

**Energooszczędne suszenie w
suszarni z odzyskiem ciepła i zintegrowanym systemem odpylania
/dane badawcze/**

I. POMIARY PROCESÓW SUSZENIA ZBOŻA W WYBRANYCH SUSZARNIACH

W celu oszacowania procesów suszenia zboża oraz warunków w istniejących i pracujących wybranych suszarniach przeprowadzono pomiary:

- temperatury powietrza suszącego,
- strumieni powietrza suszącego,
- ciśnienia powietrza w suszarni,
- wilgotności powietrza suszącego.

Miejsca wykonywanych pomiarów dostosowane były do możliwości technicznych ich przeprowadzenia w poszczególnych suszarniach. Celem anonimizacji danych, miejsca lokalizacji suszarni określono odpowiednio jako lokalizacje A,B,C,D i E.

1. Zakres pomiarów

Pomiary istniejących suszarni przeprowadzono w celu określenia warunków hydraulicznych pracy układu powietrznego oraz warunków termodynamicznych zachodzących procesów suszenia. Pomiary prowadzono głównie w trakcie realizowanych procesów produkcyjnych. Do szczegółowego oszacowania warunków hydraulicznych pracy suszarni przeprowadzono pomiary przepływu powietrza dla suszarni wypełnionej zbożem podgrzanym do temperatury 30÷35°C, bez dalszego podgrzewania w trakcie pomiarów. Pomiary własności termodynamicznych powietrza i ich zmiany w trakcie procesów suszenia przeprowadzono na istniejących obiektach w trakcie ich pracy.

2. Metodyka pomiarów i obliczeń

2.1. Pomiary i obliczenia strumieni powietrza

Strumienie powietrza mierzono na wlocie do suszarni oraz na wylotach z rozdzielaczy daszkowych. Pomiary te wykonywano elektronicznym anemometrem skrzydełkowym ϕ 100 typu LCA 301 firmy Airflow.

Mierzono średnią prędkość powietrza przepływającego przez powierzchnie pomiarowe - otwory. Strumienie powietrza obliczano ze wzorów:

- dla otworów wlotowych do suszarni:

$$V = e \cdot F_1 \cdot w_{sr} \quad m^3/s \quad (1.1)$$

$$V = e \cdot F_1 \cdot w_{sr} \cdot 3600 \quad m^3/h \quad (1.2)$$

gdzie:

e - współczynnik uwzględniający warunki dopływu powietrza do otworu wlotowego (czerpni) od strony napływu powietrza, $e = 0,71 \div 0,85$;

F_1 - powierzchnia pomiarowa (brutto) otworu pomiarowego, m^2 ;

w_{sr} - zmierzona, średnia prędkość napływu powietrza na powierzchnię pomiarową, m/s .

- dla otworów wylotowych z wkładów daszkowych

$$V = w_{sr} \cdot \frac{F_1 + F_2}{2} \quad m^3/s \quad (1.3)$$

$$V = w_{sr} \cdot \frac{F_1 + F_2}{2} \cdot 3600 \quad m^3/h \quad (1.4)$$

w którym:

w_{sr} - średnia prędkość wypływu powietrza z otworu, m/s;

F_1 - powierzchnia pomiarowa (brutto) otworu pomiarowego, m²;

F_2 - powierzchnia netto (czynna) wolna dla przepływu powietrza, m².

2.2. Pomiary temperatury powietrza

Temperaturę powietrza mierzono przyrządem pomiarowym TESTO 400 firmy TESTOTERM z sondami do pomiaru temperatury (termopara) o zakresie pomiarowym (-20)÷(+180)°C.

Pomiary przeprowadzono równocześnie dwoma sondami. Pierwsza sonda – „sucha”, mierzyła temperaturę termometru suchego powietrza. Druga sonda – „mokra”, mierzyła temperaturę termometru mokrego. Element pomiarowy sondy drugiej (mokrej) zwilżony był wodą destylowaną (zdemineralizowaną). Odczyty dokonywane były po ustaleniu się wskazań temperatury dla obu sond pomiarowych.

Pomiary temperatury powietrza sondami „suchą” i „mokrą” wykonano w celu wyznaczenia wilgotności powietrza metodą psychrometryczną.

2.3. Pomiary i obliczenia wilgotności powietrza

Wilgotność względną powietrza wyznaczano metodą psychrometryczną dokonując pomiarów temperatury powietrza „suchego” i „mokrego”. Wilgotność względną powietrza φ wyznaczano w oparciu o wskazanie temperatury powietrza suchego (t_s) i różnicę pomiędzy wskazaniami termometru suchego i mokrego ($t_s - t_m$).

Zawartość wilgoci x w powietrzu wilgotnym wyznaczano ze wzoru:

$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_{on}}{b - \varphi \cdot p_{on}} \quad \frac{kg}{kg_{ps}} \quad (1.5)$$

w którym:

φ - wyznaczona metodą psychrometryczną wilgotność względna powietrza, %,

p_{on} – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia ($\varphi = 1$), Pa,

b – ciśnienie atmosferyczne, Pa.

2.4. Pomiary ciśnienia powietrza w suszarni

W suszarniach mierzono ciśnienia statyczne powietrza. Pomiary wykonywano przyrządem pomiarowym TESTO 400 firmy TESTOTERM z elektronicznym przetwornikiem ciśnienia, posiadającym świadectwo wzorcowania nr 00988961 (protokół kalibracji) wydane przez producenta urządzenia służącym do pomiarów różnicy ciśnień. Mierzono różnicę ciśnienia powietrza w komorze suszarni i na zewnątrz.

3. Wyniki pomiarów i obliczeń

3.1. Suszarnia w lokalizacji A

Suszarnia w lokalizacji A przewidziana jest do suszenia 13,3 t/h (320t/dobę) kukurydzy. Suszarnia posiada 24 sekcje z czego 5 z nich są to sekcje chłodzące. Z części chłodzącej powietrze zasysane jest do komory z palnikami gazowymi i podgrzane razem z zasysanym powietrzem zewnętrznym napływa do sekcji suszących.

Pomiary suszarni wykonano w celu ustalenia warunków hydraulicznych pracy suszarni. Pomierzono:

- strumienie powietrza przepływającego przez sekcje suszące na poszczególnych poziomach suszarni,
- strumienie powietrza przepływającego przez sekcje chłodzące,
- strumienie powietrza zewnętrznego zasysanego do suszarni,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze za sekcjami chłodzenia,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze przed wentylatorem na różnych poziomach za sekcjami suszenia.

Pomiary strumieni powietrza w suszarni:

Prędkości powietrza przepływającego przez suszarnię mierzono na wylotach z wkładów daszkowych do komory przed wentylatorem. Pomierzono prędkości powietrza przepływającego przez wszystkie wyloty z wkładów daszkowych do komory przed wentylatorem. Prędkości te uśredniano dla wylotów na wszystkich poziomach suszenia. Na poziomach I-III jest to 40 wylotów daszkowych, zaś na poziomie IV 50 wylotów.

Strumienie powietrza obliczono ze wzoru (1.3) przyjmując $F_1=F_2$. Powierzchnia pojedynczego wylotu wynosi średnio 0,03 m². Sumaryczna powierzchnia wylotów daszkowych na poziomach I-III wynosi zatem 1,2 m² dla każdego poziomu, natomiast na poziomie IV 1,5 m². Z uwagi na nieregularne wyloty powietrza (powierzchnia złożona –trójkąt i prostokąt) i niedokładności pomiaru prędkości wprowadzono do wzoru (1.3) współczynnik korygujący $\varepsilon = 0,85$.

Wyniki pomiarów strumieni powietrza:

Tabela 1.1. Strumienie powietrza wywiewanego przepływającego przez poszczególne poziomy części suszącej.

Nr poziomu suszarni	prędkość powietrza wypływającego z tuneli daszkowych do komory wentylatora w	średnia prędkość powietrza \bar{w}	Strumień powietrza V
	[m/s]	[m/s]	[m ³ /h]
I	9,5÷10	9,6	37325
II	8,8÷10,1	9,5	36936
III	9,4÷10,6	9,9	38491
IV	9,4÷12,4	10,7	52002
Strumień powietrza wywiewanego przez wentylator $V = V_I+V_{II}+V_{III}+V_{IV} =$			164754

Strumień powietrza chłodzącego zboże obliczono ze wzoru (1.1). Pomierzona prędkość przepływu powietrza $w_{sr}=3,98$ m/s a powierzchnia, przez którą przepływało powietrze $F=2,96$ m². Współczynnik $e=0,84$. Zatem:

$$V_{CH} = 2,96 \cdot 3,98 \cdot 0,84 \cdot 3600 = 35625 \frac{m^3}{h}$$

Strumień powietrza chłodzącego zasysany do komory grzewczej stanowił ok. 22% strumienia powietrza suszącego.

Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej pomierzono na czerpniach zainstalowanych w ścianach obudowy komory. Średnią prędkość powietrza na czerpniach pomierzona anemometrem wynosiła $w_{sr}=2,21$ m/s, zaś ich powierzchnia $F=17,9$ m². Dla tych warunków prędkości średniej współczynnik $e=0,8$. Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej wynosi:

$$V_z = 2,21 \cdot 17,9 \cdot 0,8 \cdot 3600 = 114000 \frac{m^3}{h}$$

Różnica pomiędzy strumieniami powietrza wywiewanego przez wentylatory i powietrza chłodzącego wynosi:

$$V'_z = 164754 - 35625 = 129129 \frac{m^3}{h}$$

Taki strumień powietrza zewnętrznego przepływa do komory grzewczej.

Przez nieszczelności w obudowie komory grzewczej napływa powietrze w strumieniu:

$$V_{zN} = V'_z - V_z = 129129 - 114000 = 15129 \frac{m^3}{h}$$

Powietrze zewnętrzne napływające do komory grzewczej przez nieszczelności w jej obudowie stanowi ok. 11% całkowitego strumienia powietrza zewnętrznego i ok. 9% całkowitego strumienia powietrza suszącego.

Pomiary ciśnienia powietrza w suszarni:

Pomiary ciśnienia powietrza, podciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego, przeprowadzono w komorze na ssaniu wentylatorów wywiewnych oraz w komorze za sekcjami chłodzenia.

Pomierzone podciśnienia wynosiły:

Tabela 2.2. Pomierzone wartości podciśnienia w suszarni.

Nazwa komory	Pomierzone podciśnienie komorze
	p
	[Pa]
komora chłodzenia	120
komora na ssaniu wentylatora:	
poziom I	480
poziom II	500
poziom III	515
poziom IV	520

Straty ciśnienia na wlocie i wylocie z wentylatorów:

Do transportu powietrza suszącego zastosowano trzy wentylatory osiowe zabudowane w kanałach o średnicy $\phi 1200$ mm. Strumienie powietrza transportowanego przez jeden wentylator wynoszą:

$$V = \frac{V}{3} = \frac{1647545}{3} = 54918 \frac{m^3}{h}$$

Prędkość powietrza na wlocie i wylocie z wentylatora wynosi ok. 13,5 m/s, zatem ciśnienie dynamiczne wynosi:

$$p_d = \frac{w_{sr}^2 \cdot \rho}{2} = \frac{13,5^2 \cdot 1,2}{2} = 109 Pa$$

Współczynniki oporów miejscowych wynoszą odpowiednio $\zeta_1=0,5$ na wlocie i $\zeta_2=1$ na wylocie. Sumaryczne opory powietrza na wlocie i na wylocie z wentylatora wynoszą:

$$\Delta p_w = (\zeta_1 + \zeta_2)p_d = (0,5 + 1)109 \cong 164 Pa$$

3.2. Suszarnia w lokalizacji B

Suszarnia w lokalizacji B przewidziana jest do suszenia 16,7 t/h (400 t/dobę) kukurydzy. Suszarnia posiada 28 sekcji z czego 5 to sekcje chłodzące. Z części chłodzącej powietrze zasysane jest do komory podgrzewania powietrza zewnętrznego i razem napływa do sekcji suszących.

Pomiary suszarni wykonano w celu ustalenia warunków hydraulicznych pracy suszarni. Pomierzono:

- strumienie powietrza przepływającego przez sekcje suszące na poszczególnych poziomach suszarni,
- strumienie powietrza przepływającego przez sekcje chłodzące,
- strumienie powietrza zewnętrznego zasysanego do suszarni,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze za sekcjami chłodzenia,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze przed wentylatorem na różnych poziomach za sekcjami suszenia.

Pomiary strumieni powietrza w suszarni:

Strumień powietrza chłodzącego:

Strumień powietrza chłodzącego obliczono ze wzoru (1.1). Pomierzona prędkość przepływu powietrza $w_{sr}=5,64$ m/s a powierzchnia, przez którą przepływało powietrze $F=3,02$ m². Współczynnik $e=0,85$. Zatem:

$$V_{CH} = 5,64 \cdot 3,02 \cdot 0,85 \cdot 3600 = 52120 \frac{m^3}{h}$$

Strumień powietrza chłodzącego zasysany do komory grzewczej stanowił ok. 28% strumienia powietrza suszącego.

Strumień powietrza zewnętrznego:

Powietrze zewnętrzne zasysane jest przez czerpnie, za którymi zainstalowane są nagrzewnice wodne. Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej pomierzono na czerpniach zainstalowanych w ścianach obudowy komory. Średnią prędkość powietrza na czerpniach pomierzona anemometrem wynosiła $w_{sr}=2,1$ m/s, zaś ich powierzchnia $F=22$ m². Dla tych warunków prędkości średniej współczynnik $e=0,81$. Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej wynosi:

$$V_z = 2,1 \cdot 22 \cdot 0,81 \cdot 3600 = 134719 \frac{m^3}{h}$$

Strumień powietrza suszącego:

Strumień powietrza suszącego jest sumą strumieni powietrza zewnętrznego i chłodzącego i wynosi:

$$V_s = V_z + V_{CH} = 134719 + 52120 = 186839 \frac{m^3}{h}$$

Pomiary ciśnienia powietrza w suszarni:

Pomiary ciśnienia powietrza, podciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego, przeprowadzono w komorze na ssaniu wentylatorów wywiewnych oraz w komorze za sekcjami chłodzenia.

Tabela 2.3. Pomierzone wartości podciśnienia w suszarni.

Nazwa komory	Pomierzone podciśnienie komorze
	p
	[Pa]
komora cyrkulacji	330
komora na ssaniu wentylatorów:	
poziom I	320
poziom II	470
poziom III	470
poziom IV	480
poziom V	510
poziom VI	580

Straty ciśnienia na wlocie i wylocie z wentylatorów:

Do transportu powietrza suszącego zastosowano trzy wentylatory osiowe zabudowane w kanałach o średnicy $\phi 1200$ mm. Strumienie powietrza transportowanego przez jeden wentylator wynoszą:

$$V = \frac{V_s}{3} = \frac{186839}{3} = 62280 \frac{m^3}{h}$$

Prędkość powietrza na wlocie i wylocie z wentylatora wynosi ok. 15,3 m/s, zatem ciśnienie dynamiczne wynosi:

$$p_d = \frac{w_{sr}^2 \cdot \rho}{2} = \frac{15,3^2 \cdot 1,2}{2} = 140 Pa$$

Współczynniki oporów miejscowych wynoszą odpowiednio $\zeta_1=0,5$ na wlocie i $\zeta_2=1$ na wylocie. Sumaryczne opory powietrza na wlocie i na wylocie z wentylatora wynoszą:

$$\Delta p_w = (\zeta_1 + \zeta_2) p_d = (0,5 + 1) 140 \cong 210 Pa$$

Parametry powietrza:

W trakcie pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego była w zakresie $7 \div 12$ °C.

Pomierzone parametry powietrza w suszarni zamieszczono w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Parametry powietrza wywiewanego przepływającego przez poszczególne poziomy części suszącej.

Lp.	Miejsce pomiaru	Temperatura termometru		Wilgotność względna	Zawartość wilgoci
		suchego	mokrego		
		t_s [°C]	t_m [°C]	φ [%]	x [g/kgps]
1.	taras I	50,2	27	16	12,5
2.	taras III	51	37,4	41	35
3.	taras IV	50,1	38,2	49	40
4.	taras V	42,5	35,2	62	34
5.	taras VI	36	32,9	82	31
6.	komora recyrkulacji	35,5	21,2	28	10

3.3. Suszarnia w lokalizacji C

Suszarnia w lokalizacji C przewidziana jest do suszenia 16,7 t/h (400 t/dobę) kukurydzy. Suszarnia posiada 28 sekcji z czego 5 sekcję są chłodzącymi. Z części chłodzącej powietrze zasysane jest do komory z palnikami gazowymi i podgrzane razem z zasysanym powietrzem zewnętrznym napływa do sekcji suszących.

Pomiary suszarni wykonano w celu ustalenia warunków hydraulicznych pracy suszarni. Pomierzono:

- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze za sekcjami chłodzenia,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze przed wentylatorem na różnych poziomach za sekcjami suszenia.

Pomiary strumieni powietrza w suszarni:

Pomiary ciśnienia powietrza, podciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego, przeprowadzono w komorze na ssaniu wentylatorów wywiewnych oraz w komorze za sekcjami chłodzenia.

Tabela 2.5. Pomierzone podciśnienie na poszczególnych poziomach suszarni

Nazwa komory	Pomierzone podciśnienie komorze
	p
	[Pa]
komora cyrkulacji	330
komora chłodzenia:	
taras I	278
taras II	450
taras III	450
taras IV	480
taras V	480
taras VI	500

Parametry powietrza:

W trakcie pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego była w zakresie 10÷12°C.

