

успешно, при этом скорость его на глинистых и меловых выработках несколько выше, чем на песчано-гравийных. В составе травостоя на этих отвалах значительную часть занимали ценные кормовые травы семейства мотыльковых и злаковых. Флористический состав всех пробных площадок оказался сравнительно однородным. Культурные травосмеси, высеваемые при освоении таких почвопород, должны в большей мере соответствовать этим семействам.

Наибольшая биологическая активность отмечена в нанесенных на супесчаную и суглинистую почвопороды гумусового горизонта почв под однолетними культурами и люпином многолетним (опыты 1 и 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьев, В.А. Природа Беларуси / В.А. Дементьев, А.Х. Шкляр, О.Ф. Якушко. – Минск, 1989. – 138 с.
2. Сметанин, В.И. Рекультивация и обустройство нарушенных земель: учебн. – М.: Колос, 2000. – 394 с.

3. Логинов, В.Ф. Состояние природной среды Беларуси / В.Ф. Логинов // Экологический бюллетень, 2009. – №2.

4. Лотош, В.Е. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов / В.Е. Лотош // Антропогенные факторы деградации почв и рекультивация нарушенных земель. – Минск, 2004. – №2. – С. 2-16.

5. Хомич, С.А. Оптимизация объектов водоохозяйственной рекультивации / С.А. Хомич // Природные ресурсы: межвед. бюллетень. – Минск, 2000. – №2. – С. 89-94.

6. Красильников, Н.А. Методы изучения почвенных микроорганизмов и их метаболитов / Н.А. Красильников. – М.: МГУ, 1986. – 93 с.

7. Бабьева, И.П. Практическое руководство по биологии почв / И.П. Бабьева, Н.С. Агре. – М.: МГУ, 1971. – 126 с.

8. Лиштван, И.И. Вересковые при фиторекультивации выработанных торфяных месторождений / И.И. Лиштван // Наука и инновации. – Мн., 2010. – №41. – С. 35.

УДК 664.723

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 23.03.2012

К ВОПРОСУ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА В КОНВЕКТИВНЫХ ЗЕРНОСУШИЛКАХ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

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

Аннотация

Разработана методика расчета экономии топлива в конвективных зерносушилках с рециркуляцией сушильного агента – смеси топочных газов с наружным воздухом. Получены формулы, позволяющие рассчитать параметры топочных газов, газовой смеси и сушильного агента, а также расходы наружного воздуха и сушильного агента, при которых достигается максимальная экономия топлива.

The methodology of calculation of economy of fuel in convective grain dryers with recirculation of the drying agent – mixes of furnace gases with external air is developed. The formulas, allowing calculating parameters of furnace gases, an air-gas mix and the drying agent, and also expenses of external air and the drying agent at which the maximum economy of fuel can be reached are received.

Введение

В сельском хозяйстве Республики Беларусь работают около 3,5 тысяч зерноочистительно-сушильных комплексов (ЗСК) и около 1,5 тысяч отдельно установленных зерносушилок (ЗС). Большая часть зерносушилок, предусмотренных в составе ЗСК или отдельно установленных, эксплуатируется более 15 лет, является морально и физически устаревшей.

В связи с этим требуется обновление и реконструкция зерносушильного оборудования с целью обеспечения своевременной послеуборочной обработки зерна и семян.

Говоря о задаче обновления зерносушильного оборудования, необходимо учесть следующее:

– по оценке специалистов, дефицит зерноочистительно-сушильных мощностей в нашей стране составляет около 30 %;

– программой деятельности Правительства Республики Беларусь на 2011-2015 годы предусмотрено строительство 796 новых ЗСК, а также модернизация и ремонт 741 действующих ЗС.

В ближайшее время только меньшая часть существующих устаревших ЗС может быть заменена новыми, а большая их часть будет находиться в эксплуатации. Если на новом зерносушильном оборудова-

нии организуется сушка нагретым воздухом, то на ранее установленном – в основном смесью топочных газов с воздухом.

Особое значение приобретает реконструкция много лет эксплуатируемых конвективных (шахтных и барабанных) зерносушилок, в которых при сушке используется смесь топочных газов с воздухом. Одной из задач их реконструкции является снижение расходов топлива на сушку.

С этой целью рекомендуется использовать в конвективных ЗС рециркуляцию сушильного агента (СА) [1-4].

При сушке нагретым воздухом достаточно подробно разработаны методы графоаналитического и аналитического расчета процесса рециркуляции СА и достигаемой при этом экономии теплоты и топлива [1, 3, 5].

