

ходит конденсатор (К) теплового насоса и дополнительный нагреватель (Н), где нагревается до заданной температуры. Теплота, передаваемая в испарителе от воздуха рабочему веществу (хладону) ТН, используется для нагрева воздуха в конденсаторе. Согласно расчетной схеме воздух полностью пропускается вначале через испаритель, а затем – через конденсатор и нагреватель.

На схеме показаны компрессор (КМ) и терморегулирующий вентиль (ТРВ), а также характерные точки состояний влажного воздуха в процессах его нагрева и использования. При этом использованы следующие обозначения точек: 1 – при поступлении в сушильную камеру; 2 – на выходе сушильной камеры; 3 – на выходе испарителя и 4 – на выходе конденсатора перед нагревателем.

В основу математической модели положены уравнения, характеризующие процессы изменения тепловлажного состояния воздуха при сушке продукции и при тепловой обработке воздуха в испарителе и конденсаторе ТН [3-7].

В математическую модель введено ограничение, касающееся температуры воздуха на выходе конденсатора ТН:

$$t_4 \leq t_1.$$

Знак «равенство» соответствует использованию ТН при отсутствии дополнительного нагревателя, а знак «неравенство» – с использованием дополнительного нагревателя.

Рассматривая изменение тепловлажного состояния воздуха при его охлаждении в испарителе, относительная влажность воздуха на выходе испарителя принята равной $\phi_3 \cong 100\%$.

При расчете потребления теплоты и энергии пользовались удельными расходами теплоты и энергии, отнесенными к 1 кг влаги, испаренной из влажного продукта в процессе сушки.

Входными параметрами математической модели являются исходные данные к тепловому расчету конвективной зерносушилки, принимаемые (или определяемые) согласно нормам проектирования [5, 6]:

– температуры СА на входе и выходе сушильной камеры, соответственно t_1 и t_2 , °С;

– относительная (максимально допустимая) влажность отработавшего СА ϕ_2 , %, и его влагосодержание d_2 , г/кг;

– разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере Δ , кДж/кг, отнесенная к 1 кг испаренной влаги.

– температура наружного воздуха t_0 , °С.

К входным параметрам относятся также наименьшие температурные напоры в конденсаторе и испарителе ТН (соответственно δt_1 и δt_2), которые допустимо принимать в пределах от 3 до 10 °С.

В ходе анализа математической модели исследуемых процессов, было установлено:

– возможности и условия использования ТН в рассматриваемой принципиальной схеме однозначно определяются заданными параметрами теплового режима сушки и наименьшими температурными напорами в конденсаторе и испарителе ТН;

– для решения системы уравнений, описывающих математическую модель, значения этих параметров должны отвечать условию совместности системы уравнений;

– при условии совместности системы уравнений оказывается возможным найти только одно решение, соответствующее заданным условиям использования ТН в составе КЗС;

– ключевым моментом при нахождении этого решения является определение разности температур воздуха на выходе и входе конденсатора ТН.

Согласно вышеизложенным выводам методика расчета энергетических и температурных параметров работы ТН при их использовании для осушения и рециркуляции отработавшего СА в КЗС включает следующие этапы:

– проверка возможности использования ТН, исходя из условия совместности системы уравнений, представляющей собой математическую модель исследуемых процессов;

– определение разности температур воздуха на выходе и входе конденсатора ТН;

– расчет энергетических и температурных параметров режимов работы ТН и КЗС;

– расчет экономии теплоты и топлива, достигаемой при сушке продукции за счет использования ТН.

Остановимся на основных положениях методики расчета.

Рассматриваемая система уравнений является совместной, если значение температуры воздуха на выходе испарителя ТН удовлетворяет неравенству:

$$t_{3,гр} \leq t_3 < t_2, \quad (1)$$

где $t_{3,гр}$ и t_3 – граничная и действительная температура воздуха на выходе испарителя, °С.

