

**Kazimierz Brodowicz, Krzysztof M. Ostrowski, Artur Rusowicz,
Dariusz Wierzbicki**

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

WPLYW LEPKOŚCI NUMERYCZNEJ NA POPRAWNOŚĆ OBLICZEŃ SKRAPLACZY ENERGETYCZNYCH

W pracy przedstawiono sposób doboru wartości lepkości numerycznej w kanale i w pęku w dwuwymiarowym opisie skraplacza energetycznego. Lepkość numeryczna w znacznym stopniu poprawia dokładność obliczeń. Jej dobór jest możliwy, jeżeli dysponuje się już pewną ilością obliczeń z wartościami lepkości dobranymi metodą strzału. Kryterium doboru stanowią: równość strumieni masowych pary na wlocie, warstwy przed pękiem, obrysie pęku i na powierzchni skraplania, oraz uzyskane z obliczeń spadki ciśnienia w kanale i pęku równe wartościom fizycznie poprawnym. Kryterium to można spełnić jedynie z pewnym przybliżeniem.

OZNACZENIA

- a* – powierzchnia właściwa pęku rur [m^2/m^3]
c_a – udział masowy gazu inertnego w mieszaninie [kg/kg]
i – numer kolejnej powierzchni kontrolnej (lub warunku)
j – numer kolejnego węzła siatki
k – współczynnik przenikania ciepła od pary wodnej do wody chłodzącej [$kW/m^2 \cdot K$]
L_w – ilość węzłów
n – numer kolejnej iteracji
ND_{Γⁱ} – procentowo wyrażona niedokładność z jaką wyznaczone są poszczególne strumienie (ciśnienia) względem strumienia na wlocie do skraplacza (ciśnienia fizycznie poprawnego) [%], $ND_{\Gamma^i} = (\Gamma_{obl}^i - \Gamma_{nom}^i) 100\% / \Gamma_{nom}^i$
 $ND_Q = (Q - Q_{wl}) 100\% / Q_{wl}$
 $ND_{\Delta p_k} = (\Delta p_{knum} - \Delta p_{kfp}) 100\% / \Delta p_{kfp}$
 $ND_{\Delta p_p} = [(\Delta p / \Delta x)_{num} - (\Delta p / \Delta x)_{pfp} 100\%] (\Delta p / \Delta x)_{pfp}$
p – ciśnienie [Pa], *p_m* – ciśnienie mieszaniny parowo-gazowej, *p_v* – ciśnienie cząstkowe pary wodnej
Q – strumień masowy [kg/s], *Q_{wl}* – strumień na wlocie do skraplacza, *Q_{wpp}* – strumień na warstwy przed pękiem, *Q_{opr}* – strumień na obrysie pęku, *Q_{sw}* – strumień wykroplony na powierzchni rur (uzyskany przez całkowanie członu $(ka(T_m - T_w) / r)$ po powierzchni pęku)
R – stała gazowa [J/kg·K]

RD – wskaźnik doiterowania

$$RD_z = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{L_w} (z_j^{n-1} - z_j^n)^2}{L_w}}$$

gdzie $z = u, v, p_m$ (w węzłach siatki)

- R_x, R_y – składowe oporu hydraulicznego przepływu wzdłuż osi x, y [15], [1/m]
 r – ciepło skraplania [J/kg]
 u – składowa prędkości w kierunku x [m/s]
 v – składowa prędkości w kierunku y [m/s]
 T – temperatura [K], T_m – temperatura mieszaniny parowo-gazowej, T_w – temperatura wody chłodzącej
 $1/\alpha$ – opór cieplny [m²·K/kW], $1/\alpha_D$ – dyfuzyjny opór wnikania ciepła od strony pary, $1/\alpha_s$ – opór warstwy skroplin, $1/\alpha_r$ – opór przewodzenia przez ścianę rury, $1/\alpha_o$ – opór osadów, $1/\alpha_w$ – opór wnikania ciepła od strony wody
 β – mnożnik oznaczający rodzaj obszaru; $\beta = 0$ – kanał, $\beta = 1$ – pęk rur
 Γ_{obl}^i – uogólniony symbol wielkości i -tego warunku wchodzącego w skład kryterium uzyskanego z obliczeń
 Γ_{nom}^i – uogólniony symbol wartości nominalnej i -tego warunku wchodzącego w skład kryterium
 Δp_{knum} – spadek ciśnienia w kanale na długości $A - A, B - B$ (rys. 1) uzyskany na podstawie obliczeń numerycznych [Pa]
 Δp_{kfp} – średni spadek ciśnienia w kanale odpowiadający fizycznie poprawnym wartościom [Pa]
 $(\Delta p / \Delta x)_{pnum}$ – średni jednostkowy spadek ciśnienia w pęku uzyskany z obliczeń numerycznych [Pa/m]
 $(\Delta p / \Delta x)_{pfp}$ – średni jednostkowy spadek ciśnienia w pęku odpowiadający fizycznie poprawnym wartościom [Pa/m]
 μ_{mol} – lepkość dynamiczna molekularna mieszaniny parowo-gazowej [Pa·s], μ_{num} – lepkość numeryczna; μ_p – w pęku; μ_k – w kanale
 ρ_m – gęstość mieszaniny parowo-gazowej [kg/m³], ρ_g – gęstość gazu inertnego, ρ_v – gęstość pary wodnej
 ψ_i – ślad przecięcia powierzchni Γ_{obl}^i z płaszczyzną Γ_{nom}^i leżący na płaszczyźnie μ_k, μ_p będący miejscem geometrycznym spełnienia i -tego warunku

1. CEL I ZAKRES PRACY

Prace nad rozwojem konstrukcji i badania skraplaczy energetycznych prowadzone są w Instytucie Techniki Ciepłej od szeregu lat [1÷3]. Równolegle rozwany jest model opisujący przepływ i skraplanie pary w skraplaczu, oparty na modelu continuum [4÷6]. Metoda ta nawiązuje do przepływu przez złożę porowate i jest oparta na uśrednianiu objętościowym. Na podstawie praw zachowania masy, pędu i energii połączonych z równaniami opisującymi niektóre występujące w opisie parametry stworzono matematyczny model skraplacza – dwuwymiarowy układ równań różniczkowych (jest opisany w dodatku). Postu-

lowano, że średnia wartość strumienia pary na długości skraplacza występuje w połowie długości. Przekrój ten uznano za reprezentatywny dla całego skraplacza i dla niego przeprowadzono obliczenia. W celu rozwiązania modelu zastosowano MES [7, 8]. Uzyskiwane rozwiązania nie wykazywały zadowalającej zgodności w bilansowaniu strumienia masowego pary. Poprawę usiłowano uzyskać udoskonalając procedurę obliczeniową, głównie przez zwiększenie ilości węzłów oraz wprowadzenie lepkości numerycznej.

Wiadomo z literatury podstawowej poświęconej numerycznym obliczeniom tego typu zagadnień [9, 10], że oba te działania zwiększają dokładność obliczeń. Jeżeli chodzi o ilość nodów, to zwiększano ją w czasie obliczeń od 190 węzłów poprzez 900 do 1900. Skutek tego był widoczny, ale znacznie mniejszy od oczekiwanego, tak że jedyna możliwość uzyskania lepszej zgodności w bilansowaniu tkwiła w lepkości numerycznej użytej w obliczeniach prowadzonych w 1991 r.

Słabe efekty zastosowania lepkości numerycznej w początkowych obliczeniach stworzyły potrzebę zaproponowania kryterium doboru jej wartości dla prowadzonych obliczeń, a następnie sposobu wyznaczenia takich wartości lepkości numerycznych, które to kryterium spełniają, i to stanowiło cel przedstawionej pracy.

Zakres pracy obejmował głównie szereg przeliczeń dla jednego skraplacza, z różnymi wartościami lepkości numerycznej w kanale i w pęku. Na ich podstawie zbadano zbieżność bilansów masowych pary w funkcji obu lepkości oraz zweryfikowano uzyskiwane spadki ciśnień w kanale i pęku, a następnie opracowano uniwersalną metodę doboru optymalnej wielkości lepkości numerycznej w kanale i w pęku.

