

MICHAŁ DYLAŁ, JERZY ROSIŃSKI\*

## MODEL FENOMENOLOGICZNY TRANSPORTU PIANY PRZEZ OŚRODEK POROWATY

---

## MODEL OF THE FOAM TRANSPORT TROUGH POROUS STRUCTURE

### Streszczenie

W pracy przedstawiono zjawiska, jakie towarzyszą przepływowi piany przez strukturę porowatą. Omówiono dystrybucję cieczy i gazu wewnątrz kanałów utworzonych przez kulki tworzące złożę. Rozpatrzono mechanizmy podziału pęcherzy piany i pękania lameli. Stworzyło to podstawę do zaproponowania jednowymiarowego modelu fenomenologicznego przepływu piany przez ośrodki porowate.

*Słowa kluczowe: piana początkowa i wtórna, skuteczność destrukcji piany, udział uwolnionej fazy gazowej, skuteczność odgazowania*

### Abstract

In the paper the phenomena accompanying the flow of foam through porous structure are presented. The distribution of liquid and gas inside the channels formed by balls of deposit was analysed. The mechanisms of section of foam bubbles and lamellae cracking were considered. The analysis allowed to propose the one-dimensional model of foam flow through porous structures.

*Keywords: primary and secondary foam, foam destruction efficiency, part of freed gas stage, degassing efficiency*

---

\* Prof. dr hab. inż. Michał Dylał, dr inż. Jerzy Rosiński,  
Politechnika Krakowska.

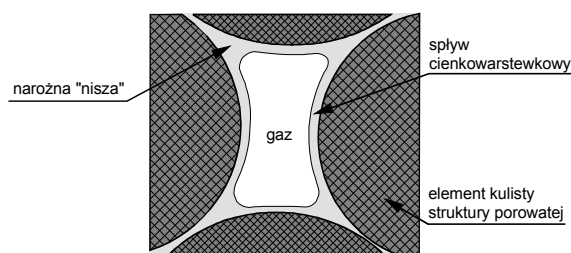
## 1. Wstęp

W 1961 roku Fried [1] wykazał, że obecność piany tworzonej w oparciu o wodne roztwory tensydów może w sposób istotny zredukować przepływ gazu przez strukturę porowatą.

Okres ostatnich paru dziesięcioleci przyniósł szereg interesujących opracowań z zakresu opisu reologii struktur pianowych; odnosząc częściowo zmiany ich własności do oddziaływania geometrii struktury porowatej. Prace te miały jednakże głównie charakter fenomenologicznych hipotez o charakterze quasi-modeli fizycznych. Poniżej przedstawione pozycje literaturowe nie aspirują do opracowania monograficznego; wskazują one zaledwie na kierunki prowadzonych badań i osiągnięte rezultaty. Zaliczyć tutaj należy artykuły i raporty z badań: Hirasaki [2, 3], Marsdena [4], Hellera i Kuntamukkula [5], Baghikiana i Handy [6] oraz Rossena [7]. Lektura powyższych prac prowadzi do wniosku, że zagadnienie to jest nadal badawczo otwarte.

## 2. Mikrostruktura piany

Za pianę uznaje się układ, w którym w cieczy zawierającej dodatek rozpuszczonego środka powierzchniowo czynnego znajduje się gaz rozproszony w formie pęcherzy stabilizowanych przez tenże dodatek. Zachowanie takiego układu dwufazowego wewnątrz warstwy porowatej jest w sposób jednoznaczny powiązane z jej strukturą geometryczną, scharakteryzowaną przede wszystkim rozkładem porów, połączonych ze sobą wąskimi kanalikami. Bardzo istotny dla przepływu pian jest fakt, że pory nie wykazują cylindrycznego kształtu, lecz mają liczne załamania i „nisze”, jak to pokazano na rysunku 1. W układzie dwufazowym ciecz ma charakter dominujący i zwilża ścianki kanałów oraz całkowicie wypełnia mniejsze pory i „nisze” – reszta objętości wypełniona jest gazem.



