

P O L S K A A K A D E M I A N A U K

I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF
FLUID-FLOW MACHINERY

PRACE
INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

99



GDAŃSK 1995

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machines

Wydanie publikacji dofinansowane zostało przez PAN ze środków DOT uzyskanych z Komitetu Badań Naukowych

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH * HENRYK JARZYNA * JERZY KRZYŻANOWSKI
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ * WŁODZIMIERZ J. PROSNAK
JÓZEF ŚMIGIELSKI * ZENON ZAKRZEWSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EDITORIAL COMMITTEE

EUSTACHY S. BURKA (REDAKTOR NACZELNY – EDITOR-IN-CHIEF)
JAROSŁAW MIKIELEWICZ
EDWARD ŚLIWICKI (REDAKTOR – EXECUTIVE EDITOR) * ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. poczt. 621,
☎ (0-58) 46-08-81 wew. 141, fax: (0-58) 41-61-44,
e-mail: tjan@imppan.imp.pg.gda.pl

ISBN 83-01-95102-2

ISSN 0079-3205

JAN MADEJSKI¹Wędrówka domieszek w obiegu siłowni parowej²

Problem tytułowy został rozpatrzony z uzględnieniem separacji i transformacji domieszek w przegrzewaczach i stopniach WP turbiny. Wyciągnięte zostały też wnioski dla nukleacji heterogenicznej w stopniach NP.

Oznaczenia

| | | | |
|------------|--|-----------|---|
| c_p | - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, | p | - ciśnienie, |
| d | - średnica rury, | $p'_s =$ | $(dp/dT)_{T=T_s}$ |
| D | - średnica kropli roztworu wodnego soli o udziale masowym soli g lub średnica cząstki stałej (pylinki), j. w. dla frakcji nr i , | r | - promień (współrzędna), promień lub indywidualna stała gazowa, |
| D_i | - średnica kropli nasyconego roztw. soli, | R | - promień lub indywidualna stała gazowa, |
| D_{min} | - średnica kulki soli krystalicznej, | T | - temperatura, |
| D_0 | - średnica początk. kropli roztworu wodnego soli o udziale masowym soli g_0 , | T_i | - temperatura cieczy, |
| f | - liczba oporu Fanninga, | T_s | - temperatura nasycenia, |
| g | - udział masowy domieszek [kg/kg H ₂ O], | t | - czas, |
| G | - prędkość masowa, | w | - prędkość, |
| G_D | - strumień masowy osiadania, | y | - wilgotność pary, |
| Δi | - entalpia parowania, | z | - współrzędna, |
| m | - masa, | α | - współczynnik przejmowania ciepła, |
| $n(D)$ | - udział frakcji o średnicy D , | λ | - przewodność cieplna, |
| N | - gęstość liczbowa kropelek lub pylinek, | μ | - dynamiczny współczynnik lepkości, |
| | | ρ | - gęstość, |
| | | σ | - napięcie powierzchniowe, |
| | | ψ | - kąt (współrzędna). |

Wskaźniki

Wskaźniki górne ' dotyczą cieczy w stanie nasycenia, zaś '' pary suchej nasyconej.

Wskaźnik dolny s dotyczy soli

¹Warszawa, ul. św. Bonifacego 83/85 m. 92

²Praca wykonana w ramach grantu KBN przyznanego IMP PAN nr PB 0376/P4/94/06

1. Wstęp

Substancja czysta jest równie wygodną abstrakcją jak system zamknięty, albowiem w rzeczywistości mamy zawsze do czynienia z mieszaninami (roztworami) o takim czy innym stężeniu niepotrzebnych składników. Istnieje pewna hierarchia znaczenia tych domieszek, określona przez ich udziały w mieszaninie, albowiem – będąc w zgodzie z Drugą Zasadą Termodynamiki – można rzec, iż wszystko jest wszędzie: *omnia sunt ubique*.

Wysokie wymagania względem bezpieczeństwa ruchu i ekonomiczności siłowni parowych powodują, że udział domieszek lub – jak kto woli – zanieczyszczeń w wodzie jako czynnika roboczym jest bardzo mały, a liczba tych, których rola jest istotna, jest ograniczona. Pochodzą one z dwóch źródeł: po pierwsze z natury, a po drugie z procesu preparowania (uzdatniania, korygowania) wody, mającego za zadanie w pierwszym rzędzie uzyskanie zgodności czynnika roboczego z materiałami konstrukcyjnymi.

Domieszki te pojawiają się w różnych stanach skupienia, a forma ich występowania również ma znaczenie.

Stosunkowo najłatwiejsze jest pozbycie się szkodliwych domieszek gazowych, tj. O_2 i CO_2 , jako gazów powodujących korozję. Gazy te są absorbowane przez ciecz w niższych temperaturach, a desorbowane w temperaturach wyższych w odgazowywaczu. Pozostały tlen można unieszkodliwić przez dodanie hydrazyny N_2H_4 .

Trudniejszym zadaniem jest zmniejszenie udziału domieszek w stałym stanie skupienia, które w wodzie występują jako składniki roztworu lub jako zawiesina. Głównym ich źródłem jest przyroda. Wody powierzchniowe w zetknięciu z glebą muszą zawierać jej składniki, a więc przede wszystkim krzemionkę SiO_2 , stanowiącą w 76.5% podstawowy składnik gleby, oraz aluminię Al_2O_3 (10%). Związki te występują często w postaci złożonej, jak np. montmorillonit (uwodniony krzemian glinu $Al_2 \cdot [(OH)_2Si_4O_{10}] \cdot nH_2O$) będący minerałem ilastym o nadmiarze ładunku ujemnego i średnicach cząstek iłu poniżej $2 \mu m$. Taki pył musi wystąpić w wodzie surowej obok kationów Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , H^+ , przy czym znamieną jest nieobecność kationów Na^{++} .

Przygotowanie wody dodatkowej, tworzącej wraz z kondensatem wodę zasilającą kocioł parowy, polega głównie na dekarbonizacji i odżelazianiu oraz na odfiltrowaniu cząstek stałych, ewentualnie na destylacji etc.. Nadto koryguje się wodę kotłową w walczaku przez dodanie fosforanów sodu (Na_3PO_4 , Na_2HPO_4 , NaH_2PO_4) w celu wymiany wapnia i magnezu na sól, albowiem fosforany wapnia i magnezu są bardziej rozpuszczalne w wodzie od węglanów i siarczanów i nie tworzą kamienia kotłowego, tylko muł podlegający okresowemu odmulanii.

W wyniku tych zabiegów z walczaka wychodzi para zawierająca krople roztworu wodnego silnego elektrolitu o bardzo małym stężeniu oraz zawiesinę pyłu, będącego głównie krzemionką. Dalsze zmiany występują w przegrzewaczach, gdzie mamy do czynienia (obok odparowania) z dyfuzyjną separacją kropelek, oraz w turbinie, będącej ogromną wirówką, a zwłaszcza w pierwszych stopniach WP.

Resztkowe kropelki i pylinki mogą później odegrać istotną rolę w nukleacji heterogenicznej w ostatnich stopniach turbiny. Celem tego opracowania jest wyznaczenie charakterystyk tych elementów, a więc średnic i koncentracji na podstawie zawartości, wyrażanej zwykle w miligramach na kilogram czystego H_2O , czyli w ppm (*parts per million*), a określonej przez normy.

2. Wyszczególnienie domieszek i ich udziałów.

Fragment schematu kotła walczakowego wraz z instalacją przygotowania wody dodatkowej przedstawiony jest na rys. 1. Legenda jest następująca. Cyframi arabskimi oznaczono elementy urządzenia, małymi literami – doprowadzone lub odprowadzone strumienie, a symbolami K z cyfrą arabską – miejsca kontroli (pobierania próbek).