Pomierzone parametry powietrza w suszarni zamieszczono w tabeli 2.6.

Tabela 2.6. Parametry powietrza wywiewanego przepływającego przez poszczególne poziomy części suszącej

Lp.	Miejsce pomiaru	Temperatura termometru		Wilgotność względna	Zawartość wilgoci
		suchego	mokrego		
		t_s [°C]	t_m [°C]	φ [%]	x [g/kgps]
1.	taras I	45,5	28,9	30	18,7
2.	taras II	43	34,9	58	32,5
3.	taras III	39	31,9	60	27,5
4.	taras IV	42,2	34,8	58	32,5
5.	taras V	41,4	34,5	67	32,7
6.	taras VI	32,6	28,8	75	24

3.4. Suszarnia w lokalizacji D

Suszarnia w lokalizacji D przewidziana jest do suszenia 6,7 t/h (160 t/dobę) kukurydzy. Suszarnia posiada 12 sekcji. Suszarnia pracuje tylko na powietrzu zewnętrznym (bez recyrkulacji).

Pomiary suszarni wykonano w celu ustalenia warunków hydraulicznych pracy suszarni. Pomierzono:

- strumienie powietrza przepływającego przez sekcje suszące na poszczególnych poziomach suszarni,
- strumienie powietrza przepływającego przez sekcję chłodzącą,
- strumienie powietrza zewnętrznego zasysanego do suszarni,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze za sekcją chłodzenia,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze przed wentylatorem na różnych poziomach za sekcjami suszenia.

Pomiary strumieni powietrza w suszarni:

Strumień powietrza całkowitego:

Prędkości powietrza przepływającego przez suszarnię mierzono na wylotach z wkładów daszkowych do komory przed wentylatorem. Pomierzono prędkości powietrza przepływającego przez wszystkie wyloty z wkładów daszkowych do komory przed wentylatorem. Prędkości te uśredniano dla wylotów na wszystkich poziomach suszenia. W suszarni jest łącznie 60 wkładów daszkowych.

Strumienie powietrza obliczono ze wzoru (1.1) przyjmując $F_1=F_2$. Powierzchnia pojedynczego wylotu wynosi średnio 0,03m². Sumaryczna powierzchnia wylotów daszkowych wynosi zatem 1,8 m². Z uwagi na nieregularne wyloty powietrza (powierzchnia złożona –trójkąt i prostokąt) i niedokładności pomiaru prędkości wprowadzono do wzoru 1.1. współczynnik korygujący $\varepsilon = 0,85$. Pomierzona anemometrem średnia prędkość powietrza wynosi: $w_{sr}=9,48$ m/s.

Strumień powietrza przepływającego przez suszarnię wynosi:

$$V = 1,8 \cdot 0,85 \cdot 9,48 \cdot 3600 = 52216 \frac{m^3}{h}$$

Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego przez palnik:

Powietrze zewnętrzne zasysane jest przez czerpnię, za którymi zainstalowany jest palnik gazowy. Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej pomierzono na czerpniach zainstalowanych w ścianach obudowy komory oraz na kracie wentylatora palnika gazowego. Średnia prędkość powietrza na czerpni ściiennej pomierzona anemometrem wynosiła $w_{sr}=4,04$ m/s, zaś ich powierzchnia $F=0,327\text{m}^2$. Dla tych warunków prędkości średniej współczynnik $e=0,84$. Średnia prędkość powietrza na kracie wentylatora palnika gazowego pomierzona anemometrem wynosiła $w_{sr}=6,11$ m/s, zaś jej powierzchnia $F=0,4$ m². Dla tych warunków prędkości średniej współczynnik $e=0,85$. Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej wynosi:

$$V_z = 4,04 \cdot 0,327 \cdot 0,84 \cdot 3600 + 6,11 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \cdot 3600 = 11495 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej:

Strumień powietrza zasysanego do komory grzewczej jest różnicą strumieni powietrza całkowitego i zewnętrznego i wynosi:

$$V_{CH} = V_s - V_z = 52216 - 11495 = 40721 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Pomiary ciśnienia powietrza w suszarni

Pomiary ciśnienia powietrza, podciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego, przeprowadzono w komorze na ssaniu wentylatorów wywiewnych oraz w komorze za sekcjami chłodzenia.

Pomierzone podciśnienie na II tarasie wynosiło 430 Pa.

Straty ciśnienia na wlocie i wylocie z wentylatorów

Do transportu powietrza suszącego zastosowano jeden wentylator osiowy zabudowany w kanale o średnicy $\phi 1000\text{mm}$. Strumień powietrza transportowanego przez wentylator wynosi:

$$V = 52216 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Prędkość powietrza na wlocie i wylocie z wentylatora wynosi ok. 18,5 m/s, zatem ciśnienie dynamiczne wynosi:

$$p_d = \frac{w_{sr}^2 \cdot \rho}{2} = \frac{18,5^2 \cdot 1,2}{2} = 205 \text{ Pa}$$

Współczynniki oporów miejscowych wynoszą odpowiednio $\zeta_1=0,5$ na wlocie i $\zeta_2=1$ na wylocie. Sumaryczne opory powietrza na wlocie i na wylocie z wentylatora wynoszą:

$$\Delta p_w = (\zeta_1 + \zeta_2)p_d = (0,5 + 1)205 \cong 308 \text{ Pa}$$

Parametry powietrza

W trakcie pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego była w zakresie 10÷11 °C.

Pomierzone parametry powietrza w suszarni zamieszczono w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Parametry powietrza wywiewanego przepływającego przez poszczególne poziomy części suszącej

Lp.	Miejsce pomiaru	Temperatura termometru		Wilgotność względna	Zawartość wilgoci
		suchego	mokrego		
		t_s [°C]	t_m [°C]	φ [%]	x [g/kgps]
1.	taras I	32,2	16,1	14	4,8

2.	taras II	36,6	18,1	13	5,5
3.	½ wysokości suszarni	52	36	36	31
4.	wentylator	46,7	27	21	13,5

3.5. Suszarnia w lokalizacji E

Suszarnia w lokalizacji E przewidziana jest do suszenia 8,5 t/h (204 t/dobę) kukurydzy. Suszarnia posiada szesnaście sekcji z czego trzy sekcje są chłodzącymi. Z części chłodzącej powietrze zasysane jest do komory z palnikami gazowymi i podgrzane razem z zasysanym powietrzem zewnętrznym napływa do sekcji suszących.

Pomiary suszarni wykonano w celu ustalenia warunków hydraulicznych pracy suszarni. Pomierzono:

- strumień powietrza przepływającego przez sekcje suszące na poszczególnych poziomach suszarni,
- strumień powietrza przepływającego przez sekcje chłodzące,
- strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do suszarni,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze za sekcjami chłodzenia,
- ciśnienie (podciśnienie) powietrza w komorze przed wentylatorem na różnych poziomach za sekcjami suszenia.

Pomiary strumieni powietrza w suszarni

Strumień powietrza całkowitego:

Prędkości powietrza przepływającego przez suszarnię mierzono na wylotach z wkładów daszkowych do komory przed wentylatorem. Pomierzono prędkości powietrza przepływającego przez wszystkie wyloty z wkładów daszkowych do komory przed wentylatorem. Prędkości te uśredniano dla wylotów na wszystkich poziomach suszenia. W suszarni jest łącznie 120 wkładów daszkowych.

Strumień powietrza obliczono ze wzoru (1.1) przyjmując $F_1=F_2$. Powierzchnia pojedynczego wylotu wynosi średnio 0,03 m². Sumaryczna powierzchnia wylotów daszkowych wynosi zatem 3,6 m². Z uwagi na nieregularne wyloty powietrza (powierzchnia złożona –trójkąt i prostokąt) i niedokładności pomiaru prędkości wprowadzono do wzoru 1.1. współczynnik korygujący $\varepsilon = 0,85$. Pomierzona anemometrem średnia prędkość powietrza wynosi: $w_{sr}=6,96$ m/s.

Strumień powietrza przepływającego przez suszarnię wynosi:

$$V = 3,6 \cdot 0,85 \cdot 6,96 \cdot 3600 = 76671 \frac{m^3}{h}$$

Strumień powietrza zewnętrznego:

Powietrze zewnętrzne zasysane jest przez czerpnie, za którymi zainstalowane są nagrzewnice gazowe. Strumień powietrza zewnętrznego zasysanego do komory grzewczej pomierzono na czerpniach zainstalowanych w ścianach obudowy komory. Wyniki pomiarów podano w tabeli 2.8.