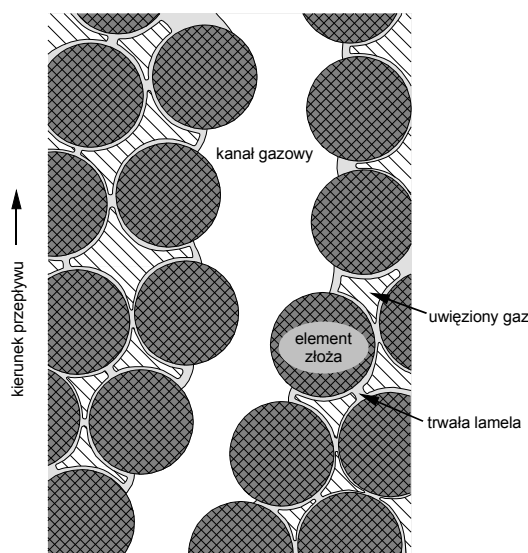
Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez „rogaty” por

Fig. 1. Cross section through "bifurcated" pore

Dzięki strukturze kanałów i zwilżaniu ścian ciała stałego, ciecz tworzy fazę ciągłą w całej sieci porów i kanalików.

### 3. Transport piany

Na rysunku 2 przedstawiono odwzorowanie układu piany–ośrodek porowaty.



Rys. 2. Przepływ piany przez strukturę porowatą  
Ciągłe kanały gazowe nie są zacienione, a uwieczony gaz jest zakreskowany

Fig. 2. Flow of foam through the porous structure

Odwzorowanie to wskazuje, że ruchliwość gazu, związana z prawem Darcy'ego, może stanowić zachętę do opisu zjawisk przez uwzględnienie przepuszczalności warstwy porowatej oraz lepkości gazu. Ponieważ jednak przepływ piany należy rozpatrywać jako przepływ cieczy nienewtonowskiej, to wpływ wymienionych wielkości nie może być analizowany rozdzielnie.

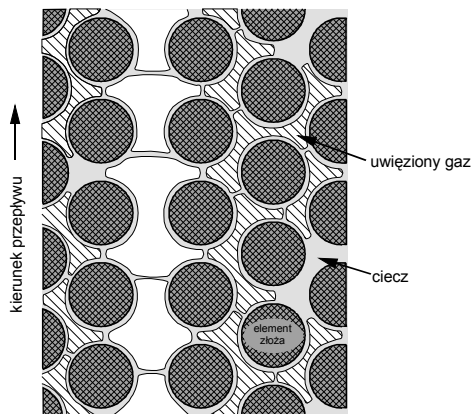
Na rysunku 2 przedstawiono strukturę piany, wskazując na istnienie wyodrębnionych przestrzeni gazowych i ciekłych – połączonych przez lamele o makroskopowej długości, mających charakter stacjonarny. Całość struktury ma charakter niestacjonarny i ulega częstym zmianom kształtu i wielkości jej elementów.

Powyższy rysunek – będący odwzorowaniem rzeczywistości – potwierdza malejącą prędkość fazy gazowej związaną z powierzchnią przekroju przepływu.

### 4. Efektywna przepuszczalność warstwy porowatej

Prace Bernarda i współpracowników [8, 9] stworzyły podstawy ilościowego modelowania przepuszczalności cieczy zawartej w objętości struktury pianowej. Uwzględniając dodatkowo prace Gillisa i Radkego [10], podjęto próbę stworzenia jednolitego modelu fizycznego przepływu piany przez mikrostrukturę porowatą.

Pewną formą podsumowania rozważań nad strukturą przepływu jest rys. 3. Analiza odwzorowania wskazuje na powstanie zamkniętych obszarów przepływu gazu i opływie elementów struktury tworzącej układ porów w formie omywania (spływu) oraz powstawanie łączników – będących lamelami.



Rys. 3. Schemat rozkładu cieczy (na poziomie porów) dla nieciągłego przepływu piany

Fig. 3. Diagram of the liquid distribution (on the level of pores) for the discontinuous foam flow

Obszary jasnoszare prezentują fazę ciekłą, natomiast gaz będący w ruchu przedstawiają białe obszary, zaś białe – zakreskowane odpowiadają przestrzeniom zajęтым przez gaz uwięziony w strukturze. Z powodu dominacji sił kapilarnych, ciecz (roztwór wodny środka powierzchniowo czynnego) spływa ku dołowi po elementach złoża; podczas gdy tylko nieznaczna jej część przemieszcza się w formie tworzących się lameli.