При возможности охлаждении воздуха в испарителе ТН до граничной температуры $t_{3,гр}$ воздух нагревается в конденсаторе ТН до заданной температуры t_1 без использования дополнительного нагревателя,

Принимая при решении математической равенство температур $t_4 = t_1$, получена следующая зависимость для расчета граничной температуры воздуха:

$$t_{3,гр} = t_1 - [(Z_1 \pi_2) / (1 + 0,088 \pi_2)], \quad (2)$$

где Z_1 – первый безразмерный параметр; π_2 – температурный параметр, °С.

При этом:

$$Z_1 = 8,13 - 0,088 (\delta t_1 + \delta t_2); \quad (3)$$

$$\pi_2 = -\frac{\Delta(t_1 - t_2)}{A}, \quad (4)$$

где A – параметр, определяющий полезно используемую при сушке теплоту, кДж/кг:

$$A = 2500 + 1,88 t_2 - \Delta.$$

Для определения параметров воздуха на выходе испарителя (влажности $d_3 = d_1$ и температуры t_3) следует использовать уравнения, предложенные в работе [3].

Следует отметить, что если граничная температура $t_{3,гр}$ не зависит от влажности и влагосодержания отработавшего СА, то температура t_3 однозначно связана с этими параметрами. При этом увеличение влажности отработавшего СА сопровождается увеличением температуры t_3 , что способствует выполнению неравенства (1).

Разность температур воздуха на выходе и входе конденсатора ТН определяется по формуле:

$$\delta t = 5,68 \left(Z_2 - \sqrt{Z_2^2 - 0,352 B Z_1} \right), \quad (5)$$

где Z_2 – второй безразмерный параметр; B – размерный параметр, °С.

Для определения этих параметров предложены уравнения:

$$Z_2 = Z_1 + 0,088 B - 1;$$

$$B = t_1 - t_3 - \pi_2.$$

После расчета разности температур воздуха на выходе и входе конденсатора оказывается возможным найти другие неизвестные величины:

– температуру воздуха на выходе конденсатора:

$$t_4 = t_3 + (\delta t);$$

– удельный расход теплоты в дополнительном нагревателе:

$$q_n = A \frac{t_1 - t_4}{t_1 - t_2}; \quad (6)$$

– удельный расход электрической энергии на привод компрессора:

$$l = -\Delta - q_n; \quad (7)$$

– разность температур конденсации в конденсаторе и испарения в испарителе:

$$\delta t_{тн} = \delta t + \delta t_1 + \delta t_2; \quad (8)$$

– коэффициент преобразования ТН по формуле из работы [3];

– удельный расход теплоты при использовании ТН для осушения и рециркуляции воздуха в конвективной зерносушилке:

$$q_{т3} = \frac{l}{\eta_1 \eta_2} + \frac{q_n}{\eta_3}, \quad (9)$$

где η_1 и η_2 – КПД тепловой электростанции и коэффициент потерь энергии в электросетях; η_3 – КПД воздушнонагревателя;

– удельный расход теплоты при сушке традиционным способом с использованием нагретого воздуха в качестве СА:

$$q_T = A \frac{t_1 - t_0}{(t_1 - t_2) \eta_3}; \quad (10)$$

– относительную экономию теплоты и топлива:

$$b = (q_T - q_{т3}) / q_T. \quad (11)$$

Система вышеприведенных уравнений устанавливает тесную взаимосвязь между энергетическими и температурными параметрами режимов работы ТН и КЗС.

Предложенная методика расчета и вышеприведенные уравнения были использованы для следующих типовых вариантов сушки:

- вариант 1 – сушка семян гороха;
- вариант 2 – сушка семян трав;
- вариант 3 – сушка семенного зерна;
- вариант 4 – сушка семян кукурузы;
- вариант 5 – сушка гречихи;
- вариант 6 – сушка продовольственного зерна пшеницы.

Параметры теплового режима сушки определены согласно [5, 6]. Наименьшие температурные напоры в испарителе и конденсаторе приняты равными 6 °С.

