

## ВЛИЯНИЕ КПД КОНВЕКТИВНЫХ ЗЕРНОСУШИЛОК НА ЭКОНОМИЮ ТОПЛИВА

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

### Аннотация

*Обоснованылагаемые полезно использованной теплоты в конвективных зерносушилках, дан вывод обобщенной формулы для расчета КПД конвективных зерносушилок и установлена зависимость экономии топлива от КПД зерносушилок при рециркуляции отработавшего сушильного агента и утилизации его теплоты.*

*Components of usefully used warmth in convection grain dryers have been validated, conclusion of generalized formula of calculation of coefficient of efficiency of grain dryers has been given, and dependence of economy of fuel on coefficient of efficiency of grain dryers has been found.*

### Введение

Конвективные зерносушилки (КЗС) характеризуются значительными расходами теплоты и топлива, во многих случаях превышающими теоретически необходимые в несколько раз. В связи с этим разработка и внедрение энергоэффективных КЗС является одним из направлений энергосбережения в сельском хозяйстве.

Определяя экономию топлива в КЗС, достигаемую за счет использования энергосберегающих способов сушки, представляется целесообразным установить зависимость между КПД и достигаемой экономией топлива. Это позволит по известному значению КПД оценить возможности и размеры энергосбережения.

В связи с этим необходимо остановиться на определении КПД и полезно использованной теплоты в КЗС.

Для расчета КПД при сушке нагретым воздухом рекомендуются следующие формулы:

– при отсутствии рециркуляции сушильного агента (СА) [1, 2]

$$\eta_B = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}, \quad (1)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры СА на входе и выходе сушильной камеры (шахты), °С;  $t_0$  – температура наружного (атмосферного) воздуха, °С;

– при использовании рециркуляции СА [3]

$$\eta'_B = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0 - k(t_2 - t_0)}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент рециркуляции как отношение массы рециркулирующей части СА ко всей его массе.

В разъяснениях к рекомендуемым уравнениям (1) и (2) ничего не говорится о полезно используемой при сушке теплоте.

В ряде работ [4-6] утверждается, что полезно использованной при сушке теплотой является теплота, израсходованная непосредственно на испарение вла-

ги из продукции, и что КПД конвективной сушилки представляет собой отношение этой теплоты ко всей затраченной при сушке теплоте. Такой выбор полезно использованной теплоты и определения КПД не согласуется в реальном процессе сушки с уравнениями (1) и (2) и был назван формализованным, принятым без учета специфики процесса сушки как тепломассообменного процесса [1].

Особенности процесса сушки проявляются и в том, что при общепринятой методике в тепловом балансе сушильной камеры отсутствует теплота, израсходованная на испарение влаги [1, 7]. Из теплового баланса КЗС следует, что затраченная на сушку теплота расходуется на компенсацию теплопотерь с отработавшим (уходящим) СА и в окружающую среду через стены сушильной камеры, а также на нагрев зерна и семян. Теплота, затраченная на испарение влаги из зерна и семян, аккумулируется СА и входит в состав теплопотери с отработавшим СА.

Известна попытка ввести в тепловой баланс сушильной камеры теплоту, затраченную на испарение влаги [4, 6]. Такой же прием использован и в ТКП 149-2008. Затраченная теплота определяется суммой расходов теплоты на испарение влаги, с уходящим СА, на нагрев зерна и семян, а также в окружающую среду, при этом теплопотери с уходящим СА предлагается рассчитывать через разность температур, а не энтальпий. Такой прием является явно искусственным и приводит к занижению теплопотери с уходящим СА по сравнению с ее действительным значением.

В связи с вышеизложенными положениями остается открытым вопрос о КПД зерносушилок и полезно использованной при сушке теплоте.

Цель настоящих исследований:

– установить зависимости для расчета КПД конвективных зерносушилок и полезно использованной при сушке теплоты;

– изучить влияние КПД конвективных зерносушилок на экономию топлива, достигаемую при рециркуляции отработавшего СА и утилизации его теплоты.

### Основная часть

Представляется целесообразным подходить к понятиям «КПД» и «полезно использованная теплота» применительно к КЗС, исходя из взаимосвязи между этими понятиями, устанавливаемой уравнением:

$$q_1 = q\eta, \quad (3)$$

где  $q_1$  и  $q$  – полезно использованная и затраченная удельная теплота из расчета на 1 кг испаренной влаги, кДж/кг;  $\eta$  – КПД зерносушилки.