Tabela 2.8. Wyniki pomiarów i obliczeń strumienia powietrza wywiewanego przepływającego przez poszczególne poziomy części suszacej

L.p.	Nazwa	Przekrój	Współczynnik	Prędkość	Strumień
	kratki		poprawkowy	zmierzona	zmierzony
		F1	e	w	V
-	-	m2	-	m/s	m3/h
1	2	3	4	5	6
1.	I	0,9516	0,73	0,49	1225
2.	II	1,2261	0,73	0,53	1708
3.	III	0,3744	0,735	0,72	713
4.	IV	1,4536	0,735	0,79	3039
5.	V	1,288	0,735	0,7	2386
6.	VI	3,4224	0,81	2,16	21556
suma:					23942

$$V_z = 23942 \frac{m^3}{h}$$

Strumień powietrza chłodzącego:

Strumień powietrza chłodzącego jest różnicą strumieni powietrza całkowitego i zewnętrznego i wynosi:

$$V_{CH} = V_s + V_z = 76671 - 23942 = 52729 \frac{m^3}{h}$$

Pomiary ciśnienia powietrza w suszarni

Pomiary ciśnienia powietrza, podciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego, przeprowadzono w komorze na ssaniu wentylatorów wywiewnych oraz w komorze za sekcjami chłodzenia. W tabeli 2.9. zamieszczono wyniki pomiarów podciśnienia na poszczególnych poziomach suszarni.

Tabela 2.9. Pomierzone wartości podciśnienia na poszczególnych poziomach suszarni

Nazwa komory	Pomierzone podciśnienie komorze
	p
	[Pa]
komora chłodzenia:	
taras I	230
taras II	575

Straty ciśnienia na wlocie i wylocie z wentylatorów

Do transportu powietrza suszącego zastosowano jeden wentylator osiowy zabudowany w kanale o średnicy $\phi 1000$ mm. Strumień powietrza transportowanego przez wentylator wynosi:

$$V = 76671 \frac{m^3}{h}$$

Prędkość powietrza na wlocie i wylocie z wentylatora wynosi ok. 12,3 m/s, zatem ciśnienie dynamiczne wynosi:

$$p_d = \frac{w_{sr}^2 \cdot \rho}{2} = \frac{27,13^2 \cdot 1,2}{2} = 442 Pa$$

Współczynniki oporów miejscowych wynoszą odpowiednio $\zeta_1=0,5$ na wlocie i $\zeta_2=1$ na wylocie. Sumaryczne opory powietrza na wlocie i na wylocie z wentylatora wynoszą:

$$\Delta p_w = (\zeta_1 + \zeta_2)p_d = (0,5 + 1)442 \cong 663 Pa$$

Parametry powietrza

W trakcie pomiarów temperatura powietrza zewnętrznego była w zakresie $9 \div 11$ °C.

Pomierzone parametry powietrza w suszarni zamieszczono w tabeli 2.10.

Tabela 2.10. Parametry powietrza przepływającego przez poszczególne poziomy części suszącej

Lp.	Miejsce pomiaru	Temperatura termometru		Wilgotność względna	Zawartość wilgoci
		suchego	mokrego		
		t_s [°C]	t_m [°C]	φ [%]	x [g/kgps]
1.	1 taras	32,9	16,7	16	5
2.	2 taras	43,8	17,6	4,5	2
3.	3 taras	46	27	23	15
4.	komora recyrkulacji	22,6	13,4	25	5
5.	zewn.	10,8	9	90	7

Uwaga. Przeprowadzone pomiary strumieni powietrza realizowano w bardzo trudnych i zmieniających się warunkach eksploatacji. Dlatego mogą być obarczone dużym błędem, należy traktować je jako poglądowe i nie uwzględniać ich przy analizach istniejących suszarni

II. OCZYSZCZANIE POWIETRZA W SUSZARNIACH

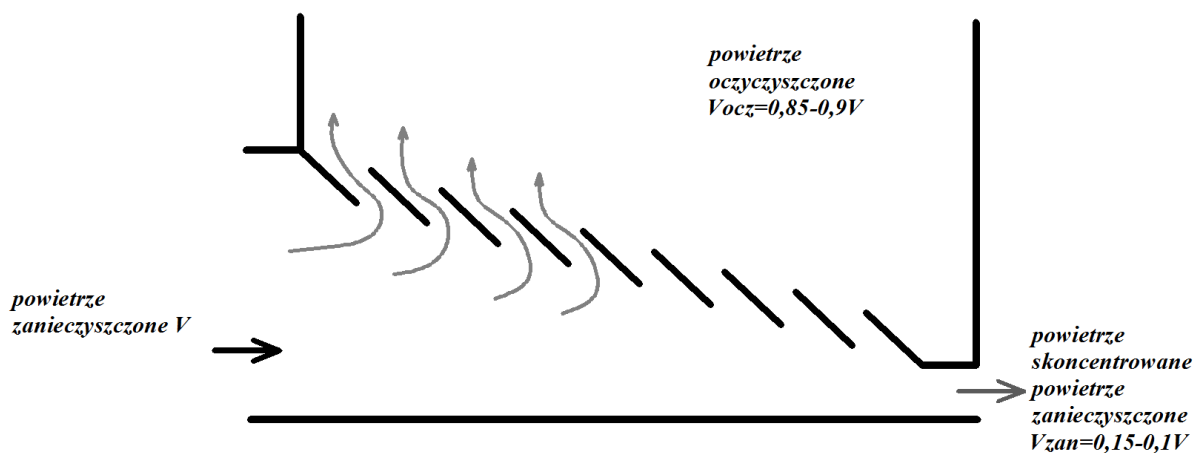
1. Zanieczyszczone powietrze suszące

W trakcie suszenia ziarna wydzielają się zanieczyszczenia w postaci pyłu jak i większych cząstek (np. łuski). By racjonalnie wykorzystać oddzielone od zboża zanieczyszczenia należy je oddzielić od powietrza suszącego przed jego usunięciem na zewnątrz.

2. Inercyjne urządzenia do oczyszczania powietrza

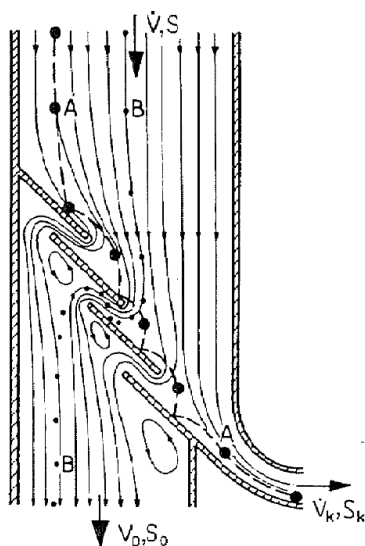
Ideą działania inercyjnych urządzeń do oczyszczania powietrza jest wykorzystanie sił bezwładności cząstek zanieczyszczeń przemieszczających się w strudze powietrza. Zasadę działania odpylaczy inercyjnych przedstawiono na rysunku poniżej. Powietrze zanieczyszczone przepływa wzdłuż zmniejszającego się kanału ograniczonego elementami skośnymi. Przekrój tego „kanału” zmniejsza

się co powoduje wzrost prędkości powietrza. Jednocześnie przez szczeliny pomiędzy elementami skośnymi wypływa powietrze oczyszczone V_{ocz} , które usuwane jest na zewnątrz. Natomiast powietrze zanieczyszczone transportowane jest do urządzenia, w którym następuje oddzielenie zanieczyszczeń z powietrza. Tym urządzeniem może być filtr workowy lub cyklon.