В случае сушки продукции смесью топочных газов и воздуха возможны две схемы рециркуляции сушильного агента:

- согласно первой схеме рециркулирующая часть СА смешивается с воздухом, после этого образовавшаяся смесь используется в процессах горения топлива и разбавления топочных газов;

- по второй схеме топочные газы на выходе топочного устройства разбавляются наружным воздухом, а затем к газозвдушной смеси добавляется рециркулирующая часть СА.

Для сушки смесью топочных газов и воздуха предложен графоаналитический метод расчета процесса рециркуляции СА и достигаемого эффекта энергосбережения, основанный на построении исследуемых процессов в диаграмме влажного воздуха [2, 3]. Аналитический метод расчета относительной экономии теплоты и топлива был изложен в работе [4], в которой не рассматривались отдельные процессы приготовления СА необходимых параметров.

Графоаналитический метод требует наличия диаграммы влажного воздуха при высоких температурах (до 1500° С) и в ряде случаев приводит к определению искомым величин со значительной погрешностью.

Более приемлемой и распространенной является вторая схема приготовления СА, при которой исключается загрязнение топочного устройства рециркулирующей частью СА и повышается его надежность в эксплуатации.

Целью настоящей работы является:

- разработка аналитического метода расчета экономии топлива в КЗС с рециркуляцией СА – смеси топочных газов с наружным воздухом;
- вывод формул, позволяющих рассчитать параметры топочных газов, газозвдушной смеси и сушильного агента, а также расходы наружного воздуха и сушильного агента, при которых достигается максимальная экономия топлива.

Основная часть

Рассматриваемая функциональная схема сушилки (рис. 1) включает топочное устройство (ТУ), камеру смешения, условно разбитую на две части (КС1 и

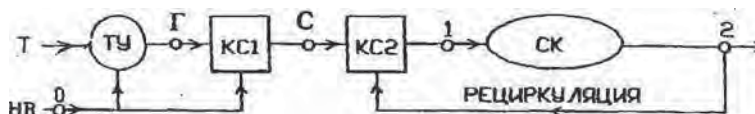


Рисунок 1. Функциональная схема конвективной сушилки

КС2), и сушильную камеру (СК).

Топливо (Т) и наружный воздух (НВ) подаются в ТУ. Образующиеся топочные газы (Г) направляются в КС1, где разбавляются наружным воздухом до необходимой температуры. Образовавшаяся газозвдушная смесь (ГВС) поступает в КС2, где смешивается с рециркулирующей частью СА. Приготовленный СА требуемых параметров подается в сушильную камеру (барабан, шахту и пр.). Отработавший СА частично сбрасывается в атмосферу, а другая его часть повторно используется за счет рециркуляции.

Точками обозначены характерные состояния используемых рабочих сред: 0 – наружный воздух; 1 – приготовленный СА; 2 – отработавший СА; Г – топочные газы; С – газозвдушная смесь.

Исходными данными к расчету рециркуляции являются:

- расчетные характеристики топлива, в том числе: низшая теплота сгорания топлива Q_H^p , кДж/кг (для газообразного топлива Q_H^c , кДж/м³); масса водяных паров m_w , образующихся при сгорании единицы количества топлива; зольность топлива A^p , % и плотность газообразного топлива ρ , кг/м³;

- температура СА на входе сушильной камеры t_1 , °С;

- параметры отработавшего СА: температура t_2 , °С, влагосодержание d_2 , г/кг и энтальпия h_2 , кДж/кг;

- разность добавлений и расходов теплоты в сушильной камере Δ , кДж/кг;

- параметры наружного воздуха: температура t_0 , °С, влагосодержание d_0 , г/кг и энтальпия h_0 , кДж/кг.

К искомым значениям относятся параметры и расходы рабочих сред в процессах использования и приготовления СА; коэффициенты рециркуляции СА и разбавления топочных газов воздухом; ожидаемая относительная экономия топлива.

Графики исследуемых процессов при рециркуляции отработавшего СА представлены на рис. 2.

Процессы 0-С и Г-С характеризуют разбавление топочных газов наружным воздухом и образование газозвдушной смеси, процессы С-1 и 2-1 – приготовление СА необходимых параметров путем смешения газозвдушной смеси с рециркулирующей частью СА. Линия 1-2 соответствует изменению состояния СА в сушильной камере.

