

К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В КОНВЕКТИВНЫХ ЗЕРНОСУШИЛКАХ

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

Аннотация

Определены условия и возможности энергосбережения в конвективных зерносушилках при использовании тепловых насосов для осушения воздуха.

Введение

Сушка сельскохозяйственной продукции относится к энергоемким технологическим процессам и характеризуется большими потерями теплоты с отработавшим сушильным агентом, которые могут достигать 60% и более от теплоты, затрачиваемой при сушке.

Решение задач энергосбережения в конвективных зерносушилках неразрывно связано с утилизацией теплоты отработавшего сушильного агента. Некоторые сведения по применению тепловых насосов с этой целью приведены в литературе [1, 2, 3] и носят в основном описательный характер.

Рассмотрим использование парокомпрессионного теплового насоса (ТН) в зерносушилках по схеме с осушением воздуха без дополнительного его нагрева в условиях низкотемпературной сушки семенного зерна, семян трав и др. культур (рис. 1). Температура

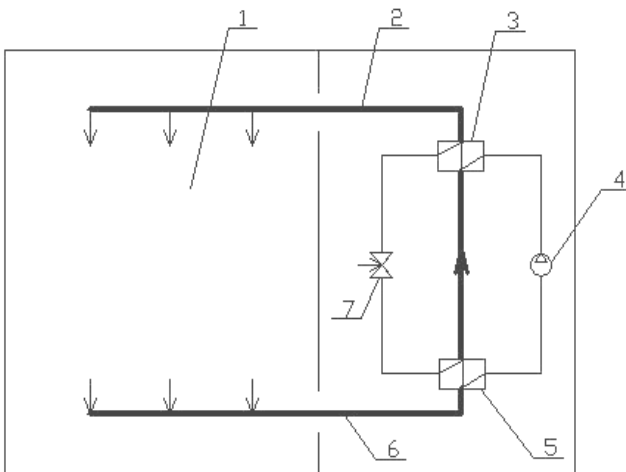


Рисунок 1. Принципиальная схема применения ТН в зерносушилках

сушильного агента не превышает 70 °С.

Сушильным агентом является воздух, который циркулирует по замкнутому контуру через сушильную камеру 1 при помощи каналов 2 и 6.

Воздух увлажняется при сушке влажного продукта в сушильной камере 1, осушается с выпадением

конденсата при охлаждении в испарителе 5 и нагревается в конденсаторе 3 до заданной температуры.

При нагреве воздуха в конденсаторе используется теплота, переданная в испарителе рабочему веществу (хладону) от охлаждаемого воздуха, а также теплота, эквивалентная затратам энергии на привод компрессора.

Для сжатия рабочего вещества (хладона) в ТН установлен компрессор 4, а для понижения его давления и температуры – терморегулирующий вентиль (регулятор давления) 7.

Целью исследований является определение условий и возможностей энергосбережения в конвективных зерносушилках при использовании ТН для осушения воздуха.

Основная часть

Процессы изменения состояния воздуха в сушильной установке с тепловым насосом как воздухоосушителем показаны на рис.2.

Процесс охлаждения изображен согласно правилу прямой линии, которое характеризует тепло- и массообмен между влажным воздухом и поверхностью испарителя, на которой выпадает конденсат из воздуха [4].

На диаграмме приняты обозначения:

– параметров воздуха: d – влагосодержание, г/кг; h – энтальпия, кДж/кг; ϕ – относительная влажность, %; t – температура, °С;

– характерных точек состояний воздуха: 1 – при поступлении в сушильную камеру; 2 – на выходе сушильной камеры; 3 – на выходе испарителя.

Индексы при параметрах означают номера характерных точек.

Согласно принятой расчетной схеме воздух полностью пропускается вначале через испаритель, а затем – через конденсатор ТН. Относительная влажность воздуха на выходе испарителя $\phi \cong 100\%$.