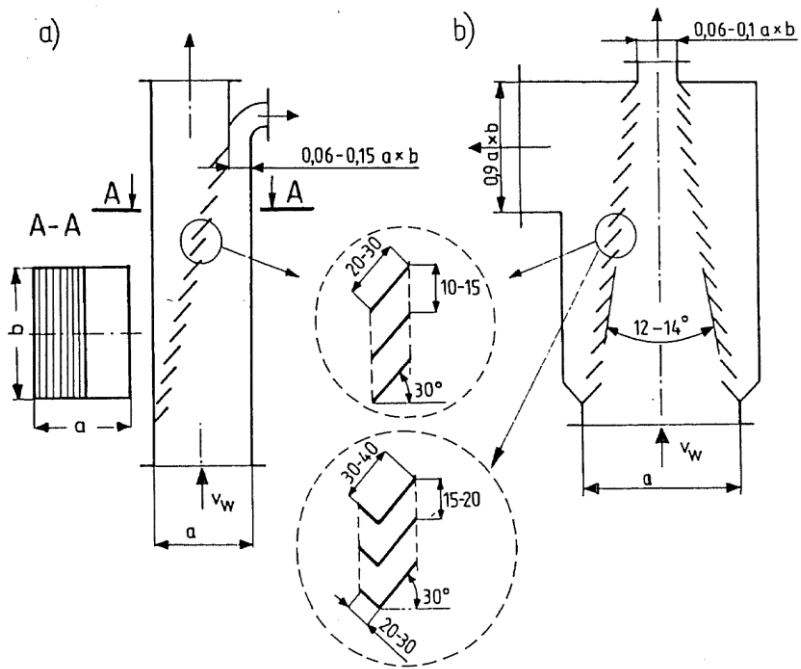


Rys.1.1. Schemat działania odpylacza inercyjnego

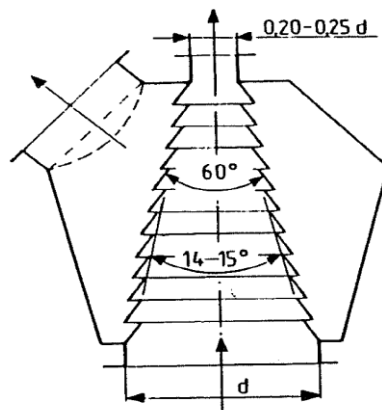
W urządzeniu inercyjnym następuje oddzielenie zanieczyszczeń od znaczącego strumienia powietrza. Następuje w nim oczyszczenie od 85÷90(9)% powietrza, które usuwane jest na zewnątrz. 10÷15% powietrza zanieczyszczonego, w którym zawarte są wszystkie (praktycznie 85÷90%) uciążliwe zanieczyszczenia transportowane jest do sprawnego urządzenia oczyszczającego (filtra workowego, cyklonu itp.). W urządzeniu tym następuje oddzielenie zanieczyszczeń od powietrza i powietrze oczyszczone usuwane jest na zewnątrz. Na rysunkach 1.2, 1.3 i 1.4 przedstawiono przykładowe rozwiązania odpylaczy inercyjnych.



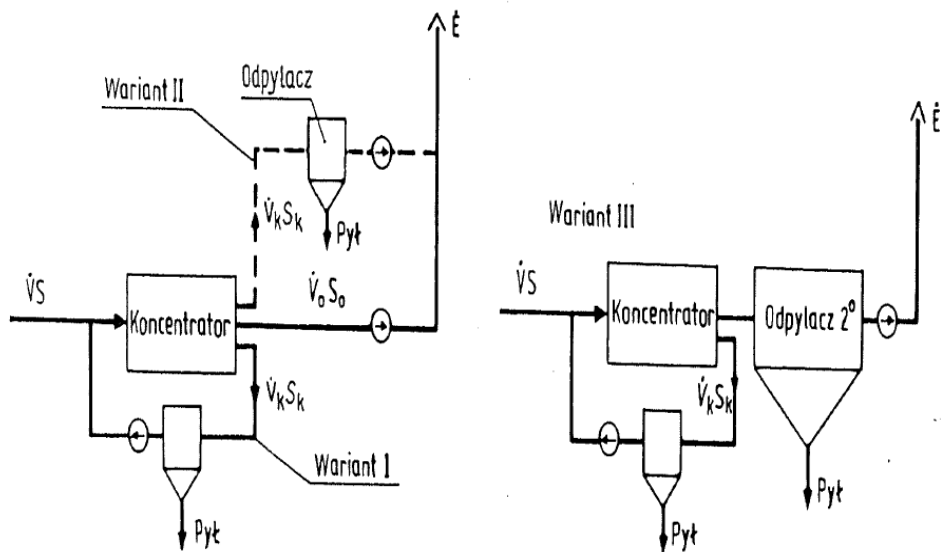
Rys.1.2. Zderzenia inercyjne ziaren pyłu z ukośnymi przeszkodami



Rys.1.3. Koncentraty żaluzjowe: a) jednoplaszczynowy, b) wieloplaszczynowy



Rys.1.4. Koncentrator stożkowy

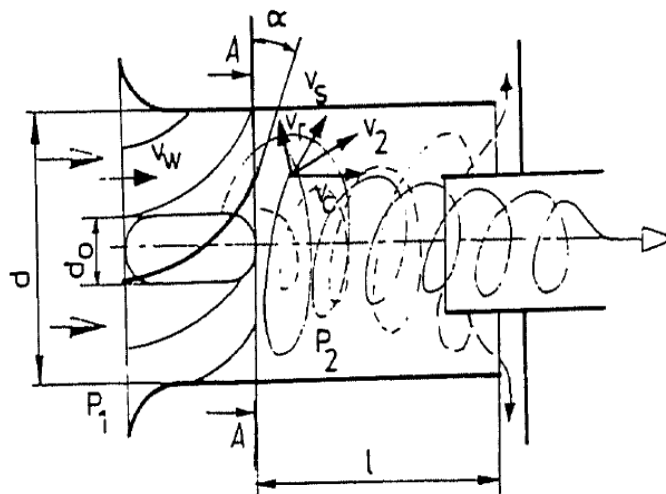


Rys.1.5. Schematy instalacji odpylających z koncentratorami inercyjnymi

Na rysunku 1.5 przedstawiono schemat układu powietrznego z wykorzystaniem odpylacza (koncentratora) inercyjnego i filtra workowego do oczyszczania powietrza zapyłonego.

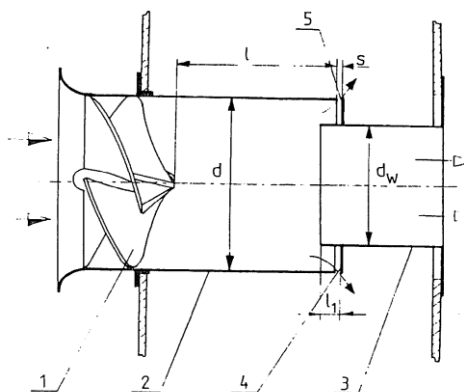
3. Ośrodkowe urządzenia do oczyszczania powietrza

Wprowadzenie zanieczyszczonego gazu w ruch spiralny powoduje powstanie siły odśrodkowej oddziałującej na poszczególne ziarna zanieczyszczenia. W trakcie ruchu spiralnego ziarna pyłu przesuwają się promieniowo od osi strugi. Ruch gazu i pyłu w koncentratorze odśrodkowym przedstawiono na rysunku 1.6.



Rys.1.6. Ruch gazu i pyłu w koncentratorze odśrodkowym

Wpływający osiowo strumień powietrza zapyłonego wprowadzany jest przez kierownice w ruch spiralny. Ziarna pyłu przemieszczają się ku zewnętrznej ścianie cylindra i wraz z częścią powietrza ($5 \div 15\%$) napływającego do koncentratora wypływają przez szczelinę pierścieniową na zewnątrz koncentratora. Powietrze zanieczyszczone jest następnie oczyszczane np.: w cyklonie lub w filtrach workowych. Natomiast powietrze oczyszczone wypływa przez rurę wewnętrzną. Przykładowe rozwiązanie pojedynczego koncentratora przedstawiono na rysunku 1.7.



Rys.1.7. Pojedynczy koncentrator odśrodkowy (moduł) w wersji „Sirocco” C.D.C firmy Davidson&Co.Ltd; 1 – kierownica wlotowa, 2-rura zewnętrzna, 3-rura wewnętrzna, 4-pierścień osłonowy, 5-szczelina

W koncentratorach odśrodkowych skutecznie oddzielany jest pył o dużych ziarnach. Zasadniczymi zaletami układów odpylania wyposażonych w koncentratory odśrodkowe są:

- elastyczność pracy; niewielki wpływ na skuteczność odpylania przy zmianie strumienia przepływu,
- duża skuteczność oddzielania większych ziaren przy ograniczonych stratach ciśnienia,
- zwarta budowa.

Podstawową wadą jest rozbudowana instalacja i dodatkowe zużycie energii do oczyszczania gazu skoncentrowanego.

Stosowanie odpylaczy, koncentratorów inercyjnych bądź odśrodkowych pozwala na uzyskanie skuteczności odpylania dla dużych ziaren rzędu 80÷85%. Skuteczność ta maleje wraz ze zmniejszającą się średnicą ziaren. Opory przepływu powietrza przez odpylacze tego typu wynoszą 350÷700Pa. Alternatywnym rozwiązaniem może być filtracja powietrza z zastosowaniem filtrów regenerowanych.

4. Filtracja powietrza

Do oczyszczania powietrza zapyłonego, wywiewanego z różnych procesów technologicznych, stosuje się filtry tkaninowe z okresową regeneracją materiału filtracyjnego. Powszechnie stosowana jest regeneracja pulsacyjna sprężonym powietrzem, rzadziej ze wstrząsaniem mechanicznym. Takie rozwiązanie oczyszczania powietrza ma wiele zalet. I charakteryzuje się dużą skutecznością. Jednak podstawową jego wadą są duże opory przepływu powietrza przez filtr. Zwykle przekraczają 1000÷1200 Pa. Filtry pulsacyjne stosowane są głównie do oczyszczania powietrza z pyłu o małych ziarnach. Ponadto występowanie pyłów wilgotnych i lepkich może powodować zabijanie się filtrów co skutkuje trudnościami z regeneracją materiału filtracyjnego.

