

UTYLIZACJA CIEPŁA ODPADOWEGO SUSZARNI

Józef Siatka, Mieczysław Mieczyski

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów
Politechniki Wrocławskiej

WSTĘP

Suszenie jest takim procesem, w którym cała doprowadzana energia jest rozpraszana do otoczenia. Deficyt paliw zmusza nas do racjonalizacji ich zużycia. Jednym ze sposobów podniesienia efektywności wykorzystania paliw jest utylizacja ciepła odpadowego systemów. Działanie instalacji utylizacyjnej zależy od potrzeb otaczającego środowiska. Głównym zadaniem rolnictwa jest produkcja żywności i jej konserwacja. Temu celowi można podporządkować funkcjonowanie instalacji utylizacyjnej. Jednym z możliwych rozwiązań jest system składający się z suszarni konwekcyjnej, absorpcyjnej komory chłodniczej i ciepłarni. Proponowany system utylizacyjny służy maksymalnemu wykorzystaniu paliw, intensyfikacji produkcji biosubstancji oraz zmniejszeniu strat żywności poprzez lepszą konserwację w komorze chłodniczej.

SUSZARNIA BĘBNOWA I JEJ SPRAWNOŚĆ

Najpopularniejsze w rolnictwie polskim są suszarnie bębnowe przeznaczone do suszenia pasz. Ponadto urządzenia te, ze względu na uniwersalność, posiadają stosunkowo długi okres wykorzystania w roku (2500 godz.).

W tej sytuacji najbardziej celowe wydaje się wykorzystanie w pierwszej kolejności ciepła odpadowego suszarni bębnowych. Umowna sprawność energetyczna suszarni (brutto) jest określona stosunkiem strumienia ciepła suszenia \dot{Q} w warunkach idealnych do nakładu energii w warunkach rzeczywistych

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{B} W_d + P} \quad (1)$$

\dot{B} - strumień paliwa,

W_d - wartość opałowa paliwa,

P - moc elektryczna do zasilania urządzeń pomocniczych suszarni.

Poprzez warunki idealne rozumie się tu proces adiabatycznego suszenia do zadanej wilgotności końcowej, bez strat, o zupełnym spalaniu paliwa, gdzie substraty i substancja do suszenia wpływają przy temperaturze otoczenia a produkty procesu (suszu, spaliny, para wodna), również wpływają przy temperaturze otoczenia, a woda w nich zawarta znajduje się w stanie pary lub w stanie związanym chemicznie w suszu. Umowna sprawność suszarni netto jest uzależniona od sprawności wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni η_{el}