Исходными данными к расчету выбраны параметры теплового режима работы конвективной зерносушилки [5]:

– температура сушильного агента на входе и выходе сушильной камеры, соответственно t_1 , °С и t_2 , °С;

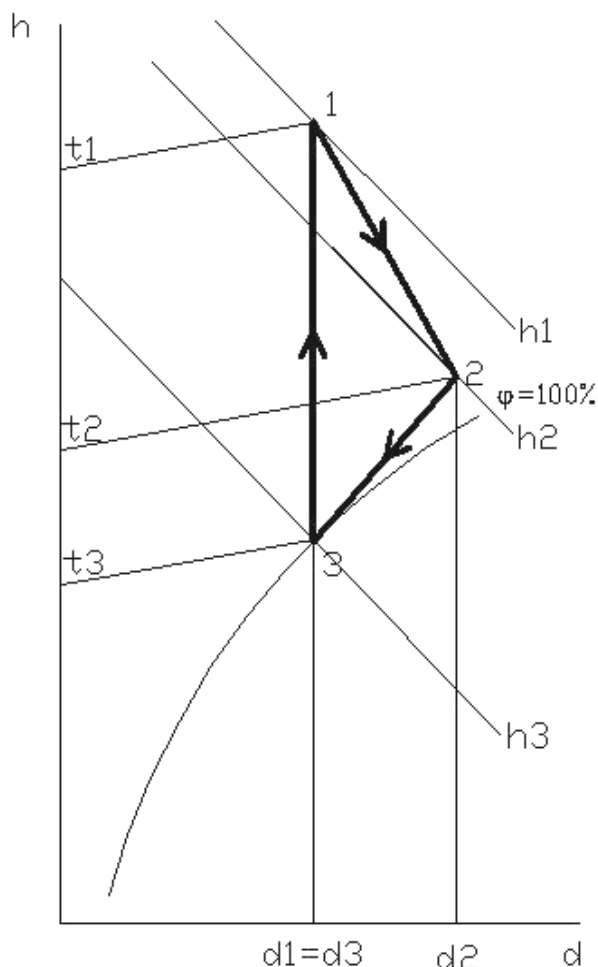


Рисунок 2. Процессы изменения состояния воздуха:
1-2 – процесс увлажнения в сушильной камере;
2-3 – процесс охлаждения и осушения в испарителе;
3-1 – процесс нагрева в конденсаторе

– разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере из расчета на 1 кг испаренной из продукта влаги, Δ , кДж/кг;

– температура наружного воздуха t_0 °С.

Расчет потребления теплоты и энергии целесообразно производить с использованием удельных расходов теплоты и энергии, отнесенных к 1 кг влаги, испаренной из влажного продукта в процессе сушки. Такие показатели наглядно характеризуют затраты энергии на сушку и достаточно объективно отражают энергетическую экономичность зерносушилок.

Условия энергосбережения определяются параметрами работы ТН: коэффициентом преобразования μ , разностью температур конденсации и испарения рабочего вещества (хладона) $\delta t_{\text{ТН}}$ °С, и удельными затратами электрической энергии на привод компрессора $l_{\text{км}}$, кДж/кг. Знание этих параметров необходимо для анализа работы тепловых насосов и условий их применения в зерносушилках.

Коэффициент преобразования представляет собой отношение теплоты, переданной в конденсаторе нагреваемому воздуху, к энергозатратам на привод

компрессора. Он зависит в основном от температур конденсации и испарения и мало зависит от природы рабочего вещества (хладона) [3, 6, 7].

Анализ данных [6, 7] позволил установить зависимость:

$$\mu = 8,13 - 0,088\delta t_{\text{ТН}}. \quad (1)$$

Уравнение (1) получено при разности температур $\delta t_{\text{ТН}}$ в интервале от 30 до 65°С. При этом температуры конденсации $40^\circ\text{C} \leq t_k \leq 80^\circ\text{C}$ и испарения $5^\circ\text{C} \leq t_n \leq 15^\circ\text{C}$. Погрешность уравнения (1) не превышает 7%.

Температуры конденсации и испарения характеризуют условия нагрева воздуха в конденсаторе и его охлаждения в испарителе до требуемых температур.

Температура конденсации должна удовлетворять условию $t_k > t_1$, а температура испарения – условию $t_n < t_3$. При индексации температур воздуха использована нумерация характерных точек (рис.2).

