta_{\text{anal}} = \left(\frac{\eta_l^2}{\rho_l^2 \cdot g} \right)^{0,33} \quad (6)$$

unde:

V , m_l - volumul, respectiv, masa de lichid reținut,
 A_{teor} - aria teoretică a elementului de umplură,
 η_l , ρ_l - vâscozitatea dinamică, respectiv, densitatea lichidului.

În cazul utilizării pentru umectare a apei, respectiv, soluției alcool metilic-apă 10%, rezultatele obținute sunt redată în tabelele 2 și 3, gradul de udabilitate al suprafeței umplurii fiind calculat ca raportul între grosimea experimentală și cea calculată δ_{exp} , δ_{anal} .

Nr. crt.	Temperatura, °C	$\delta_{\text{exp}} / \delta_{\text{anal}}$, pentru diferite tratamente aplicate						
		0	1	2	3	4	5	6
1	20	0,78	0,77	0,83	0,81	0,82	0,64	0,61
2	40	0,98	1,01	0,95	1,01	1,04	0,79	0,75
3	60	1,11	1,26	1,18	1,25	1,32	0,98	0,94
4	100	1,49	1,56	1,51	1,59	1,91	1,17	1,12

Tabelul 2
GRADUL DE UDABILITATE A UMPLUTURII ÎN CONTACT CU APA, LA DIFERITE TEMPERATURI

Nr. crt.	Temperatura, °C	$\delta_{\text{exp}} / \delta_{\text{anal}}$, pentru diferite tratamente aplicate						
		0	1	2	3	4	5	6
1	20	0,70	0,69	0,69	0,50	0,39	0,72	0,75
2	40	0,89	0,88	0,85	0,74	0,48	0,91	0,95
3	60	1,07	1,05	1,01	0,93	0,69	1,17	1,20

Tabelul 3
GRADUL DE UDABILITATE A UMPLUTURII ÎN CONTACT CU SOLUȚIE ALCOOL METILIC - APĂ 10% LA DIFERITE TEMPERATURI

Pentru fiecare tratament aplicat se constată creșterea udabilității cu temperatura, fapt explicabil prin scăderea vâscozității și tensiunii superficiale, peste care se suprapune fenomenul de degazare a lichidului. Gradul subunitar de udabilitate se poate explica prin faptul că nu toată suprafața geometrică a umpluturii este acoperită cu peliculă de lichid, cu cât raportul este mai mic rămânând suprafețe neumectate. Valoarea supraunitară a acestui raport se poate explica prin diminuarea suprafeței peliculei în raport cu cea teoretică ca rezultat al coalescenței și efectelor superficiale în porțiunea pliurilor și a altor capilarități din structura umpluturii.

Pentru sistemul alcool metilic-apă, din datele de echilibru, au fost deduse următoarele dependențe între concentrația (fr.mol.) fazei lichide x , a vaporilor y și temperatura, t (°C):

pentru faza lichidă, $x \in (0,06 \div 0,95)$:

$$x = \exp(23,604 - 0,2134 \cdot t - 635,5 \cdot t^{-1}) \quad (7)$$

respectiv,

$$t = 71,897 - 7,4353 \cdot x - 7,0648 \cdot \ln x \quad (8)$$

pentru faza de vapori, $y \in (0,304 \div 0,97)$:

$$y = (-1,2095 + 1135,9 \cdot t^{-1,5})^{0,5} \quad (9)$$

$$t = \exp(4,9466 - 0,7868 \cdot y + 0,1635 \cdot \ln y) \quad (10)$$

În tabelul 4 se redă compoziția la echilibru a vaporilor, determinată grafic din diagrama t-x,y, respectiv calculată cu relația 9, în funcție de temperatura vaporilor:

Tabelul 4
MODIFICAREA COMPOZIȚIEI VAPORILOR CA EFECT AL UMPLUTURII

Tratamentul (tabel 1)	$t_{w,v}$	y_0	$t_{D,v}$	y_s	t_1	y_1	t_2	y_2
Coloana martor	87,4	0,425* <i>0,425**</i>	84,5	0,515 <i>0,503</i>	74,8 <i>74,8</i>	0,745 <i>0,739</i>	-	-
Col. cu umplut.(0)	87,2	0,435 <i>0,430</i>	69,8	0,865 <i>0,859</i>	74,6 <i>74,7</i>	0,755 <i>0,741</i>	68,2 <i>68,5</i>	0,905 <i>0,891</i>
Col. cu umplut.(1)	86,6	0,455 <i>0,447</i>	70,0	0,860 <i>0,854</i>	74,2 <i>74,3</i>	0,760 <i>0,751</i>	68,2 <i>68,3</i>	0,905 <i>0,896</i>
Col. cu umplut.(2)	88,0	0,410 <i>0,408</i>	70,6	0,845 <i>0,840</i>	75,1 <i>75,2</i>	0,740 <i>0,730</i>	68,5 <i>68,7</i>	0,895 <i>0,886</i>
Col. cu umplut.(3)	87,5	0,423 <i>0,422</i>	70,8	0,840 <i>0,835</i>	74,9 <i>74,8</i>	0,745 <i>0,738</i>	68,4 <i>68,5</i>	0,900 <i>0,890</i>
Col. cu umplut.(4)	88,2	0,400 <i>0,402</i>	72,6	0,800 <i>0,792</i>	75,3 <i>75,4</i>	0,730 <i>0,726</i>	68,8 <i>68,8</i>	0,890 <i>0,884</i>
Col. cu umplut.(5)	88,4	0,390 <i>0,396</i>	69,5	0,875 <i>0,867</i>	75,4 <i>75,5</i>	0,730 <i>0,722</i>	68,8 <i>68,8</i>	0,890 <i>0,884</i>
Col. cu umplut.(6)	88,4	0,390 <i>0,396</i>	67,0	0,930 <i>0,928</i>	75,4 <i>75,5</i>	0,730 <i>0,722</i>	68,8 <i>68,8</i>	0,890 <i>0,884</i>

