

TERMODYNAMICZNE WARUNKI PAROWANIA ZIEMNIAKÓW W ZAMKNIĘTYCH KONTENERACH

Jan R. Kamiński

Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Michail Kotov

Spółka Akcyjna „Małpiśceprod”, Białoruś

Janina Kalinka

Białoruski Państwowy Uniwersytet Techniczny w Mińsku

Streszczenie. Badania obejmowały termiczną obróbkę ziemniaków z wykorzystaniem pary wodnej i gorącej wody. Celem badań było określenie strat ciepła spowodowanych skraplaniem się pary wodnej na metalowych częściach przenośnika ślimakowego (łopatkach) i cylindrycznej obudowie parownika. Określono równanie bilansu cieplnego z uwzględnieniem strat ciepła. Szczegółowo rozpatrzono straty ciepła wynikłe z kondensacji pary wodnej na częściach metalowych urządzenia. Z wykorzystaniem teorii liczb podobieństwa wyznaczono zależność współczynnika oddawania ciepła przy kondensacji pary od prędkości przepływu pary wodnej.

Słowa kluczowe: parowanie ziemniaków, bilans cieplny, kondensacja pary wodnej, przenośniki ślimakowe

Wprowadzenie

Masa ziemniaczana w postaci kłębow ziemniaczanych parowania jest w zamkniętym, cylindrycznym kontenerze z łopatkowym przenośnikiem ślimakowym. Ziemniaki poddawane są działaniu: pary wodnej, wydostającej się z kolektora pod ciśnieniem 120 kPa, gorącej wody o temperaturze 80 °C i łopatek przenośnika ślimakowego obracającego się zadaną prędkością kątową przemieszczającego je wzdłuż komory parowania.

Ponieważ ziemniaki znajdują się pod jednoczesnym oddziaływaniem wody, pary wodnej i przenośnika ślimakowego w zamkniętej przestrzeni, zachodzi konieczność szczegółowego rozpatrzenia zjawisk wzajemnego oddziaływania trzech stanów skupienia, a mianowicie: stałego (ziemniaki, kontener, przenośnik ślimakowy), ciekłego (woda) i gazowego (para wodna).

Cel badań

Celem badań było określenie strat ciepła, powstających w procesie technologicznym parowania ziemniaków, związanych z kondensacją pary wodnej na ściankach łopatek przenośnika ślimakowego i płaszczu obudowy urządzenia oraz wpływu prędkości przepływu pary wodnej na wielkość tych strat.

Wyniki badań

Przyjęto, że początkowa temperatura ziemniaków znajdujących się w kontenerze i przenośnika ślimakowego wynosi 20°C. Dla ustalenia bilansu termodynamicznego uwzględniono, że ciepło z pary wodnej służy do podniesienia temperatury ziemniaków do określonego poziomu i pokrycia określonych strat, w tym na kondensację pary na płaszczu kontenera (z uwzględnieniem przekazywania ciepła do otaczającego środowiska) i kondensację pary na łopatkach przenośnika ślimakowego. Bilans cieplny procesu parowania ziemniaków można zapisać następująco:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_e, \quad [J] \quad (1)$$

gdzie:

- $Q_1 = c_1 m_1 (T_1 - \theta)$ – ciepło pobierane przez ziemniaki, [J],
- $Q_2 = c_2 m_2 (T_2 - \theta)$ – ciepło przejmowane przez ślimak, [J],
- $Q_3 = c_3 m_3 (T_3 - \theta)$ – ciepło idące na podgrzanie kontenera i przechodzące przez ścianki kontenera na zewnątrz, [J],
- Q_e – ciepło kondensacji pary w wodnej, [J],
- Q – ciepło całkowite, zawarte w parze wodnej, [J],
- c_1 – ciepło właściwe ziemniaków, [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
- c_2 – ciepło właściwe materiału przenośnika ślimakowego, [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
- c_3 – ciepło właściwe materiału obudowy kontenera, [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
- m_1 – masa ziemniaków w komorze parowania, [kg],
- m_2 – masa przenośnika ślimakowego, [kg],
- m_3 – masa obudowy urządzenia, [kg],
- θ – temperatura początkowa ziemniaków i urządzenia, [K],
- T_1 – temperatura parowania ziemniaków, [K],
- T_2 – temperatura przenośnika ślimakowego podczas pracy, [K],
- T_3 – temperatura obudowy przenośnika ślimakowego podczas pracy, [K].