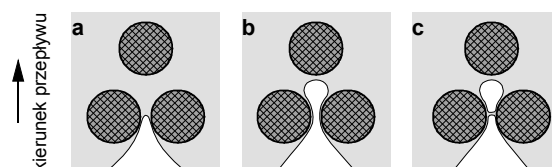
## 5. Mechanizmy tworzenia piany oraz jej rozpadu

Przepływ piany oraz zmiany podstawowych form jej struktury generują w warstwie porowatej trzy podstawowe mechanizmy. Istotę tych mechanizmów przedstawiono schematycznie na rys. 4.

Na rysunku 4a pokazano zbliżanie się pęcherza gazu do jednego z porów wypełnionych cieczą. Na rysunku 4b przedstawiono początki formowania się cienkiego „języka” gazu, wnikaącego w głąb kanału pomiędzy elementy tworzące strukturę porowatą, poprzedzającego jego zerwanie (pęknięcie). Na rysunku 4c pokazano stan po utworzeniu się lameli w kształcie soczewki wypełnionej cieczą.

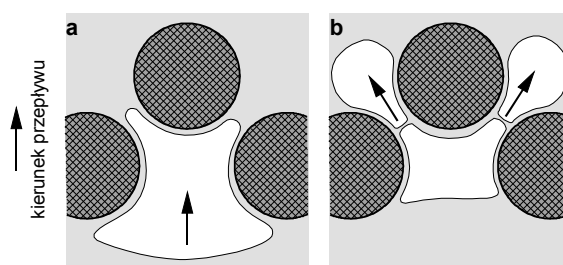
Na rysunku 5 przedstawiono poglądowo przebieg podziału większego pęcherza piany na mniejsze podczas przepływu przez rozwidlający się kanał w strukturze porowatej.

Gdy pęcherz gazu napotyka na środku swej drogi element struktury złoża (rysunek 5a) następuje jego podział na dwie części. Po ich oderwaniu powstają dwa nowe pęcherze poruszające się oddzielnie odmiennymi torami (rys. 5b).



Rys. 4. Mechanizm pęknięcia „języka gazu”

Fig. 4. Mechanism of "gas tongue" cracking

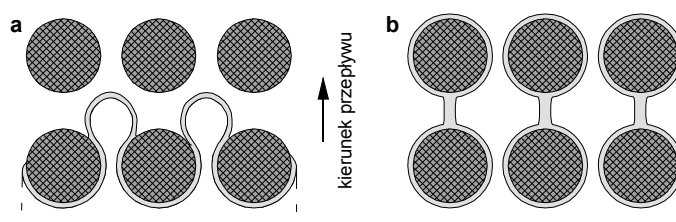


Rys. 5. Schemat mechanizmu podziału

a – pęcherz napotyka na swej drodze element struktury złoża, b – podzielone pęcherze gazu

Fig. 5. Diagram of the division mechanism

Na kolejnym rysunku zilustrowano trzeci z zaobserwowanych mechanizmów: w jego lewej części (rys. 6a) przedstawiono uformowany już przepływ dwóch odgałęzień strugi gazowej, które następnie tworzą stałe połączenie z kolejnym napotkanym elementem struktury poru (rys. 6b) – omywając jego powierzchnię cienką warstwą, połączoną z wcześniej już pokonanym poziomem kanalików.



