

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В КОНВЕКТИВНЫХ ЗЕРНОСУШИЛКАХ ПУТЕМ РЕЦИРКУЛЯЦИИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

А.Л.Синяков, канд. техн. наук, доцент, И.А.Цубанов, ст. преподаватель (УО БГАТУ)

Аннотация

Предложена методика расчета энергосбережения в конвективных зерносушилках за счет рециркуляции сушильного агента. Выполнен анализ влияния отдельных параметров работы конвективных зерносушилок на условия и возможности энергосбережения при рециркуляции сушильного агента.

Введение

Наибольшие потери теплоты при сушке зерна связаны с удалением отработавшего сушильного агента (СА) в атмосферу, при этом в атмосферу сбрасывается и полезно использованная при сушке теплота, непосредственно израсходованная на испарение влаги из влажного продукта.

Рециркуляция СА является методом повышения, как энергетической, так и экологической эффективности конвективных зерносушилок. Она способствует уменьшению тепловых отходов, сбрасываемых в атмосферу.

Рециркуляция СА характеризуется отсутствием необходимости в использовании специализированного энергосберегающего оборудования: тепловых насосов и теплоутилизаторов.

Некоторые сведения о тепловых процессах в конвективных сушилках с рециркуляцией СА даны в литературе [1– 4] и носят отрывочный, а иногда и противоречивый характер.

Задачи исследования состоят в восполнении пробела в этой области. Его цель заключается в разработке методики расчета тепловых процессов и энергосбережения в конвективных зерносушилках с рециркуляцией СА и в анализе влияния отдельных параметров на условия и возможности снижения расходов теплоты при сушке зерна.

Основная часть

Рассмотрим рециркуляцию СА в конвективных зерносушилках, в которых при сушке используется смесь топочных газов с воздухом. Такие зерносушил-

ки получили широкое распространение в сельскохозяйственном производстве [1, 4-8].

Для упрощения анализа тепловлажностных процессов, происходящих в СА при его приготовлении, введем следующие допущения:

- рециркулирующая часть СА предварительно смешивается с наружным воздухом;
- образовавшаяся смесь используется в процессе горения топлива и смешивается с топочными газами.

Принципиальная схема сушильной установки с учетом этих допущений представлена на рис. 1.

Наружный воздух из атмосферы смешивается с рециркулирующей частью СА и поступает в топочное устройство (Т), в котором предусмотрена камера смешения с топочными газами. Приготовленный СА подается в сушильную камеру (СК), на выходе которой одна его часть выпускается в атмосферу, а другая возвращается путем рециркуляции и смешивается с наружным воздухом.

Вместо удаляемой в атмосферу части сушильного агента подается такое же количество наружного (атмосферного) воздуха. Влага, удаляемая при сушке из зерна, ассимилируется, в конечном счете, подаваемым наружным воздухом.

На схеме обозначены характерные состояния воздуха и сушильного агента:

- 0 – наружный (атмосферный) воздух;
- 1 – приготовленный СА на входе в сушильную камеру;
- 2 – отработавший СА на выходе из сушильной камеры;
- 3 – смесь воздуха с рециркулирующей частью СА.



Рисунок 1. Принципиальная схема сушильной установки с рециркуляцией сушильного агента

Процессы изменения тепловлажностного состояния сушильного агента и воздуха в сушильной установке показаны на рис. 2.