На втором этапе расчета была использована система уравнений, включающая уравнения смешения топочных газов и воздуха, а также зависимость, характеризующая изменение энтальпии СА в процессах, расположенных на линии С–1–2 (рис. 2):

$$h_c = h_2 - \frac{\Delta}{1000}(d_2 - d_c). \quad (5)$$

В качестве характеристики процесса смешения топочных газов с воздухом был принят коэффициент разбавления как отношение массы наружного воздуха (его сухой части) к массе сухих топочных газов на выходе ТУ.

В результате решения системы уравнений был определен коэффициент разбавления:

$$n = \frac{h_r - h_2 - 10^{-3} \Delta \times (d_r - d_2)}{h_2 - h_0 - 10^{-3} \Delta \times (d_2 - d_0)}. \quad (6)$$

Параметры газовой смеси:

– влагосодержание

$$d_c = \frac{d_r + nd_0}{1+n}; \quad (7)$$

– энтальпия по формуле (5);

– температура исходя из зависимости, определяющей энтальпию влажного воздуха [7]:

$$t_c = \frac{h_c - 2,5d_c}{1,01 + 1,88 \times 10^{-3} d_c}. \quad (8)$$

На третьем этапе расчета определяют параметры СА на входе в сушильную камеру или зону сушки:

– влагосодержание по уравнению, предложенному в работе [4]:

$$d_1 = \frac{d_2 - \pi_1}{1 + 1,86 \times 10^{-3} \times \pi_1}, \quad (9)$$

где π_1 – обобщенный параметр, г/кг:

$$\pi_1 = \frac{1010(t_1 - t_2)}{2500 + 1,88t_2 - \Delta};$$

– энтальпию по формуле (5), заменив в ней параметры h_c и d_c на параметры h_1 и d_1 .

Затем находят коэффициент рециркуляции как отношение массы рециркулирующей части СА ко всей его массе, используемой при сушке продукции:

$$k_p = \frac{d_1 - d_c}{d_2 - d_c}. \quad (10)$$

Выполненные расчеты позволяют определить расходы наружного воздуха и СА по отношению к 1 кг жидкого или твердого, или к 1 м³ газообразного топлива (соответственно в кг/кг или кг/м³).

Расход наружного воздуха, используемого:

– при горении топлива в ТУ

$$L_{TV} = \alpha L_0; \quad (11)$$

– при разбавлении топочных газов

$$L_c = nm_{cr}; \quad (12)$$

– при приготовлении СА

$$L_B = L_{TV} + L_c. \quad (13)$$

Масса сухой газовой смеси, полученной при разбавлении воздухом топочных газов, была принята равной массе воздуха, использованного при горении топлива и разбавлении топочных газов.

В таком случае:

– расход рециркулирующей части СА:

$$L_p = k_p \frac{L_B}{1 - k_p}; \quad (14)$$

– расход СА в процессе сушки:

$$L = L_B + L_p. \quad (15)$$

При расчете относительной экономии топлива допустимо воспользоваться удельными расходами теплоты на испарение 1 кг влаги из продукции в сравниваемых вариантах. Такой прием согласуется с ТКП 149-2008, согласно которому сравнение теплотехнических качеств сушилок проводится по затратам теплоты на испарение 1 кг влаги. При этом фактический расход теплоты приводят к стандартным условиям: температура наружного воздуха и материала равна 5° С, а атмосферное давление – 99,3 кПа (745 мм рт.ст.).

Удельный расход теплоты, кДж/кг на испарение 1 кг влаги:

– в сушилках с рециркуляцией СА

$$q = (h_c - h_0) \frac{1000}{d_2 - d_c}; \quad (16)$$

– в сушилках без рециркуляции СА

$$q_0 = (h_{1,0} - h_0) \frac{1000}{d_{2,0} - d_{1,0}}, \quad (17)$$

где $h_{1,0}$ – энтальпия СА на входе сушильной камеры, кДж/кг; $d_{2,0}$ и $d_{1,0}$ – влагосодержание СА на выходе и входе сушильной камеры, г/кг.

В сушилках без рециркуляции СА вышеприведенные параметры СА, входящие в уравнение (17), являются искомыми величинами. Для их расчета необходимо определить расход воздуха L_T для горения топлива и разбавления топочных газов по отношению к 1 кг или 1 м³ топлива.

При нахождении величин L_T , $d_{1,0}$ и $h_{1,0}$ следует использовать зависимости, приведенные в работе [7], а величины $d_{2,0}$ – в работе [4]

Ожидаемая экономия топлива:

$$b = \frac{q_0 - q}{q_0} 100\%. \quad (18)$$

Рассмотрим расчет рециркуляции СА и ожидаемой экономии топлива в конвективных шахтных ЗС при сушке продовольственного и семенного зерна смесью топочных газов с воздухом.