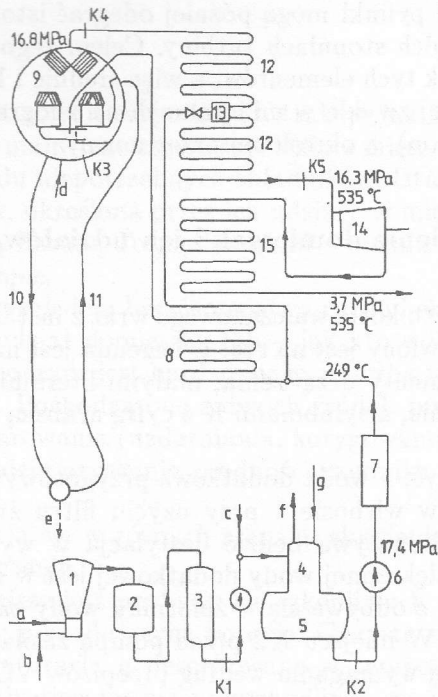
Na schemacie z rys. 1 woda dodatkowa przygotowywana jest metodą³ dekarbonizacji na zimno w wirbosie 1 przy użyciu filtru żwirowego 2 i wymiennika kationitowego 3. Alternatywą będzie destylacja w wyparce ogrzewanej parą z upustu. Kontrola zmiękczonej wody dodatkowej jest w miejscu K1. Mieszanie tej wody ze skroplinami *c* odbywa się w zbiorniku wody zasilającej 5, połączonym z odgazowyczem 4. W miejscu K2 przed pompą zasilającą 6 jest kontrola wody zasilającej, dla której wymagania według przepisów VGB 1972 (vide [1], str. 32) dla kotłów walczakowych pod ciśnieniem przewyższającym 8 MPa są następujące: $pH(25^\circ) > 9$; $O_2 < 0.02$ ppm; $Fe < 0.02$ ppm; $Cu < 0.03$ ppm; olej < 0.5 ppm; CO_2 nie wykrywalne; udział krzemionki i przewodność elektryczna takie, aby były spełnione wymagania dla wody kotłowej (kontrola w miejscu K3).

Woda zasilająca tłoczona jest następnie do regeneracyjnych podgrzewaczy wysokopiętnych 7, po czym doprowadzona jest do kotła. Z kotłowego spalinowego podgrzewacza 8 przechodzi do walczaka 9, zawierającego trzy stopnie separacji wilgoci, a mianowicie cyklony (I stopień separacji), połączone z żaluzjami (II stopień) oraz żaluzje lub separatory siatkowe (III stopień) redukujące wilgotność pary do $100 \div 200$ ppm, a nawet według danych Zyka [3] do 30 ppm przy użyciu separatorów siatkowych. Woda kotłowa jest korygowana w walczaku fosforanami sodowymi *d*, których doprowadzanie powoduje m. in. dominację sodu w domieszkach. Z dołu walczaka (miejsce K3) pobiera się próbki wody kotłowej, która dla $p \geq 16$ MPa powinna spełniać następujące wymagania: $pH(25^\circ) 9 \div 10$; wskaźnik alkaliczności⁴ < 0.1 mval/kg; $PO_4 = 2 \div 6$ ppm; $SiO_2 < 0.3$ ppm; przewodność elektryczna (25°) $< 50 \mu S/cm$.

Odmuliny *e* odprowadza się okresowo z komory położonej w najniższym miejscu parownika. Odsalania w kotłach energetycznych obecnie raczej się nie stosuje. Kontrola pary w miejscach K4 i K5 powinna sprawdzić spełnienie następujących wymagań (VGB 1972): SiO_2 (w zawieszynie) < 0.02 ppm; $Fe < 0.02$ ppm; $Cu < 0.003$ ppm; $Na + K < 0.01$ ppm; przewodność elektryczna $< 0.2 \mu S/cm$.

³Obecnie dostępne są nowocześniejsze urządzenia, wytwarzane np. przez AEG Kanis

⁴Jest to ilość zużytych cm^3 0.1 N kwasu solnego wobec fenoltaleiny (vide [2], s. 351)



Rys. 1. Elementy urządzenia: 1 – wirbos; 2 – filtr żwirowy; 3 – wymiennik kationitowy; 4 – odgazowywacz; 5 – zbiornik wody zasilającej; 6 – pompa zasilająca; 7 – regeneracyjne podgrzewacze WP wody zasilającej; 8 – spalinowy podgrzewacz wody zasilającej; 9 – walczak; 10 – rury opadowe; 11 – rury wznoszące; 12 – przegrzewacz pary; 13 – wtryskowy schładzacz pary przegrzanej; 14 – turbina WP; 15 – przegrzewacz wtórny.

Strumienie substancji: a – woda surowa; b – mleko wapienne; c – skropliny; d – fosforany sodowe do korygowania wody kotłowej; e – odmuliny; f – odgazowanie; g – para grzejna z upustu.

Miejsca kontroli stężenia domieszek (pobierania próbek): K1 – woda dodatkowa zmięczona; K2 – woda zasilająca; K3 – woda kotłowa; K4 – para z walczaka; K5 – para świeża

Żelazo i miedź mogą wystąpić w postaci tlenków jako produkt korozji stali (stale kotłowe zawierają pewien procent Cu).

Przegrzewacz pierwotny 12 składa się z dwóch sekcji, między którymi znajduje się wtryskowy schładzacz pary przegrzanej 13, do którego użyta jest rozpylona woda zasilająca. Tak, czy owak, przez przegrzewacz przepływa para przegrzana, zawierająca kropelki rozcieńczonego roztworu wodnego silnego elektrolitu, jakim mogą być związki sodu lub potasu. W miarę odparowania z powierzchni kropelek stężenie elektrolitu wzrasta. Ze względu na dominację sodu w domieszkach roztwarzalnych jako reprezentant tej klasy domieszek może być przyjęty sól. Może on wystąpić jako sól dysocjująca ($NaCl$, Na_2SO_4 , Na_2CO_3) lub jako ług $NaOH$. To samo dotyczy potasu.

Bardzo małe stężenia powodują, że zamiast pomiaru bezpośredniego udziałów tych związków stosuje się pomiar przewodności elektrycznej metodą mostkową.

Niestety, wzory, którymi rozporządzamy, dotyczą tylko jednego elektrolitu (vide [4], str. 434); i tak $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ odpowiada udziałowi 0.6 ppm NaCl , albo $0.7 \text{ ppm Na}_2\text{SO}_4$, albo $0.5 \text{ ppm Na}_2\text{CO}_3$, albo 0.2 ppm NaOH , albo $0.15 \text{ ppm H}_2\text{SO}_4$ (vide [5], str. 47).

A więc nie można ustalić składu roztworu, co powoduje, że trzeba przyjąć substancję reprezentującą roztwór, a może być nią sól kuchenna.

Obecnie stosowana jest w blokach energetycznych regulacja poślizgowa, co powoduje brak stopnia regulacyjnego w turbinie WP 14, której pierwszy stopień (akcyjny) działa w stosunku do domieszek jak wirówka. Odwirowane są przede wszystkim zawiesiny, których reprezentantem jest krzemionka, toteż właśnie w 1-y m stopniu WP występuje najintensywniejsze odkładanie się tzw. soli, prowadzące do zatykania przekroju przepływu.

Za turbiną WP 14 jest przegrzewacz wtórny 15, w którym wystąpić mogą podobne zjawiska jak w przegrzewaczu pierwotnym 12.

Podsumowując powyższe możemy stwierdzić, co następuje. Domieszki, przenoszone przez parę świeżą z kotła do turbiny, należą do dwóch kategorii. Pierwszą są silne elektrolity sodowe występujące w kroplach, które przedarły się przez ostatni stopień separacji wilgoci w walczaku. rednice modalne tych kropelek na wyjściu z walczaka są rzędu 0.1 mm , a udział masowy wynosi $30 \div 200 \text{ ppm}$. Przy zmniejszonym obciążeniu bloku, kiedy włącza się schładzacz pary, dojdą kropelki rozpylonej wody zasilającej.

Drugą kategorię domieszek stanowią pyłinki (cząstki stałe) substancji nierozpuszczalnych w wodzie, a głównie krzemionki, której pył zabierany jest przez pęcherzyki pary w rurach wznoszących 11 parownika na zasadzie flotacji. Udział masowy tych domieszek nie przekracza 0.05 ppm , a ich średnice wynikają z przepuszczalności filtrów.

3. Własności fizykochemiczne kropelek.

Kropelki porywane są z walczaka przez parę nasyconą pod ciśnieniem, powiedzmy, 16.8 MPa . W tablicach znajdujemy następujące własności termofizyczne dla stanu nasycecia: $T_s = 351.2^\circ\text{C} = 624.2 \text{ K}$; $\rho' = 569.1 \text{ kg}/\text{m}^3$; $c'_p = 10.051 \text{ kJ}/\text{kgK}$; $\lambda' = 0.426 \text{ W}/\text{mK}$; $\mu' = 7.188 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/\text{ms}$; $Pr' = 1.70$; $p'_s = (dp/dT)_{T=T_s} = 0.206 \text{ MPa}/\text{K}$; $\sigma = 0.00360 \text{ N}/\text{m}$; $\Delta h = 0.872 \text{ MJ}/\text{kg}$; $\rho'' = 117.24 \text{ kg}/\text{m}^3$; $c''_p = 17.069 \text{ kJ}/\text{kgK}$; $\lambda'' = 0.1096 \text{ W}/\text{mK}$; $\mu'' = 2.689 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/\text{ms}$; $Pr'' = 4.18$.