2. SFORMUŁOWANIE KRYTERIUM DOBORU LEPKOŚCI NUMERYCZNEJ

W literaturze dotyczącej obliczeń skraplaczy lepkość numeryczna była wprowadzona przez *C. Zhanga* i *A.C.M. Sousa* [11] w 1990 r. (stała w kanale i w pęku, równa $20 \mu_{mol}$), przez *L.N. Carlucci* [12] w 1986 r. (zaproponował on różne wartości w zależności od prędkości, w kanale $\mu_k = (300 \div 2000) \mu_{mol}$, w pęku $\mu_p = (5 \div 20) \mu_{mol}$) oraz *J. Weismana*, *R.W. Bowringa* [13] w 1975 r. (w kanale $\mu_k = 309 \mu_{mol}$, w pęku $\mu_p = (200\,000 \div 800\,000) \mu_{mol}$). We wszystkich tych pracach wprowadzenie lepkości miało na celu poprawienie bilansów masowych; nie analizowano tam spadków ciśnień. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów numerycznych dla siatki przedstawionej na rys. 1 stwierdzono, że wartości lepkości numerycznej zastosowane w pracy [13] radykalnie poprawiają bilanse masowe, ale dają bardzo wysokie, нефизyczne spadki ciśnień.

Natomiast wartości lepkości zaproponowane w pracy [11] prowadzą do niebezpiecznych wyników (duże oscylacje). W związku z tym próbowano znaleźć takie kryterium doboru wartości lepkości numerycznych, dla których występują: poprawa bilansów masowych i fizycznie poprawne spadki ciśnień w kanale i w pęku.

Zaproponowane kryterium opiera się na warunkach całkowych, ważnych dla obliczeń projektowych skraplacza. W celu weryfikacji bilansów masowych sprawdzono wyznaczone za pomocą obliczeń numerycznych całość gęstości strumienia masowego na obrysie pęku (Q_{opr}), całość na powierzchni wymiany (Q_{sw}) oraz dodatkowo całość na płaszczyźnie przekroju poprzecznego skraplacza na warstwiczy przed pękiem od strony wlotu, gdyż w obliczeniach bez lepkości numerycznej obserwowano w obszarze wlotu znaczne odstępstwa od zasady zachowania masy. Całki te powinny odpowiadać wartości strumienia na wlocie (wartość nominalna). W celu sformułowania warunków na spadki ciśnień należy określić wartości średnie tych spadków (z uwagi na całkowity charakter), występujących w kanale i pęku, wykorzystując i porównując je z danymi uzyskanymi za pomocą znanych metod obliczania oporów przepływów (wartości nominalne).

Na tak wybranych powierzchniach kontrolnych spełnione muszą być warunki, że całki te równają się strumieniowi dopływającej pary, a spadki ciśnień odpowiadają fizycznie poprawnym wartościom. Warunki te można zapisać w uogólnionej formie, w której i oznacza kolejny numer warunku, lewa strona oznacza wielkość obliczoną numerycznie, a prawa strona fizycznie poprawną wartość nominalną tej wielkości:

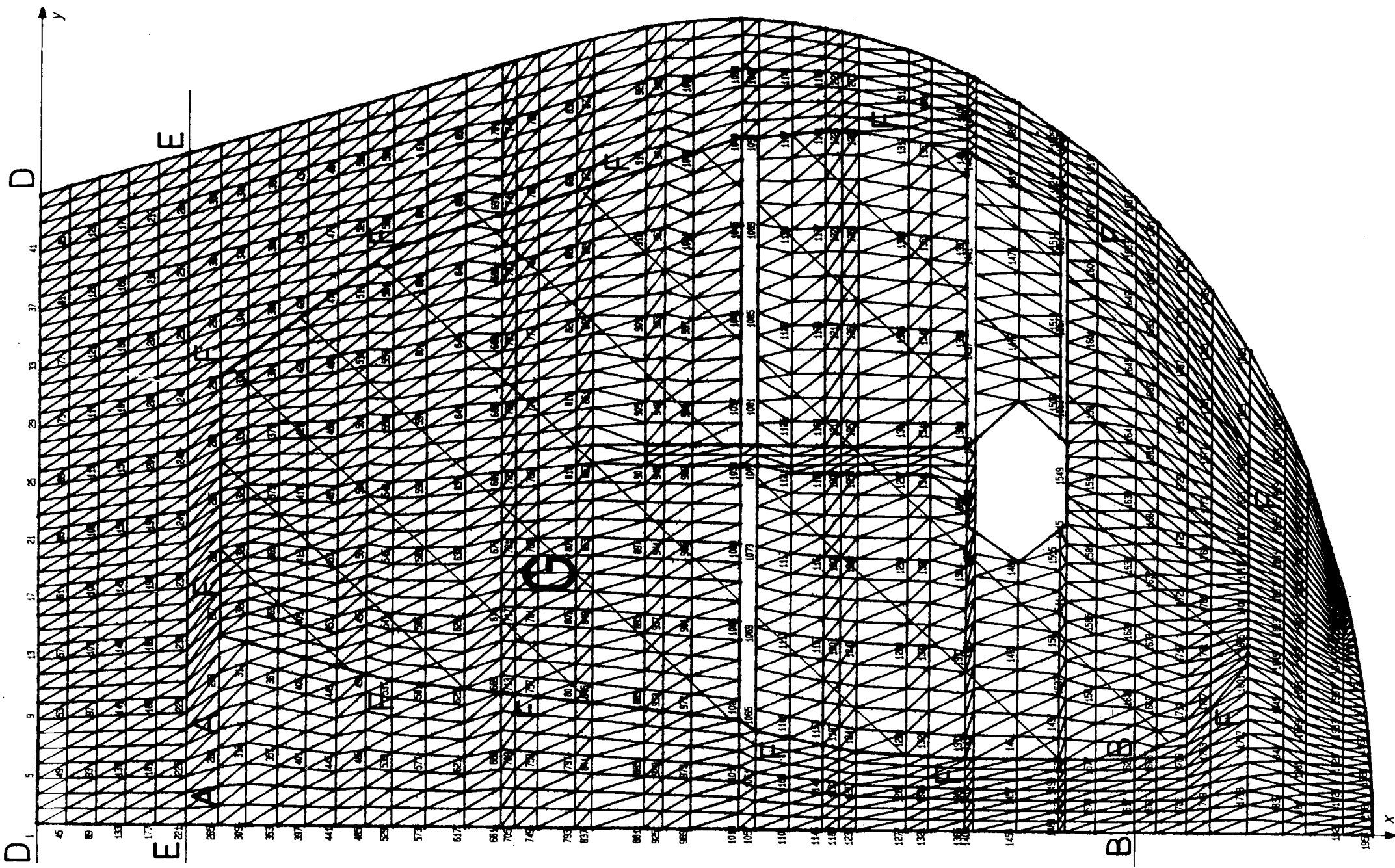
$$\Gamma_{obl}^i = \Gamma_{nom}^i \quad (1)$$

Ostatecznie przyjęto $i = 5$ otrzymując 5 warunków:

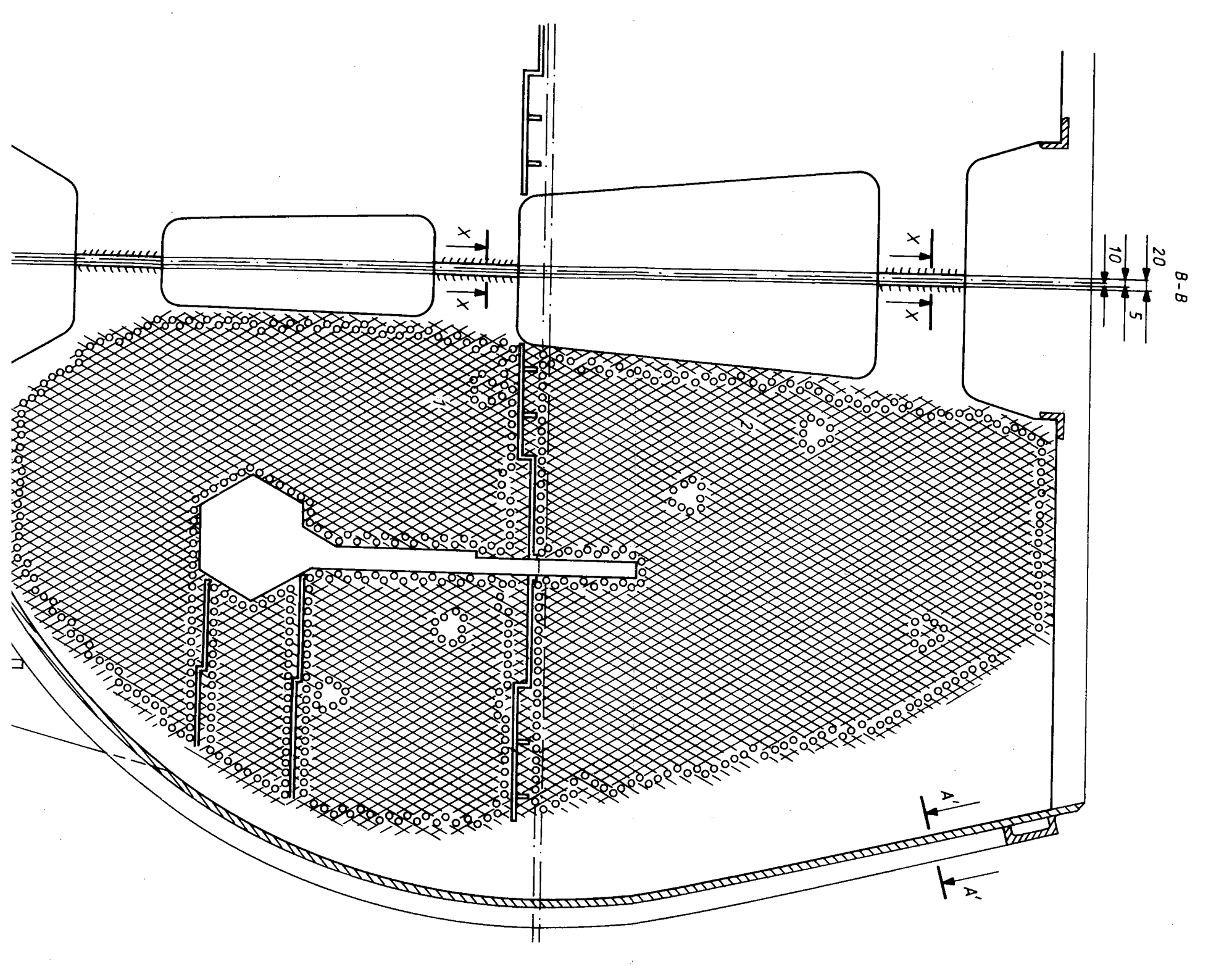
- 1) $Q_{wpp} = Q_{wl}$
- 2) $Q_{opr} = Q_{wl}$
- 3) $Q_{sw} = Q_{wl}$
- 4) $(\Delta p / \Delta x)_{pnum} = (\Delta p / \Delta x)_{p fp}$
- 5) $\Delta p_{knum} = \Delta p_{k fp}$

3. ANALIZA WPŁYWU LEPKOŚCI NUMERYCZNEJ NA BILANSE MASOWE I SPADKI CIŚNIENIA

W celu określenia wpływu lepkości numerycznej na bilanse masowe pary i spadki ciśnień przeprowadzono symulację numeryczną kondensacji pary w skrapla-



Rys. 1. Siatka skraplacza „Halamba” z zaznaczonymi charakterystycznymi powierzchniami, na których sprawdza się warunki kryterium: strumienie przepływającej pary: D-D – wlot $Q_{wpl} = 19,444 \text{ kg/s}$, E-E – warstwa przed pękiem (Q_{wpp}), F-F – obrys pęku rur (Q_{opp}), G – powierzchnia pęku rur – strumień wykropiony (Q_{wy}); spadki ciśnień w kanale: przekrój A-A, przekrój B-B (Δp_{knum})



czu „Halemba”. Skraplacz ten ma geometrię pokazaną na rys. 2 i nominalny przepływ pary na wlocie $Q_{wl} = 19,44$ kg/s. Do obliczeń wykorzystano siatkę zajmującą 32 MB pamięci RAM (3692 – trójkąty, 1988 – węzły; rys. 1).

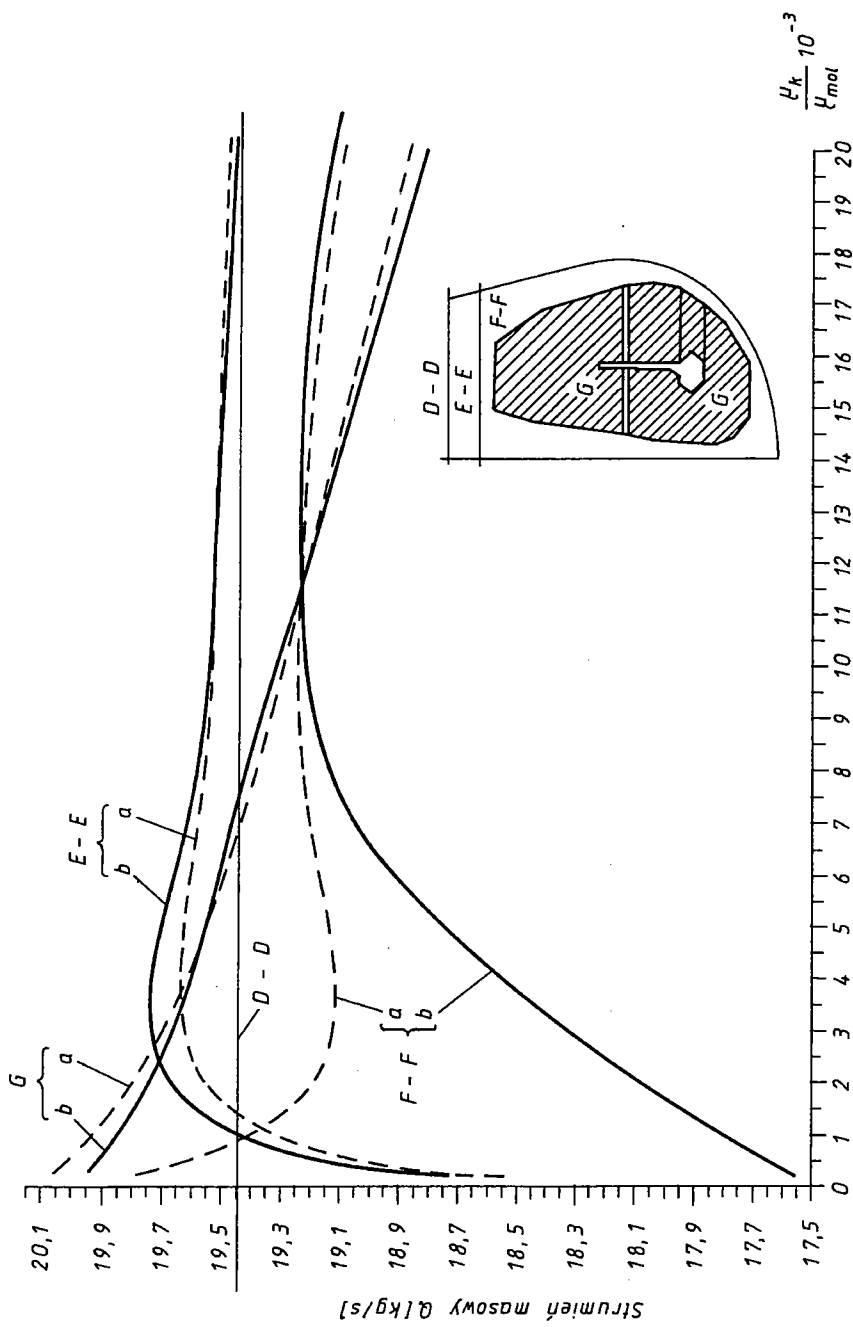
Fizycznie poprawne średnie spadki ciśnień określono następująco: w pęku prędkość pary zmienia się w zakresie $7,3 \div 0,5$ m/s. Średnia prędkość dla tego przedziału wynosi 4,5 m/s. Ze względu na fakt, że ze wzrostem prędkości następuje nieliniowy wzrost spadku ciśnienia, jako reprezentatywną prędkość przyjęto 6 m/s. Odpowiadający jej spadek ciśnienia pary wynosi $(\Delta p / \Delta x)_{p,fp} = 228$ Pa/m. W kanale wyznaczono spadki ciśnień posługując się modelem opisu jednowymiarowego w kanale o zmiennym przekroju, z bocznym odsysaniem pary [14]. Zarówno długość, jak i zmiana przekroju i warunki odsysania bocznego były tak dobrane, aby odwzorowywały kanały w skraplaczu występujące po obu stronach pęku. Wartość spadków ciśnienia wynosi odpowiednio $\Delta p_{k,fp} = 40$ Pa.