Для расчета разности температур конденсации и испарения следует пользоваться формулой:

$$\delta t_{\text{ТН}} = t_1 - t_3 + \delta t_1 + \delta t_2, \quad (2)$$

где δt_1 и δt_2 – наименьшие температурные напоры в конденсаторе и испарителе, их значения допустимо принимать в пределах от 5 до 10°С.

При этом $\delta t_1 = t_k - t_1$, а $\delta t_2 = t_3 - t_n$.

В случае применения ТН для осушения воздуха в зерносушилках удельные затраты энергии на привод компрессора определяются внутренним тепловым балансом сушильной камеры и оказываются равными разности добавлений и расходов теплоты в сушильной камере:

$$l_{\text{км}} = -\Delta. \quad (3)$$

Конвективные зерносушилки характеризуются значением величины $\Delta < 0$ в связи с большими расходами теплоты на нагрев зерна и семян. Для снижения энергозатрат на работу ТН необходимо уменьшить значение величины Δ по модулю путем уменьшения расходов теплоты в сушильной камере.

Коэффициент преобразования при работе ТН в принятых условиях

$$\mu = \frac{(t_1 - t_3)A}{(t_1 - t_2)l_{\text{км}}}, \quad (4)$$

где A – параметр, характеризующий процесс сушки, кДж/кг.

$$A = 2500 + 1,88t_2 - \Delta. \quad (5)$$

В уравнения (1), (2), (3) и (4) входят неизвестные величины: разность температур $\delta t_{\text{ТН}}$, коэффициент преобразования μ , удельные затраты энергии на привод компрессора $l_{\text{км}}$ и температура воздуха на выходе испарителя t_3 .

Решая эту систему уравнений, находим:

$$\delta t_{\text{ТН}} = \frac{8,13(t_1 - t_2) + B(\delta t_1 + \delta t_2)}{0,088(t_1 - t_2) + B}, \quad (6)$$

где параметр $B = -A/\Delta$.

Исходя из вышеизложенного, следует, что параметры работы ТН в рассматриваемых условиях определяются параметрами теплового режима сушки и наименьшими температурными напорами в испарителе и конденсаторе и не могут быть приняты (заданы) произвольно.

Величина $\delta t_{\text{ТН}}$ уменьшается при снижении расходов теплоты в сушильной камере и уменьшении разности температур воздуха на входе и выходе сушильной камеры.

Снижение величины $\delta t_{\text{ТН}}$ при заданной температуре нагрева воздуха приводит к повышению температуры охлажденного воздуха на выходе испарителя и смещению процесса сушки в более влажную область состояний воздуха. Более того, может получиться, что расчетное влагосодержание воздуха на выходе сушильной камеры превышает влагосодержание насыщенного воздуха при заданной температуре t_2 и влажный воздух оказывается в области перенасыщенного состояния (в области тумана).

В таком случае должна существовать минимально допустимая разность температур конденсации и испарения, которую обозначим как $\delta t'_{\text{ТН}}$. При разности температур конденсации и испарения меньше этого значения происходит увлажнение воздуха в сушильной камере до недопустимо высокой влажности.

Условия применения ТН в конвективных зерносушилках для осушения воздуха определяются неравенством

$$\delta t_{\text{ТН}} \geq \delta t'_{\text{ТН}} \quad (7)$$

С учетом выражения (2) получаем:

$$\delta t'_{\text{ТН}} = t_1 - t'_3 + \delta t_1 + \delta t_2, \quad (8)$$

где t'_3 – максимально допустимая температура воздуха после охлаждения в испарителе, °С.

Такой температуре в точке 3 должна соответствовать максимально допустимая относительная влажность воздуха на выходе сушильной камеры в

точке 2 (рис. 2). Значение этой влажности при сушке зерна и семян не должно превышать 80%.

Для расчета температуры t'_3 требуется найти максимально допустимые значения влагосодержания воздуха на выходе сушильной камеры и после испарителя, соответственно d'_2 и d'_3 .