Średnice tych kropelek są rzędu 0.1 mm , powiedzmy $D_o = 0.1 \text{ mm}$. Udział NaCl wynosi tyle, co w wodzie kotłowej, powiedzmy $g_o = 30 \text{ ppm}$. Przy wilgotności, powiedzmy $y_o = 200 \text{ ppm}$ udział NaCl w parze wynosi 0.006 ppm , co czyni rzadłość wymaganiom dla pary.

Część kropelek zostanie wyseparowana dyfuzyjnie w przegrzewaczu i osiadzie na jego ściance. Reszta będzie odparowywała, a ich średnice będą się zmniejszały bez zmiany zawartości soli, której masa wynosi $m_s = (\pi/6)D_o^3\rho'g_o$, jako że kropelka o średnicy początkowej D_o ma gęstość $\rho_l = \rho'$, gdyż udział soli jest bardzo

mały. W miarę zmniejszania się średnicy kropelki $D < D_o$ gęstość średnia ρ_l będzie wzrastała, gdyż gęstość $NaCl$, wynosząca $\rho_s = 2165 \text{ kg/m}^3$, jest większa od ρ' . Pomijając niewielką zresztą kontrakcję będziemy mieli

$$V = V_{NaCl} + V_{H_2O},$$

$$V_{NaCl} = \frac{m_{NaCl}}{\rho_s}, \quad V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho'},$$

$$V = \frac{m_{NaCl}}{\rho_s} + \frac{m_{H_2O}}{\rho'} = \frac{m_{NaCl} + m_{H_2O}}{\rho_l},$$

skąd, przy $g = m_{NaCl}/m_{H_2O}$, będzie

$$\rho_l = \rho' \frac{g + 1}{\frac{\rho'}{\rho_s} g + 1}. \quad (1)$$

Tak więc masa soli w kropelce o średnicy D wynosi

$$m_s = \frac{\pi}{6} D^3 \rho_l \cdot g = \frac{\pi}{6} D_o^3 \rho' g_o, \quad (2)$$

skąd po podstawieniu (1) otrzymuje się

$$\frac{g(g+1)}{\frac{\rho'}{\rho_s} g + 1} = g_o \left(\frac{D_o}{D} \right)^3, \quad (3)$$

co daje równanie kwadratowe

$$g^2 + g \left[1 - g_o \frac{\rho'}{\rho_s} \cdot \left(\frac{D_o}{D} \right)^3 \right] - g_o \left(\frac{D_o}{D} \right)^3 = 0, \quad (4)$$

którego rozwiązanie jest następujące

$$g = \frac{1}{2} [(\rho'/\rho_s)g_o(D_o/D)^3 - 1] \cdot \left\{ 1 - \sqrt{1 + \frac{4g_o(D_o/D)^3}{[(\rho'/\rho_s)g_o(D_o/D)^3 - 1]^2}} \right\}. \quad (5)$$

W podanych już warunkach mamy $\rho'/\rho_s = 0.2629$, $g_o = 3 \cdot 10^{-5}$, co przy $D = 5 \text{ } \mu\text{m}$, $D_o/D = 1 \cdot 10^{-4}/5 \cdot 10^{-6} = 20$ daje $g_o(D_o/D)^3 = 0.24$ oraz $g = 0.2094$, co już jest dużym stężeniem, choć maksymalna rozpuszczalność $NaCl$ w wodzie może dojść do 0.4 w temperaturze 100°C . Dla $g = 0.4$ gęstość roztworu wzrasta do $\rho_l = 720.9 \text{ kg/m}^3$ wobec $\rho' = 569.1 \text{ kg/m}^3$. Wzrasta również, co jest rzeczą bardzo ważną, temperatura nasycenia nad płaską powierzchnią rozdziału faz, a także napięcie powierzchniowe. Z danych ebulliometrycznych (vide[6], str. 476) wynika, że temperaturę nasycenia roztworu wodnego $NaCl$ można wyrazić wzorem

$$T_s = T_{so} \left(1 + 0.76 \frac{RT_{so}}{\Delta h} \cdot g \right) = T_s(g), \quad (6)$$

w którym $T_{so} = T_s(O)$, zaś $R = 461.4 \text{ J/kgK}$ jest indywidualną stałą gazową H_2O . Dla przykładu przy $T_{so} = 624.2 \text{ K}$, jak powyżej podano, otrzymuje się przy $g = 0.4$ wartość $T_s = 624.2(1 + 0.76 \cdot 461.4 \cdot 624.2 / 0.876 \cdot 10^6) = 686.9 \text{ K} = 413.9^\circ\text{C}$, przewyższającą temperaturę czystej wody o 62.7 K ! Być może wynik ten jest przesadzony, gdyż opiera się na wzorze (6), wyprowadzonym dla niewielkich ciśnień, nie mniej jednak fakt powyższy daje wiele do myślenia.

Brak również danych doświadczalnych dla napięcia powierzchniowego roztworów pod wysokim ciśnieniem. Dla ciśnienia atmosferycznego obowiązuje wzór

$$\sigma/\sigma_o = 1 + 0.2893 \cdot g, \quad (7)$$

ustalony dla roztworu wodnego $NaCl$ na podstawie danych doświadczalnych (vide [6], str. 423). W ten sposób dla $\sigma = 0.0036 \text{ N/m}$ przy $g = 0.4$ otrzymamy $\sigma = 0.0040 \text{ N/m}$, a więc o 10% więcej – różnica niewielka.

Wyniki te pozwalają obliczyć temperaturę kropli T_l w warunkach równowagi, tj. wtedy gdy kropla nie zmienia swej średnicy. Jak zwykle po stronie wklęsłej, a więc w cieczy, panuje wyższe ciśnienie p_l niż po stronie wypukłej, p_g , tzn.

$$p_l = p_g + \frac{4\sigma}{D}. \quad (8)$$

Nadto jest

$$p_g = p \cdot \exp\left(\frac{4\sigma}{\rho_l RT_s D}\right), \quad (9)$$

gdzie parametry p oraz T_s dotyczą płaskiej granicy faz. Mamy więc

$$p_l - p = \frac{4\sigma}{D} + p \left[\exp\left(\frac{4\sigma}{\rho_l RT_s D}\right) - 1 \right], \quad (10)$$

wobec czego

$$T_l - T_s = \frac{p_l - p}{p'_s} = \frac{4\sigma}{p'_s \cdot D} + \frac{p}{p'_s} \left[\exp\left(\frac{4\sigma}{\rho_l RT_s D}\right) - 1 \right],$$

gdzie

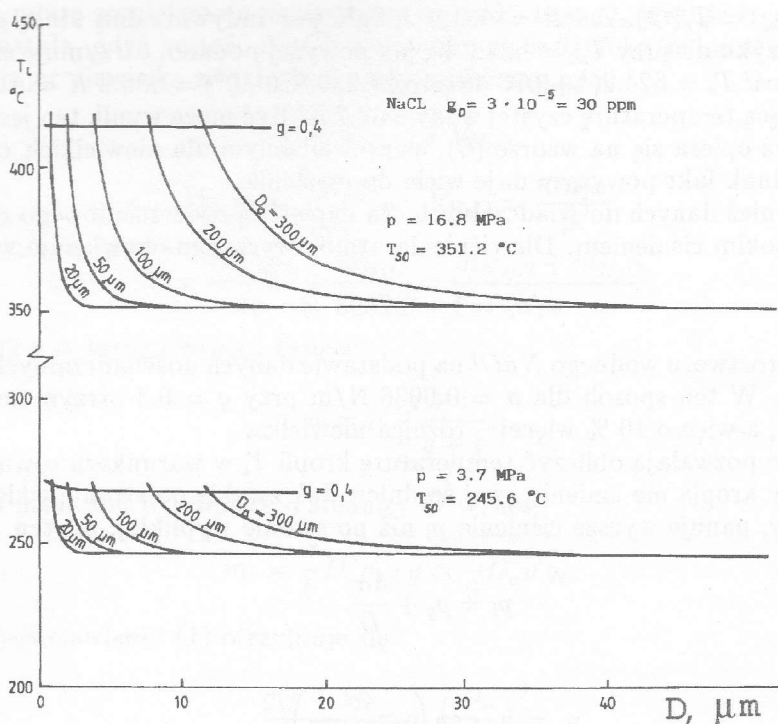
$$p'_s = (dp/dT)_{T=T_s}. \quad (11)$$

Stąd mamy wzór na temperaturę kropli o średnicy D w parze o ciśnieniu p :

$$T_l = T_s + \frac{4\sigma}{p'_s D} + \frac{p}{p'_s} \left[\exp\left(\frac{4\sigma}{\rho_l RT_s D}\right) - 1 \right], \quad (12)$$

w którym p'_s zależy tylko od ciśnienia, zaś ρ_l , T_s , σ także od udziału soli i średnicy kropli.