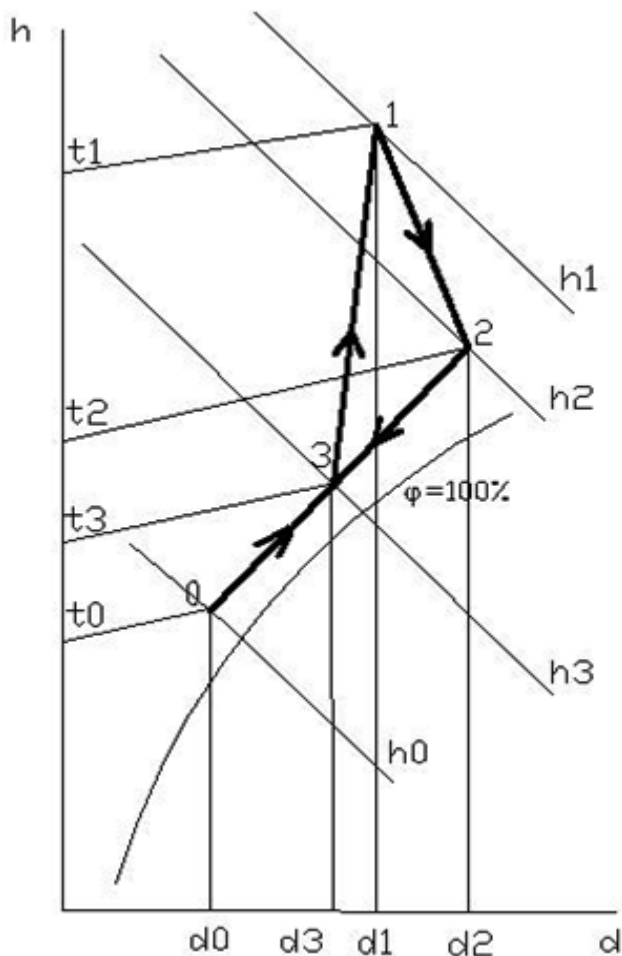


Рисунок 2. Процессы изменения состояния воздуха и сушильного агента

Графически представлены: 1-2 – процесс увлажнения СА в сушильной камере; 2-3 и 0-3 – процесс смешения рециркулирующей части СА с воздухом; 3-1 – ветвь процесса приготовления СА в топочном устройстве с камерой смешения.

При этом не показан процесс изменения состояния топочных газов при смешении с образовавшейся смесью воздуха и рециркулирующей части СА.

Для параметров сушильного агента (воздуха) приняты следующие обозначения: d – влагосодержание, г/кг; h – энтальпия, кДж/кг; ϕ – относительная влажность, %; t – температура, °С.

Нумерация точек соответствует принятой при составлении расчетной схемы зерносушилки. Индексы при параметрах означают номера характерных точек.

При анализе теплового режима зерносушилки будем считать происходящие в ней процессы стационарными, установившимися во времени. Математическое описание стационарных режимов работы обычно сводится к алгебраическим уравнениям [9]. В нашем случае

используем основные алгебраические уравнения, характеризующие процессы приготовления СА и изменения его состояния при сушке продукта [4-8].

Входными параметрами математической модели являются исходные данные к расчету:

- температуры СА на входе и выходе сушильной камеры, соответственно t_1 и t_2 , °С;
- параметры наружного воздуха: температура t_0 , °С; влагосодержание d_0 , г/кг, и энтальпия h_0 , кДж/кг;
- относительная влажность отработавшего СА (максимально допустимая), %;
- разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере Δ , кДж/кг, отнесенная к 1 кг испаренной влаги;
- теплота сгорания топлива, используемая в процессе приготовления сушильного агента, Q_T , кДж/кг;
- масса водяных паров m_p , кг/кг, образовавшихся при сгорании 1 кг топлива;
- масса сухой части воздуха L_T , кг/кг, подаваемого в топочное устройство при отсутствии рециркуляции из расчета на 1 кг топлива.

Параметры СА и воздуха входят в состав параметров теплового режима сушки, которые принимаются согласно нормам проектирования. Значения величин Q_T , m_p и L_T находят при тепловом расчете приготовления СА в топочном устройстве [6-8].

Разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере характеризует ее внутренний тепловой баланс и изменение тепловлажностного состояния СА в процессе сушки. В конвективных зерносушилках преобладают расходы теплоты в сушильной камере, поэтому значения величины Δ имеют знак «минус».

Выходными параметрами математической модели являются:

- влагосодержание приготовленного СА d_1 , г/кг;
- масса приготовленного СА из расчета на 1 кг сжигаемого топлива L , кг/кг;
- массы наружного воздуха и рециркулирующей части СА, соответственно, L_B и L_P из расчета на 1 кг топлива, кг/кг;
- параметры смеси воздуха с рециркулирующей частью СА;
- коэффициент рециркуляции k_p ;
- удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги из продукта q , кДж/кг.

Приготовленный СА обладает свойствами влажного воздуха в связи со значительным избытком воздуха в смеси воздуха с топочными газами. Под массой СА и воздуха будем подразумевать массу сухой их части. При малом влагосодержании допустимо принимать массу сухой части влажного воздуха равной массе всего влажного воздуха.

Удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги при сушке влажного продукта объективно отражает энергетическую экономичность работы конвективных зерносушилок. Сравнение удельных расходов теплоты при рециркуляции СА и при однократном его использовании позволяет оценить принципиальные возможности и масштабы снижения расходов тепловой энергии на сушку.

Коэффициент рециркуляции будем определять как отношение массы рециркулирующей части СА ко всей его массе. При этом коэффициент рециркуляции характеризует долю СА, повторно используемую в сушильном процессе, и может изменяться в пределах от 0 до 1.