Mając na uwadze specyficzne warunki pracy instalacji powietrznych w procesach suszenia zboża oraz dążąc do zastosowania odzysku energii z powietrza usuwanego do wstępnego podgrzewania powietrza zewnętrznego proponuje się zastosowanie ruchomych filtrów siatkowych oczyszczanych w sposób ciągły bądź okresowo.

III. ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ DLA PROCESÓW SUSZENIA

1. Założenia

Wielkość suszarni modelowej 20 o parametrach pracy:

- strumień masowy suszonej kukurydzy 12 ton/h (288 ton/dobę),
- wilgotność względna kukurydzy na wejściu do suszarni 30% ,
- wilgotność względna kukurydzy na wylocie z suszarni $14,5\%$,
- strumień powietrza suszącego (przepływającego przez wentylatory o $t_p=60^\circ\text{C}$ i $\rho=1,06 \text{ kg/m}^3$) - $140\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,
- temperatura obliczeniowa powietrza zewnętrznego $t_z=5^\circ\text{C}$,
- maksymalna temperatura powietrza podgrzanego $t_{pg}=110^\circ\text{C}$,
- liczba sekcji suszących 16 ,
- liczba sekcji chłodzących 4 ,
- masowy strumień powietrza $M_p=148\,400 \text{ kg/h}$ ($41,22 \text{ kg/s}$).
-

2. Bilans cieplny suszarni

W tej części opracowania oszacowano zapotrzebowanie na energię cieplną do suszenia kukurydzy przy parametrach pracy odpowiadających założeniom z punktu powyżej. W bilansie cieplnym oszacowano następujące jego elementy:

- zapotrzebowanie na energię cieplną do podgrzania powietrza suszącego,
- zapotrzebowanie na energię do podgrzania kukurydzy,
- straty ciepła przez przegrody zewnętrzne suszarni,
- odzysk energii z ochładzanej kukurydzy suszonej.

2.1. Zapotrzebowanie na energię do podgrzewania powietrza suszącego

Niezbędną do podgrzania powietrza suszącego moc cieplną obliczono ze wzoru:

$$Q_N = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_{pg} - t_z) \quad (3.1)$$

w którym:

V – strumień objętościowy powietrza suszącego, $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$;

ρ – gęstość powietrza, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;

c_p – ciepło właściwe powietrza, $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$;

t_{pg} – obliczeniowa temperatura powietrza podgrzanego, $^\circ\text{C}$;

t_z – obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego, $^\circ\text{C}$;

Dla $V = 39 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 140000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ i $\rho = 1,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ i $c_p = 1,06 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$; $t_{pg} = 110^\circ\text{C}$; $t_z = 5^\circ\text{C}$

wymagana moc cieplna niezbędna do podgrzania powietrza wynosi:

$$Q_N = 39 \cdot 1,06 \cdot 1,005 \cdot (110 - 5) = 4370 \text{ kW}$$

2.2. Zapotrzebowanie na energię do podgrzewania kukurydzy

Kukurydza podgrzewana jest od temperatury zewnętrznej $t_z = 5^\circ C$ do średniej temperatury nasiona $t_k = 75^\circ C$. Wymagana do podgrzania kukurydzy moc cieplna obliczona może być z zależności:

$$Q_k = M_k \cdot c_k \cdot (t_k - t_z) \quad (3.2)$$

w której:

M_k – strumień masowy kukurydzy, $\frac{kg}{s}$;

c_k – ciepło właściwe kukurydzy, $\frac{kJ}{kgK}$;

t_k – średnia temperatura kukurydzy ogrzanej, $^\circ C$;

t_z – temperatura kukurydzy na wejściu do suszarni równa obliczeniowej temperaturze powietrza zewnętrznego, $^\circ C$;

Dla $M_k = 3,34 \frac{kg}{s} = 12 \frac{ton}{h}$; $c_k = 1,8 \frac{kJ}{kgK}$; $t_k = 75^\circ C$; $t_z = 5^\circ C$ moc wymagana do podgrzewania kukurydzy wynosi:

$$Q_k = 3,34 \cdot 1,8 \cdot (75 - 5) = 421 kW$$

2.3. Zapotrzebowanie ciepła do odparowania wody z kukurydzy

Strumień wilgoci odparowującej z kukurydzy oblicza się ze wzoru:

$$M_w = M_k \cdot (x_1 - x_2) \frac{kg}{s} \quad (3.3)$$

w którym:

M_k – strumień masowy kukurydzy, $\frac{kg}{s}$;

x_1 – zawartość wilgoci w kukurydzy przed osuszeniem, $\frac{kg}{kg_{ps}}$;

x_2 – zawartość wilgoci w kukurydzy po osuszeniu, $\frac{kg}{kg_{ps}}$;

Dla $M_k = 3,34 \frac{kg}{s} = 12 \frac{ton}{h}$; $x_1 = 0,3 \frac{kg}{kg_{ps}}$; $x_2 = 0,145 \frac{kg}{kg_{ps}}$ strumień wilgoci odparowującej z kukurydzy wynosi:

$$M_w = 3,34 \cdot (0,3 - 0,145) = 0,518 \frac{kg}{s} = 1,86 \frac{ton}{h}$$

Wymaganą moc cieplną potrzebną do odparowania strumienia wilgoci oblicza się ze wzoru:

$$Q_w = M_w \cdot r \quad (3.4)$$

gdzie:

M_w – strumień odparowującej wody, $\frac{kg}{s}$;

r – ciepło parowania wody, $\frac{kJ}{kg}$;

Dla $M_w = 0,518 \frac{kg}{s} = 1,86 \frac{ton}{h}$; $r = 2500 \frac{kJ}{kg}$ wymagana moc cieplna potrzebna do odparowania wilgoci z kukurydzy wynosi:

$$Q_w = 0,518 \cdot 2500 = 1295 kW$$

2.4. Straty ciepła przez przegrody zewnętrzne

Straty ciepła przez przegrody zewnętrzne suszarni oblicza się ze wzoru :

$$Q_{strat} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot U_i \cdot \Delta t_i \cdot 10^{-3} kW \quad (3.5)$$

gdzie:

F_i – powierzchnia i-tej przegrody zewnętrznej, m^2 ;

U_i – współczynnik przenikania ciepła przez i-tą przegrodę zewnętrzną, $\frac{W}{m^2 K}$

Δt_i – różnica temperatury powietrza dla i-tej przegrody zewnętrznej, K;

Przyjęto jednakowe wartości U_i i Δt_i dla wszystkich przegród zewnętrznych.

Do obliczeń strat ciepła suszarni niezaizolowanej przyjęto:

$\sum F_i = 550 m^2$; $U_i = U = 5,0 \frac{W}{m^2 K}$; $\Delta t_i = \Delta t = 70^\circ C - 5^\circ C = 65^\circ C$. Zatem statyczne straty

ciepła przez przegrody zewnętrzne wynoszą:

$$Q_{strat} = 550 \cdot 5 \cdot 65 \cdot 10^{-3} = 178,8 kW \cong 179 kW$$

Stosując ocieplone ściany zewnętrzne np.: z płyt warstwowych o grubości 40 mm można uzyskać współczynnik przenikania ciepła dla przegrody na poziomie $U=0,5 \frac{W}{m^2 K}$. Dla tak skonstruowanych ścian straty ciepła można znacząco ograniczyć i będą one wówczas wynosiły:

$$Q'_{strat} = 550 \cdot 0,5 \cdot 65 \cdot 10^{-3} = 18 kW$$

2.5. Odzysk energii z ochładzania kukurydzy wysuszonej

Do ochładzania zboża osuszonego przewidziano cztery sekcje. Strumień objętościowy powietrza chłodzącego stanowi ok. 20% strumienia całkowitego powietrza suszącego czyli $V_{ch} = 0,15V = 5,85 \frac{kg}{s}$. Ochładzanie zboża następuje od temperatury $75^\circ C$ do temperatury $40^\circ C$.