Krople, które są porywane przez parę z walczaka do przegrzewacza, mają pewien rozkład średnic początkowych D_o . Dlatego na rys. 2 podana jest zależność $T_l(D)$ dla kilku wartości D_o przy $g_o = 3 \cdot 10^{-5}$. Dodano podobny wykres dla ciśnie-



Rys. 2.

nia w przegrzewaczu wtórnym, gdzie $p = 3.7$ MPa, przy czym w tych warunkach było $T_s = T_{s0} = 245.6^\circ\text{C} = 518.6$ K; $\rho' = 805.7$ kg/m³; $c'_p = 4.805$ kJ/kgK; $\lambda' = 0.622$ W/mK; $\mu' = 11.21 \cdot 10^{-5}$ kg/ms; $Pr' = 0.865$; $p'_s = 0.0635$ MPa/K; $\sigma = 0.02723$ N/m; $\Delta h = 1.737$ MJ/kg; $\rho'' = 18.38$ kg/m³; $c''_p = 4.036$ kJ/kgK; $\lambda'' = 0.0441$ W/mK; $\mu'' = 1.803 \cdot 10^{-5}$ kg/ms; $Pr'' = 1.65$.

Linie $T_l(D)$ kończą się dla $g = 0.4$, która to wartość jest graniczną rozpuszczalnością NaCl w wodzie 100°C . Nie wiadomo, ile wynosi ta wartość graniczna dla wyższych ciśnień.

Dalsze odparowanie kropli powoduje, że w roztworze nasyconym ($g = 0.4$) powstają kryształy soli. W końcu powstanie kulisty z założenia kryształ NaCl o średnicy $D_{smax} = D_{min}$, którą można obliczyć na podstawie wzoru (2), tj.

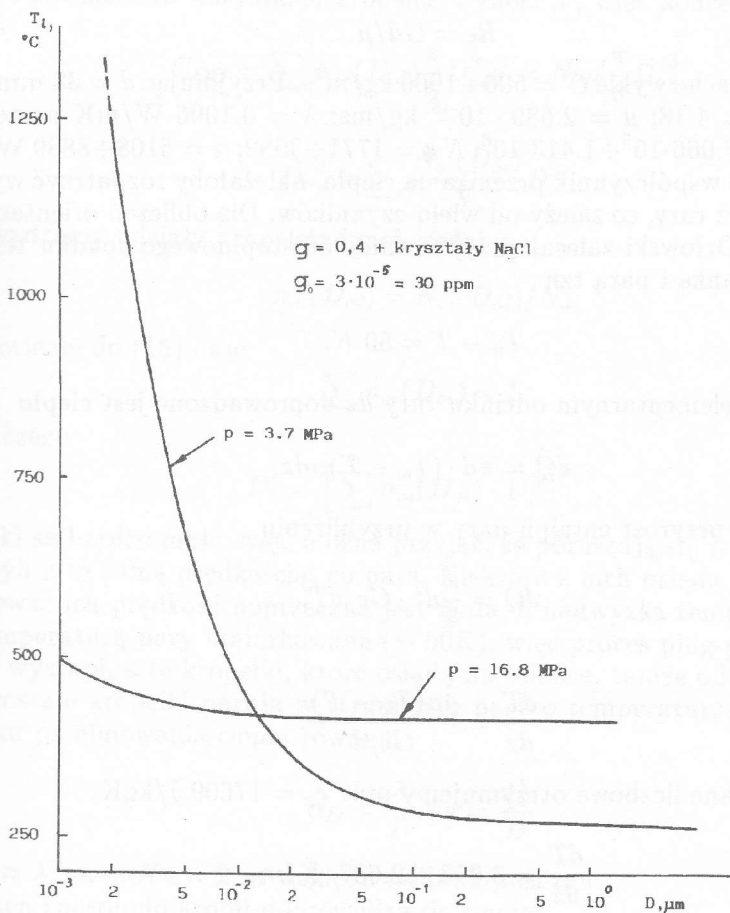
$$m_s = \frac{\pi}{6} D_o^3 \rho' g_o = \frac{\pi}{6} D_{smax}^3 \cdot \rho_s,$$

skąd

$$D_{smax} = D_o (\rho' g_o / \rho_s)^{1/3} = D_{min}. \quad (13)$$

Dla $g_o = 3 \cdot 10^{-5}$ otrzymujemy $D_{min} = 0.0199 \cdot D_o$ przy $p = 16.8$ MPa oraz $D_{min} = 0.0223 D_o$ przy $p = 3.7$ MPa. Natomiast przy $g = 0.4$ otrzymujemy

$D_n = 0.0390 \cdot D_o$ dla $p = 16.8$ MPa i $D_n = 0.0395 \cdot D_o$ przy $p = 3.7$ MPa. Dla warunków $D_{min} < D < D_n$ został sporządzony wykres $T_l(D)$, zamieszczony na rys. 3. Nadmienimy, że temperatura topnienia $NaCl$ wynosi $801^\circ C$, a temperatura



Rys. 3.

wrzenia $1413^\circ C$.

4. Odparowanie kropli w przegrzewaczu.

Udział kropelek ma pomijalny wpływ na bilans cieplny przegrzewacza, który można obliczyć dla samej tylko pary. W niniejszej analizie chodzi nam tylko o orientacyjne wyniki, dlatego uprościmy sobie problem przyjmując stałość własności pary jako gazu, przepływającego z prędkością masową G przez rurę o średnicy d , przy czym $c_p = c_p''$, $\mu = \mu''$, $\lambda = \lambda''$, $Pr = Pr''$. Współczynnik przejmowania

ciepła obliczamy ze wzoru

$$Nu = \alpha d / \lambda = 0.023 Pr^{1/3} Re^{0.8},$$

gdzie

$$Re = Gd / \mu.$$

W przegrzewaczach zwykle $G = 500 \div 1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Przyjmując $d = 38 \text{ mm}$ otrzymamy dla $Pr = 4.18$; $\mu = 2.689 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$; $\lambda = 0.1096 \text{ W/mK}$ następujące wartości: $Re = 7.066 \cdot 10^5 \div 1.413 \cdot 10^6$; $Nu = 1771 \div 3082$; $\alpha = 5108 \div 8889 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Aby obliczyć współczynnik przenikania ciepła, należałoby rozpatrzyć wymianę ciepła z zewnątrz rury, co zależy od wielu czynników. Dla obliczeń orientacyjnych Profesor Piotr Orłowski zalecał przyjmowanie 50-stopniowego spadku temperatury między ścianką i parą tzn.

$$T_w - T = 50 \text{ K}.$$

Wobec tego na elementarnym odcinku rury dz doprowadzone jest ciepło

$$d\dot{Q} = \pi d \cdot (T_w - T) \alpha dz,$$

które powoduje przyrost entalpii pary w przybliżeniu

$$d\dot{Q} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot G c_p dT.$$

Stąd

$$\frac{dT}{dz} = \frac{4\alpha(T_w - T)}{G c_p d}. \quad (14)$$

Podstawiając dane liczbowe otrzymujemy przy $c_p = 17609 \text{ J/kgK}$

$$\frac{dT}{dz} = 3.053 \div 2.657 \text{ K/m}.$$

Temperatura początkowa pary wynosi $351.2 \text{ }^\circ\text{C}$, a końcowa $535 \text{ }^\circ\text{C}$, a więc przyrost temperatury jest 183.8 K . Tak więc długość rury musi być $L = 60.2 \div 69.2 \text{ m}$, co daje $L/d = 1584 \div 1820$, oraz czas przebywania w przegrzewaczu 14.1 względnie 8.1 sekund.