Исходя из уравнения для расчета влагосодержания отработавшего СА [6,8], находим влагосодержание приготовленного СА:

$$d_1 = \frac{d_2 - \pi_1}{1 + 1,86 \cdot 10^{-3} \pi_1}, \quad (1)$$

где π_1 – обобщенный параметр.

$$\pi_1 = \frac{1010(t_1 - t_2)}{A}.$$

При этом A – параметр, характеризующий процесс сушки, кДж/кг:

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

Влагосодержание d_1 имеет вполне определенное значение в зависимости от принятого (заданного) влагосодержания отработавшего СА и найденного по исходным данным параметра π_1 .

Разность влагодержаний:

$$d_2 - d_1 = \frac{(1010 + 1,88d_1)(t_1 - t_2)}{A}. \quad (2)$$

Для определения требуемой массы СА в целом и его частей запишем уравнения материального (по водяным парам) и теплового баланса топочного устройства и камеры смешения из расчета на 1 кг топлива

$$L_B d_0 + L_P d_2 + 1000m_n = (L_B + L_P)d_1,$$

$$L_B h_0 + L_P h_2 + Q_T = (L_B + L_P)h_1.$$

При записи приведенных уравнений в правой их части в скобках опущена разность $(1 - m_n)$, характеризующая приращение массы сухих топочных газов при сгорании топлива, ввиду ее малости по сравнению с другими слагаемыми. При расчете величины Q_T следует учесть высшую теплоту сгорания из расчета на 1 кг рабочей массы топлива и КПД топочного устройства.

Решая систему этих двух уравнений, находим зависимости для расчета:

– массы наружного воздуха

$$L_B = \frac{1000(Q_T - m_n \Delta)}{1000(h_1 - h_0) - (d_1 - d_0)\Delta}; \quad (3)$$

– массы рециркулирующей части СА

$$L_P = \frac{L_B(d_1 - d_0) - 1000m_n}{d_2 - d_1}; \quad (4)$$

– массы всего СА

$$L = \frac{L_B(d_2 - d_0) - 1000m_n}{d_2 - d_1}; \quad (5)$$

– коэффициента рециркуляции согласно принятому определению

$$k_p = L_P / L. \quad (6)$$

Уравнение (3) получено с использованием основных закономерностей изменения состояния СА при сушке влажного продукта [6–8].

Коэффициент рециркуляции может быть определен на базе уравнений (2), (4) и (5) в виде выражения:

$$k_p = 1 - \frac{(1010 + 1,88d_1)(t_1 - t_2)}{A(d_2 - d_0 - \delta d_B)}. \quad (7)$$

где δd_B – увлажнение наружного воздуха при асимилиации им всех водяных паров в топочном устройстве, г/кг;

$$\delta d_B = 1000m_n / L_B.$$

Следует заключить, что коэффициент рециркуляции однозначно определяется параметрами теплового режима сушки и не может быть принят произвольно. Он зависит от температуры и влагосодержания СА на входе и выходе сушильной камеры, от степени увлажнения СА в камере смешения с топочными газами, от значения величины Δ , а также от влагосодержания наружного воздуха.

В вышеприведенных зависимостях существенное значение имеет влагосодержание отработавшего СА, которое является параметром, во многом определяющим коэффициент рециркуляции и другие характеристики приготовления СА перед его использованием для сушки зерна.

Представляется целесообразным выполнять расчеты в зависимости от принятого влагосодержания отработавшего СА при его оптимальной относительной влажности. Значение влагосодержания необходимо принимать исходя из требований обеспечения благоприятных условий для процесса сушки и энергосбережения в конвективных зерносушилках.

Известно [1], что повышение влагосодержания отработавшего СА, с одной стороны, способствует увеличению коэффициента рециркуляции и снижению расходов теплоты при сушке зерна, а с другой – приводит к уменьшению движущей силы массообмена и может вызвать увеличение продолжительности сушки и габаритов сушильной камеры.

Параметры смеси воздуха с рециркулирующей частью СА:

– энтальпия, кДж/кг:

$$h_3 = (1 - k_p)h_0 + k_p h_2; \quad (8)$$

– влагосодержание, г/кг:

$$d_3 = (1 - k_p)d_0 + k_p d_2; \quad (9)$$

– температура:

$$t_3(1 - k_p)t_0 + k_p t_2. \quad (10)$$

Уравнение (10) позволяет приближенно определить температуру газовой смеси, принимая ее как смесь сухих газов и сухого воздуха. В общем случае температуру газовой смеси находят, пользуясь зависимостью энтальпии влажного воздуха от температуры и влагосодержания [6, 8].