При проверке возможности использования ТН для осушения и рециркуляции отработавшего СА относительная влажность воздуха на выходе сушильной камеры во всех вариантах принята равной 80%.

Результаты расчетов даны в табл. 1.

Анализ табличных данных позволил заключить,

Таблица 1. Расчет температур воздуха на выходе испарителя

Параметры, единицы величин	Источник, номер формулы	Вариант					
		1	2	3	4	5	6
$t_1, ^\circ\text{C}$	Принято	50	60	70	55	90	120
$t_2, ^\circ\text{C}$	Принято	30	28	35	35	35	42
$d_2, \text{г/кг}$	[5]	22,0	19,7	29,5	29,5	29,5	44,5
$\Delta, \text{кДж/кг}$	Принято	-1250	-1750	-2000	-1500	-2000	-2000
$d_1 = d_3, \text{г/кг}$	[3]	16,5	12,0	21,5	24,3	17,0	26,5
$t_3, ^\circ\text{C}$	[3]	22,0	17,0	26,2	28,2	22,5	29,5
Z_1	(3)	7,074	7,074	7,074	7,074	7,074	7,074
$\pi_2, ^\circ\text{C}$	(4)	6,57	13,01	15,33	7,4	24,1	34,06
$t_{3,гр}, ^\circ\text{C}$	(2)	20,6	17,0	23,8	23,3	35,3	59,7

что применение ТН в комплекте с дополнительным нагревателем для осушения и рециркуляции отработавшего СА возможно при низкотемпературной сушке семян и семенного зерна при параметрах теплового режима работы ТН и КЗС, отвечающих неравенству (1) как условию совместности используемой системы уравнений.

В случае сушки гречихи и продовольственного зерна пшеницы (варианты 5 и 6) оказывается невозможным использование ТН в исследуемых условиях

в связи с невыполнением условия совместности системы уравнений. Расчетное значение температуры t_3 не удовлетворяет неравенству (1), т.к. оказывается меньше граничного значения температуры $t_{3,гр}$.

Дальнейшие расчеты выполнены для вариантов сушки 1, 2 и 3. При этом ставилась задача установить влияние на экономию теплоты и топлива при использовании ТН следующих параметров: влажности отработавшего СА, КПД тепловых электростанций и разности добавлений и расходов теплоты в сушильной камере.

При расчетах приняты следующие исходные данные: $\eta_2 = 0,92$; $\eta_3 = 0,91$; $\delta t_1 = \delta t_2 = 6 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ и два значения КПД тепловых электростанций: $\eta_1 = 0,38$ и $\eta_1 = 0,51$.

Анализ полученных результатов позволил установить, что экономия теплоты и топлива в КЗС при использовании ТН для осушения и рециркуляции отработавшего СА во многом определяется влажностью отработавшего в сушильной камере воздуха и КПД тепловых электростанций. Даже незначительное увеличение влажности отработавшего СА сопровождается существенным увеличением экономии теплоты и топлива.

Результаты расчетов, выполненных для сушки семенного зерна (вариант 3) в зависимости от влажности отработавшего СА и КПД электростанций, представлены на рис. 2.

Крайние левые точки на графиках характерны для применения ТН без дополнительных нагревателей. Очевидно из графиков, что использование ТН в комплексе с дополнительными нагревателями способствует увеличению эффекта энергосбережения.

Увеличение относительной влажности отработавшего СА (воздуха) от 72 до 85% при сушке семенного зерна сопровождается уменьшением удельных расходов теплоты от 5700 до 4400 кДж/кг при КПД электростанции $\eta_1 = 0,38$ или от 4250 до 3450 кДж/кг при КПД электростанции $\eta_1 = 0,51$. При этом экономия теплоты и топлива увеличивается соответственно от 38,5 до 53% и от 54 до 63%.

Во многом определяющим фактором в формировании условий возможного применения ТН для воздухоосушения в зерносушилках является значение разности добавлений и расходов теплоты в СК [3].