Rozpatrzmy teraz zachowanie się kropelek. Oceniając ich średnią średnicę początkową na $D_o = 0.1 \text{ mm}$ mamy przy $y_o = 200 \text{ ppm} = 2 \cdot 10^{-4}$ ilość kropelek na 1 kg pary równą

$$N_o = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{\frac{\pi}{6}(10^{-4})^3 \rho'} = 6.712 \cdot 10^5 \text{ kg}^{-1}$$

przy $\rho' = 569.1 \text{ kg/m}^3$, co daje przy $\rho'' = 117.24 \text{ kg/m}^3$ ilość $7.869 \cdot 10^7$ kropelek na m^3 .

Średnice kropelek podlegają pewnej statystyce, a mianowicie jest N_{oi} kropel o średnicy D_{oi} , przy czym

$$N_o = \sum N_{oi}(D_{oi}). \quad (15)$$

Gęstość początkowa wszystkich kropelek wynosi ρ' , więc koncentracja kropelek wynosi

$$C_{DO} = \sum N_{oi}(D_{oi}) \frac{\pi}{6} D_{oi}^3 \rho' = N_o \rho' \frac{\pi}{6} \bar{D}_o^3,$$

skąd

$$\bar{D}_o^3 = \sum \frac{N_{oi}(D_{oi})}{N_o} D_{oi}^3.$$

Wprowadzamy udziały kropelek danej średnicy

$$n_{oi}(D_{oi}) = N_{oi}(D_{oi})/N_o. \quad (16)$$

Podstawienie do (15) daje

$$\sum n_{oi}(D_{oi}) = 1, \quad (17)$$

wobec czego

$$\bar{D}_o = \left[\sum n_{oi}(D_{oi}) \cdot D_{oi}^3 \right]^{1/3}. \quad (18)$$

Kropelki są bardzo małe, więc można przyjąć, że poruszają się w parze bez poślizgu, czyli z tą samą prędkością, co para. Niektóre z nich osiadają na ścianie rury, a ponieważ ich prędkość poprzeczna jest mała, a nadwyżka temperatury ścianki nad temperaturą pary umiarkowana ($\sim 50\text{K}$), więc proces ping-pong, opisany w [7], nie wystąpi, a te kropelki, które osiadają na ścianie, tamże odparują.

Pozostałe kropelki parują w strumieniu pary o temperaturze T przy współczynniku przejmowania ciepła równym

$$\alpha_D = \frac{\lambda}{D} Nu = \frac{2\lambda}{D} \quad (19)$$

przy $\lambda \approx \lambda''$ oraz $Nu = 2$ ze względu na brak poślizgu.

W ten sposób do kropli doprowadza się ciepło

$$d\dot{Q} = \pi D^2 \alpha_D \cdot (T - T_l) dt = 2\pi D \lambda (T - T_l) dt. \quad (20)$$

Powoduje ono odparowanie, związane ze zmniejszeniem się średnicy, co wymaga ciepła $-\rho_l \Delta h d(\pi D^3/6)$, oraz podgrzanie cieczy, co wymaga ciepła $c_{pl} \rho_l (\pi/6) D^3 dT_l$. Ten ostatni wyraz można pominąć. Mamy więc

$$d\dot{Q} \approx -\rho_l \Delta h d\left(\frac{\pi}{6} D^3\right) = -\rho_l \Delta h \frac{\pi}{2} D^2 dD, \quad (21)$$

skąd, po porównaniu z (20), otrzymujemy równanie

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{4\lambda}{\rho_l \Delta h D} \cdot (T - T_l). \quad (22)$$

Inaczej

$$\frac{dD^2}{dt} = -\frac{8\lambda}{\rho_l \Delta h} (T - T_l), \quad (23)$$

lub

$$\frac{dD^2}{dz} = -\frac{8\lambda\rho}{G\rho_l \Delta h} (T - T_l), \quad (24)$$

gdzie ρ jest gęstością pary.

Uwzględniając teraz zależność (14) otrzymujemy

$$\frac{dD^2}{dT} = -\frac{2c_p \lambda \rho d}{\rho_l \Delta h \alpha} \cdot \frac{T - T_l}{T_w - T}, \quad (25)$$

przy czym $T_w - T = \text{const} = 50 \text{ K}$, w związku z czym $dD^2/dT \sim (T - T_l)/\rho_l$.

Należy pamiętać, że ρ_l oraz T_l są funkcjami średnicy D , dlatego rozwiązanie $D(T)$ z warunkiem początkowym $D(T_o) = D_o$ można otrzymać tylko numerycznie.

Rozpatrzmy przykład liczbowy dla następujących danych: $p = 16.8 \text{ MPa}$; $T_{so} = 351.2^\circ\text{C} = T_o$; $\rho' = 569.1 \text{ kg/m}^3$; $\Delta h = 0.872 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$; $c_p = 1.7609 \cdot 10^4 \text{ J/kgK}$; $\rho = 117.24 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0.1096 \text{ W/mK}$; $\alpha = 5108 \text{ W/m}^2\text{K}$; $G = 500 \text{ kg/m}^2\text{s}$; $d = 38 \text{ mm}$. Otrzymujemy równanie

$$dD^2/dT = -1.3568 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{T - T_l}{\rho_l/\rho'}, \quad (26)$$

które rozwiążemy dla $D_o = 0.1 \text{ mm} = 100 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ m}$. Dla $g_o = 3 \cdot 10^{-5}$ mamy $D_n = 3.9 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 3.9 \mu\text{m}$ oraz $D_{min} = 1.99 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1.99 \mu\text{m}$. Tablica 1 zawiera wartości T_l i ρ_l/ρ_s w funkcji średnicy kropli. Dodano tam również wartości temperatury pary T i współrzędnej z , otrzymane z numerycznego całkowania, przy czym na początku odparowania można było przyjąć $T_l = T_o$ oraz $\rho_l/\rho' = 1$, co dało rozwiązanie

$$D^2 = D_o^2 - \frac{1}{2} \cdot 1.3568 \cdot 10^{-10} (T - T_o)^2. \quad (27)$$

obowiązujące, powiedzmy, do $D = 18 \mu\text{m} = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$. Otrzymujemy wtedy $T - T_o = 11.9 \text{ K}$, tj. $T = 363.1^\circ\text{C}$, a z równania (14) mamy $z = 3.90 \text{ m}$. Następnie dla $D = 7.93 \mu\text{m}$, $z \approx 3.97 \text{ m}$, otrzymujemy $T = T_l = 363.3^\circ\text{C}$. Od tego miejsca jest $dD^2/dT > 0$, czyli para zaczyna się kondensować na kropli, której średnica zaczyna wzrastać.

Od miejsca pierwszego minimum funkcji $D(T)$ równanie (26) należy całkować numerycznie. Wystąpi szereg maximów i minimów, a proces globalnego odparowania znacznie się spowalnia. Prawie cała woda odparowuje na początkowym odcinku (do pierwszego minimum) o długości 3.97 m , gdy czysty kryształ soli wystąpi dopiero dla $z = 22.54 \text{ m}$ przy długości rury $L = 60.2 \text{ m}$. W związku

Tablica 1

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $D, \mu\text{m}$ | 100 | 50 | 31 | 18 | 11.39 | 6.54 | 5.09 | 4.36 | 3.9 | 1.99 |
| ρ_i/ρ' | 1 | 1 | 1.0007 | 1.0037 | 1.0147 | 1.0718 | 1.1400 | 1.2050 | 1.2668 | 1.2669 |
| $T_i, ^\circ\text{C}$ | 351.2 | 351.2 | 351.4 | 352.0 | 354.3 | 366.9 | 382.5 | 398.2 | 413.9 | 414.0 |
| $T, ^\circ\text{C}$ | 351.2 | 361.7 | 362.7 | 363.1 | 363.2 | 367.5 | 384.0 | 390.0 | 405.0 | 420.0 |
| z, m | 0 | 3.44 | 3.77 | 3.90 | 3.94 | 5.34 | 10.74 | 13.04 | 17.62 | 22.54 |

z tym można przyjąć, że proces odparowania opisuje równanie typu (27), przy czym jego ważność kończy się wtedy, gdy zaobserwuje się istotny wzrost funkcji $T_i(D)$, przedstawionej na rys. 2. Orientacyjnie można obliczyć odcinek parowania kładąc w (27) $D = 0$, co daje $T = 363.3^\circ\text{C}$, oraz $z = 3.98 \text{ m}$.