Влагосодержание воздуха, г/кг, при температуре t_2 и относительной влажности $\varphi = 80\%$ определяется зависимостью

$$\ln d'_2 = 1,296 + 0,059t_2. \quad (9)$$

Влагосодержание воздуха, г/кг, на выходе испарителя

$$d'_3 = \frac{Ad'_2 - 1010(t_1 - t_2)}{A + 1,88(t_1 - t_2)}. \quad (10)$$

Температура воздуха на выходе испарителя, °С, при относительной влажности $\varphi \cong 100\%$ рассчитывается по формуле:

$$t'_3 = 15,9(\ln d'_3 - 1,42). \quad (11)$$

Уравнение (9) получено при температуре t_2 в интервале от 20 до 40 °С, а уравнение (11) – при влагосодержании d'_3 в пределах от 5 до 50 г/кг. Погрешность уравнений не превышает 1%.

При нахождении формул (9) и (11) использованы табличные данные о параметрах состояния влажного воздуха, а при выводе зависимости (10) – основные закономерности увлажнения воздуха в процессе сушки [5].

Используя равенство $\delta t_{\text{ТН}} = \delta t'_{\text{ТН}}$ в формуле (6), найдем максимально допустимую разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере Δ' исходя из условия обеспечения допустимой влажности воздуха на выходе сушильной камеры.

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Разность температур $(t_1 - t_2)$ обозначена как δt . Значения в столбцах под буквой А даны при

Таблица 1. Максимально допустимое значение Δ' , кДж/кг

$\delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$							
	25		30		35		40	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
10	-1020	-1200	-1000	-1150	-950	-1120	-940	-1120
15	-1100	-1320	-1040	-1250	-970	-1200	-950	-1150
20	-1300	-1600	-1160	-1450	-1070	-1300	-1020	-1260
25	-1560	-1980	-1340	-1700	-1200	-1550	-1140	-1460
30	-1920	-2550	-1590	-2150	-1410	-1900	-1310	-1760
35	-2430	-3400	-1970	-2800	-1710	-2450	-1560	-2230
40	-3180	-4750	-2520	-3950	-2170	-3400	-1940	-3050

$(\delta t_1 + \delta t_2) = 12^\circ\text{C}$, а в столбцах под буквой Б – при $(\delta t_1 + \delta t_2) = 20^\circ\text{C}$.

При расчете энергосбережения в качестве базового варианта принимаем конвективную сушку, при которой для нагрева сушильного агента используется топливо, сжигаемое в топочном устройстве зерносушилки.

Целесообразность применения ТН в конвективных зерносушилках характеризуется относительной экономией теплоты:

$$b = (q_T - q_{T3}) / q_T, \quad (12)$$

где q_T и q_{T3} – удельные расходы теплоты при традиционной сушке и при производстве электрической энергии на электростанциях для привода компрессора ТН, кДж/кг.

Удельные расходы теплоты:

$$q_T = \frac{A(t_1 - t_0)}{(t_1 - t_2)\eta_T}, \quad (13)$$

где η_T – КПД топочного устройства;

$$q_{T3} = l_{\text{км}} / (\eta_e \eta_{\text{эл}}), \quad (14)$$

где η_e и $\eta_{\text{эл}}$ – эффективный КПД электростанции и коэффициент потерь энергии в электросетях.

В случае сжигания жидкого или газообразного топлива $\eta_T = 0,95$, а при сжигании твердого – $\eta_T = 0,8$. Производство и передача электрической энергии характеризуются средними значениями $\eta_e = 0,35$ и $\eta_{\text{эл}} = 0,95$.

Относительная экономия теплоты определяется удельными затратами энергии на привод компрессора, параметрами теплового режима сушки, а также значениями КПД электростанций и топочных устройств.

Представляется целесообразным рассматривать варианты применения ТН в зерносушилках при условии снижения расходов теплоты не менее чем на 15%.

Используя условие относительной экономии теплоты в приведенном размере, находим на основе формул (3), (12), (13) и (14) минимально допустимое

значение разности добавлений и расходов теплоты в сушильной камере:

$$\Delta'' = - \frac{(2500 + 1,88t_2)C}{1,88 + C}, \quad (15)$$

где C – параметр энергосбережения:

$$C = \frac{(t_1 - t_0)\eta_e \eta_{\text{эл}}}{(t_1 - t_2)\eta_T}.$$

Уравнением (15) следует пользоваться при $C < 1,18$.