* valori preluate din diagrama t-x,y; ** valori calculate cu relațiile (7)-(10).

Tabelul 5
EFICACITATEA UMPLUTURII STRUCTURATE TIP A ÎN FUNCȚIE DE TRATAMENTUL APLICAT SUPRAFEȚEI

Condiții de lucru	$t_{w,l}$	$t_{w,v}$	$t_{D,v}$	NTT/1 elem.umpl	HTT, mm	NTT/m.l. umpl
Coloana martor	88,6	87,4	84,5	0,28 <i>0,25*</i>	-	5,6 <i>5,0</i>
Col. cu umplut.(0)	88,6	87,2	69,8	1,45 <i>1,54</i>	34,5 <i>32,5</i>	29,0 <i>30,8</i>
Col. cu umplut.(1)	88,6	86,6	70,0	1,41 <i>1,46</i>	35,5 <i>34,2</i>	28,2 <i>29,2</i>
Col. cu umplut.(2)	89,0	88,0	70,6	1,40 <i>1,46</i>	35,8 <i>34,2</i>	28,0 <i>29,2</i>
Col. cu umplut.(3)	88,6	87,5	70,8	1,33 <i>1,39</i>	37,5 <i>36,0</i>	26,6 <i>27,8</i>
Col. cu umplut.(4)	89,0	88,2	72,6	1,16 <i>1,17</i>	43,2 <i>42,7</i>	23,1 <i>23,4</i>
Col. cu umplut.(5)	89,0	88,4	69,5	1,63 <i>1,65</i>	30,7 <i>30,3</i>	32,6 <i>33,0</i>
Col. cu umplut.(6)	89,0	88,4	67,0	1,97 <i>2,02</i>	25,4 <i>24,7</i>	39,4 <i>40,5</i>

- y_0 deasupra lichidului, la temperatura $t_{w,v}$;
- y_s la partea superioară a stratului de umplutură, la temperatura t_b ;
- y_1 și y_2 sunt compozițiile rezultate, la temperaturile t_1 și t_2 , din îmbogățirea corespunzătoare unui taler, respectiv, două talere teoretice.

În tabelul 5 sunt prezentate datele referitoare la eficacitatea coloanei pentru fiecare caz studiat: numărul de talere teoretice (NTT) corespunzătoare unui element de umplutură, respectiv unui metru liniar de umplutură, precum și înălțimea echivalentă a unui taler teoretic (HTT).

Concluzii

A fost studiată influența diferitelor tratamente chimice și termice aplicate suprafeței unor umpluturi structurate asupra comportării acestora în procesul de rectificare, prin aprecierea gradului de udabilitate și a eficacității de separare. Eficacitatea umpluturii s-a apreciat, comparativ, prin determinarea grosimii stratului de lichid reținut pe suprafața acestuia și prin stabilirea numărului de talere teoretice corespunzătoare unor elemente de umplutură, respectiv, a înălțimii talerului teoretic.

S-a constatat că mărirea temperaturii conduce la creșterea gradului de udabilitate al suprafeței în cazul folosirii apei cât și a soluției alcool metilic-apă. Pentru cazul

al doilea, un grad de udabilitate mai mare se realizează la umpluturile tratate electrochimic (6 și 5), iar pentru apă rezultate mai bune prezintă umplutura (4) tratată combinat (chimic și apoi termic).

În corelare cu gradul de udabilitate, la rectificarea sistemului alcool metilic-apă, s-au obținut eficacități mărite pentru umpluturile tratate electrochimic (6 și 5), iar rezultate mai modeste au apărut la folosirea umpluturii tratate combinat (4). De asemenea, s-a constatat o bună corelare între valorile temperaturii și compoziției vaporilor, determinate grafic, respectiv, analitic.

Bibliografie

1. BENITEZ J., Mass Transfer Operations, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2002, p. 182
2. ATAKI A., Wetting of Structured Packing Elements-CFD and Experiment, PhD Thesis, Technical Univ. of Kaiserslautern, 2006
3. WANG G.Q., YUAN X.G., YU K.T., Chemical Eng. and Processing, **45**, 2006, p.691
4. SHILKIN A., KENIG E.Y., Chemical Eng. Journal, **110**, 2005, p.87
5. TIPESCU G., Contribuții asupra transferului de masă în procesul de distilare izotopică, Teză de doctorat, Univ. Tehnică de Construcții București, 2005
6. TEFĂNESCU I., PECULEA M., TIPESCU G., Brevet de Invenție RO-113534 C1, BOPI nr.1/2000

Întrat în redacție: 29.06.2007