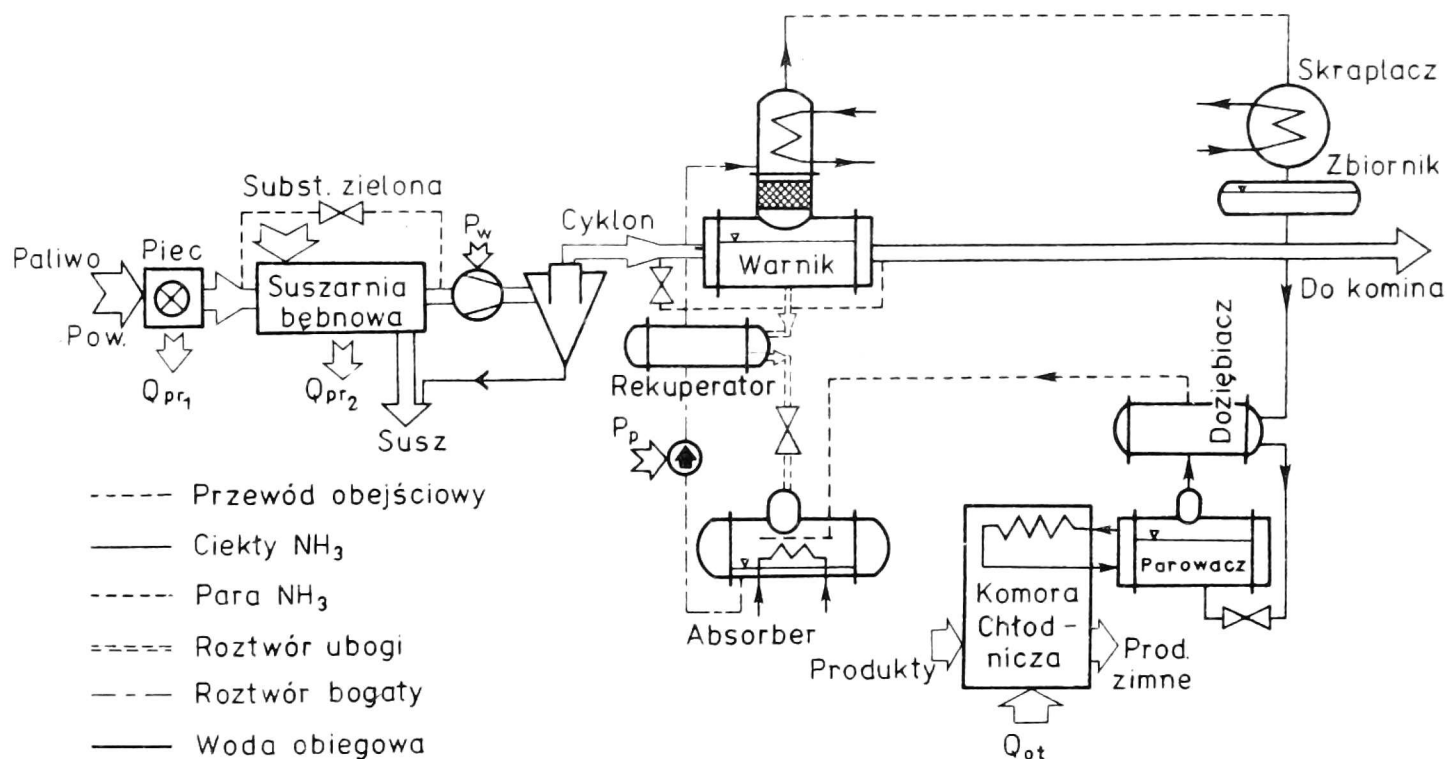
$$\eta_{net} = \frac{\dot{Q}}{B \dot{W}_d + \frac{P}{\eta_{el}}} \quad (2)$$

Dla urządzeń rzeczywistych sprawności te są znacznie mniejsze od jedności.

SKOJARZONY SYSTEM SUSZARNICZO-ZIĘBNY, OPARTY NA SUSZARNI BĘBNOWEJ

Wykorzystując energię spalin współprądowej, konwekcyjnej suszarni bębnowej do napędu ziębiarki absorpcyjnej oziębiającej komorę chłodniczą, uzyska się częściowy odzysk ciepła odpadowego. Taki system suszarniczo-ziębny (SZ) przedstawiono na rysunku 1. Działanie systemu jest następujące:

Wytworzone w piecu gazy spalinowe mieszają się z powietrzem i zasysane przez wentylator wpływają do obracającego się bębna, będącego komorą suszenia. Wilgotny materiał podawany jest współprądowo z czynnikiem suszącym do bębna, gdzie przesuwając się wzdłuż oddaje nadmiar wilgoci. Wsuszony materiał zsypuje się do komory chłodzenia suszu a częściowo, szczególnie drobne cząstki są unoszone z prądem poprzez wentylator do cyklonu, gdzie zachodzi odzielenie gazów spalinowych od resztek suszu. Spaliny o temperaturze ok. 150°C opuszczające cyklon suszarni bębnowej są kierowane do ogrzewania wirnika, przez co ulegają ochłodzeniu do ok. 100°C, a następnie są przetłaczane przez wentylator wyciągowy do komina.



Rys. 1. Skojarzony system suszarniczo-ziębny

Absorpcyjne urządzenie chłodnicze działa dzięki przemianom czynnika obiegowego jakim jest roztwór wody i amoniaku. W wanniku następuje odpędzenie amoniaku z roztworu. Pary amoniaku ulatniające się z wannika przepływają przez rektyfikator do deflegmatora, gdzie podlegają oczyszczeniu z pary wodnej. W czasie tego procesu wodzie chłodzącej jest przekazywane ciepło deflegmacji \dot{Q}_D . Następnie para amoniaku skrapla się w kondensatorze chłodzonym wodą oddając ciepło kondensacji \dot{Q}_K . Ciekły ziębny jest doziębiany w doziębniaku i po zdławieniu zaworem dławiącym do zadanego ciśnienia, odparowuje w parowaczu pobierając ciepło \dot{Q}_O od obiegowego czynnika pośredniego, który wychładza komorę chłodniczą. Zimne pary amoniaku z parowacza przepływają przez doziębniak do absorbera, gdzie są pochłaniane przez roztwór ubogi, który pochodzi z wannika. Na drodze roztworu ubogiego znajduje się rekuperator pozwalający podgrzać wstępnie roztwór bogaty opuszczający absorber. Ciepło absorpcji \dot{Q}_A jest przekazywane do wody chłodzącej. Przepływ roztworu bogatego do wannika jest wymuszony przez pompę obiegową.