Поэтому соответствующий интерес вызывает анализ влияния этой величины на показатели энергоэффективности применения ТН с целью осушения и рециркуляции воздуха в КЗС.

Необходимо отметить, что применение ТН в анализируемых условиях возможно при повышенных по модулю значениях этой разности добавлений и расходов теплоты. Такие значения характерны для сушки гороха, фасоли, проса, рапса и др. культур, для которых снижение влажности за один проход через сушилку составляет от 2 до 4%.

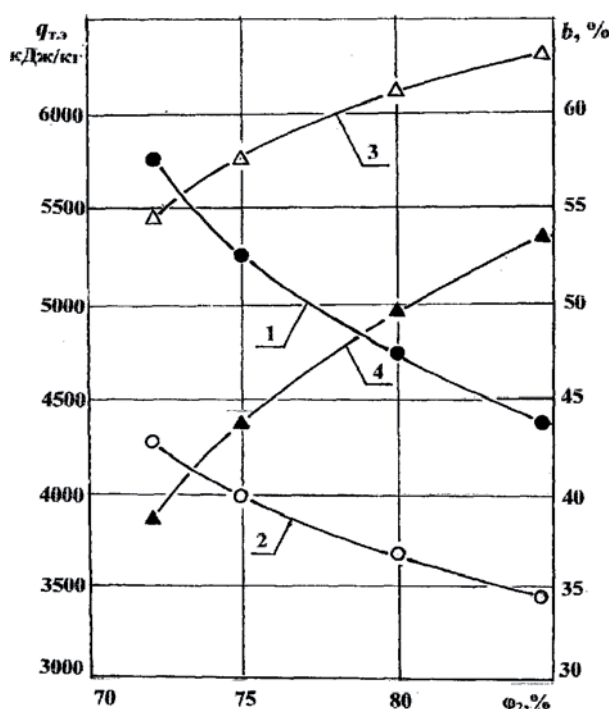


Рис. 2. Удельный расход теплоты и экономия теплоты и топлива при сушке семенного зерна с использованием ТН:

1 – удельный расход теплоты при КПД электростанции $\eta_1 = 0,38$; 2 – то же при КПД электростанции $\eta_1 = 0,51$; 3 – относительная экономия теплоты и топлива при $\eta_1 = 0,51$; 4 – то же при $\eta_1 = 0,38$.

Проводимая в настоящее время модернизация сушильного оборудования сопровождается увеличением доли испаряемой влаги в процессе охлаждения продукции. В результате происходит увеличение расходов теплоты на испарение 1 кг влаги в процессе сушки непосредственно в сушильной камере и значения по модулю величины Δ .

В связи с этими обстоятельствами процесс сушки во многих случаях может протекать при значениях Δ от -1000 до -3000 кДж/кг.

Расчет расходов теплоты при сушке семян гороха и трав при вышеуказанных исходных данных был выполнен в зависимости от величины Δ в допустимом интервале ее значений (табл.2) Относительная влажность отработавшего в СК воздуха принята равной 80%.

Увеличение по модулю величины Δ связано с увеличением расходов теплоты непосредственно в сушильной камере и сопровождается увеличением расходов теплоты на сушку продукции. При этом увеличивается коэффициент преобразования ТН, что объясняется уменьшением разности температуры СА на выходе и входе конденсатора ТН и необходимой разности температур конденсации и испарения.