4. SPOSÓB DOBORU LEPKOŚCI NUMERYCZNEJ I JEGO WERYFIKACJA

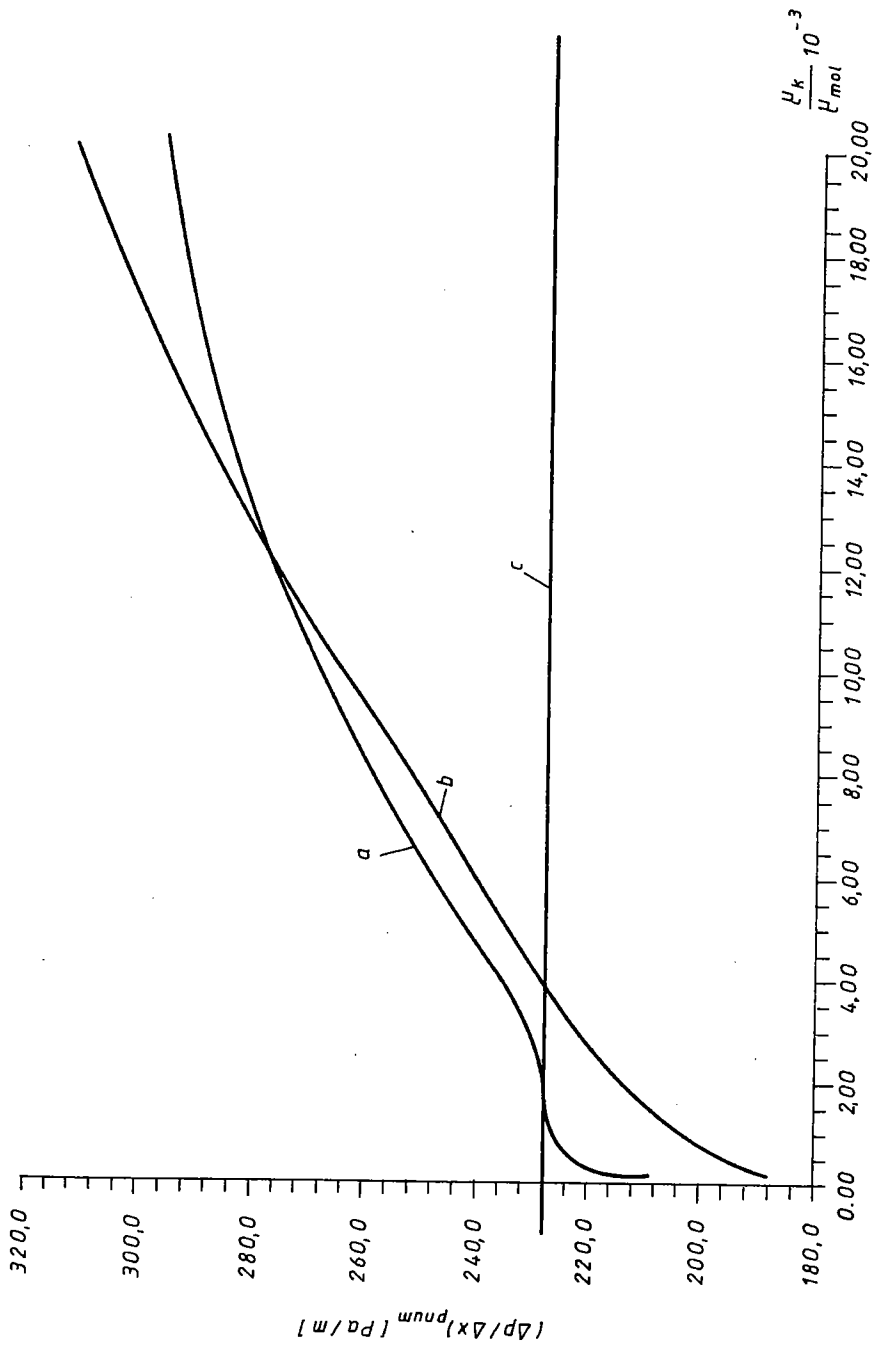
Wykorzystanie kryterium wymaga dysponowania całym zbiorem rozwiązań z różnymi wartościami μ_k i μ_p . Obliczenia te wykonano dla postulowanych wartości lepkości numerycznej. Aby ułatwić liczenie, założono początkowo, że lepkości w kanale i pęku są sobie równe i przeprowadzono obliczenia dla $\mu_k = \mu_p \in (200 \div 20\,000) \mu_{mol}$. Uzyskane wyniki sugerowały, że lepkość w pęku w przybliżeniu jest równa $12\,000 \mu_{mol}$ i przeprowadzono następnie obliczenia dla $\mu_p = 12\,000 \mu_{mol}$ i $\mu_p \in (200 \div 20\,000) \mu_{mol}$. W kolejnych przeliczeniach sprawdzono odchylenia od warunków występujących w kryterium doboru, co przedstawiono na rys. 3,4,5.

Dodatkowo określono też lepkość turbulentną (dyspersję) w kanale i w pęku. W kanale wynosi ona $(50 \div 600) \mu_{mol}$ i w pewnym stopniu jest porównywalna z lepkością numeryczną $\mu_k = 800 \mu_{mol}$. Można zatem uważać, że przepływ w kanale jest opisany lepszym modelem fizycznym, który uwzględnia lepkość turbulentną. Natomiast w pęku lepkość turbulentna wynosi $(250 \div 1500) \mu_{mol}$ i różni się znacznie od lepkości numerycznej $\mu_p = 13\,000 \mu_{mol}$.