Удельный расход СА из расчета на 1 кг испаренной из продукта влаги обратно пропорционален раз-

ности влагосодержания СА на выходе и входе сушильной камеры и согласно уравнению (2) определяется в основном параметром A и температурами СА на входе и выходе сушильной камеры. Некоторое влияние рециркуляции на расход СА связано с увеличением влагосодержания приготовленного СА и не является существенным. В связи с этим следует заключить, что рециркуляция СА не приводит к заметному увеличению его расхода.

Удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги при использовании рециркуляции сушильного агента, кДж/кг:

$$q_p = (t_1 - t_3 + x_{\text{пр}}) \frac{A}{t_1 - t_2}, \quad (11)$$

и $x_{\text{пр}}$ – приведенный параметр, °С:

$$x_{\text{пр}} = 2,5\delta d / (1,01 + 1,88 \cdot 10^{-3} d_1).$$

В вышеприведенном выражении δd – увлажнение СА в топочном устройстве при смешении с топочными газами:

$$\delta d = 1000m_n/L.$$

Аналогично находим при однократном использовании СА ($k_p = 0$):

$$q_0 = (t_1 - t_0 + x_{\text{пр.о}}) \frac{A}{t_1 - t_2}, \quad (12)$$

где $x_{\text{пр.о}}$ – приведенный параметр, °С, при $k_p = 0$:

$$x_{\text{пр.о}} = 2,5\delta d_T / (1,01 + 1,88 \cdot 10^{-3} d_{1,0}).$$

При этом:

$d_{1,0}$ – влагосодержание СА на входе сушильной камеры при отсутствии рециркуляции:

$$d_{1,0} = d_0 + \delta d_T;$$

δd_T – увлажнение СА в топочном устройстве с камерой смешения при отсутствии рециркуляции:

$$\delta d_T = 1000m_n/L_T.$$

Погрешность уравнений (10) и (11) не превышает 1,5%.

Для оценки достигаемого эффекта энергосбережения используем относительную экономию теплоты в процессе сушки:

$$b = \frac{q_0 - q_p}{q_0}. \quad (13)$$

В случае использовании воздуха как сушильного агента или при малом образовании водяных паров при сгорании топлива уравнение (13) может быть преобразовано к виду:

$$b = \frac{k_p (t_2 - t_0)}{t_1 - t_0}. \quad (14)$$

Таким образом, в принятых условиях сушки относительная экономия теплоты прямо пропорциональна коэффициенту рециркуляции. Полученное

уравнение (14) может быть использовано для расчета снижения расходов теплоты в первом приближении.

Методика расчета энергосбережения при рециркуляции СА включает следующие этапы:

- выбор максимально допустимой влажности и влагосодержания отработавшего СА, расчет влагосодержания приготовленного СА и разности его влагосодержания на выходе и входе сушильной камеры по уравнениям (1) и (2);

- расчет масс воздуха и СА, а так же коэффициента рециркуляции по формулам (3), (4), (5) и (6);

- определение параметров газовой смеси воздуха и рециркулирующего СА по уравнениям (8), (9) и (10);

- определение расходов теплоты и относительного снижения расходов теплоты по зависимостям (11), (12) и (13);

- вывод о целесообразности использования рециркуляции СА с целью энергосбережения.

Предложенную методику используем для расчета расходов теплоты и энергосбережения в зависимости от параметров теплового режима сушки зерна, семян и др. культур, принятых согласно рекомендациям литературы [5, 6]. Расчеты выполним для жидкого топлива – тракторного керосина, приняв значения величин: $m_n = 1,233$ кг/кг; $Q_T = 44200$ кДж/кг [6]. При этом будем принимать относительную влажность отработавшего СА, равной максимально допустимой в зерносушилках: $\varphi_2 = 80\%$.

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Анализ вышеприведенных зависимостей и результатов расчетов позволяет заключить, что на размеры уменьшения расходов теплоты существенное влияние оказывают параметры наружного воздуха, разность температур СА на входе и выходе сушильной камеры, а также температура и влагосодержание отработавшего СА.

Увеличение температуры и влагосодержания наружного воздуха приводит к резкому уменьшению возможностей экономии теплоты при рециркуляции СА (примеры расчетов 2 и 3).

При уменьшении разности температур СА на входе и выходе сушильной камеры наблюдается заметное снижение расходов теплоты на сушку (см. примеры расчетов 1 и 2, а также 4 и 5).