Таблица 2. Удельные расходы теплоты и относительная экономия теплоты и топлива

Параметры, единицы величин	Источник, номер формулы	Вариант сушки					
		1			2		
		при Δ , кДж/кг					
		-1250	-1750	-2250	-1750	-2250	-2750
$t_{3,гр}, ^\circ\text{C}$	(2)	20,55	16,5	13,7	15,0	14,3	12,3
$t_3, ^\circ\text{C}$	[3]	22,0	22,7	23,08	16,8	18,1	18,8
$\delta t, ^\circ\text{C}$	(5)	27,26	24,0	21,77	43,2	36,5	32,17
$q_n, \text{кДж/кг}$	(6)	140	707	1238	0	827	1497
$l, \text{кДж/кг}$	(7)	1110	1043	1012	1750	1423	1253
$\delta t_{тн}$	(8)	39,26	36,0	33,77	55,4	48,5	44,17
μ	[3]	4,67	4,96	5,16	3,3	3,86	4,24
$q_t, \text{кДж/кг}$	(10)	9410	10640	11890	8130	9072	10015
при $\eta_1 = 0,38$							
$q_{тэ}, \text{кДж/кг}$	(9)	3330	3760	4250	5005	4980	5230
$b, \%$	(11)	64,5	64,5	64,1	38,5	45,2	47,8
при $\eta_1 = 0,51$							
$q_{тэ}, \text{кДж/кг}$	(9)	2520	3000	3520	3730	3940	4315
$b, \%$	(11)	73,3	71,8	70,4	54,1	56,5	56,9

Относительная экономия теплоты и топлива в варианте сушки 1 несущественно зависит от величины Δ , а в варианте сушки 2 при $\eta_1 = 0,38$ заметно увеличивается с ростом величины Δ .

Согласно полученным данным влияние разности добавлений и расходов теплоты в сушильной камере на относительную экономию теплоты и топлива при сушке зерна и семян взаимосвязано с влиянием других параметров режимов работы КЗС и ТН.

Заключение

Использование ТН для осушения и рециркуляции отработавшего СА при сушке зерна и семян возможно при параметрах теплового режима сушки, отвечающих условию совместности системы уравнений, описывающих исследуемые процессы. Условия совместности формулируются в виде неравенства (1).

Температурные и энергетических параметры режимов работы КЗС и ТН однозначно определяются параметрами теплового режима сушки, наименьшими температурными напорами в конденсаторе и испарителе ТН, а так же показателями эффективности производства и передачи электрической и тепловой энергии. Искомые параметры режимов работы КЗС и ТН не могут быть приняты произвольно, а должны быть определены исходя из математической модели исследуемых процессов.

Расчетные значения коэффициента преобразования ТН находятся в пределах от 3 до 5,1 при принятых условиях использования ТН для осушения и рециркуляции отработавшего СА (воздуха).

Экономия теплоты и топлива в КЗС при использовании ТН в рассмотренных в данной работе условиях составляет от 38,5 до 73,5%.

Несмотря на приведенные высокие значения достигаемой экономии теплоты и топлива для решения вопроса о возможности использования предлагаемого технического решения требуется технико-

экономическое обоснование. Особое значение здесь имеют стоимость топлива, тарифы на электрическую энергию и капитальные затраты.

При этом следует учесть, что необходимым является оборудование КЗС не только тепловым насосом, но и воздуховодами и вентиляторами для организации рециркуляции СА, а также фильтрами-обеспылевателями для очистки отработавшего СА от загрязнений – от пыли, шелухи и т.п. В связи с этим, потребуются решение ряда конструктивных проблем, что будет связано с увеличением капитальных затрат.

Представляется целесообразным использование ТН для осушения и рециркуляции отработавшего СА на шахтных зерносушилках, как наиболее распространенных на предприятиях сельского хозяйства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Рэй, Д. Тепловые насосы/ Д. Рэй, Д. Макмайкл. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
3. Цубанов, А.Г. К вопросу энергосбережения в конвективных зерносушилках / А.Г. Цубанов, А.Л. Сиянков, И.А.Цубанов // Агропанорама, №3, 2009. – С. 22-27.
4. Янговский, Е.И. Промышленные тепловые насосы/ Е.И. Янговский, Л.А. Левин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
5. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки/ В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов – М.: Колос, 1982. – 239 с.
6. Малин, Н.И. Справочник по сушке зерна/ Н.И. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.
7. Цубанов, А.Г. Тепловые насосы – утилизаторы теплоты отработавшего сушильного агента / А.Г. Цубанов, А.Л. Сиянков, И.А.Цубанов // Агропанорама, №2, 2010. – С. 27-31.