Pozyskiwaną z kukurydzy wraz z powietrzem suszącym moc cieplną obliczono z zależności:

$$Q_{ch} = M_{ks} \cdot c_k \cdot (t_k - t_{ku}) kW \quad (3.6)$$

gdzie:

M_{ks} – strumień masowy kukurydzy osuszonej, $\frac{kg}{s}$;

c_k – ciepło właściwe kukurydzy, $\frac{kJ}{kg K}$;

t_k – średnia temperatura kukurydzy ogrzanej, $^\circ C$;

t_{ku} – średnia temperatura kukurydzy ochłodzonej, $^\circ C$;

Dla $M_{ks} = 2,85 \frac{kg}{s} = 12 \frac{ton}{h}$; $c_k = 1,8 \frac{kJ}{kgK}$; $t_k = 75^\circ C$; $t_{ku} = 40^\circ C$ pozyskiwana moc cieplna wynosi:

$$Q_{ch} = 2,85 \cdot 1,8 \cdot (75 - 40) \cong 180 kW$$

Pozyskana energia spowoduje podgrzanie powietrza chłodzącego do temperatury, którą można obliczyć z zależności:

$$t_{zch} = t_z + \frac{Q_{ch}}{V_{ch} \cdot \rho \cdot c_p} \text{ } ^\circ C \quad (3.7)$$

w której:

t_{zch} – temperatura powietrza zewnętrznego za sekcjami chłodzącymi, $^\circ C$;

Q_{ch} – moc cieplna pozyskiwana w wyniku ochładzania kukurydzy, kW ;

C_p – ciepło właściwe powietrza, $\frac{kJ}{kgK}$;

ρ – gęstość powietrza, $\frac{kg}{m^3}$;

Dla

$$t_z = 5^\circ C; \quad Q_{ch} = 180 kW; \quad V_{ch} = 0,15 \cdot V = 0,15 \cdot 39,00 = 5,85 \frac{m^3}{s}; \quad c_p = 1,005 \frac{kJ}{kg^\circ C};$$

$\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}$; temperatura powietrza za sekcjami chłodzenia jest równa:

$$t_{zch} = 5 + \frac{180}{5,85 \cdot 1,25 \cdot 1,005} = 29,5^\circ C$$

2.6. Bilans cieplny suszarni

Powietrze zewnętrzne o strumieniu $\sim 33,1 \frac{m^3}{s}$ podgrzewane jest w suszarni do temperatury $\sim 110^\circ C$.

Takie podgrzewanie powietrza wymaga źródła ciepła o mocy :

$Q_N = 33,1 \cdot 1,25 \cdot 1,005(110 - 5) \cong 4780 kW$. Źródłami tej energii są:

- sekcja chłodzenia zboża o pozyskiwanej mocy $Q_{ch}=180 kW$,
- palniki gazowe o mocy $Q_p = Q_N - Q_{ch} = 4780 - 180 = 4600 kW$.

Dostarczona z powietrzem suszącym moc cieplna zapewnia:

- podgrzanie kukurydzy od temperatury $t_z = 5^\circ C$ do temperatury $t_k = 75^\circ C$; wymagana moc cieplna procesu wynosi $Q_k = 421 kW$,
- odparowanie wilgoci z kukurydzy od wilgotności względnej 30% do wilgotności względnej 14,5%; wymagana moc cieplna procesu $Q_w = 1295 kW$,
- pokrycie strat ciepła przez przegrody zewnętrzne; wymagana moc cieplna przy przegrodach zewnętrznych nieizolowanych $Q_{strat} = 179 kW$ zaś przy izolowanych pod względem termicznym przegrodach zewnętrznych $Q_{strat} = 18 kW$.

Z powietrzem wywiewanym z suszarni usuwana jest energia o mocy obliczonej ze wzoru:

$$Q_u = Q_N - (Q_k + Q_w + Q_{strat}) kW \quad (3.8)$$

Zatem na zewnątrz usuwana jest wraz z powietrzem energia o mocy:

– w suszarni z przegrodami nieizolowanymi:

$$Q_u = 4780 - (421 + 1295 + 179) = 2885 kW$$

– w suszarni z przegrodami izolowanymi termicznie:

$$Q_u = 4780 - (421 + 1295 + 18) = 3046 kW$$

Temperaturę powietrza usuwanego z suszarni można obliczyć z zależności:

$$t_u = t_{pg} - \frac{Q_k + Q_w + Q_{strat}}{V \cdot \rho \cdot c_p} \text{ } ^\circ C \quad (3.9)$$

W której:

t_u – temperatura powietrza usuwanego na zewnętrznego, $^\circ C$;

t_{pg} – temperatura podgrzanego powietrza suszącego, $^\circ C$;

Q_k – moc cieplna potrzebna do podgrzania kukurydzy, kW ;

Q_w – moc cieplna potrzebna do odparowania wody, kW ;

Q_{strat} – moc cieplna potrzebna na pokrycie statycznych strat ciepła suszarni, kW ;

V – strumień powietrza wywiewanego, $\frac{m^3}{s}$;

ρ – gęstość powietrza wywiewanego, $\frac{kg}{m^3}$;

c_p – ciepło właściwe powietrza, $\frac{kJ}{kgK}$;

Temperatura powietrza wywiewanego z suszarni nieizolowanej wynosi:

$$t_u = 110 - \frac{421 + 1295 + 179}{39,00 \cdot 1,06 \cdot 1,005} \cong 64^\circ C .$$

Zaś temperatura powietrza wywiewanego z suszarni izolowanej wynosi:

$$t_u = 110 - \frac{421 + 1295 + 18}{39,00 \cdot 1,06 \cdot 1,005} \cong 68^\circ C .$$

Energia cieplna dostarczana z zewnątrz przez palniki gazowe o mocy $Q_p = 4600 kW$ tylko w części wykorzystywana jest do procesu suszenia zboża. Znaczną jej część stanowi energia usuwana na zewnątrz z powietrzem wywiewanym. Udział energii usuwanej na zewnątrz w energii dostarczanej można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta U = \frac{Q_u}{Q_N} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

Udział energii cieplnej usuwanej z powietrzem z suszarni nieizolowanej wynosi:

$$\Delta U = \frac{2885}{4780} \cdot 100\% = 60\%$$

Udział energii cieplnej usuwanej z powietrzem z suszarni izolowanej wynosi:

$$\Delta U = \frac{3046}{4780} \cdot 100\% = 63,7\%$$

Natomiast udział energii efektywnie wykorzystywanej do procesu suszenia w energii dostarczanej można obliczyć z zależności:

$$\Delta S = \frac{Q_k + Q_w}{Q_N} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

Zatem udział ten wynosi:

$$\Delta S = \frac{421+1295}{4780} \cdot 100\% = 35,9\%$$

Tak mały udział energii cieplnej do procesu suszenia oznacza, że ograniczona jest sprawność energetyczna suszarni.

Udział energii efektywnie wykorzystanej do suszenia kukurydzy w energii dostarczanej z zewnątrz przez palniki można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta Q_E = \frac{Q_k + Q_w}{Q_p} \cdot 100\% \quad (3.12)$$

Udział ten wynosi:

$$\Delta Q_E = \frac{421+1295}{4600} \cdot 100\% = 37,3\%$$

Poprawę efektywności energetycznej suszarni można uzyskać przez:

- obniżenie parametrów powietrza suszącego,
- zastosowanie odzysku energii z powietrza wywiewanego.

V. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA SUSZARNI

Poniżej przedstawione zostanie porównanie efektywności energetycznej suszarni różniących się sposobami ograniczenia zapotrzebowania na energię do procesów suszenia zboża. Obecnie wykonywane są suszarnie:

- bez dodatkowych rozwiązań ograniczających zapotrzebowanie na energię cieplną,
- z zastosowanymi sekcjami chłodzenia kukurydzy, w których powietrze zewnętrzne przepływa przez osuszoną i podgrzaną kukurydżę, chłodząc ją podgrzewa się i jest podawane do układu podgrzewania powietrza suszącego.

Proponuje się nowe rozwiązanie ograniczenia zapotrzebowania na energię cieplną do procesu suszenia ziaren kukurydzy przez odzyskiwanie energii z powietrza wywiewanego do wstępnego podgrzewania zasysanego powietrza zewnętrznego.

Do porównania posłużono się założeniami dotyczącymi parametrów pracy suszarni zamieszczonymi w punkcie III.1 Do porównania przyjęto suszarnię z izolowanymi ścianami zewnętrznymi. Do podgrzewania powietrza suszącego w warunkach obliczeniowych niezbędna jest moc $Q_N = 4370 \text{ kW}$.