Komora chłodnicza może być przeznaczona do przechowywania materiału siewnego, produktów spożywczych w postaci mięsa, nabiału, warzyw i jarzyn. Temperatura w komorze jest uzależniona od jej przeznaczenia.

Przy założeniu, że nie wykorzystuje się ciepła przemian wody chłodzącej absorber, skraplacz i deflegmator, otrzymuje się sprawność energetyczną netto systemu skojarzonego:

$$\eta_{s_1}^{net} = \frac{\dot{Q} + \dot{Q}_o}{\dot{B} W_d + \frac{P + P_p}{\eta_{el}}} \quad (3)$$

gdzie:

\dot{Q} - strumień ciepła suszenia w warunkach idealnych,

\dot{Q}_o - wydajność ziębnicza komory,

P, P_p - moc napędu urządzeń pomocniczych, pomp.

Przyrost sprawności w stosunku do prostego systemu suszarniczego przy pominięciu mocy napędowej pomp wynosi:

$$\Delta \eta_1^{net} = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{B} W_d + \frac{P}{\eta_{el}}} \quad (4)$$

Jak widać, w wyniku skojarzenia, sprawność systemu powiększa się o udział wydajności ziębniczej komory.

SKOJARZONY SYSTEM SUSZARNICZO-ZIĘBNO-GRZEJNY (SZG)

Ziębiarka absorpcyjna jest źródłem ciepła odpadowego. Temperatura absorbera, deflegmatora i kondensatora może wynosić 50÷70°C. W związku z tym, istnieje możliwość wykorzystania ciepła przemian wody chłodzącej te podzespoły. Dla zapewnienia maksymalnego wykorzystania paliwa w systemie suszarni bębnowej, proponuje się skojarzenie systemu suszarniczego z ciepłarnią. Poza wykorzystaniem ciepła odpadowego ziębiarki absorpcyjnej planuje się tu również dalsze wykorzystanie ciepła odpadowego spalin, które w poprzednim systemie po wyjściu z wernika uchodziły do atmosfery. Schemat skojarzonego systemu suszarniczego-ziębno-grzejnego przedstawiono na rysunku 2. W stosunku do systemu poprzednio opisanego dochodzi tu wymiennik ciepła spaliny-woda, usytuowany za wernikiem oraz ciepłarnia. W wymienniku tym spaliny będą ochładzane w zakresie 100÷50°C. Wystąpi tu intensywna kondensacja pary wodnej znajdującej się w spalinach.

W związku z obecnością związków siarki SO₂ i SO₃ powstanie roztwór agresywny działający korodująco na wymiennik ciepła. W celu ochrony przed korozją planuje się dwa alternatywne rozwiązania:

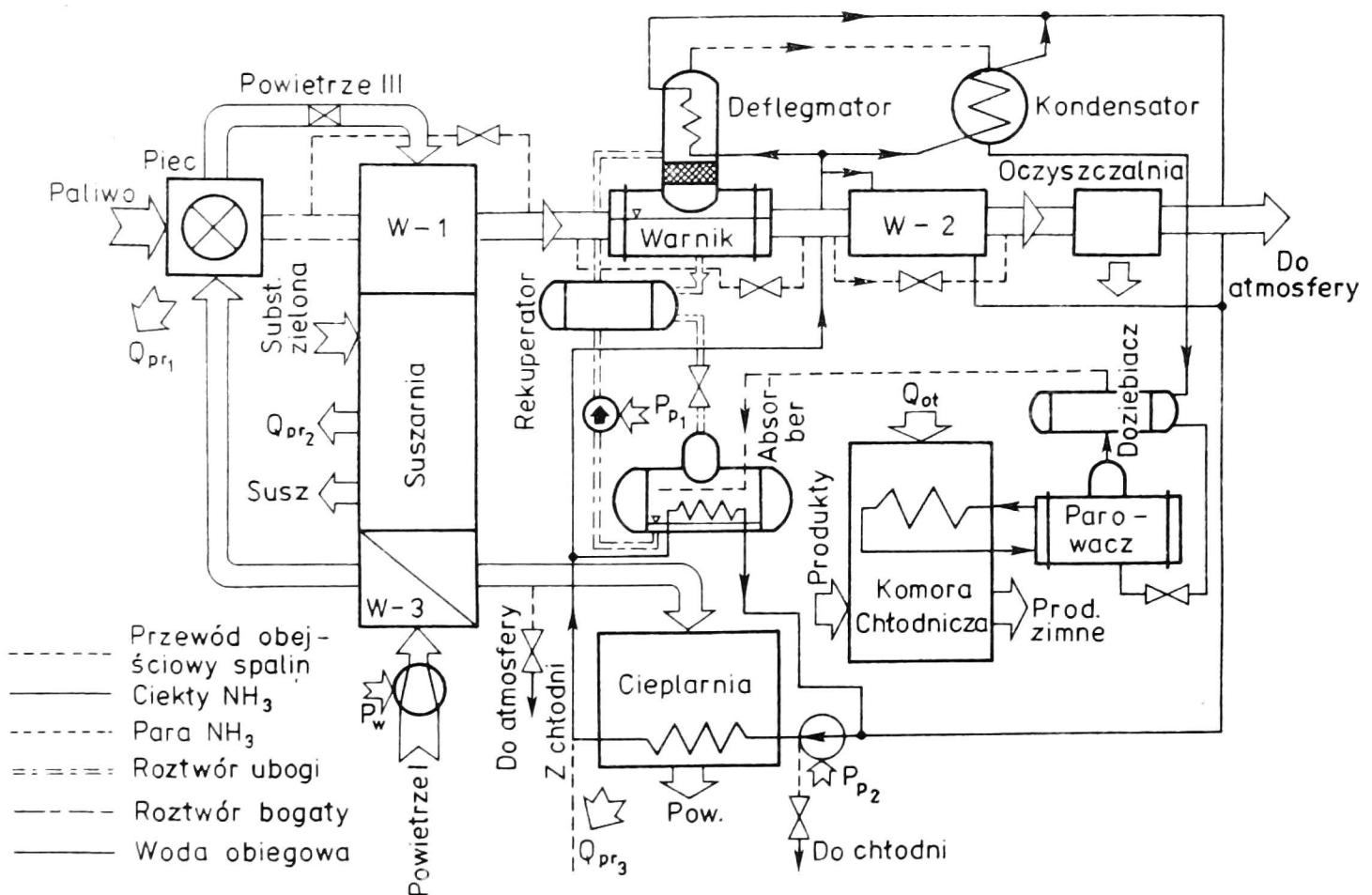
1) konstrukcja wymiennika nierdzewnego lub pokrytego warstwą odporną na działanie korozji,

$$\Delta \eta_2^{\text{net}} = \frac{\dot{Q}_o + \dot{Q}_c}{\dot{B} W_d + \frac{P_w}{\eta_{el}}} \quad (7)$$

W tym układzie sprawność η_{s2}^{net} może wynosić znacznie powyżej stu procent, m.in. dzięki działaniu ziębiarki jako pompy ciepła oraz podwójnemu wykorzystaniu ciepła: do suszenia a następnie do napędu ziębiarki. Na podstawie wzoru (7) widać, że w wyniku skojarzenia, sprawność netto systemu SZG w stosunku do sprawności suszarni powiększa się o udział wydajności ziębniczej komory \dot{Q}_o i mocy termicznej cieplarni \dot{Q}_c .

SKOJARZONY SYSTEM SUSZARNICZO-ZIĘBNO-GRZEJNY OPALANY NADCIŚNIENIOWO (NSZG)

W celu dalszej intensyfikacji procesów w skojarzonym systemie oraz podwyższenia ich efektywności a także lepszej ochrony środo-



Rys. 3. Schemat skojarzonego systemu suszarniczego-ziębno-grzejjego opalanego nadciśnieniowo

wiska proponuje się zastosowanie spalania przy nadciśnieniu oraz pośredniego suszenia substancji. Schemat systemu przedstawiono na

rysunku 3. Poprzez nadciśnieniowe spalanie paliwa w komorze spalania uzyskuje się spaliny, które w wymienniku ciepła W-1 (powietrze III - spaliny) ulegają częściowemu ochłodzeniu. Tak podgrzane powietrze III służy jako czynnik suszący produkty zielone w suszarni. Następnie powietrze to podgrzewa w wymienniku W-3 powietrze świeże I, tłoczone przez wentylator, a dalej służy jako powietrze nawiewne do ogrzewania i klimatyzacji cieolarni.