Statystyczny udział kropelek o średnicy początkowej D_{oi} jest $n_{oi}(D_{oi})$. Nie wszystkie kropelki zdążą odparować w parze, albowiem część odpadnie w procesie osiadania na ściance rury. Masowy strumień osiadania wynika głównie z turbulencji i na ten temat jest wiele opracowań, jednakowoż traktują one proces sumarycznie, tj. bez uwzględniania średnic. Tak więc strumień osiadania dotyczy wszystkich kropelek, których koncentracja chwilowa wynosi

$$C_D = \sum N_i(D_i) \cdot \rho_{li} \frac{\pi}{6} D_i^3 \text{ kg/m}^2. \quad (28)$$

Najprostszy wzór na strumień osiadania G_D został opracowany przez McCoya i Hanratty'ego [8], a mianowicie

$$G_D = C_D \cdot 0.17w\sqrt{f/2}, \quad (29)$$

przy czym

$$f = 0.046Re^{-0.2}, \quad Re = Gd/\mu. \quad (30)$$

Na odcinku rury dz wyseparowuje się $G_D \cdot \pi d \cdot dz$, co powoduje ubytek wydatku kropelek $wC_D(\pi/4)d^2$. Mamy więc

$$G_D \pi d \cdot dz = -d(wC_D \frac{\pi}{4} d^2),$$

co daje równanie

$$\frac{dC_D}{dz} = -\frac{0.68}{d} \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot C_D. \quad (31)$$

Wzór ten dotyczy przypadku, gdy średnice każdej frakcji nie ulegają zmianom, a więc należy go tak interpretować, że

$$\rho_{li} \cdot \frac{\pi}{6} D_i^3 = \text{const} = \rho' \frac{\pi}{6} D_{oi}^3. \quad (32)$$

Tak więc równanie (31), zapisane dla określonej frakcji kropelek, należy przedstawić tak

$$\frac{dN_i}{dz} = -\frac{0.68}{d} \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot N_i, \quad (33)$$

przy czym dla $z = 0$ jest $N_i = N_{oi}(D_{oi})$. Po całkowaniu otrzymujemy

$$N_i = N_{oi}(D_{oi}) \exp \left(-0.68 \sqrt{\frac{f}{2}} \cdot \frac{z}{d} \right). \quad (34)$$

Separacji podlegają kropelki, tj. kulki ciekłe, albowiem ciecz przykleja się do ścianki i tam odparowuje pozostawiając osad soli. Natomiast krystaliczna pozostałość danej kropelki nie może być wyseparowana, gdyż brak jest naturalnego kleju, jakim jest ciecz. Wobec tego zakończenie procesu separacji będzie w poprzednio wspomnianym miejscu pierwszego minimum zależności $D(T)$, określonym w przybliżeniu przez równanie typu (27), które w ogólnym przypadku brzmi

$$D^2 = D_o^2 - \frac{c_p \lambda \rho d}{\rho' \Delta h \alpha} (T - T_{so})^2, \quad (35)$$

co daje dla miejsca końca separacji

$$T - T_{so} = D_o \sqrt{\frac{\rho' \Delta h \alpha}{c_p \lambda \rho \cdot d}}. \quad (36)$$

Z równania (14) otrzymuje się

$$T - T_{so} = \frac{4\alpha \Delta T}{G c_p d} \cdot z, \quad \Delta T = T_w - T = const, \quad (37)$$

wobec czego (po uproszczeniach)

$$\frac{z}{d} = D_o \cdot \frac{G}{4\Delta T} \cdot \sqrt{\frac{\rho' \Delta h c_p}{\alpha \lambda \rho \cdot d}}, \quad (38)$$

co można podstawić do (34) razem z wyrażeniem (30). Mamy więc

$$\frac{N_i}{N_{oi}(D_{oi})} = \exp \left(-0.17 \cdot \frac{G D_{oi}}{\lambda \Delta T} \sqrt{\frac{0.023 \cdot \rho' \Delta h c_p \lambda}{\alpha d \cdot \rho \cdot Re^{0.2}}} \right), \quad (39)$$

a po uwzględnieniu wzoru:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = 0.023 Pr^{1/3} Re^{0.8} \quad (40)$$

Tablica 2.

| <i>i</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| $D_{oi}, \mu\text{m}$ | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 500 |
| $D_{min,i}, \mu\text{m}$ | 0.02 | 0.04 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 10.0 |
| $N_i/N_{oi}(D_{oi})$ | 0.972 | 0.945 | 0.869 | 0.755 | 0.571 | 0.246 | 0.060 | 0.004 | $8 \cdot 10^{-7}$ |

otrzymujemy

$$\frac{N_i}{N_{oi}(D_{oi})} = \exp\left(-0.17 \frac{GD_{oi}}{\lambda\Delta T} \sqrt{\frac{\rho'\Delta hc_p}{\rho Re Pr^{1/3}}}\right). \quad (41)$$

W rozpatrywanym poprzednio przykładzie $D_{oi} = 0.1\text{mm}$ przy $G = 500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ i $d = 0.038 \text{ m}$ mieliśmy $Re = 7.066 \cdot 10^5$ oraz $f = 0.00311$, przy czym było $\lambda/d = 104.65$, co dało

$$0.17 \frac{G}{\lambda\Delta T} \sqrt{\frac{\rho'\Delta hc_p}{\rho Re Pr^{1/3}}} = 2.806 \cdot 10^4, \quad (42)$$

wobec czego dla $D_{oi} = 100 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ m}$ wypadło

$$N_i = 0.0604 N_{oi}(D_{oi}). \quad (43)$$

W ten sposób został określony udział frakcji, pochodzącej z kropelek o początkowej średnicy $D_{oi} = 0.1 \text{ mm}$ i składającej się z kulek krystalicznych o średnicy $D_{min,i}$, określonej wzorem (13), tj.

$$D_{min,i} = D_{oi}(\rho'g_o/\rho_s)^{1/3},$$

która dla $g_o = 3 \cdot 10^{-5}$ oraz $D_{oi} = 0.1 \text{ mm}$ wynosi $D_{min,i} = 1.99 \mu\text{m} \approx 2 \mu\text{m}$. Im większa średnica początkowa kropelki, tym mniejszy końcowy udział danej frakcji, co ilustruje tablica 2, opracowana dla rozpatrzonych powyżej warunków.

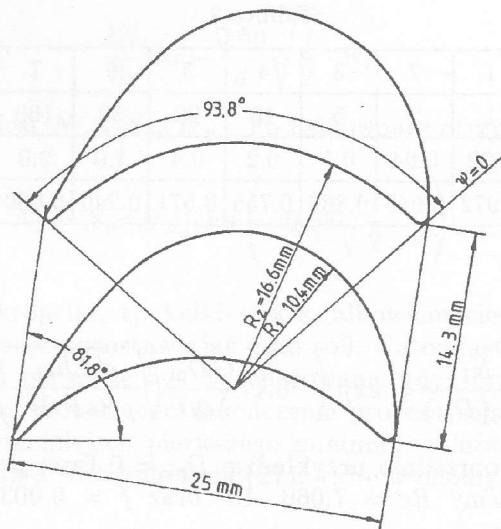
5. Pierwszy stopień turbiny jako wirówka.

Na rys. 4 jest przerysowana z książki Profesora Stefana Perycza ([9], str.180, rys. VI. 6) palisada akcyjna z profilami R-3021A w skali 2:1. Kąt $\beta_s = 81.8^\circ$ dał stałą szerokość kanału, równą 6.2 mm.

Geometria profilu była określona przez rzędne stron wklęsłej i wypukłej, jak to się praktykuje w przypadku profili lotniczych. Mimo to udało się uzyskać

R-3021A

Skala 2 : 1



Rys. 4.

wystarczającą dokładność rysując profil R-3021A za pomocą czterech promieni, nie licząc promieni zaokrąglenia krawędzi natarcia i spływu. Podana wartość kąta β_s spowodowała, że główny odcinek kanału jest opisany kołami współśrodkowymi o promieniach $R_1 = 10.4$ mm dla strony wypukłej i $R_2 = 16.6$ mm dla strony wklęsłej sąsiedniego profilu w zakresie kąta od $\psi = 0$ na wlocie do kanału do $\psi_K = 93.8^\circ$ na wylocie.