С целью определения КПД и полезно использованной теплоты были преобразованы к форме уравнения (3) зависимости, ранее полученные в работах [8, 9] для расчета расходов теплоты при сушке зерна и семян:

– при сушке нагретым воздухом без рециркуляции СА

$$A = q \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}, \quad (4)$$

где  $A$  – параметр, характеризующий процесс сушки, кДж/кг;

– при сушке смесью топочных газов с воздухом без рециркуляции СА

$$A = q \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0 + X_0}, \quad (5)$$

где  $X_0$  – температурный параметр, учитывающий расходы теплоты при парообразовании в процессе горения топлива, °С.

– при сушке смесью топочных газов с воздухом в сушилке с рециркуляцией СА

$$A = q \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3 + X}, \quad (6)$$

где  $t_3$  – температура газовой смеси воздуха с рециркулирующей частью СА, °С;  $X$  – температурный параметр, определяемый с учетом рециркуляции СА, °С.

Температура газовой смеси [8]:

$$t_3 = (1 - k)t_0 + kt_2, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент рециркуляции как отношение массы рециркулирующей части СА ко всей его массе.

Используя уравнения (6) и (7), находим

$$A = q \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0 - k(t_2 - t_0) + X}. \quad (8)$$

Анализ уравнений (4), (5) и (8) позволяет сделать выводы:

– по своей структуре они аналогичны формуле (3);  
– дроби в их правой части представляют собой КПД зерносушилок, а в уравнениях (4) и (8) при  $X = 0$  соответствуют формулам (1) и (2) для расчета КПД при сушке нагретым воздухом;

– для расчета КПД конвективных зерносушилок в рассмотренных вариантах сушки следует рекомендовать обобщенную формулу:

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0 - k(t_2 - t_0) + X}. \quad (9)$$

При сушке газовой смесью и отсутствии ее рециркуляции в полученное выражение необходимо подставлять вместо параметра  $X$  параметр  $X_0$ .

Уравнение (9) в случае сушки нагретым воздухом ( $X = 0$ ) при отсутствии рециркуляции СА ( $k = 0$ ) переходит в уравнение (1), а при использовании рециркуляции – в уравнение (2).

Из уравнений (4), (5) и (8) следует, что если КПД зерносушилок определяется по уравнениям (1) и (2) или по обобщенной формуле (9), то полезно использованная при сушке теплота равна параметру  $A$ .

В таком случае, используя зависимость для расчета параметра  $A$  [8]:

$$q_1 = A = 2500 + 1,88 t_2 - \Delta, \quad (10)$$

где  $\Delta$  – разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере, кДж/кг.

При записи величины  $A$  ранее было принято:

– теплота парообразования  $r_0 = 2500$  кДж/кг;  
– удельная изобарная теплоемкость водяных паров  $c_p = 1,88$  кДж/(кг × К).

Используем для преобразования уравнения (10) зависимость, характеризующую внутренний тепловой баланс зерносушилки [1, 7]:

$$\Delta = c_w t' - q_1' - q_1'',$$

где  $c_w$  – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг × К);  $t'$  – температура продукции при поступлении на сушку, °С;  $q_1'$  и  $q_1''$  – удельные расходы теплоты на нагрев зерна и семян, а также в окружающую среду через стены сушильной камеры, кДж/кг.

После подстановки в формулу (10) обозначений теплоты парообразования и удельной изобарной теплоемкости водяных паров вместо их числовых значений, а также составляющих величины  $\Delta$  запишем:

$$q_1 = (r_0 + c_p t_2 - c_w t') + q_1' + q_1'' \quad (11)$$

Величина в круглых скобках характеризует теплоту, расходуемую непосредственно на испарение 1 кг влаги из продукции.

Полезно использованная в КЗС теплота, определяемая по уравнениям (10) и (11), включает расходы теплоты на испарение влаги в процессе сушки, на нагрев зерна и семян, а также через стены сушильной камеры в окружающую среду.

Следует указать, что согласно формуле (11), полезно использованная теплота в теоретическом процессе сушки ( $\Delta = 0$ ) равна теплоте, израсходованной на испарение влаги.