Powietrze świeże I po wstępnym podgrzaniu w wymienniku W-3, ochładza pancerz komory spalania. Dalej strumień gorącego powietrza I dzieli się na powietrze II do spalania oraz powietrze III do suszenia. Spaliny po częściowym ochłodzeniu w wymienniku W-1 są kierowane do warnika ziębiarki. Warnik pozwala na dalsze ich ochłodzenie do temperatury $90 \div 100^{\circ}\text{C}$. Dalszym ogniwem wychładzającym spaliny jest wymiennik W-2. Opuszczające wymiennik spaliny o temp. $40 \div 50^{\circ}\text{C}$, po oczyszczeniu wypływają do otoczenia. Ziębiarka absorpcyjna pracuje tu w układzie opisanym poprzednio. Spalanie nadciśnieniowe pozwala na zastosowanie paleniska fluidalnego opalanego paliwami odpadowymi, jak miał węglowy o niskiej wartości opałowej itp. Z kolei palenisko fluidalne umożliwia częściowe oczyszczenie spalin ze związków siarki, poprzez wprowadzenie materiałów wiążących siarkę już w komorze paleniskowej. Jednym ze znanych związków tego typu jest wapień. Zubożone w siarkę spaliny powinny tworzyć mniej agresywny roztwór przy kondensacji pary wodnej na powierzchniach wymienników ciepła. Dalsze oczyszczenie spalin ze związków siarki można przeprowadzić metodą adsorpcji poprzez węgiel aktywny. Metoda ta nadaje się do spalin o temp. niższej od 150°C , a więc w naszym przypadku przed wymiennikiem W-2. Zaletą spalania nadciśnieniowego jest również usytuowanie wentylatora podmuchu na wlocie powietrza I. Dzięki sprężaniu powietrza o niższej temperaturze niż w przypadku gorących spalin, nakład mocy do napędu wentylatora P_w będzie mniejszy (w stosunku do poprzednich systemów). Praca wentylatora na czystym czynniku zwiększy wydajnie jego trwałość w porównaniu z pracą w innych systemach. Suszenie pośrednie substancji zielonej strumieniem czystego powietrza, wpłynie dodatnio na jakość suszu. Rozwiązanie takie jest już stosowane w USA [4], a w naszych warunkach zarzucone ze względu na niższą sprawność termiczną niż w procesie bezpośrednim. Dla tego systemu strata ta będzie odzyskana poprzez ochładzanie spalin w dalszych urządzeniach (warnik, wymiennik W-2).

OBLICZENIE SPRAWNOŚCI SYSTEMÓW SKOJARZONYCH

Dla suszarni bębnowej SB-1,5 o parametrach podanych w tabeli 1 dokonano identyfikacji obiegu ziębiarki absorpcyjnej na wykresie entalpia-stężenie dla $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ [7].

T a b e l a 1

Parametry eksploatacyjne suszarni bębnowej
SB-1,5 podczas suszenia trawy

Wielkość	Symbol	Wartość liczbowa	Jednostka
Strumień suszu	\dot{m}_s	0,45	kg/s
Strumień odparowanej wody	\dot{m}_w	0,74	kg/s
Strumień spalonego paliwa (węgla)	\dot{B}	0,113	kg/s
Moc silników elektr.	P	239	kW
Wartość opałowa paliwa	W_d	29,33	MJ/kg
Temperatura spalin na wylocie z bębna	t_1	150	°C
Sprawność termiczna suszarni brutto	η_b	71,9	%
Strumień spalin na wylocie z suszarni	\dot{V}	7,83	m ³ /s
Sprawność suszarni netto	η_{net}	58	%

Podstawowe parametry obiegu ziębiarki zamieszczono w tabeli 2.