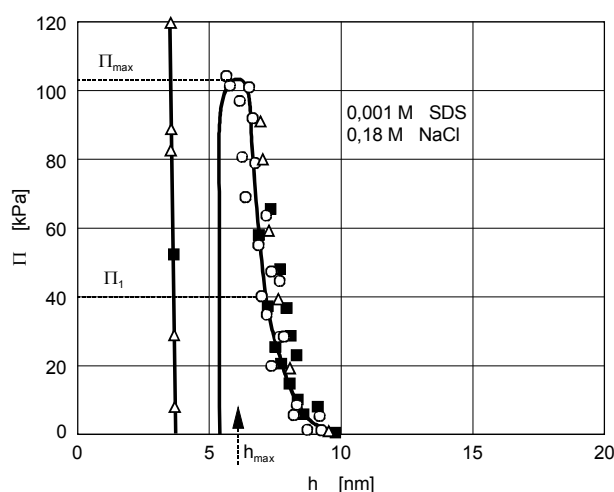
Rys. 6. Tworzenie lameli wzdłużnych

Fig. 6. Creating of the longitudinal lamellae

W podsumowaniu należy stwierdzić, że w literaturze zagadnienia (Ettinger i Radke [11]) – jako dominujący przedstawiany jest mechanizm pierwszy, zwany w piśmiennictwie angielskim *snap-off*.

## 6. Destrukcja piany

Procesowi generowania piany towarzyszy każdorazowo zjawisko jej samoczynnego rozpadu – zwane samodestrukcją lub autodestrukcją – oraz destrukcji wymuszonej, np. przy przepływie przez warstwę porowatą. Prace Chambersa i Radke [12] wskazują na dwa możliwe zjawiska będące przyczyną koalescencji: ssanie kapilarne, wywołane strukturą porowatą oraz dyfuzję. Dalszej analizie i ocenie podlegać będą zjawiska kapilarne jako dominujące.



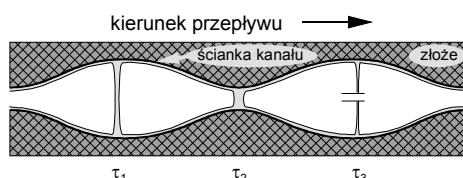
Rys. 7. Eksperymentalna zależność ciśnienia rozpadu dla SDS w roztworze soli

Fig. 7. The experimental correlation of destruction pressure for SDS in salt solution

Na rysunku 7 przedstawiono zależność ciśnienia  $\Pi$  i grubości lameli, uzyskane w temperaturze otoczenia z zastosowaniem tensydu SDS oraz chlorku sodu o stężeniu  $10^{-2}$  kmol/l. Na rysunku nie zilustrowano ujemnej części izotermy – wprowadzie bardzo atrakcyjnej technicznie, lecz niemożliwej do odtworzenia ze względu na brak możliwości dokonania pomiarów w stanie równowagi.

W rzeczywistości przebieg izotermy przypomina klasyczną literę „S”; natomiast metastabilny charakter filmu wymaga ujemnych wartości współczynnika nachylenia. Uzyskany przebieg wskazuje, że dla wartości dodatnich tangensa kąta nachylenia izotermy nawet najmniejsze zakłócenie doprowadzi do rozerwania filmu. Wynika z tego, że praktycznie istnienie lameli gwarantuje jedynie zmiana jej grubości w pobliżu 4 nm i powyżej 7 nm. Jak wynika z przedstawionego wykresu, dla  $\Pi_1 = \text{const}$  istnieją trzy grubości równowagowe lameli (4, 5 i 9 nm). Zamieszczony wykres wskazuje także, że statyczne lamele są stosunkowo stabilne w zakresie do wartości ciśnienia krytycznego – ciśnienia kapilarnego, po przekroczeniu którego następuje ich rozerwanie. Oznacza to, że wartość krytycznego ciśnienia kapilarnego  $\Pi_{kr}$  może być uznana za ważny procesowo parametr, decydujący o stabilności lameli układów pianowych.