W ten sposób cząstki stałe (krzemionka, sól) poruszające się w parze bez poślizgu na wlocie, tj. z tą samą prędkością w , co para, wpadają po wejściu do głównego odcinka kanału w pole przyspieszenia odśrodkowego w^2/r , które powoduje ich ruch poprzeczny w kierunku współrzędnej r , przy czym składowa prędkości w kierunku kąta ψ jest stała i wynosi w .

Rozpatrujemy płaskie zagadnienie we współrzędnych r, ψ . Uwzględniając siłę masową i siłę oporu otrzymujemy równanie ruchu dla cząstki o średnicy D i gęstości ρ_s w następującej postaci

$$\frac{\pi}{6} D^3 \rho_s \frac{dw_r}{dt} = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho_s - \rho) \frac{w^2}{r} - 3\pi \mu D w_r, \quad (44)$$

gdzie w_r jest składową promieniową prędkości, zaś ρ oraz μ są gęstością wzgl. lepkością pary. Mamy

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{\partial w_r}{\partial t} + w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial w_r}{\partial \psi}. \quad (45)$$

Pierwszy wyraz po prawej stronie tego równania równa się zero, gdyż z założenia przepływ jest stacjonarny; drugi wyraz pomijamy biorąc pod uwagę, że $w_r \ll w$.

Podstawienie do (44) daje po uporządkowaniu

$$\frac{dw_r}{d\psi} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) w - \frac{18\mu}{\rho_s D^2 w} \cdot r w_r \quad (46)$$

z warunkiem początkowym $w_r = 0$ dla $\psi = 0$. Nadto mamy

$$r \frac{d\psi}{dt} = w = \text{const}, \quad (47)$$

wobec czego

$$w_r = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\psi} \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{w}{r} \cdot \frac{dr}{d\psi}, \quad (48)$$

można podstawić do (46), otrzymując równanie trajektorii cząstki

$$\frac{d}{d\psi} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\psi} \right) = \frac{\Delta\rho}{\rho_s} - \frac{18\mu}{\rho_s D^2 w} \cdot \frac{dr}{d\psi}, \quad \Delta\rho = \rho_s - \rho, \quad (49)$$

z warunkami początkowymi dla $\psi = 0$: $r = R$, $dr/d\psi = 0$.

Jeśli trajektoria taka dojdzie do $r = R_2$ dla $\psi < \psi_K$, to cząstka o danej średnicy D , startująca z miejsca $r = R$, $\psi = 0$, osiadzie na stronie wklęsłej łopatki wirnika. Inaczej mówiąc, jeśli trajektoria cząstki, charakteryzowanej przez D i R , dojdzie do krawędzi splywu profilu, to wszystkie cząstki o większej średnicy, startujące z miejsca $r = R$, $\psi = 0$, zostają wyseparowane z przepływu.

Lewa strona równania (49) ma znaczenie na początkowym odcinku trajektorii, gdzie składowa prędkości w_r rośnie od $w_r = 0$ do pewnej wartości stałej, która ustala się już dla niewielkich kątów ψ . Wystarczy więc oprzeć się na tej wartości ustalonej, która daje z równania (49)

$$\frac{dr}{d\psi} = \frac{D^2 w \Delta\rho}{18\mu}, \quad (50)$$

skąd

$$r = \frac{D^2 w \Delta\rho}{18\mu} \psi + R. \quad (51)$$

Oznaczamy przez D_K tę średnicę, która z promienia R prowadzi wprost do krawędzi splywu o współrzędnych R_2, ψ_K . Wtedy

$$R_2 = \frac{D_K^2 w \Delta\rho}{18\mu} \psi_K + R,$$

co daje

$$D_K = \sqrt{\frac{18\mu}{w \Delta\rho} \cdot \frac{R_2 - R}{\psi_K}}. \quad (52)$$

W opisanym procesie separacji średnice cząstek nie zmieniają się, natomiast ulega zmianie charakterystyka statystyczna. Jeśli na wlocie do kanału udziały cząsteczek o średnicy D wynosiły $n_1(D)$, to na wylocie będzie $n_2(D) < n_1(D)$. Nową charakterystykę statystyczną obliczamy w następujący sposób.

Rozpatrujemy "rurkę" prądową w pobliżu $r = R$ o szerokości dR . Wzór (52) określa wartość graniczną $D_K(R)$. Jeśli $D < D_K$, to dla tego elementu będziemy mieli $dn_2(D) = dn_1(D)$. W przeciwnym razie $dn_2(D) = 0$.

Udział $n_1(D)$ nie zależy od położenia R , wobec tego

$$dn_1(D) = \frac{n_1(D)dR}{R_2 - R_1}. \quad (53)$$

Na wylocie z kanału będzie

$$\left. \begin{aligned} dn_2(D) &= dn_1(D) & \text{dla } D < D_K, \\ dn_2(D) &= 0 & \text{dla } D > D_K \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

W ten sposób

$$n_2(D) = \int_{R_1}^{R(D_K)} dn_1(D) = \int_{R_1}^{R(D_K)} \frac{dR}{R_2 - R_1} n_1(D) = n_1(D) \cdot \frac{R(D_K) - R_1}{R_2 - R_1}. \quad (55)$$

Ze wzoru (52) wynika, że

$$R(D_K) = R_2 - D_K^2 \frac{w\Delta\rho\psi_K}{18\mu}$$

przy $D_K = D$, tj.

$$\frac{R(D_K) - R_1}{R_2 - R_1} = 1 - D^2 \cdot \frac{w\Delta\rho\psi_K}{18\mu(R_2 - R_1)},$$

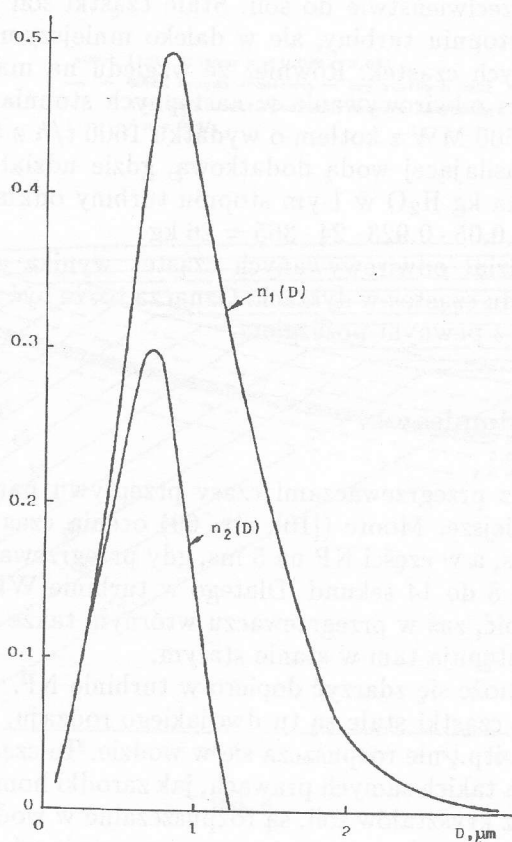
skąd wynika

$$n_2(D) = n_1(D) \left[1 - \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^2 \right], \quad (56)$$

gdzie

$$D_{max} = \sqrt{\frac{18\mu(R_2 - R_1)}{w\Delta\rho\psi_K}}. \quad (57)$$

Jest to największa średnica cząstki na wylocie z kanału. W przypadku danej palisady było $R_2 - R_1 = 6.2 \cdot 10^{-3}$ m, $\psi_K = 93.8^\circ = 1.637$ rad. Dla odwirowania krzemionki można było przyjąć $\Delta\rho = 2228$ kg/m³. Przyjmując liczbę Macha $M = 0.9$ otrzymano $w = 586.5$ m/s, a przy $\mu = 2.9 \cdot 10^{-5}$ kg/ms wypadło $D_{max} = 1.23 \cdot 10^{-6}$ m = 1.23 μ m.



Rys. 5.

Na rys. 5 przedstawiono wykresy $n_1(D)$ i $n_2(D)$. Pierwszy z nich dotyczy pyłu przemysłowego według danych J. M. Dalla Valle ([4], vol. 5, hasło: Dust). Na tej podstawie zostały obliczone całki

$$\int_0^{D_{max}} D^3 n_j(D) dD = C_j, \quad (58)$$

które wyniosły $C_1 = 1$, $C_2 = 0.07686$, co oznacza, że w wirniku 1-go stopnia turbiny osiada 92.3% domieszek stałych, reprezentowanych przez krzemionkę, których udział nie może przewyższyć $4 \cdot 10^{-8}$.