Jak wynika z obliczeń, strumień ciepła przekazany do wurnika \dot{Q}_w wynosi 9,1% całkowitej energii spalin. Po wykorzystaniu obliczonych poprzednio wielkości określono, że sprawność netto skojarzonego systemu "SZ" wynosi:

$$\eta_{s_1}^{net} = 61,3\%$$

co stanowi wzrost o 3% w stosunku do sprawności suszarni bębnowej. Po wykorzystaniu ciepła odpadowego ziębiarki (\dot{Q}_A , \dot{Q}_D , \dot{Q}_K) oraz ciepła dochłodzenia spalin (do temperatury $t_3 = 45^\circ\text{C}$)

$$\dot{Q}_{Ds} = 1856 \text{ kW.}$$

T a b e l a 2

Parametry teoretycznego obiegu ziębiarki absorpcyjnej

Wielkość	Symbol	Wartość liczbowa	Jednostka
Temperatura spalin na wylocie z warknika	t_2	100	$^{\circ}\text{C}$
Strumień ciepła prze- kazany do warknika	\dot{Q}_w	265	kW
Strumień ziębnika	\dot{m}_z	0,114	kg/s
Wydajność ziębnicza	\dot{Q}_o	133	kW
Strumień ciepła deflegmacji	\dot{Q}_D	-35	kW
Strumień ciepła kondensacji	\dot{Q}_K	-134	kW
Strumień ciepła absorpcji	\dot{Q}_A	-225	kW
Efektywność ziębienia	ξ_z	0,504	-
Temperatura początkowa odparowania NH_3	t_o	-10	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura wody chłodzącej	T_w	27	$^{\circ}\text{C}$

w celu ogrzewania cieplarni, sprawność netto systemu "SZG" wynosi:

$$\eta_{s_2}^{\text{net}} = 120\%.$$

Zastosowanie ziębiarki wpłynęło na wzrost sprawności o 13% natomiast dalsze dochłodzenie spalin spowodowało wzrost o 45%. W stosunku do prostego systemu suszarniczego stanowi to ogólnie przyrost sprawności o 58%.

OBLICZENIE EFEKTÓW EKONOMICZNYCH W SKALI KRAJU,
WYNIKAJĄCYCH Z ZASTOSOWANIA SKOJARZONYCH SYSTEMÓW SUSZARNICZYCH

Według przeprowadzonego rozeznania, w Polsce pracuje obecnie ok. 300 suszarek bębnowych. Większość z nich, to suszarki produkcji krajowej, zbliżone co do wielkości i rodzaju do opisanej tu suszarni SB-1,5. Można więc stwierdzić, że suszarka ta jest reprezentatywna dla eksploatowanych w kraju suszarek bębnowych. Dla wartości średniej rocznego czasu pracy suszarni $\tau_{gr} = 2500$ godz., odzyskany w ciągu roku w skali kraju strumień ciepła wynosiłby:

$$\dot{Q}_{\text{odz/rok}} = \tau_{\text{sr}} n \dot{Q}_{\text{nap}} = 6,876 \cdot 10^9 \text{ MJ/rok}$$

gdzie:

n - zainstalowana liczba suszarek,

\dot{Q}_{nap} - napędowy strumień ciepła dla jednej suszarni,

τ_{sr} - obliczony przyrost sprawności,

co w przeliczeniu na paliwo umowne o wartości opałowej W_u daje odzysk:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{\text{odz/rok}}}{W_u} = \frac{6,876 \cdot 10^9}{29,33 \cdot 10^3} = 2,344 \cdot 10^5 \text{ t}_{\text{pal um/rok}}$$

Oprócz oszczędności w paliwie, zastosowanie w praktyce proponowanych systemów pozwoli na lepsze przechowywanie produktów spożywczych (w komorach chłodniczych) i zmniejszenie strat żywności dotychczas występujących.

Ponadto, budowa ciepłarni ogrzewanych ciepłem odpadowym wpłynie na wzrost produkcji biosubstancji w kraju i pozwoli lepiej zaopatrywać rynek w produkty zielone. Dodatkowym aspektem będzie ochrona środowiska przed zanieczyszczeniem termicznym od emitowanych w atmosferę gorących spalin.

ZAPEWNIENIE CIĄGŁOŚCI PRACY SYSTEMU SKOJARZONEGO

Suszarnie bębnowe pracują średnio ok. 8 miesięcy w roku, od początku maja (suszenie zielonek) do końca grudnia (suszenie wytlóków buraczanych). Przez pozostałe miesiące w roku obiekty te stoją nieczynne. W przypadku systemów skojarzonych należałoby zapewnić zasilanie komory i ciepłarni na okres, gdy suszarnie nie pracuje. W obydwu systemach można to łatwo osiągnąć poprzez zmniejszenie wydajności cieplnej pieca, która wystarczy do napędu wurnika ziębiarki. Spaliny muszą wtedy zasilać bezpośrednio wurnik z pominięciem suszarni, poprzez przewód obejściowy.