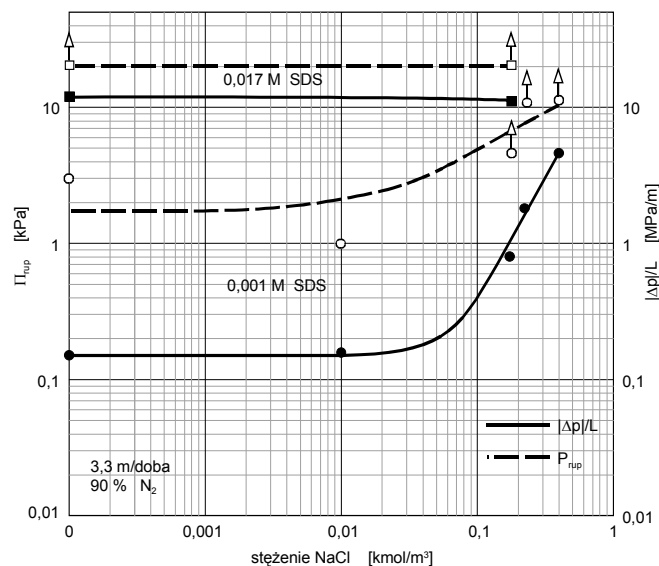
Wykorzystanie elementów hydrodynamicznej teorii stabilności przepływu, opisujących ewolucję grubości lameli przy jej okresowym przesuwaniu wzdłuż pionowej rury (kanalika – poru) pozwoliło na przedstawienie na rys. 8 następującego odwzorowania.



Rys. 8. Przemieszczanie się lameli w kanale o cyklicznie zmiennej średnicy. Pęknięcie lameli następuje po upływie czasu  $\tau_3$

Fig. 8. Migration of lamellae in the cyclical variable diameter channel

Zobrazowano zachowanie się pojedynczej lameli w kolejnych odstępach czasu  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  i  $\tau_3$  – przy jej przemieszczaniu się z lewa na prawo. Elementem wywołującym zniszczenie są zmiany grubości lameli poruszającej się wzdłuż kanalika struktury porowatej wywoływane naprzemiennymi naprężeniami ściskającymi i rozciągającymi o znacznej częstotliwości. Całość rozważań oraz warunki ich aplikacji ujmuje teoria Jimeneza i Radkego [13] – uzależniając jednakże jej zastosowanie od wartości ciśnienia kapilarnego  $\Pi_{kr}$ .



Rys. 9. Porównanie ciśnienia pęknięcia lameli ze spadkiem ciśnienia na złożu podczas przepływu piany. Skierowane ku górze strzałki wskazują, że aktualne ciśnienie pęknięcia lameli jest wyższe od zaznaczonego

Fig. 9. The comparison of the pressure of lamellae cracking with the pressure drop on the bed during the flow of foam

Poniżej przedstawiono wpływ stężenia środka powierzchniowo czynnego na warunki destabilizacji lameli, przy różnych zmianach wartości ciśnienia kapilarnego; szczególny wpływ ma tutaj także wzrost udziału chlorku sodu.

Przebiegi zmienności  $\Pi_{kr} = f(c_T)$  wskazują, że wzrost stężenia tensydu  $c_T$  skutkuje wzrostem wartości ciśnienia.

## 7. Fenomenologiczny jednowymiarowy model transportu piany w quasistrukturalnej warstwie porowatej

Obecność piany w ośrodku porowatym jest, z poznawczo - aplikacyjnego punktu widzenia, bardzo interesującym zagadnieniem – zarówno z powodu unikalnych struktur, jak też oddziaływania na przepływ cieczy i gazu.

Wprawdzie krytyczny przegląd literatury dostarcza wielu informacji opisujących tworzenie piany i jej destrukcję oraz mechanizmy jej transportowania – jednakże istniejące sprzeczności i rozbieżności dotyczące występujących cząstkowych mechanizmów oraz – co bardzo istotne – makroskopowych skutków, które ze sobą niosą wymuszają potrzebę ujednolicenia skrajnych punktów widzenia. W szczególności istotny problem stanowi zdefiniowanie wpływu stężenia tensydów oraz topologii ośrodka porowatego na strukturę piany oraz opory przepływu.

Prace Frieda w zakresie wpływu obecności piany w strukturze porów potwierdziły jej znaczny wpływ na warunki przepływu przez pory i kanaliki; szczególnie na drogę przepływu płynów niezwilżających ich ścianek.

Przedstawiona analiza i ocena stanu wiedzy pozwoliła na skorygowanie opisu fenomenologicznego przepływu piany, korektę mechanizmów koalescencji oraz transportu. W efekcie umożliwiło to prezentację ogólnego jednowymiarowego modelu transportu piany, opartego na zmienności wielkości pęcherzy w pianie oraz geometrii lameli.