Параметр энергосбережения уменьшается при увеличении разности температур сушильного агента на входе и выходе сушильной камеры и при снижении температуры отработавшего сушильного агента в пределе до температуры наружного воздуха. Его уменьшение приводит к снижению энергозатрат при традиционной конвективной сушке и ограничивает возможности энергосбережения при использовании ТН в конвективных зерносушилках.

Показатели расчета минимально допустимого значения величины Δ'' по уравнению (15) даны в табл.2.

Прочерк в таблице означает, что не выполняется условие $C < 1,18$.

Из вышеизложенных положений следует, что условия и возможности энергосбережения при использовании ТН как осушителей воздуха в конвективных зерносушилках определяются параметрами теплового режима сушки. При этом решающее влияние оказывает разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере. Ее значение должно находиться во вполне определенном пределе, ограниченном минимально и максимально допустимыми значениями:

$$\Delta'' \leq \Delta \leq \Delta' \quad (16)$$

Условия применения ТН согласно неравенству (16) связаны с тем, что удельные энергозатраты энергии на привод компрессора, определяемые по формуле (3), должны быть достаточны и для нагрева воздуха до заданной температуры без применения дополнительных нагревателей, и для обеспечения энерго-

Таблица 2. Минимально допустимое значение Δ'' , кДж/кг

$\delta t, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$			
	25	30	35	40
10	-3700	-7300	-20700	–
15	-2500	-3750	-5750	-9700
20	-2050	-2750	-3750	-5150
25	-1800	-2300	-2950	-3750
30	-1650	-2050	-2500	-3050
35	-1550	-1900	-2250	-2650
40	-1500	-1750	-2050	-2400

сбережения в требуемых размерах.

Рассматривая вышеприведенные данные, необходимо учесть, что разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере при сушке зерна и семян в конвективных зерносушилках может находиться в пределах от -700 до -2500 кДж/кг.

Анализ данных табл. 1 и 2 позволяет установить, что при разности температур $\delta t = 40^\circ\text{C}$ оказывается невозможным применение ТН в принятых условиях, а при разности температур δt , равной 30°C или 35°C возможности применения ТН существенно ограничены.

Методика расчета расходов теплоты и энергосбережения включает следующие этапы:

- составление исходных данных согласно рекомендациям по тепловому режиму сушки и результатам теплового расчета сушильной камеры [5];

- рассмотрение возможности использования ТН в конвективной зерносушилке, основываясь на неравенстве (16);

- расчет основных параметров работы ТН и температуры воздуха на выходе испарителя по уравнениям (1), (2), (3), (4) и (6);

- расчет расходов теплоты и энергосбережения по уравнениям (12), (13) и (14);

- заключение о целесообразности использования предлагаемого варианта энергосбережения.

Предложенную методику расчета используем при расчете расходов теплоты и энергосбережения в условиях низкотемпературной сушки семенного зерна, семян трав и др. культур (табл.3).

Параметры теплового режима сушки приняты согласно рекомендациям [5, 8]. Варианты расчета расположены в порядке возрастания температуры воздуха на входе сушильной камеры. Расчет проведен при значениях величин: $\delta t_1 = \delta t_2 = 6^\circ\text{C}$, $t_0 = 15^\circ\text{C}$, $\eta_r = 0,95$, $\eta_e = 0,35$ и $\eta_{эл} = 0,95$.

В табл. 3 включены результаты расчета максимально допустимой температуры воздуха на выходе испарителя t_3' и минимально допустимой разности температур конденсации и испарения $\delta t_{тн}'$ для проверки выполнения неравенства (7).

В рассмотренных вариантах принятая разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере находится в допустимых пределах, ее значение удовлетворяет неравенству (16).