Masowo-średnia średnica cząstek wylatujących z wirnika została obliczona na $0.74 \mu\text{m}$, co przy ich gęstości $\rho_s \approx 2300 \text{ kg/m}^3$ daje ilość cząstek u wylotu równą $8.2 \cdot 10^7$ na kg pary. Trzeba podkreślić, że cząstki te w zasadzie nie są wylapywane drogą osiadania na ściankach przegrzewacza (wylączywszy

chyba kolana) w przeciwieństwie do soli. Stałe cząstki soli będą również odwirowywane w 1-ym stopniu turbiny, ale w daleko mniejszym udziale ze względu na małe wymiary tych cząstek. Również ze względu na małe wymiary cząstek obu rodzajów proces odwirowywania w następnych stopniach turbiny mało się zaznaczy. W bloku 500 MW z kotłem o wydatku 1600 t/h z 5-procentowym uzupełnieniem wody zasilającej wodą dodatkową, gdzie udział masowy domieszek wynosi $4 \cdot 10^{-8}$ kg na kg H_2O w 1-ym stopniu turbiny odkłada się w ciągu roku $1600 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-8} \cdot 0.05 \cdot 0.923 \cdot 24 \cdot 365 = 26$ kg.

Tak znaczny udział odwirowywanych cząstek wynika głównie stąd, że nie uwzględniono rozpadu cząstek w dyszach. Oznacza to, że być może cząstki wlatują do kanałów wirnika z pewnym poślizgiem.

6. Dalsze losy domieszek.

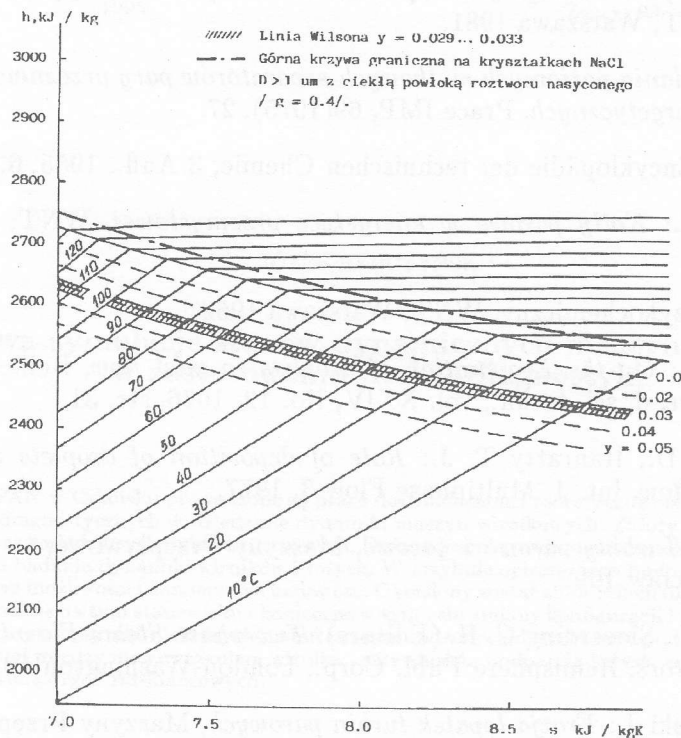
W porównaniu z przegrzewaczami czasy przepływu pary w turbinie są o 3 rzędy wielkości mniejsze. Moore ([10], str. 69) ocenia czas przepływu w części WP turbiny na 8 ms, a w części NP na 5 ms, gdy przegrzewaczu pierwotnym oceniliśmy ten czas na 8 do 14 sekund. Dlatego w turbinie WP zjawiska dyfuzyjne nie powinny wystąpić, zaś w przegrzewaczu wtórnym także nie powinno ich być, gdyż domieszki występują tam w stanie stałym.

Coś ciekawego może się zdarzyć dopiero w turbinie NP.

Podkreślimy, że cząstki stałe są tu dwojako rodzaju. Część z nich, a mianowicie krzemionka itp., nie rozpuszcza się w wodzie. Te cząstki mogą być zarodkami kondensacji na takich samych prawach, jak zarodki homogeniczne. Pozostałe cząstki, utworzone z kryształów soli, są rozpuszczalne w wodzie, a więc powodują wzrost temperatury wrzenia, a tym samym przesuwają górną krzywą graniczną ku wyższym temperaturom, jak to pokazano na rys. 6, przedstawiającym wykres Molliera dla H_2O . Linia $y = 0$ jest krzywą graniczną dla czystej substancji. Na tej linii zacznie się wzrost kropel, powstałych na obcych zarodkach substancji nierozpuszczalnych jak SiO_2 , przy czym pierwsze zadziałają duże kryształki o średnicy rzędu $1 \mu m$. Zarodki homogeniczne mają średnice o 3 rzędy wielkości mniejsze, przeto mogą się uaktywnić dopiero przy pewnym przechłodzeniu pary. W przypadku czystej nukleacji spontanicznej bez obcych zarodków otrzymuje się wtedy linię Wilsona ($y \approx 3\%$).

Gdy kondensacja odbywa się na kryształkach $NaCl$, których średnica jest rzędu $1 \mu m$, to na ich powierzchni tworzy się powłoka roztworu nasyconego, dla którego przy $T = 100^\circ C$ jest $g = 0.4$. Przesuwa to górną krzywą graniczną o jakieś 20 kJ/kg wzwyż. Ze względu na duże wymiary zarodków ewentualne przechłodzenie powinno być znikome. Jednocześnie na początku kondensacji udział $NaCl$ w kropelkach jest bardzo duży, a potem stopniowo maleje aż do wartości rzędu ppm w kondensatorze głównym. Są to fakty powszechnie znane (vide J. Krzyżanowski [11], str. 122 i dalsze, zwłaszcza wyniki badań Marcinkowskiego).

Można w związku z tym postawić pytanie, dlaczego we wczesnych eksperymentach z ekspansją pary mokrej obserwowano przechłodzenie do linii Wilsona



Rys. 6.

i późniejsze uderzenia kondensacyjne? Albo inaczej, dlaczego we współczesnych turbinach energetycznych zjawisk tych się nie obserwuje i to nawet w przypadku destylatu jako wody dodatkowej?

Sądzymy, że przyczyną jest korygowanie wody kotłowej fosforanami sodowymi, które wprowadzają sole sodowe do obiegu. We wczesnych badaniach dysz de Laval'a korygowania wody nie stosowano i stąd wynikały piękne i pouczające wyniki Yellotta i Hollanda.

Mycie kotła roztworem $NaOH$, Na_3PO_4 i Na_2SO_4 ma jakościowe tylko, a nie ilościowe znaczenie.

Pracę zgłoszono 1994.10.18

Literatura

- [1] Orłowski P., Dobrzański W., Szwarz E.: *Kotły parowe-konstrukcja i obliczenia*, WNT, Warszawa 1979, wyd. 3.

- [2] *Pomiary ciepłne i energetyczne*, praca zbiorowa pod redakcją M. Mieszkowskiego, WNT, Warszawa 1981.
- [3] Zyk A.: *Badania poziomych siatkowych separatorów pary przeznaczonych dla urzędź energetycznych*, Prace IMP, 69(1975), 27.
- [4] Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, 3 Aufl., 1955, 6. Band
- [5] Orłowski P.: *Kotły parowe w energetyce przemysłowej*, WNT, Warszawa 1976.
- [6] Poradnik fizykochemiczny, WNT, Warszawa 1962.
- [7] Madejski J.: *On the Evaporation of droplets in mist flow*, Bull. de l'Acad. Pol. Sci., sér. d. sci. techn., vol. XXIV, No. 12, 1976, str. 31.
- [8] McCoy D. D., Hanratty T. J.: *Rate of deposition of droplets in annular two-phase flow*, Int. J. Multiphase Flow 3, 1977.
- [9] Perycz S.: *Turbiny parowe i gazowe*, Maszyny Przepływowe, t. 10, Ossolineum, Wrocław 1992.
- [10] Moore M. J., Sieverding C. H. (Editors): *Two-phase Steam Flow in Turbines and Separators*, Hemisphere Publ. Corp., London-Washington 1976.
- [11] Krzyżanowski J.: *Erozja łopatek turbin parowych*, Maszyny Przepływowe, t. 6, Ossolineum, Wrocław 1991.

Migration of admixtures in the steam power station cycle

Summary

The title problem has been considered with regard to separation and transformation of admixtures in superheaters and HP turbine stages. Conclusions with respect to the heterogeneous nucleation in LP stages have been drawn.