Влияние параметра Δ согласно примерам расчета 3 и 4 оказывается не столь значительным в принятом интервале его изменения.

Нетрудно убедиться, что при повышенных расходах теплоты при сушке с однократным использованием СА создаются благоприятные условия для энергосбережения путем применения рециркуляции СА.

Выводы

1. За счет рециркуляции СА достигается снижение расходов теплоты в конвективных зерносушилках в размере 10 – 35% в зависимости от исходных параметров теплового режима сушки.

Таблица 1

Расчет расходов теплоты и энергосбережения

Параметры, единицы величин	Источник, номер формулы	Вариант					
		1	2	3	4	5	6
$t_1, ^\circ\text{C}$	Принято	150	70	70	70	60	60
$t_2, ^\circ\text{C}$	Принято	47	35	35	35	35	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	Принято	5	5	20	20	5	5
$d_0, \text{г/кг}$	Принято	3,5	3,5	10,5	10,5	3,5	3,5
$h_0, \text{кДж/кг}$	Принято	13,8	13,8	47	47	13,8	13,8
$d_2, \text{г/кг}$	Принято	58,8	29,5	29,5	29,5	29,5	22,0
$h_2, \text{кДж/кг}$	Расчет [5]	199,7	111	111	111	111	86,4
$L_{т.}, \text{кг/кг}$	Расчет [5]	282	628	817	817	742	742
$\Delta, \text{кДж/кг}$	Принято	-1336	-1300	-1300	-800	-800	-800
$d_1, \text{г/кг}$	(1)	30,78	20,0	20,0	18,6	21,7	12,75
$h_1, \text{кДж/кг}$	Расчет [5]	237,1	123,4	123,4	119,6	117,4	93,9
$L_b, \text{кг/кг}$	(3)	176,5	348	516	571	383	516
$L_p, \text{кг/кг}$	(4)	127,5	476	387	314	734	383
$L, \text{кг/кг}$	(5)	304	824	903	885	1117	899
k_p	(6)	0,42	0,58	0,43	0,35	0,66	0,43
$h_3, \text{кДж/кг}$	(8)	91,9	70	74,5	69,4	77,95	45,05
$d_3, \text{г/кг}$	(9)	26,7	18,5	18,7	17,15	20,7	11,45
$t_3, ^\circ\text{C}$	(10)	22,64	22,34	26,45	25,25	24,8	15,75
$q_p, \text{кДж/кг}$	(11)	5210	5640	5170	4630	5090	5320
$q_0, \text{кДж/кг}$	(12)	5930	7720	5930	5160	7920	6620
$b, \%$	(13)	12,2	27,0	12,8	10,3	35,7	19,6

2. Эффект энергосбережения при рециркуляции СА определяется, в основном, параметрами наружного воздуха и сушильного агента на входе и выходе сушильной камеры. Меньшее влияние оказывают расходы теплоты непосредственно в сушильной камере и дополнительное увлажнение СА в топочном устройстве с камерой смешения.

3. Рециркуляция СА оказывается наиболее эффективной в условиях низкотемпературной сушки зерна и семян при низких температурах наружного воздуха.

4. Коэффициент рециркуляции, а также расходы наружного воздуха и сушильного агента не могут быть приняты произвольно, а должны быть рассчитаны по уравнениям (3), (4), (5), (6) и (7).

5. Коэффициент рециркуляции увеличивается:

- при снижении разности температур сушильного агента на входе и выходе сушильной камеры;

- при росте температуры и влажности отработавшего сушильного агента, что приводит к увеличению его влагосодержания;

- при уменьшении влагосодержания наружного воздуха и дополнительного увлажнения сушильного агента в топочном устройстве.

- при увеличении значения параметра A , и, следовательно, при увеличении расходов теплоты в сушильной камере.

6. Рециркуляция СА не приводит к заметному увеличению его расхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке/ О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Лебедев, П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев. – М.: Энергия, 1966. – 288 с.
3. Малин, Н.И. Энергосберегающая сушка зерна/ Н.И. Малин. – М.: Колос, 2004. – 240 с.
4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник/ под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 586 с.
5. Гришин, М.А. Установки для сушки пищевых продуктов: справочник/ М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 215 с.
6. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки/ В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
7. Малин, Н.И. Справочник по сушке зерна/ Н.И. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.
8. Справочник по теплоснабжению сельского хозяйства/ Л.С. Герасимович, А.Г. Цубанов, Б.Х. Драганов, А.Л. Синяков. – Мн.: Ураджай, 1993. – 368 с.
9. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств/ В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высш. школа, 1991. – 400 с.