Uwzględniając istotne cechy struktury porowatej, a w szczególności: rozkład wielkości porów i ich wzajemnych połączeń kanalikami, brak cylindrycznego kształtu porów i kanalików, posiadających liczne załamania (nisze) – można zaobserwować, że faza uprzywilejowana (ciecz) zwilża ścianki porów. Pozostaje ona w załamaniach, wypełniając w całości mniejsze z porów; reszta ich objętości wypełniona jest gazem. Pozostała część cieczy pokrywa cienką warstwą ścianki porów. To właśnie zjawisko występowania części cieczy zwilżającej ścianki porów powoduje, że w załamaniach ciecz z przyległych porów styka się z płynem zwilżającym i wypełniającym najmniejsze pory. Oznacza to, że faza ciekła występuje w formie ciągłej, natomiast gaz gromadzi się w centralnej części największych porów. Innymi słowy, wypełnia on objętość porów, które tym samym obciążone są przez obie fazy jednocześnie; przy różnych ich proporcjach i rozmieszczeniu.

Lokalne różnice wartości ciśnienia kapilarnego wyrównywane są przez „połączenia” elementów objętości cieczy; oczywiście dla warunków, gdy dominującą rolę odgrywają siły napięcia międzyfazowego, a ciśnienie kapilarne jest stałe.

Podczas dwufazowego przepływu płynu faza gazowa dopływa do powiązanych ze sobą „dużych” kanalików w warstwie porowatej. Natomiast faza ciekła zajmuje miejsce w powiązanych ze sobą „małych” kanalikach porów oraz w ich załamaniach (niszach).



Struktura morfologiczna i mechanizmy przepływu piany w ośrodkach porowatych są bardzo złożone, trudne do opisanie i jednoznacznego rozgraniczenia (interakcje). Nawet przy małych wartościach liczby Reynoldsa można zaobserwować występowanie czterech obszarów (zakresów) mikrostruktur. Jeżeli średni wymiar porów jest wielokrotnie większy od wielkości pojedynczych pęcherzy piany można je traktować jako „ciało stałe”. Piana rozróżniana strukturalnie jako kulista bądź komórkowa wykazuje, w szczególności dla tej ostatniej, połączenie komórek przez stabilne, cienkie warstwy płynne – lamele. Dla drugiego, odwrotnego przypadku, gdy charakterystyczna wielkość porów danej struktury jest porównywalna lub mniejsza od rozmiaru rozproszonych pęcherzy gazu – pęcherze te oraz lamele „obejmują” w całości pory.

Przy małym przepływie pęcherzyki gazu wypełniają objętość porów i są od siebie rozdzielone przez utworzone z cieczy „soczewki” o znacznej grubości. Przeciwnie, przy małych udziałach fazy gazowej, pęcherzyki gazu wypełniające pory pozostają w bezpośrednim kontakcie, oddzielone jedynie przez lamele. Ta ostatnia struktura morfologiczna nosi często w literaturze nazwę „zakresu pojedynczych lameli”.

## 8. Modelowanie przepływu piany przez ośrodki porowate

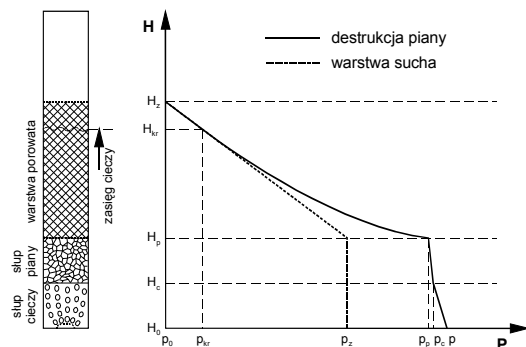
W literaturze [14, 15] przedstawiono wiele metod dotyczących modelowania przepływu piany przez ośrodki porowate, rekomendując jednakże w ograniczonym stopniu zaledwie cztery z nich. Poczynając od metod bilansu populacji po modele równowagowe oraz od równań semiempirycznych po stosowanie teorii przepływów w ujęciu fraktalnym.