Najbardziej złożonym procesem jest kondensacja pary wodnej na metalowych powierzchniach. Zjawisko to było szczegółowo rozpatrywane przez Nusselta [Stephen 1992]. Nusselt rozpatrywał zjawisko kondensacji pary wodnej przepływającej w przewodach rurowych poziomych i pionowych. Według teorii Nusselta kondensacja pary na metalowych powierzchniach charakteryzuje się powstawaniem kondensacyjnego płaszczu wodnego ściekającego pod działaniem siły ciężkości. Przy małej prędkości parowania (w zamkniętym kontenerze) i małej grubości ścianki płaszczu kontenera proces kondensacji uważa się za laminarny i ciepło przekazywane jest głównie przez płaszcz.

Rozpatrzmy kondensację pary na ściankach (płaszczu) kontenera, przedstawiającego sobą rurę o średnicy D i długości L .

Przywołując teorię Nusselta, który wyliczał ciepło przy kondensacji na pionowych i poziomych metalowych ściankach, określimy masę wody i ilość ciepła, traconego przy kondensacji. Przyjmujemy, że masa kondensacyjna formułuje się w kierunku wysokości h , kontenera o średnicy D . Wtedy,

$$dQ_{cm} = M\Delta h = \alpha(\theta_n - \theta_{cm})LD, \text{ [J]} \quad (2)$$

gdzie:

- L – długość kontenera,
- M – masa kondensacyjna, [m],
- Δh – różnica entalpii, [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$], [kg],
- D – średnica kontenera,
- α – współczynnik przekazywania ciepła podczas kondensacji, [m],
- θ_n – temperatura początkowa kontenera, [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
- θ_{cm} – temperatura kontenera podczas pracy, [K].

Proces kondensacji pary na powierzchniach płaskich łopatek przenośnika ślimakowego można zapisać następująco:

$$dQ_T = 2\alpha(\theta_n - \theta_{cm})F_T, \text{ [J]} \quad (3)$$

gdzie:

- F_T – powierzchnia płaska łopatek, [m^2].

Ciepło całkowite wydzielane przy kondensacji równa się sumie:

$$dQ = dQ_{cm} + dQ_T = \alpha(\theta_n - \theta_{cm})F, \quad (4)$$

gdzie:

- F – powierzchnia wewnętrzna kontenera, [m^2],

Uwzględniając fakt, że połowę kontenera zajmuje woda, otrzymamy:

$$dQ = \alpha(\theta_n - \theta_{cm}) F/2. \text{ [J]} \quad (5)$$

Zależności te można wykorzystywać przy obliczaniu ilości przekazywanego ciepła przez przenośnik ślimakowy. Przyjmujemy, że łopatki ślimaka stanowią powierzchnię płaską pionową, a wał ślimaka jest poziomą rurą o średnicy d , oraz, że wał ślimaka jest w połowie zanurzony w wodzie, natomiast łopatki przemiennie zanurzają się do wody. Wtedy ciepło kondensacji, na części ślimaka stykającego się z parą wodną, wynosi:

$$dQ_{\text{ślim}} = \alpha(\theta_n - \theta_{\text{ślim}})(F_{\text{łop}} + \pi dl)/2. \text{ [J]} \quad (6)$$

gdzie:

- $F_{\text{łop}}$ – dwustronna powierzchnia wszystkich łopatek ślimaka, [m^2],
- d – średnica rury ślimaka, [m],
- l – jej długość, [m].

Współczynnik α określa ilość ciepła oddawaną w sekundzie przez jednostkę powierzchni kontenera, przy zmianie temperatury o jeden stopień, $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$.

Spotykane w literaturze [Kluge, Neuerbauer 1994] wartości współczynnika α , przy kondensacji pary na zwilżanych i niezwilżanych powierzchniach, zmieniają się w dużym zakresie, a mianowicie:

$$4500 < \alpha < 16000$$

Celem zwiększenia dokładności wyliczeń, dla konkretnego procesu cieplnego, należy dokładniej określić wartość współczynnika α . W tym celu, wykorzystujemy teorię liczb podobieństwa, która szeroko jest stosowana w technice cieplnej.

Istota podobieństwa zjawisk fizycznych polega na podobieństwie pewnych wielkości fizycznych o tych samych jednostkach, określających dane zjawisko. W porównywanych podobnych zjawiskach różne wielkości fizyczne posiadają swoją wartość stałą, która powinna być jednakowa dla wszystkich podobnych parametrów. Parametry te (zwane bezwymiarowymi kompleksami lub kryteriami) bywają określone lub wymagają określenia. Kryteria określone nazywają się bazowymi. Określone wynikają z kryteriów bazowych. I tak przy rozpatrywaniu zjawisk cieplnych wykorzystywane jest kryterium (liczba) Nusselta:

$$\text{Nu} = \alpha \ell / \lambda, \quad (7)$$

gdzie:

- α – współczynnik przekazywania ciepła, [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$],
- ℓ – charakterystyczny wymiar, [m],
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Jedną z liczb podobieństwa jest liczba Reynoldsa. Przy jej pomocy można oszacować stosunek sił bezwładności do sił lepkości. Liczba Reynoldsa jest kryterium do wyznaczania charakterystyki przepływu wszelkich płynów nieściśliwych i określana jest następująco:

$$\text{Re} = \frac{l \cdot v}{\nu} = \frac{l \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

gdzie:

- v – prędkość liniowa, [m/s],
- l – charakterystyczny wymiar, [m],
- ν – współczynnik lepkości kinematycznej, [$\text{s} \cdot \text{m}^{-2}$],
- μ – współczynnik lepkości dynamicznej, [$\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Kolejną liczbą podobieństwa jest liczba Prandtla. Wyraża ona stosunek momentu dyfuzyjnego do dyfuzji na drodze termicznej. Definiuje ją się wzorem:

$$\text{Pr} = \nu / \alpha, \quad (9)$$

gdzie:

- ν – współczynnik lepkości kinematycznej, [$\text{s} \cdot \text{m}^2$],
- α – współczynnik termodyfuzji (przewodzenia ciepła), [m/s].

W specjalnych tablicach [Properties of Water and Steam in SI-Units. Springer-Verlag. Berlin-Heid.], podawane są wartości stosunku liczb $\text{Pr}_f / \text{Pr}_w$ dla różnych wartości Re. Tak na przykład, do wyrażenia na Nu wchodzi kryterium Re, które dla zadanych warunków należy wyliczyć. Należy zauważyć, że nawet nieznaczna zmiana parametrów, wchodzących w liczbę Re, istotnie zmieniają jej wartość. Jako przykład w pracy podana jest pewna ilość wartości liczby Re (dla różnych prędkości) a następnie z pomocą kryterium Nu wylicza się współczynnik α .

W tabeli 1 zamieszczono formuły wyliczania liczby (kryterium) Nusselta dla cieczy i gazów przy różnych wartościach liczby Re [Žaukauskas 1972].

Termodynamiczne warunki parowania...

Tabela 1. Formuły na kryterium Nusselta przy różnych wartościach Re
Table 1. Formulas for Nusselt criterion with different Re values

Przedział	Formuła	Wartości Re
1	$Nu = 0,76 Re^{0,4} Pr_f^{0,7} (Pr_f/Pr_w)^p$	10 - 4·10
2	$Nu = 0,52 Re^{0,5} Pr_f^{0,37} (Pr_f/Pr_w)^p$	4·10 - 10 ³
3	$Nu = 0,26 Re^{0,6} Pr_f^{0,37} (Pr_f/Pr_w)^p$	10 ³ - 2·10 ⁵
4	$Nu = 0,26 Re^{0,8} Pr_f^{0,4} (Pr_f/Pr_w)^p$	2·10 ⁵ - 10 ⁷

W tabeli 1 indeks f oznacza ciecz, w - ciało twarde. Przy rozpatrywanej temperaturze stosunek Pr_f/Pr_w jest równy 0,4; współczynnik lepkości kinematycznej $\nu = 0,295 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$, współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0,682 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Należy zauważyć, że nawet nieznacząca zmiana wartości parametrów, wchodzących w Re, istotnie zmienia jej wartość. Jako przykład przytoczymy pewną ilość wyliczonych wartości Re (dla różnych prędkości) i wartości liczby Nu wyliczone z pomocą tabeli 1. Wartości liczb Re i Nu w zależności od prędkości pary przytoczone zostały w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości liczb Re i Nu w zależności od prędkości przepływu pary
Table 2. Re and Nu values in dependence on steam Speer flow

Prędkość V (m/c)	0,001	0,01	0,1	1	5	10
Liczba Re	$17 \cdot 10^2$	$17 \cdot 10^3$	$17 \cdot 10^4$	$17 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^6$	$17 \cdot 10^6$
Liczba Nu	21,94	91,9	365,8	$230 \cdot 10^2$	$836 \cdot 10^2$	$1456 \cdot 10^2$

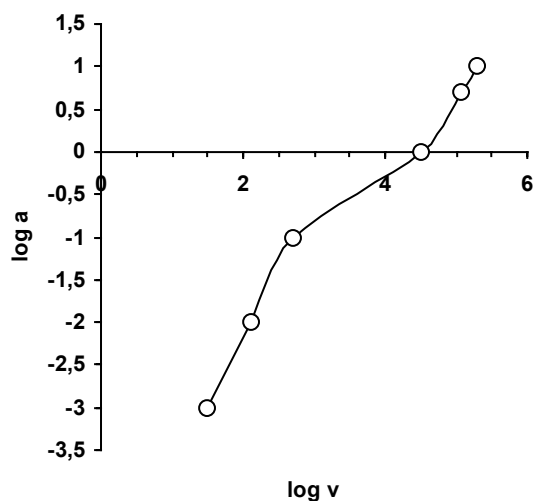
Jako przykład charakterystycznego wymiaru może służyć średnica kontenera $D = 0,5 \text{ m}$, temperatura pary $T_f = 100^\circ\text{C}$, temperatura urządzenia $T_w = 40^\circ\text{C}$. Przy określonej temperaturze liczba $Pr_f = 1,75$; stosunek $Pr_f/Pr_w = 0,4$; kinematyczna lepkość pary $\nu = 0,295 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$, wykładnik potęgowy $p = 0,2$.