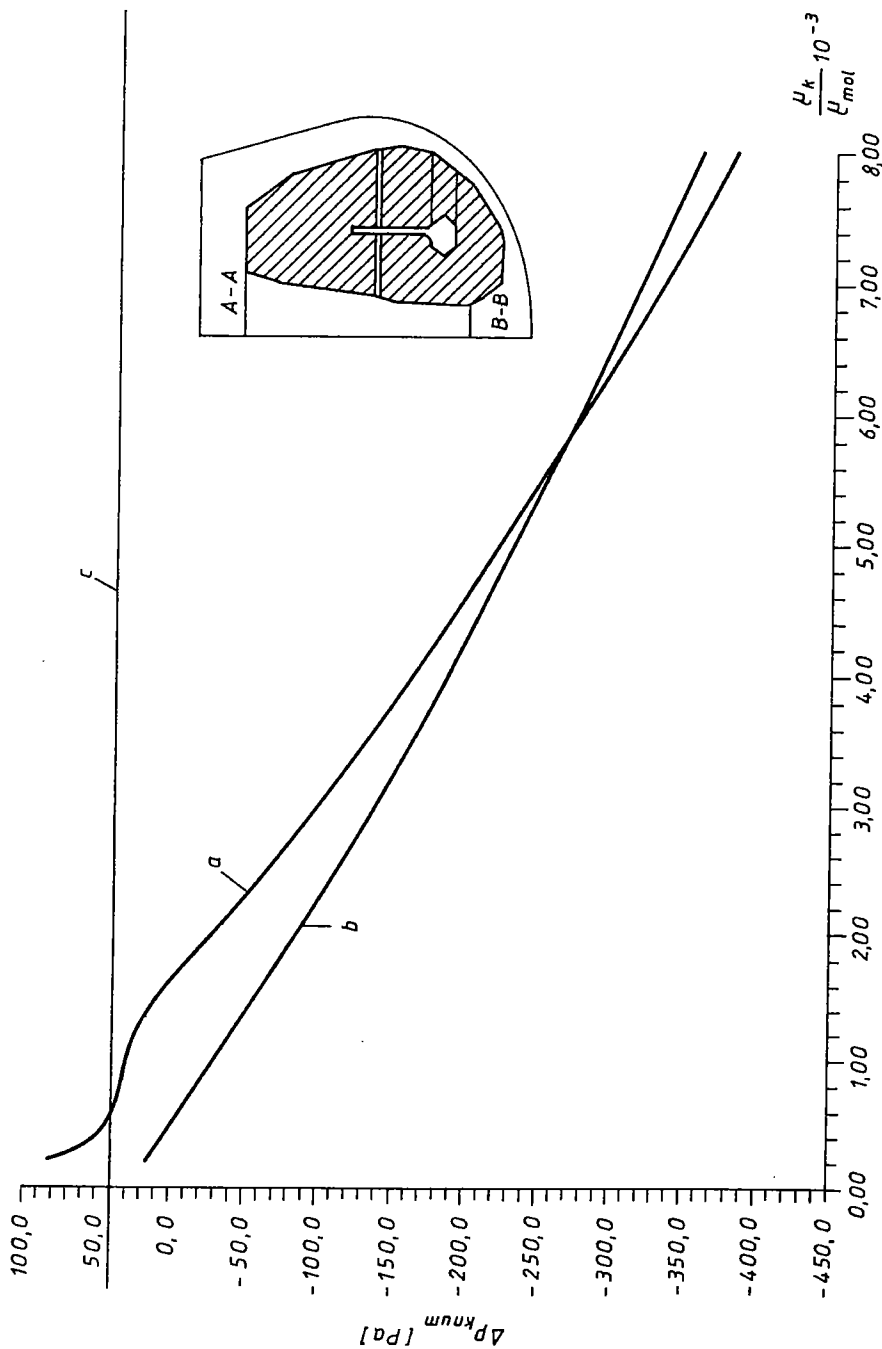
Dysponując pewną liczbą wyników obliczeń skraplacza można przystąpić do doboru lepkości numerycznej w kanale i w pęku w następujący sposób: na podstawie wzoru (1) przy uwzględnieniu, że: $\Gamma_{obl}^i = \Gamma_{obl}^i(\mu_k, \mu_p)$, oraz że $\Gamma_{nom}^i = \text{const}$, we współrzędnych Γ , μ_k , μ_p lewa strona zależności (1) tworzy powierzchnię, a prawa płaszczyznę. Ich przecięcie tworzy na płaszczyźnie Γ_{nom}^i , μ_k , μ_p (rys. 6) krzywą $\psi_i(\mu_k, \mu_p)$, która jest miejscem geometrycznym



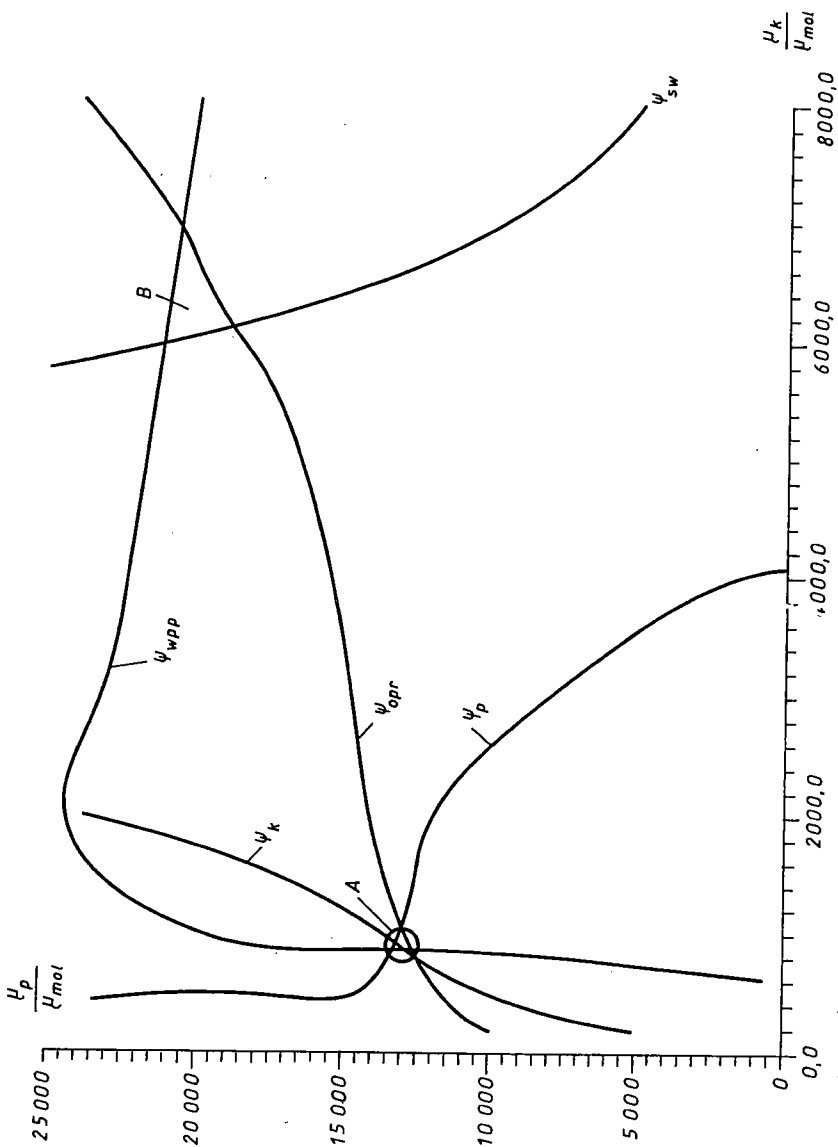
Rys. 3. Bilanse masowe na różnych powierzchniach kontrolnych (zaznaczonych na rys. 1), dla różnych wartości lepkości numerycznych w kanale



Rys. 4. Uśrednione wartości spadku ciśnienia w pęku $(\Delta p/\Delta x)_{pn}$ w zależności od różnych wartości lepkości numerycznych; nominalny spadek ciśnienia określony jest wg [15]; a) $\mu_k = 12000$ $\mu_{mol} = 20000$ $\mu_k = \mu_p \in (200 \div 20000)$ $\mu_{mol} \in (200 \div 20000)$ μ_k ; b) $\mu_k = \mu_p \in (200 \div 20000)$ $\mu_{mol} \in (200 \div 20000)$ μ_{mol} ; c) wartość nominalna $-(\Delta p/\Delta x)_{np}$



Rys. 5. Spadek ciśnienia w kanale o długości A-A, B-B w zależności od różnych wartości lepkości numerycznych; nominalny spadek ciśnienia określony jest wg [14]; a) $\mu_p = 12\,000 \mu_{mol} = \text{const}$, $\mu_k \in (200 \div 20\,000) \mu_{mol}$; b) $\mu_k = \mu_p \in (200 \div 20\,000) \mu_{mol}$; c) wartość nominalna $-\Delta p_{k,fp}$



Rys. 6. Linie oznaczające miejsca geometryczne, dla których spełniony jest każdy z warunków (omówionych w punkcie 2). Kryterium wymaga spełnienia wszystkich warunków, a więc wszystkie linie powinny przecinać się w jednym punkcie (z uwagi na przybliżenia wszystkie powinny przechodzić przez niewielki obszar); przez obszar A przechodzą wszystkie linie z wyjątkiem ψ_{sw} , z tego powodu wartości lepkości z obszaru A spełniają osłabione kryterium

spełnienia i -tego warunku. Natomiast spełnienie pełnego kryterium (wszystkich pięciu warunków) jest wspólnym punktem przecięcia pięciu krzywych ψ_i na płaszczyźnie μ_p, μ_k . Z uwagi na przybliżony charakter przedstawionej analizy obszar A można uznać za taki punkt, chociaż przez punkt ten przechodzą tylko cztery funkcje ψ_i , a nie przechodzi funkcja piąta ψ_{sw} odzwierciedlająca strumień wykroplony Q_{sw} . Oznacza to, że za pomocą dwóch stałych (μ_k, μ_p) nie można spełnić pełnego kryterium (wzór 1), ale kryterium osłabione, spełniające tylko cztery warunki, a piąta wielkość (Q_{sw}) będzie obciążona większym błędem.