Dokonana analiza możliwości wykorzystania metod sieciowych i metody bilansu populacji – jako mających podstawy teoretyczne i powiązanych ze strukturą porów i kanałów warstwy (zatem i występujących mechanizmów destrukcji i koalescencji) oraz metod statystycznych w ujęciu stochastycznym uzasadniała posłużenie się metodą bilansu populacji oraz alternatywnie budową modeli stochastycznych (semiempirycznych) o ograniczonym z natury zakresie ważności.

## 9. Fenomenologiczne uwarunkowania modelu

Na rysunku 10 przedstawiono zależność ciśnienia, panującego w kolumnie do destrukcji piany od jej wysokości. Cała kolumna pracuje przy nadciśnieniu, a przestrzeń ponad warstwą wypełnienia połączona jest z otoczeniem, gdzie panuje ciśnienie  $p_0$ . Gaz (powietrze) doprowadzany jest na samym dole kolumny do dystrybutora pod ciśnieniem  $p$ . W trakcie jego przejścia przez warstwę wodnego roztworu tensydu o wysokości  $H_c$  odnotowuje się niewielki spadek ciśnienia do wartości  $p_c$ , odpowiadający ciśnieniu hydrostatycznemu słupa cieczy (przy uwzględnieniu gęstości mieszaniny ciecz–gaz). Dalej, od  $H_c$  do  $H_p$  w kolumnie znajduje się warstwa piany, która powoduje dalszy spadek ciśnienia do  $p_p$ . Wartość tego spadku ciśnienia, odpowiadającego ciśnieniu hydrostatycznemu słupa piany, jest znikoma, gdyż gęstość piany jest bardzo mała i w dodatku, na skutek ociekania, zmienia się nieliniowo wzdłuż wysokości warstwy od około  $400 \text{ kg/m}^3$  przy powierzchni cieczy do około  $200 \text{ kg/m}^3$  tuż pod warstwą wypełnienia. Zmiana ciśnienia na

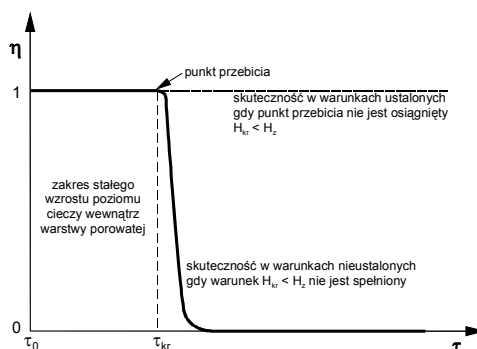
tym odcinku zachodzi wzdłuż linii krzywej, lecz dla uproszczenia oraz ze względu na bardzo małe wartości została przedstawiona jako linia prosta.



Rys. 10. Rozkład ciśnienia wzdłuż wysokości kolumny

Fig. 10. The pressure distribution along the height of the column

Następnie piana wchodzi między elementy warstwy porowatej – zaczyna się jej destrukcja. Jeżeli proces rozpadu ustala się w czasie to poziom cieczy z rozerwanych lameli podnosi się do wysokości  $H_{kr}$  i w dalszym czasie oscyluje wokół niego. Na wysokości od  $H_p$  do  $H_{kr}$  następuje znaczny spadek ciśnienia. Ponieważ ciecz rozkłada się na tym odcinku kolumny nierównomiernie – w dolnej części wypełnienia jest jej więcej, a co za tym idzie dynamiczna porowatość jest mniejsza – ciśnienie zmienia się wzdłuż linii krzywej od wartości  $p_p$  do  $p_{kr}$ .



Rys. 11. Zależność skuteczności destrukcji piany od czasu

Fig. 11. Dependence of the effectiveness of the foam destruction vs. the time

Powyżej poziomu cieczy w złożu  $H_{kr}$  wypełnienie jest suche i przepływa przez nie gaz uwolniony ze zniszczonych pęcherzy piany. Spadek ciśnienia na tym odcinku jest praktycznie liniowy i odpowiada hydraulicznym oporom przepływu przez suche

wypełnienie. Uwolniony z piany gaz wypływa do przestrzeni połączonej z atmosferą i jego ciśnienie zrównuje się z ciśnieniem otoczenia  $p_0$ .