Do procesu suszenia powietrza niezbędna jest moc cieplna do:

- podgrzewania kukurydzy $Q_k = 421 \text{ kW}$,
- odparowania wody ze zboża $Q_w = 1295 \text{ kW}$,
- do pokrycia statycznych strat ciepła przez przegrody zewnętrzne $Q_{strat} = 18 \text{ kW}$,

Zatem do procesu suszenia zboża niezbędna jest moc cieplna:

$$Q_s = Q_k + Q_w + Q_{strat} = 421 + 1295 + 18 = 1734 \text{ kW}$$

Udział wykorzystanej do suszenia kukurydzy mocy cieplnej Q_s w mocy dostarczonej przez źródło ciepła Q_N wynosi:

$$\frac{Q_s}{Q_N} \cdot 100\% = \frac{1734}{4370} \cdot 100\% = 39,7\%$$

Przy zastosowaniu sekcji chłodzenia pozyskiwana przez powietrze chłodzące energia $Q_{CH} = 180\text{kW}$. Zatem udział ciepła wykorzystanego do osuszania kukurydzy w energii dostarczanej ze źródła ciepła wynosi:

$$\frac{Q_s}{Q_N - Q_{CH}} \cdot 100\% = \frac{1734}{4370 - 180} \cdot 100\% = 41,4\% .$$

W przypadku proponowanego odzysku energii z powietrza wywiewanego i wykorzystania tej energii do podgrzewania powietrza zewnętrznego oraz stosowania sekcji chłodzenia kukurydzy, omawiany udział ciepła wykorzystanego do osuszania zboża w energii dostarczanej ze źródła ciepła wynosi:

$$\frac{Q_s}{Q_N - (Q_{CH} + Q_{wo})} \cdot 100\% = \frac{1734}{4370 - (180 + 1242)} \cdot 100\% = 58,8\% . \quad \text{Pozwala to na}$$

zmniejszenie mocy źródła ciepła do:

$$\frac{Q_N - (Q_{CH} + Q_{wo})}{Q_N} \cdot 100\% = \frac{4370 - (180 + 1242)}{4370} \cdot 100\% = 67,5\% .$$

VI. ODZYSK ENERGII Z POWIETRZA USUWANEGO Z SUSZARNI

1. Idea odzysku energii z powietrza wywiewanego z suszarni

Wykorzystanie energii z powietrza wywiewanego do wstępnego podgrzania powietrza suszącego może znacząco obniżyć koszty suszenia, przez ograniczenie zużycia spalonego gazu. Poniżej analizowane będą zagadnienia związane z odzyskiem energii z powietrza usuwanego z suszarni. Temperatura obliczeniowa powietrza zewnętrznego zasysanego do suszarni przyjmowana jest na poziomie $t_z = 5^\circ\text{C}$. Powietrze podgrzewane jest do temperatury $t_n = 90 \div 110^\circ\text{C}$ i o takiej temperaturze napływa do części suszącej zboże. Powietrze, przepływając przez sekcje suszące, gdzie asymiluje wilgoć, obniża swoją temperaturę. Temperatura powietrza wilgotnego usuwanego z suszarni może być w zakresie $t_u = 55 \div 65^\circ\text{C}$.

Strumień masowy powietrza wywiewanego z suszarni modelowej wynosi $M_{pu} = 41,22 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$.

Zatem do atmosfery usuwana jest energia o mocy obliczonej ze wzoru:

$$Q_u = M_{pu} \cdot c_p \cdot (t_u - t_z) \quad \text{kW} \quad (6.1)$$

w którym:

Q_N – moc energii cieplnej usuwanej do atmosfery; kW,

M_{pu} – strumień masowy powietrza usuwanego z suszarni; $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$,

c_p – ciepło właściwe powietrza; $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$,

t_u – temperatura powietrza usuwanego na zewnątrz suszarni; $^\circ\text{C}$,

t_z – temperatura powietrza zewnętrznego; $^\circ\text{C}$,

Zatem moc wynoszona z powietrzem usuwanym z suszarni wynosi:

$$Q_u = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (60 - 5) = 2278\text{kW}$$

Natomiast moc ciepłą dostarczaną do powietrza suszącego można obliczyć z zależności:

$$Q_N = M_{pu} \cdot c_p \cdot (t_n - t_z) \quad kW \quad (6.2),$$

w której

Q_N – moc energii cieplnej dostarczanej do powietrza suszącego; kW,

M_{pu} – strumień masowy powietrza usuwanego z suszarni; $\frac{kg}{s}$,

c_p – ciepło właściwe powietrza; $\frac{kJ}{kgK}$,

t_n – temperatura powietrza napływającego do sekcji suszących; °C,

t_z – temperatura powietrza zewnętrznego; °C.

Po podstawieniu wszystkich danych do wzoru otrzymuje się:

$$Q_N = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (110 - 5) = 4350 \quad kW$$

Udział energii cieplnej usuwanej do atmosfery w energii dostarczonej do powietrza suszącego można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta Q_u = \frac{Q_u}{Q_N} \cdot 100 \quad \% \quad (6.3)$$

Zatem:

$$\Delta Q_u = \frac{2278}{4350} \cdot 100\% = 52,4\%$$

Efektywnie do procesu osuszania wykorzystywane jest ok. 48% energii dostarczanej do powietrza suszącego. Do poprawy efektywności energetycznej suszarni zaproponowano odzysk energii z powietrza wywiewanego do wstępnego podgrzewania powietrza zewnętrznego.

2. Efektywność stosowania odzysku energii z powietrza wywiewanego

Powietrze zewnętrzne o temperaturze t_z podgrzewane jest w wymienniku (wymyennikach) WO do temperatury $t_{z'}$. Powietrze to podgrzewane jest powietrzem usuwanym z suszarni o temperaturze t_u . Temperatura powietrza zewnętrznego podgrzewanego w wymienniku WO zależy od sprawności temperaturowej wymiennika, która zdefiniowana jest zależnością:

$$\eta_t = \frac{t_{z'} - t_z}{t_u - t_z} \quad (6.4a)$$

gdzie:

$t_{z'}$ – temperatura powietrza za wymiennikiem do odzysku ciepła WO (na wyjściu z wymiennika WO); °C,

t_z – temperatura powietrza zewnętrznego; °C,

t_u – temperatura powietrza usuwanego z suszarni; °C,

Dla wymienników, których parametry pracy są i sprawność temperaturowa są znane, można obliczyć temperaturę powietrza zewnętrznego za wymiennikiem $t_{z'}$. Wykorzystuje się do tego wzór:

$$t_{z'} = t_z + \eta_t (t_u - t_z) \quad (6.5)$$

Temperatura powietrza zewnętrznego za wymiennikiem do odzysku ciepła, przy $t_z=5^\circ\text{C}$ i $t_u=60^\circ\text{C}$ w zależności od sprawności η_t wynosi:

– Przy $\eta_t = 0,4$

$$t_{z'} = 5 + 0,4(60 - 5) = 27^{\circ}C$$

– Przy $\eta_t = 0,5$

$$t_{z'} = 5 + 0,5(60 - 5) = 32,5^{\circ}C$$

– Przy $\eta_t = 0,6$

$$t_{z'} = 5 + 0,6(60 - 5) = 38^{\circ}C$$

Jednocześnie temperaturę powietrza wywiewanego na zewnątrz suszarni $t_{u'}$ można obliczyć ze wzoru:

$$t_{u'} = t_u - \eta_t(t_u - t_z) \quad ^{\circ}C \quad (6.6)$$

Zatem temperatura powietrza usuwanego na zewnątrz suszarni $t_{u'}$ w zależności od sprawności wynosi:

– Przy $\eta_t = 0,4$

$$t_{u'} = 60 - 0,4(60 - 5) = 38^{\circ}C$$

– Przy $\eta_t = 0,5$

$$t_{u'} = 60 - 0,5(60 - 5) = 32,5^{\circ}C$$

– Przy $\eta_t = 0,6$

$$t_{u'} = 60 - 0,6(60 - 5) = 27^{\circ}C$$

Po zastosowaniu odzysku energii z powietrza wywiewanego i wykorzystaniu jej do wstępnego podgrzewania powietrza zewnętrznego wymagana moc cieplna do podgrzewania powietrza suszającego wynosi odpowiednio:

– dla $\eta_t = 0,4$

$$Q_N' = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (110 - 27) = 3438kW$$

– dla $\eta_t = 0,5$

$$Q_N' = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (110 - 32,5) = 3211kW$$

– dla $\eta_t = 0,6$

$$Q_N' = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (110 - 38) = 2983kW$$

Zatem stosując odzysk energii z powietrza wywiewanego do podgrzewania powietrza suszającego można ograniczyć niezbędną moc cieplną do podgrzewania powietrza od 21% do 31,5% przy sprawności temperaturowej od 0,4 do 0,6.

Natomiast do atmosfery z powietrzem wywiewanym usuwana jest energia cieplna odpowiednio:

– dla $\eta_t = 0,4$

$$Q_u' = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (38 - 5) = 1367kW$$

– dla $\eta_t = 0,5$

$$Q_u' = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (32,5 - 5) = 1139kW$$

– dla $\eta_t = 0,6$

$$Q_u' = 41,22 \cdot 1,005 \cdot (27 - 5) = 911kW$$

Jednocześnie zmniejsza się udział energii cieplnej usuwanej na zewnątrz suszarni w energii dostarczonej do powietrza suszającego, odpowiednio:

– dla $\eta_t = 0,4$

$$\Delta Q_u' = \frac{1367}{3438} \cdot 100\% \cong 40\%$$

– dla $\eta_t = 0,5$

$$\Delta Q'_u = \frac{1139}{3211} \cdot 100\% = 35,5\%$$

– dla $\eta_t = 0,6$

$$\Delta Q'_u = \frac{911}{2983} \cdot 100\% = 30,5\%$$