W tabeli 3 zamieszczono wartości współczynnika α dla zadanych prędkości pary wodnej, które wyliczono z zależności $Nu = \alpha \ell^{-1}$ zgodnie z tabelą 1.

Tabela 3. Wartości prędkości przepływu pary i współczynnika przekazywania ciepła
Table 3. Values of steam Speer flow and coefficient of heat transfer

Prędkość v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0,001	0,01	0,1	1,0	5	10
Współczynnik α	30	125,5	498,2	$313,7 \cdot 10^2$	$1140 \cdot 10^2$	$1986 \cdot 10^2$

Na podstawie wyliczonych danych sporządzono graficzną zależność współczynnika α od prędkości przepływu pary. Dla wygody graficzną zależność podano w skali logarytmicznej $\log \alpha = f(\log v)$ i zamieszczono na rysunku 1.



Rys. 1. Zależność współczynnika α od prędkości przepływu pary wodnej V
 Fig. 1. Dependence of α coefficient on steam Speer flow V

Jak widać z podanej zależności w zakresie prędkości od 0,1 do 1,0 m/s współczynnik oddawania ciepła wzrasta stosunkowo powoli, to jest wzrost oddawania ciepła poprzez kondensację jest nieznaczny. Ze zwiększeniem prędkości przepływu pary powyżej 1m/s widoczne jest intensywne oddawanie ciepła. Szczególnie istotna różnica w wartościach współczynnika α może wystąpić na obrotowym ślimaku. Podczas obrotu ślimaka w kierunku przepływu pary względna prędkość pary zmniejsza się, w kierunku przeciwnym do obrotu ślimaka prędkość względna przepływu pary zwiększa się. Tym sposobem, zmianą prędkości i kierunku obrotu przenośnika ślimakowego, można zmieniać wartości współczynnika przekazywania ciepła α .

Wnioski

1. Podczas parowania ziemniaków, z wykorzystaniem pary wodnej i gorącej wody, w zamkniętym kontenerze (parowniku), składającym się z przenośnika ślimakowego i cylindrycznej obudowy, występują znaczne straty ciepła spowodowane kondensacją pary wodnej na metalowych częściach przenośnika ślimakowego i jego cylindrycznej obudowy.
2. Szczegółowo przeanalizowany najbardziej złożony proces, strat ciepła spowodowanych kondensacją pary na metalowych powierzchniach, pozwolił na ustalenie wpływu podstawowych reżimów parowania na straty ciepła.

3. Z wyprowadzonej zależności na współczynnik oddawania ciepła, w procesie kondensacji pary na obudowie ślimaka i przenośniku ślimakowym, od prędkości przepływu pary wodnej wynika, że w przedziale prędkości 0,1 do 1,0 m współczynnik oddawania ciepła wzrasta powoli, natomiast po przekroczeniu prędkości powyżej 1,0 m/s występuje szybki wzrost wartości współczynnika.
4. Na wartość współczynnika oddawania ciepła, podczas skraplania pary na częściach metalowych parownika (kontenera), wpływ ma również prędkość względna przepływu pary wodnej związana z kierunkiem obrotu przenośnika ślimakowego.

Bibliografia

- Karl Stephan.** 1992. Heat Transfer in Condensation and Boiling, New-York, p 10-15.
Gerhard Kluge, Gernot Neuerbauer. 1994. Grundlagen der Thermodynamik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlin-Oxford, p 76.
Žukauskas A.A. 1972. Konvektivnyj perenos v teploobmennikach. Moskva, Nauka, s. 273.
Properties of Water and Steam in SI-Units. Springer-Verlag, Berlin-Heid.

THERMODYNAMIC CONDITIONS OF POTATO TREATMENT IN COVERED CONTAINERS

Summary. The work was aimed to study the thermodynamic terms of potato treatment in covered containers. Roughly cut potatoes are blanched. To improve the process efficiency, estimation of the possible condensation heat loss is of certain interest. With this aim in view the heat-balance equation has been set up taking into account the most challenging process of steam condensation on metal surfaces. The dependence between heat transfer factor and steam speed has been established, and speed interval for the least heat transfer rate has been determined.

Key words: potato, container, condensation, heat balance

Adres do korespondencji:

Jan R. Kamiński: e-mail: jan_kaminski@sggw.pl
Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 164
02-787 Warszawa