Na wykresie przedstawionym na rys. 10 zaznaczono linią przerywaną rozkład ciśnienia wzdłuż kolumny dla przepływu czystego powietrza przez suche wypełnienie z wydatkiem takim samym jak w przypadku przepływu piany.

Na rysunku 11 przedstawiono zależność skuteczności destrukcji piany dla dwóch przypadków.

Linią przerywaną zaznaczono wartość skuteczności w czasie, gdy destruktory pracują stabilnie, poziom cieczy w warstwie wypełnienia nie osiągnął jego górnej granicy;  $H_{kr} < H_w$ . W tym przypadku, ponieważ wszystkie pęcherze piany ulegają rozpadowi, skuteczność destrukcji utrzymuje wartość 1 (100 %).

Jeżeli wydatek doprowadzanej na złoża piany jest znacznie większy, poziom cieczy między elementami wypełnienia nie stabilizuje się i po pewnym czasie  $\tau_{kr}$ , ciecz pojawia się na górnej jego powierzchni. Moment ten nazywa się punktem przebiccia. Ciecz bardzo szybko rozlewa się po całej powierzchni złoża, a napływający z dołu gaz i pęcherze niezniszczonej piany wraz z nią tworzą pianę wtórną. Praktycznie cały gaz jest ponownie uwięziony w pęcherzach nowopowstałej piany wtórnej, a więc skuteczność powyżej punktu przebiccia spada do zera. Ten przebieg zmienności skuteczności w czasie zaznaczono na wykresie linią ciągłą.

### Oznaczenia

$H$	– wysokość	[m]
$P$	– ciśnienie	[Pa]
$\eta$	– skuteczność destrukcji piany	
$\Pi$	– lokalna wartość ciśnienia wewnątrz warstwy porowatej	[Pa]

### Literatura

- [1] F r i e d A. N.: *The Foam Drive Process for Increasing the Recovery of Oil*, report 5866, U. S. Dept of Interior, Bureau of Mines, 1961.
- [2] H i r a s a k i G. J.: *The Steam Foam Process*, supplement to SPE 19505, available from Soc. Petr. Eng. Book Order Department: Richardson, TX, 1989.
- [3] H i r a s a k i G. J.: J. Petr. Tech., **41**, 1989, 449-456.
- [4] M a r s d e n S. S.: *Foams in Porous Media* – SUPRI TR-49, U.S. D.O.E., 1986.
- [5] H e l l e r J. P., K u n t a m u k k u l a M. S.: Ind. Eng. Chem. Res., **26**, 1987, 318-325.
- [6] B a g h d i k i a n S. Y., H a n d y L. L.: *Transient Behavior of Simultaneous Flow of Gas and Surfactant Solution in Consolidated Porous Media*, Topical Report U.S. D.O.E., July, 1991.
- [7] R o s s e n W. R.: *Foams: Theory, Measurements and Applications*, Marcel Dekker Inc., New York 1996.
- [8] B e r n a r d G. G., H o l m L. W.: Soc. Petr. Eng. J., **4**(3), 1964, 267-274.

- [9] Bernard G. G., Holm L. W., Jacobs W. L.: Soc. Petr. Eng. J., **5**, 1965, 295-300.
- [10] Gillis J. V., Radke C. J.: Presented at the 65th SPE Annual Technical Conference, New Orleans 1990.
- [11] Ettinger R. A., Radke C. J.: Soc. Petr. Eng., **7**, 1992, 83-90.
- [12] Chambers K. T., Radke C. J.: *Capillary Phenomena in Foam Flow Through Porous Media*, Marcel Dekker Inc., New York 1991.
- [13] Jimenez A. I., Radke C. J.: *Dynamic Stability of Foam Lamellae Flowing Through a Periodically Constricted Pore*, Borchardt J. K., Yen T. F. Eds., Washington 1989.
- [14] Kovscek A. R., Radke C. J.: *Fundamentals of Foam Transport in Porous Media*, Topic Report, U.S. Department of Energy, October 1993.
- [15] Kovscek A. R., Radke C. J.: *Fundamentals of Foam Transport in Porous Media*, Foams: Fundamental Application in the Petroleum Industry, Univ. of California, Berkeley 1994.