Относительное уменьшение расхода топлива в КЗС может быть определено исходя из сравнения удельных расходов теплоты на сушку:

$$b = \frac{q_0 - q_E}{q_0}, \quad (12)$$

где  $q_0$  и  $q_E$  – затраченная удельная теплота из расчета на 1 кг испаряемой влаги при традиционном способе сушки и при использовании рециркуляции СА или утилизации его теплоты, кДж/кг.

При сушке нагретым воздухом в условиях рециркуляции СА расчет удельной теплоты был выполнен по формулам (4) и (8), принимая  $X = 0$ .

Исходя из уравнения (12) было установлено:

$$b = k(1 - \eta_B). \quad (13)$$

В случае сушки смесью воздуха с топочными газами и рециркуляции СА при расчетах относительной экономии топлива были использованы уравнения (5), (8) и (12) и была получена зависимость:

$$b = \frac{k(t_2 - t_0) + X_0 - X}{t_1 - t_0 + X_0}.$$

Преобразование этой зависимости на основе формул, ранее предложенных в работе [8] для расчета параметров  $X_0$  и  $X$ , позволило установить, что данная зависимость является тождественной уравнению (13). Об этом свидетельствует сопоставление расчетных значений по уравнению (13) с данными работы [8], приведенное в табл.1.

**Таблица 1. Расчет экономии топлива при рециркуляции СА**

Параметры, единицы величин	Источник, номер формулы	Вариант [8]					
		1	2	3	4	5	6
$t_1, ^\circ\text{C}$	[8]	150	70	70	70	60	60
$t_2, ^\circ\text{C}$	[8]	47	35	35	35	35	30
$t_0, ^\circ\text{C}$	[8]	5	5	20	20	5	5
$\Delta, \text{кДж/кг}$	[8]	-1336	-1300	-1300	-800	-800	-800
$k$	[8]	0,42	0,58	0,43	0,35	0,66	0,43
$b, \%$	[8]	12,2	27,0	12,8	10,3	35,7	19,6
$\eta_B$	(1)	0,71	0,54	0,7	0,7	0,455	0,545
$b, \%$	(13)	12,2	26,8	12,9	10,5	36,0	19,6

Результаты расчета практически полностью совпадают друг с другом. В связи с этим при расчете экономии топлива за счет рециркуляции СА следует использовать уравнение (13) независимо от природы СА: нагретый воздух или газоздушная смесь.

Влиянием КПД на экономию топлива объясняется:

- большая экономия топлива при низкотемпературной сушке семенного зерна (варианты 2, 5 и 6) по сравнению с сушкой продовольственного зерна (вариант 1) при одной и той же температуре наружного воздуха;
- снижение экономии топлива при повышении температуры наружного воздуха (варианты 2, 3 и 4).

Рассмотрим влияние КПД на экономию топлива в КЗС при утилизации теплоты отработавшего СА.

В исследуемой схеме (рис.1) атмосферный наружный воздух (НВ) нагревается вначале в теплоутилизаторе (ТУ) за счет теплоты отработавшего СА, а затем в нагревателе (Н) до требуемой температуры.

В качестве нагревателя предусмотрен огневой воздухоподогреватель с нагревом воздуха газообразными продуктами сгорания топлива.

СА подается в сушильную камеру (СК), где используется в процессе сушки влажного продукта, а затем проходит через ТУ и удаляется в атмосферу.

Энергоэффективность работы ТУ характеризуется температурным коэффициентом эффективности, который определяет его действительную тепловую мощность по отношению к теоретически возможной тепловой мощности [1,10].

При расчете были приняты равными удельные изобарные теплоемкости и массовые расходы подаваемого в зерносушилку наружного воздуха и отработавшего СА. В таком случае температурный коэффициент эффективности:

$$E = \frac{t_3 - t_0}{t_2 - t_0}, \quad (14)$$

где  $t_3$  – температура НВ на выходе теплоутилизатора,  $^\circ\text{C}$ .