Problemy technologiczne związane z pracą takich systemów utylizacyjnych będą przedmiotem dalszych prac badawczych.

WNIOSKI

1. Zastosowanie w kraju skojarzonego systemu ziębno-grzejnego do suszarni bębnowych pozwoliłoby na odzysk około 0,23 mln ton paliwa umownego rocznie, co wyraża się oszczędnością ok. 460 mln zł nakładów inwestycyjnych na gospodarkę paliwową.

2. Skojarzony system pozwala na uruchomienie przy jednej suszarce bębnowej o wydajności 1,5 t suszu/h, komory chłodniczej o wydajności ziębniczej ok. 130 kW oraz cieplarni o wydajności cieplnej ok. 2,3 MW.

3. Ze wstępnych rozważań wynika, że możliwe jest tworzenie wielkich kombinatów o równoległej strukturze suszarni bębnowych sprzężonych z dużymi chłodniami i cieplarniami.

4. Dla oceny celowości utylizacji ciepła odpadowego suszarni bębnowych należy przeprowadzić analizę techniczno-ekonomiczną uwzględniającą koszty instalacji odzyskowych, zysk wynikający z oszczędności energii, ochrony środowiska, dodatkowej produkcji biosubstancji i zmniejszenia strat żywności a także koszty eksploatacyjne.

Praca została wykonana we współpracy z Instytutem Mechanizacji Rolnictwa Akademii Rolniczej we Wrocławiu, w ramach międzyresortowego problemu badań MR I. 10 koordynowanego przez Politechnikę Poznańską.

LITERATURA

1. Haraz D. T., Janovskij G. A., Gavrilova Ł. V.: Ispolzovanie vtoricznych energoresursov v absorbcionnych chołodilnych ustanovkach, Promslennaja energetika 1976 nr 10.
2. Kalisiewicz A.: IMER, BI 1966 nr 9.
3. Maczek K., Mieczyski M., Eichler J., Siatka J., Warwaszyński Z.: Analiza systemów absorbcyjnych w urządzeniach chłodniczych, Raport I-20/SPR-23/79 - Politechnika Wrocławska.
4. Pabis S.: Suszenie płodów rolnych, Warszawa 1965.
5. Racjonalizacja użytkowania paliw i energii w przemyśle, PAN, Ossolineum, Wrocław 1978.
6. Rago W.: Problemy odzyskiwania energii odpadowej w świetle bilansu energetycznego Polski, Gosp. Paliw. i Energią, 1980 nr 1.
7. Siatka J., Mieczyski M.: Skojarzone systemy ziębno-grzejne. Wykorzystanie ciepła odpadowego suszarni. Raport I-20/SPR nr 36/79.
8. Suson S. P.: Racjonalne ispolzovanie vtoricznych energeticeskich resursov - vaznaja zadaca desjatoj pjatiletki - Promyslennaja energetika, 1976 nr 10.

Юзеф Сятка, Мечислав Мечински

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДЯЩЕГО ТЕПЛА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СУШИЛЬНИЦ

Р е з ю м е

Описываются способы утилизации отходящего тепла сельскохозяйственных сушильных машин при помощи абсорбционных холодильников. Сопряженные, охлаждающе-нагревные системы позволяют интенсифицировать продукцию биовещества и создать условия для консервации продуктов. Предложено структуру будущей системы со сгоранием при сверхдавлении и промежуточным сушением, имеющей перевосходство над системами опирающимися на существующих объектах. Расчитано теоретическую эффективность системы для некоторых экспериментальных данных. Оценено рекуперацию условного топлива в Польше, возможную после применения предложенных утилизационных установок к всем барабанным сушильным машинам.

Józef Siatka, Mieczysław Mieczyski

UTILIZATION OF WASTE HEAT IN AGRICULTURAL DRIERS

S u m m a r y

Methods of waste heat utilization in agricultural driers by means of absorption refrigerators were discussed in the paper. Coupled cooling-heating system allows to intensify the production of biosubstance and forms suitable conditions for food preservation. The future overpressure fired system with an indirect drying is proposed, as it prevails relatively the other systems based on existing driers. Theoretical efficiency of the systems was computed for some experimental results. Recovery of conventional fuel was estimated for the whole country, obtainable if all the drum driers would be equipped with a system for waste heat utilisation.