Na rysunkach 7, 8 przedstawiono rozwiązania dla $\mu_k = 900 \mu_{mol}$ i $\mu_p = 13\,000 \mu_{mol}$ (obszar A) a w tabl. 1 błędy poszczególnych warunków.

Tablica 1

Weryfikacja zaproponowanej metody doboru lepkości numerycznej

	Wartości fizycznie poprawne	Rejon punktu A ND [%]		$\mu_k = \mu_p = 0$ ND [%]		Rejon punktu B ND [%]	
Bilanse masowe [kg/s]							
Q_{wl}	19,44	19,44	0,00	19,44	0,00	19,44	0,00
Q_{wpp}	19,44	19,46	0,01	15,15	22,07	19,54	0,51
Q_{opr}	19,44	19,35	0,45	18,20	7,33	19,36	0,42
Q_{sw}	19,44	19,93	2,50	20,13	3,54	19,48	0,18
Spadki ciśnień							
$(\Delta p / \Delta x)_p$ – pęk [Pa/m]	228	228	0,0	154	32,5	262	14,91
(Δp) – kanał [Pa]	40	39,8	0,5	45	12,5	-297	842,5

Rejon punktu A (rys. 6) – $\mu_k = 900 \mu_{mol}$, $\mu_p = 13\,000 \mu_{mol}$;
 rejon punktu B (rys. 6) – $\mu_k = 7000 \mu_{mol}$, $\mu_p = 22\,000 \mu_{mol}$.

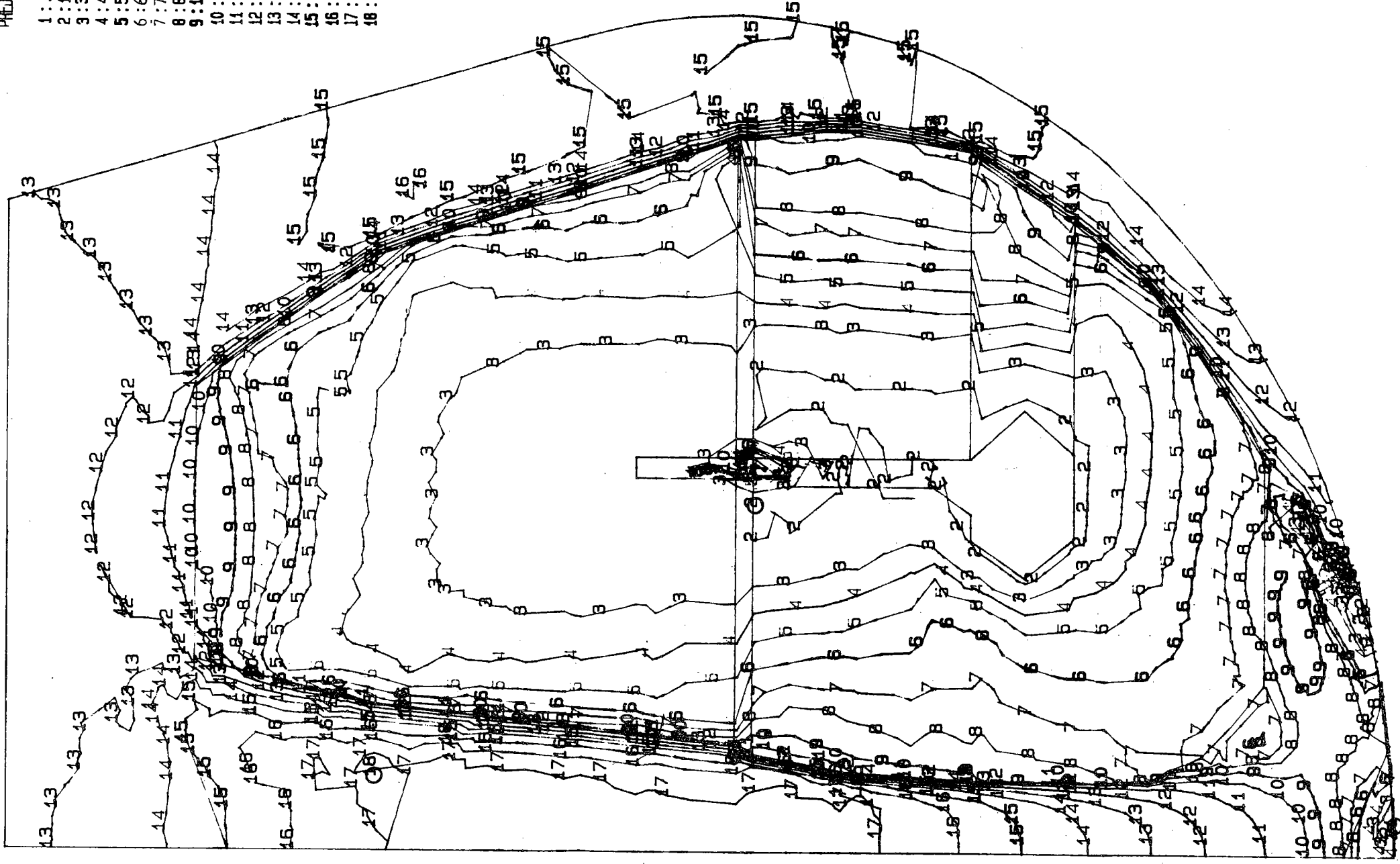
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wiadomo z literatury, że wprowadzenie lepkości numerycznej poprawia rozwiązania zagadnień zbliżonych do rozpatrywanego. Jednakże w literaturze brak jest informacji co do warunków doboru konkretnych wartości tej wielkości z proponowanego szerokiego zakresu lepkości (tabl. 2). Zagadnienie to jest tematem niniejszej pracy.