В качестве топлива был принят природный газ из газопровода «Ямал-Европа». Используя состав природного газа Уренгойского месторождения [8], был выполнен расчет теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания при коэффициенте избытка воз-

духа $\alpha = 1$, а также массы образующихся в процессе горения водяных паров (табл. 1).

В табл. 1 приведены V_{RO_2} , $V_{N_2}^0$ и $V_{H_2O}^0$ – теоретические объемы трехатомных газов, азота и водяных паров в составе продуктов сгорания.

Таблица 1. Расчетные характеристики процесса горения при $\alpha = 1$

V_B^0 , м ³ /м ³	V_{RO_2} , м ³ /м ³	$V_{N_2}^0$, м ³ /м ³	$V_{H_2O}^0$, м ³ /м ³	m_W , кг/м ³
9,43	0,99	7,46	2,13	1,62

При расчете параметров топочных газов были приняты следующие данные: $t_r = 1200$ °С, $t_0 = 5$ °С, $d_0 = 3,5$ г/кг, $h_0 = 14$ кДж/кг и $\eta = 0,95$. Используя справочные данные об энтальпии, единицы объема воздуха и продуктов сгорания [6] было определено:

$$H_B^0 = 16540 \text{ кДж/м}^3; H_r^0 = 19890 \text{ кДж/м}^3; H_{B,0}^0 =$$

7кДж/м³.

Затем по уравнениям (1), (2) и (4) были найдены параметры:

$$\alpha = 1,7; h_r = 1810 \text{ кДж/кг}; d_r = 85 \text{ г/кг}.$$

Температурные параметры теплового режима сушки продовольственного и семенного зерна были приняты согласно [9], а относительная влажность СА на выходе сушильной камеры при использовании рециркуляции СА – равной максимально допустимому значению 80 %.

Результаты дальнейших расчетов даны в табл. 2.

Исходя из данных табл.2, следует, что чем больше расходы теплоты в КЗС без рециркуляции СА, тем больше, как правило, достигаемая экономия топлива за счет рециркуляции СА.

Размеры экономии топлива увеличиваются при сушке семенного зерна (варианты 2-7) по сравнению с сушкой продовольственного зерна (вариант 1).

Увеличение температуры СА на выходе сушильной

Таблица 2. Расчет удельных расходов теплоты и ожидаемой относительной экономии топлива

Величины, единицы величин	Источник, номер формулы	Вариант						
		1	2	3	4	5	6	7
t_1 , °С	Принято	120	70	70	70	70	70	70
t_2 , °С	Принято	42	30	35	35	35	35	40
Δ , кДж/кг	Принято	-1000	-1000	0	-500	-1000	-2000	-1000
При работе зерносушилки без рециркуляции СА								
L_T , кг/м ³	Расчет [9]	267	475	475	475	475	475	475
$d_{1,0}$, г/кг	Расчет [9]	9,57	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
$d_{2,0}$, г/кг	Расчет [4]	32	18,4	20,85	18,6	16,95	14,75	15,5
ϕ_2 , %	Табл. [9]	60	67	57	52	47	41	43
$h_{1,0}$, кДж/кг	Расчет [9]	147,3	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9
q_0 , кДж/кг	(17)	5950	6510	5370	6400	7450	9540	8710
При работе зерносушилки с рециркуляцией СА								
d_2 , г/кг	Принято	44,5	22	29,5	29,5	29,5	29,5	39,4
h_2 , кДж/кг	Расчет [9]	157	86,5	111	111	111	111	141
n	(6)	9,2	19,6	17,5	15,7	14,3	12,2	10,5
d_C , г/кг	(7)	11,5	7,45	7,9	8,4	8,8	9,7	10,6
h_C , кДж/кг	(5)	190	101	111	122	131,7	150,6	170
t_C , °С	(8)	156	80	89	98	107	123	140
d_1 , г/кг	Расчет [4]	21,55	10,45	15,3	17,6	19,2	21,45	30,4
k_P	(10)	0,305	0,205	0,345	0,43	0,502	0,59	0,69
h_1 , кДж/кг	(6)	180	98,2	111	117	121	127	150
L_{TY} , кг/м ³	(11)	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7	20,7
L_C , кг/м ³	(12)	182	388	347	311	283	241	208
L_B , кг/м ³	(13)	203	409	368	332	304	268	229
L_P , кг/м ³	(14)	89	106	193	250	306	386	510
L , кг/м ³	(15)	292	515	560	582	610	654	739
q , кДж/кг	(16)	5330	5970	4490	5100	5700	6900	5440
b , %	(18)	10	8	16	20	23	27,5	37