Анализ результатов расчета и полученных уравнений позволяет заключить, что снижение расходов теплоты и топлива определяется, в первую очередь, внутренним тепловым балансом сушильной камеры. Чем больше разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере превышает минимально допустимое значение, тем значительней эффект энергосбере-

Таблица 3. Расходы теплоты в конвективной зерносушилке

Параметр	Единица величины	Номер формулы	Вариант			
			1	2	3	4
t_1	$^\circ\text{C}$	Принято	40	50	55	70
t_2	$^\circ\text{C}$	Принято	25	30	30	35
Δ	кДж/кг	Принято	-1250	-1250	-1500	-2000
Δ'	кДж/кг	Табл. 1	-1100	-1160	-1340	-1710
Δ''	кДж/кг	Табл. 2	-2500	-2750	-2300	-2250
$l_{км}$	кДж/кг	(3)	1250	1250	1500	2000
A	кДж/кг	(5)	3800	3805	4055	4565
$\delta t_{тн}$	$^\circ\text{C}$	(6)	36,3	41,4	48,1	58,1
μ	-	(1)	4,9	4,5	3,9	3,0
t_3	$^\circ\text{C}$	(2)	15,7	20,6	18,9	23,8
d_2'	г/кг	(9)	16,2	21,9	21,9	29,4
d_3'	г/кг	(10)	12,1	16,4	15,5	21,4
t_3'	$^\circ\text{C}$	(11)	17,1	21,9	20,9	26,1
$\delta t_{тн}'$	$^\circ\text{C}$	(9)	34,9	40,1	46,1	55,9
q_T	кДж/кг	(13)	6660	7010	6830	7550
$q_{тз}$	кДж/кг	(14)	3760	3760	4510	6020
b	%	(12)	43,5	46,4	33,9	20,3

жения при использовании ТН как воздухоосушителей. В связи с этим особое значение приобретает оптимизация теплового режима сушки с целью снижения расходов теплоты непосредственно в сушильной камере.

Выводы

1. При использовании ТН в конвективных зерносушилках по схеме с осушением воздуха достигается снижение расходов теплоты и топлива на сушку зерна и семян в размере 20-46% в зависимости от параметров теплового режима сушки. Определяющим фактором является разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере.

2. Основные параметры работы ТН (удельные затраты энергии на привод компрессора, коэффициент преобразования и разность температур конденсации и испарения) не могут быть приняты произвольно или включены в число исходных данных. Значения этих показателей необходимо определять по уравнениям (1), (2), (3), (4) и (6).

3. Условия работы ТН в конвективных зерносушилках как осушителей воздуха устанавливают неравенства (7) и (16).

4. Расчет энергосбережения должен производиться согласно предложенной методике с учетом характера и особенностей процессов нагрева, увлажнения и осушения воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке/ О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Рей, Д. Тепловые насосы/ Д. Рей, Д. Макмайкл. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
3. Янговский, Е.И. Промышленные тепловые насосы/ Е.И. Янговский, Л.А. Левин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
4. Данилова, Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок/ Г.Н. Данилова [и др.]; под общ. ред. Г.Н. Даниловой. – Л.: Машиностроение, 1986. – 303 с.
5. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки/ В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
6. Быков, А.В. Холодильные машины и тепловые насосы. Повышение эффективности/ А.В. Быков, И.М. Калнинь, А.С. Крузе. – М.: Агропромиздат, 1988. – 287 с.
7. Холодильные машины: справочник/ А.И. Азаров [и др.]; под ред. А.В. Быкова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 224 с.
8. Малин, Н.Н. Справочник по сушке зерна/ Н.Н. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.

УДК 635.21.077: 621.365

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 13.04.2009

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Е.М. Заяц, докт. техн. наук, профессор, В.С. Корко, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ);
А.Е. Заяц, канд. техн. наук (ООО «АТЕМ»)

Аннотация

Приведены результаты анализа эффективности использования электрической энергии в технологических процессах, рассмотрены теоретические основы и сравнительные показатели технологий обработки органических дисперсных материалов электрическим током и тепловыми способами. Определены перспективные направления использования электрической энергии в технологических процессах сельскохозяйственного производства.

Введение

Анализ публикаций по перспективам потребления энергии показывает дальнейшее увеличение доли электрической энергии в общем балансе энергопотребления сельским хозяйством. Это обусловлено простотой транспортировки и универсальностью электрической энергии. От одного электрического

ввода в здание можно получить практически все виды энергии: механическую, тепловую, оптическую, химическую и другие [1, 2, с. 8-11].

В реальных технологиях электроэнергия оказывает комплексное влияние на предмет труда [1, 3...5]. Однако значимость действующих факторов различна, в одном процессе каким-то из них можно пренебречь, а в