Отсюда следует:

$$t_3 = t_0 + E(t_2 - t_0). \quad (15)$$

Аналогично уравнению (3) с заменой температуры  $t_0$  на температуру  $t_3$  может быть получена зависимость при утилизации теплоты СА:

$$A = q_E \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_3} \quad (16)$$

На основе уравнений (4), (12) и (16) было найдено:

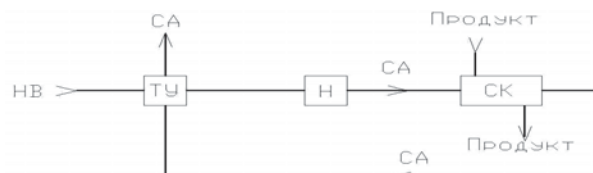
$$b = E(1 - \eta_B). \quad (17)$$

Коэффициент эффективности ТУ типа «воздух – воздух» в реальных условиях эксплуатации находится в пределах от 0,35 до 0,7 [10] в зависимости от их конструктивного оформления.

Данные расчета по формуле (17) при среднем значении коэффициента эффективности  $E = 0,5$  для вышеприведенных вариантов сушки приведены в табл. 2.

Для сравниваемых энергосберегающих мероприятий оказывается примерно одинаковой экономия топлива и предпочтительней по сравнению с утилизацией теплоты может оказаться рециркуляция СА в связи с меньшими капитальными затратами.

Уравнения(13) и (17) характеризуют влияние КПД зерносушилок на экономию топлива при рециркуляции отработавшего СА и утилизации его теплоты. Они являются простыми по форме и показывают, что относительная экономия топлива прямо пропор-



**Рисунок 1. Принципиальная схема КЗС с теплоутилизатором**

**Таблица 2. Расчет экономии топлива при утилизации теплоты отработавшего СА**

Параметры, единицы величин	Источник, номер формулы	Вариант [8]					
		1	2	3	4	5	6
$\eta_B$	(1)	0,71	0,54	0,7	0,7	0,455	0,545
$b, \%$	(17)	14,5	23,0	15,0	15,0	27,3	22,8

циональна доле непроизводительных потерь теплоты в КЗС, определяемой как  $(1 - \eta_B)$ .

Структура этих уравнений аналогична, отличие только в том, что при рециркуляции отработавшего СА коэффициент пропорциональности в уравнении является коэффициент рециркуляции, а при утилизации теплоты отработавшего СА – температурный коэффициент эффективности ТУ.

Коэффициент рециркуляции определяется в основном параметрами теплового режима сушки, а температурный коэффициент эффективности – параметрами работы ТУ, характеризующими условия теплопередачи в ТУ.

#### Заключение

Слагаемыми полезно использованной теплоты в КЗС являются расходы теплоты на испарение влаги из продукции, на нагрев продукции и в окружающую среду через стены сушильной камеры.

В теоретическом процессе сушки полезно использованная теплота равна расходу теплоты на испарение влаги.

КПД конвективных зерносушилок и полезно использованную теплоту следует рассчитывать по формулам (9), (10) и (11).

Влияние КПД конвективных зерносушилок на экономию топлива, достигаемую при рециркуляции и утилизации теплоты отработавшего СА, характеризуется уравнениями (13) и (17).

Установлено, что чем меньше КПД зерносушилки, тем больше достигаемое снижение расходов топ-

лива при сушке зерна и семян как при рециркуляции отработавшего СА, так и при утилизации его теплоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, В.А. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справоч. / В.А. Григорьев, В.М. Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 586 с.
2. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
3. Рей, Д. Тепловые насосы/ Д. Рей, Д. Макмайкл. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
4. Атаназевич, В.И. Сушка пищевых продуктов: справоч. пособ. / В.И. Атаназевич. – М.: ДеЛи, 2000. – 296 с.
5. Малин, Н.И. Справочник по сушке зерна/ Н.И. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.
6. Гришин, М.А. Установки для сушки пищевых продуктов: справочн./ М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 215 с.
7. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
8. Синяков, А.Л. Энергосбережение в конвективных зерносушилках путем рециркуляции сушильного агента / А.Л. Синяков, И.А. Цубанов // Агропанорама. – №5, 2009. – С. 40-44.
9. Цубанов, А.Г. К вопросу энергосбережения в конвективных зерносушилках / А.Г. Цубанов, А.Л. Синяков, И.А. Цубанов // Агропанорама. – №3, 2009. – С. 22-27.
10. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: справоч. пособ./Л.Д. Богуславский и [др.]; под общ. ред. Л.Д. Богуславского и В.И. Ливчака. – М.: Стройиздат, 1990.– 624 с.

**“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.**

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на первое полугодие 2013 года: для индивидуальных подписчиков - 80250 руб., ведомственная подписка - 142836 руб.