камеры с 30 до 40°C при $\Delta = -1000$ кДж/кг сопровождается увеличением удельного расхода теплоты в зерносушилке без рециркуляции СА с 6510 до 8650 кДж/кг, а также экономии топлива при использовании рециркуляции СА с 8 до 37 % (варианты 2 и 7). При одинаковых температурах t_1 и t_2 увеличение расходов теплоты в сушильной камере приводит к росту по модулю величины Δ и к увеличению значения q_0 от 5350 до 9480 кДж/кг и экономии топлива за счет рециркуляции СА от 16 до 27 % (варианты 3 и 6).

Примечательным является и тот факт, что увеличение температуры СА на выходе сушильной камеры в условиях рециркуляции СА характеризуется уменьшением удельных расходов теплоты на сушку от 5970 до 5440 кДж/кг (варианты 2, 5 и 7). С позиции энергосбережения может оказаться приемлемым увеличение температуры отработавшего СА при использовании его рециркуляции.

Заключение

Путем рециркуляции СА в конвективных ЗС возможно обеспечить экономию топлива в рассмотренных вариантах в размере от 8 до 37 % в зависимости от параметров теплового режима сушки. Особое значение здесь имеют температура отработавшего СА и расходы теплоты непосредственно в сушильной камере.

Предложенная методика расчета относительной экономии топлива, параметров и расходов наружного воздуха и СА в КЗС при рециркуляции СА базируется на определении коэффициентов избытка воздуха, разбавления наружным воздухом топочных газов и рециркуляции СА.

Разработка технологического процесса и конструкции КЗС должна сопровождаться решением проблемы снижения расходов топлива при сушке. Необходимо изначально принять все меры для снижения расходов топлива при сушке, а затем решать

задачи энергосбережения с помощью тех или иных энергосберегающих способов сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Кочетков, А.В. Снижение энергозатрат за счет совершенствования технологического процесса сушки рециркуляцией сушильного агента / А.В. Кочетков, Е.Г. Мигуцкий, В.А. Седнин // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ), 2010. – №1. – С. 67-77.
3. Промышленные теплообменные процессы и установки / А.М. Бакластов [и др.]; под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
4. Синяков, А.Л. Энергосбережение в конвективных зерносушилках путем рециркуляции сушильного агента / А.Л. Синяков, И.А. Цубанов // Агропанорама, 2009. – №5. – С. 40-44.
5. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных аппаратов / П.В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
6. Герасимович, Л.С. Справочник по теплоснабжению сельского хозяйства / Л.С. Герасимович, А.Г. Цубанов, Б.Х. Драганов, А.Л. Синяков. – Мн.: Ураджай, 1993. – 368 с.
7. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
8. Клименко, А.В. Теплоэнергетика и теплотехника: справоч. в 4-х кн. / А.В. Клименко, В.М. Зорина // Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: кн. 2. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 562 с.
9. Малин, Н.И. Справочник по сушке зерна / Н.И. Малин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 159 с.

**Счетчик газа ультразвуковой СГУ001
типоразмеров G16-G25**

Предназначены для измерения объемного расхода горючего газа по ГОСТ 5542-87 или паров сжиженного углеводородного газа по ГОСТ 20448-90 с приведением измеренного объема газа к нормальным условиям, т.е. к температуре газа 20 °С и плотности 0,72 кг/м³ с отображением информации об объеме израсходованного газа на табло счетчика с возможностью передачи информации в централизованную систему учета.



Основные технические данные

Рабочий диапазон температур, °С	от -30 до +50
Рабочий диапазон расхода газа, м ³ /час	от 0,16 до 40
Основная относительная погрешность, не более, %	± 3
Порог чувствительности, не более, м ³ /час	0,05
Наибольшее избыточное рабочее давление газа, кПа	100
Число разрядов индикаторного табло счетчика	8
Дополнительная относительная погрешность при изменении температуры окружающей среды от -30 до +50 °С, не более	0,01% на 1 °С

*Цена изделий на 40-60% ниже зарубежных аналогов
Производство счетчиков освоено на ООО «Московский завод электронизмерительных приборов – 1», г. Брест. Завершается подготовка производства к выпуску счетчиков на ОАО «Агат - системы управления», г. Минск.*