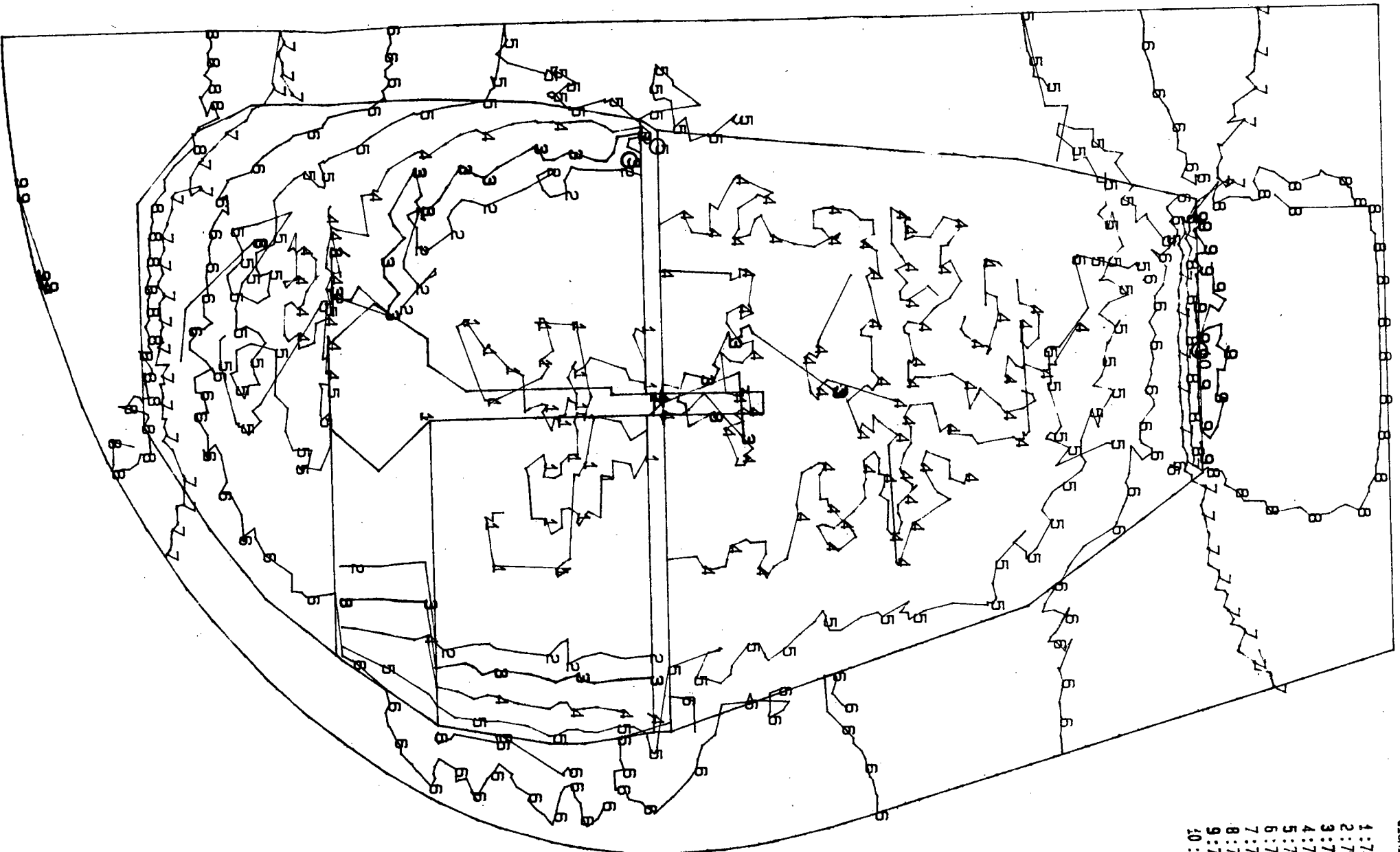
Wstępne informacje o wpływie lepkości numerycznej uzyskano rozwiązując zagadnienie dla różnych wartości lepkości numerycznej w kanale i w pęku, a następnie określono sposób doboru wartości lepkości, aby spełnione było pełne kryterium. Mowa tu o sposobie, a nie metodzie, bo nie uzyskano pełnej wiedzy, jakie parametry (prędkość, geometria pęku, geometria kanału, ilość nodów w rozwiązaniu numerycznym itp.) wpływają na wartości lepkości numerycznej.

PRĘDKOŚCI.

- 1 : 1.171
- 2 : 1.199
- 3 : 3.256
- 4 : 4.284
- 5 : 5.313
- 6 : 6.341
- 7 : 7.370
- 8 : 8.398
- 9 : 10.455
- 10 : 13.540
- 11 : 19.711
- 12 : 29.996
- 13 : 40.280
- 14 : 50.564
- 15 : 60.849
- 16 : 70.105
- 17 : 77.304
- 18 : 81.418



Rys. 7. Linie stałych prędkości pary w skraplaczu „Halemba”, uzyskane na podstawie obliczeń z lepkością numeryczną z obszaru A (rys. 6);
 $\mu_k = 900 \mu_{mol}$ i $\mu_p = 13000 \mu_{mol}$



- L15N1EN1A
- 1 : 7450, 973
 - 2 : 7527, 826
 - 3 : 7538, 567
 - 4 : 7604, 679
 - 5 : 7655, 914
 - 6 : 7702, 026
 - 7 : 7753, 261
 - 8 : 7778, 876
 - 9 : 7809, 620
 - 10 : 7819, 867

Rys. 8. Linie statycznych ciał pary w skraplaczach „Halemba”, uzyskane na podstawie obliczeń z lepkością numeryczną z obszaru A (rys. 6);
 $\mu_k = 900 \mu_{mol}$ i $\mu_p = 13000 \mu_{mol}$

Tablica 2

Zestawienie wartości μ_{num}/μ_{mol} wg różnych autorów (1 – L. Carlucci [12], 2 – J. Weisman, R.W. Bowring [13], 3 – C. Zhang, A.C.M. Sousa [11]), 4 – wyznaczone w pracy

Rodzaj obszaru	μ_{num}/μ_{mol}			
	1	2	3	4
Kanał	363÷1818 $v = 10\div 60$ m/s	stała 309	stała 20	stała 900 $v = 10\div 60$ m/s
Pęk	4,9÷20,3 $v = 0,5\div 10$ m/s	200 000÷775 000 $v = 0,5\div 10$ m/s	stała 20	stała 13 000 $v = 0,5\div 10$ m/s

Szczegółowy sposób doboru wartości lepkości numerycznej omówiono w rozdz. 4. Tu warto przypomnieć trzy istotne uwarunkowania tego sposobu.

Po pierwsze na kryterium doboru składało się 5 warunków. Trzy dotyczyły zbieżności strumieni masowych na wybranych powierzchniach kontrolnych (na wlocie do skraplacza, na granicy pęku i kanału, w całym pęku – co określało strumień wykroplonej pary), a dwa – spadków ciśnień w pęku (na wybranych przekrojach) i w kanale.

Po drugie sposób doboru lepkości numerycznych w kanale i w pęku, które spełniałyby wspomniane kryterium, polegał na wyznaczeniu przecięcia funkcji $\Gamma_{obl}^i(\mu_k, \mu_p)$ ze stałą (powierzchnią Γ_{nom}^i), które jest linią, i wybraniu punktu z obszaru μ_k, μ_p , dla którego możliwie wszystkie warunki wchodzące do kryterium są spełnione.

Po trzecie okazało się, że nie można dysponując dwiema wartościami lepkości numerycznej (w kanale i w pęku) spełnić wszystkich wymaganych kryteriów. W związku z tym na płaszczyźnie μ_k, μ_p wyznaczono dwa obszary A i B, z których każdy częściowo spełnia wymagane kryteria (rys. 6). Obszar B charakteryzował się dobrą zbieżnością strumieni masowych pary (tabl. 1), ale nie spełniał warunków spadków ciśnień, szczególnie w kanale. Natomiast obszar A spełniał wymogi co do spadków ciśnień, a strumień wykroplony różnił się od pozostałych tylko o około 2%. W dalszych obliczeniach korygowano strumień wykroplony wprowadzając poprawkę na poziomie każdego węzła.

Podsumowując uzyskane wyniki pracy, w której zaproponowano kryterium doboru wartości lepkości numerycznej oraz sposób określania tej wartości, można przedstawić następujące wnioski:

1. Spełnienie wymienionego kryterium umożliwia wygenerowanie dwóch wartości lepkości numerycznej w kanale i w pęku (z obszaru A jako lepiej opisującego fizykę zjawiska).

2. Wprowadzenie lepkości numerycznych w istotny sposób poprawia zarówno zbieżność, jak i stabilność (tabl. 3) uzyskanych wyników.

3. Wartość lepkości numerycznej w kanale jest zbliżona do wartości lepkości turbulentnej, natomiast w pęku lepkość numeryczna jest o dwa rzędy większa od lepkości turbulentnej.

Tablica 3

Zestawienie wskaźników doiterowania RD

Iteracja	Obszar A			$\mu_k = \mu_p = 0$		
	RD_u	RD_v	RD_{pm}	RD_u	RD_v	RD_{pm}
20	0,039	0,024	0,148	8,051	5,039	12,030
25	0,029	0,018	0,105	8,937	7,054	9,161
30	0,022	0,016	0,086	6,648	4,689	9,119

Dodatek

OPIS MODELU MATEMATYCZNEGO I SYMULATORA NUMERYCZNEGO SKRAPLACZA ENERGETYCZNEGO

Obliczenia rozplywu pary w skraplaczu należy równocześnie prowadzić w dwóch obszarach: pęku rur oraz kanałach doprowadzających i odprowadzających parę. W każdym z nich o przepływie pary decydują nieco inne mechanizmy. Przepływ pary w pęku opisywano jako przepływ z zastosowaniem sił oporu przepływu. Obliczenia skraplaczy prowadzono przy następujących założeniach:

- ustalone warunki pracy (nie ulegają zmianie w czasie żadne parametry intensywne i ekstensywne określające przepływ i warunki wymiany);
- znana jest geometria skraplacza energetycznego (kształt obudowy, pęku, rozmieszczenie i podziałka rur, rozmieszczenie przegród i tac, odprowadzenie skroplin i odsysanie mieszaniny parowo-gazowej);
- pomijamy przepływ pary wzdłuż rur;
- transport dyfuzyjny gazu inertnego jest pomijalnie mały w porównaniu z transportem konwekcyjnym;
- proces opisuje się w dziedzinie continuum zarówno w obszarze pęku, jak i kanałów (proces przebiegający w sposób dyskretny na każdej rurze, transformuje się na całą przestrzeń pęku rur);

Układ równań:

- równanie ciągłości:

$$\frac{\delta(\rho_m u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho_m v)}{\delta y} = \frac{\beta k a (T_m - T_w)}{r} \quad (1)$$

– równanie pędu w kierunku osi x :

$$\rho_m u \frac{\delta u}{\delta x} + \rho_m v \frac{\delta u}{\delta y} = -\frac{\delta p_m}{\delta x} - \beta \mu R_x u + \mu_{num} \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right) \quad (2)$$

– równanie pędu w kierunku osi y :

$$\rho_m u \frac{\delta v}{\delta x} + \rho_m v \frac{\delta v}{\delta y} = -\frac{\delta p_m}{\delta y} - \beta \mu R_y v + \mu_{num} \left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} \right) \quad (3)$$

– równanie bilansu składnika:

$$\frac{\delta (c_a \rho_m u)}{\delta x} + \frac{\delta (c_a \rho_m v)}{\delta y} = 0 \quad (4)$$

Obowiązują one w obszarze pęku ($\beta = 1$), jak i w obszarze kanałów ($\beta = 0$), gdzie zerują się człony źródłowe. Zakłada się, że para jest w stanie nasycenia i własności mieszaniny określają związki:

$$p_m = \rho_g R_g T_m(\rho_v) + p_v(T_m)$$

$$\rho_m = \rho_g + \rho_v$$

Funkcje $T_m(\rho_v)$ i $p_v(T_m)$ dla pary nasyconej wodnej bierzemy z literatury.

Warunki brzegowe są następujące:

- na wlocie znane są wartości składowych prędkości $u = u_0$ i $v = v_0$ oraz stężenie gazów inertych,
- na wylocie znane są wartości składowych prędkości $u = u_0$ i $v = v_0$,
- na wlocie znana jest wartość ciśnienia $p = p_0$,
- prędkość normalna na tacach, ścianach, przegrodach jest równa zero ($v_n = 0$).

W równaniu bilansu masy pojawia się człon zwany członem znikania pary wodnej ($\beta ka(T_m - T_w)/r$). Wymaga on wyznaczenia lokalnych wielkości następujących parametrów:

- temperatury mieszaniny parowo-gazowej,
- oporów cieplnych

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_D} + \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_r} + \frac{1}{\alpha_o} + \frac{1}{\alpha_w} \quad (5)$$

- temperatury wody chłodzącej.

W odniesieniu do skraplaczy dwubiegowych przyjęto, że średnia temperatura wody chłodzącej jest równa temperaturze w połowie długości skraplacza.

Układ równań (1÷4) opisujący przepływ pary składa się z cząstkowych, nieliniowych równań różniczkowych. Rozwiązanie numeryczne wymaga zastosowania procesu iteracyjnego wykorzystującego metodę elementów skończonych [7,8]. Program realizuje następujące etapy:

- wyznaczanie przybliżonych rozwiązań układu równań bilansowych w węzłach siatki, rozkładów pól prędkości i ciśnienia (u , v , p_m) dla ustalonych wartości funkcji ρ_m , R_x , $\beta ka(T_m - T_w)/r$;
 - mając pola prędkości i ciśnienia obliczanie stężenia gazów inertych c_a przez stosowanie przybliżonej metody charakterystyk;
 - określanie nowych wartości parametrów ρ_m , R_x , $\beta ka(T_m - T_w)/r$ i powtarzanie obliczeń.
- W celu rozwiązania układu równań zastosowano proces iteracyjny, rozwiązując w każdym kroku układ liniowy. Podczas tej iteracji dokonano dyskretyzacji otrzymując układ równań algebraicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Brodowicz, A. Czaplicki, L. Jackowski: *Wyniki badań i modernizacja skraplacza w Elektrowni „Ostrołęka B”*. Konferencja Naukowo-Techniczna – Kierunki modernizacji układów wymiany masy w elektrowniach ciepłych, Ostrołęka, 1985
- [2] K. Brodowicz, A. Czaplicki: *Rozwój skraplaczy energetycznych*. Energetyka, 1986, nr 6.
- [3] K. Brodowicz, D. Wierzbicki: *Ekspertyza pracy skraplacza bloku 50 MW*. Elektrownia Halemba, ITC, 1990.
- [4] A. Czaplicki, A. Grabarski: *Zagadnienia cieplno-przepływowych obliczeń numerycznych skraplaczy energetycznych*. Inż. Chem. i Proc., 1991, 1.
- [5] R. Woźniak: *Dobór kształtu pęku dla skraplacza w Halembie*. Praca magisterska, Politechnika Warszawska, 1992.
- [6] K. Brodowicz, D. Wierzbicki, K. M. Ostrowski: *Przeprowadzenie obliczeń skraplacza turbozespołu 16 MW*. ITC, 1991.
- [7] O. Zienkiewicz: *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa, 1972.
- [8] A. Majewski: *Komputerowe metody rozwiązywania zagadnień brzegowych*. WPW, Warszawa, 1984.
- [9] A. Brooks, T. Hughes: *Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations*. Computer Methods in Applied Mech. and Eng. 1982, 32, 199-257.
- [10] D. Kelly, S. Nakazawa, O. Zienkiewicz: *A note on upwinding and anisotropic balancing dissipation in finite element approximations to convective diffusion problems*. International Journal For Numerical Methods in Engineering, 1980, vol 15, 1705-1711.
- [11] C. Zhang, A. C. M. Sousa: *Numerical simulation of turbulent and shear flow in isothermal exchanger model*. ASME J. of Fluids Engineering, 1990.
- [12] L. Carlucci: *Computations of flow and heat transfer in power plant condenser*. Proc. of 8th Int. Heat Transfer Conf.; San Francisco, 1986, vol.5, pp. 2541-2546.
- [13] A. Bush, G. Marshall, Y. Wilkinson: *The prediction of steam condensation using a three component solution algorithm*. Proc. of the Second International Symposium Condensers and Condensation, University of Bath (UK), 1990.
- [14] A. Szumowski, W. Selerowicz, J. Piechna: *Dynamika gazów*. WPW, Warszawa, 1988.
- [15] L. Jackowski: *Wpływ przepływu dwufazowego na warunki wnikania ciepła w skraplaczach energetycznych*. Praca doktorska, Warszawa, 1987.

INFLUENCE OF NUMERICAL VISCOSITY ON CORRECTNESS OF POWER CONDENSER CALCULATION

S u m m a r y

The work shows the numerical viscosity selection in a channel and a tube bundle in a two-dimensional power condenser description. Numerical viscosity improves the correctness of calculations to a great extent. Its selection is possible when some calculations with numerical viscosities chosen by the shot method are available. The criteria of selection are as follows: equality of the steam mass flow on inlet, on the contour line in front of the tube bundle, the outline of the bundle and on the condensation surface, and obtained by means of calculations a steam pressure drop in the channel and tube bundle which is equal to nominal values. These criteria can be satisfied only with certain approximation.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НУМЕРИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ НА УЛУЧШЕНИЕ ПОДСЧЕТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Краткое содержание

В работе представлен метод подбора нумерической вязкости в канале и в пучке для двухмерного описания энергетического конденсатора. Нумерическая вязкость значительно улучшает точность подсчетов. Можем ее подобрать, если уже располагаем соответствующим количеством подсчетов по вязкости, подобранных методом удара. Критериями подбора являются: равенство массовых балансов пара в характеристических разрезах на впуске, на горизонтали перед пучком, контуре пучка и на поверхности конденсирования, а также получение из расчетов перепада давления пара в канале и в пучке, равного номинальной величине. Этот критерий можно выполнить только приблизительно. Результаты представлены для конденсатора турбины мощностью в 50 МВ электростанции Халемба.