

К ВОПРОСУ О СУШКЕ СЫПУЧИХ ТВЕРДЫХ ПОРОШКОВ В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ БИОГАЗА

Чекайкин Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент¹

Терентьев Андрей Борисович, кандидат технических наук, доцент²

Курочкин Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор¹

¹ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

²ФГКВООУ ВО «Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева»

¹440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11; тел.:8(8412)49-56-99

²440005, г. Пенза-5, Военный городок; e-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Ключевые слова: биогаз, энергетический баланс, энергосбережение, тепловой баланс, энтальпия, сушка, псевдооживленный (кипящий) слой.

В настоящее время в качестве теплоносителя в сушилках в основном используют горячий воздух, высокую температуру которого обеспечивают применением различных нагревательных устройств. Работа этих устройств требует значительных затрат различных традиционных видов энергии. Сами сушилки имеют сложную конструкцию, большую массу и габариты, высокую стоимость, сложны в техническом обслуживании. Свести к минимуму зависимость сушки в «кипящем» слое от применения традиционных источников энергии и обеспечить полную автономность процесса, значительно упростить конструкцию сушилки может применение в качестве сушильного агента высоконагретых продуктов горения альтернативных источников энергии (биогаза или попутного газа), разгоняемых в сушилке в условиях естественной конвекции. Запас таких источников тепловой энергии практически неисчерпаем, доступен, и их использование не связано с большими затратами. При разработке математической модели расчета теплового баланса сушки в установке были описаны процессы теплоприхода и теплоотвода. Для исследования зависимости энергии продуктов горения смеси биогаза с воздухом от перечисленных факторов был использован современный программный комплекс TERRA «Программа термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств». В результате расчетов для семи смесей получены текстовые и графические данные. Графические зависимости показывают, что с ростом равновесной температуры ПГ их энтальпия увеличивается. В то же время значительное влияние на энтальпию оказывает исходный состав смеси «биогаз – воздух». Проведенные термодинамические расчеты показали, что теплоотворная способность ПГ смесей «биогаз – воздух» обеспечивает требуемые условия по сушке твердых сыпучих материалов в «кипящем» слое, создаваемом в разрабатываемой установке.

Введение

Сушка зерна относится к востребованным и вместе с тем весьма энергоемким процессам перерабатывающей промышленности [1, 2].

С точки зрения энергоэффективности одним из рациональных способов сушки зерна является его тепловая обработка в восходящем потоке нагретых газов, образующем «кипящий слой» материала. В таких сушилках в качестве теплоносителя используется горячий воздух, а восходящий поток горячих газов формируется за счет перепада температур на входе и выходе установки [3, 4].

К недостаткам технических средств, реализующих данный способ сушки, относятся значительные затраты различных традиционных видов энергии в процессе работы, а также сложность и высокая стоимость таких средств [5].

Свести к минимуму эти недостатки можно за счет применения в качестве сушильного агента высоконагретых продуктов горения альтернативных источников энергии (биогаза или попутного газа). Запас таких источников тепловой

энергии практически неисчерпаем, доступен, а их использование не связано с большими экономическими затратами.

Установка, позволяющая реализовать такой принцип работы, состоит из соплового блока 1 (рис. 1) и конусоидальной башни [6]. Сопловый блок включает в себя шесть одинаковых секций 1 прямоугольного переменного сечения, суживающихся к центру. В башне размещены решетка 5, устройства загрузки и выгрузки материала 6 и 7, а также система генерации высоконагретых газообразных продуктов горения биогаза (попутного газа), включающая баллон с биогазом (попутным газом) 8, горелки 4 и газопроводы.

Установка работает следующим образом. Влажный материал через устройство загрузки 7 (в верхнем положении) подается на решетку 5. Биогаз (попутный газ) по газопроводам поступает в горелки 4. Образующиеся высоконагретые газообразные продукты горения, смешиваясь с воздухом, создают значительный перепад температур на входе в сопловый блок 1 и выходе из

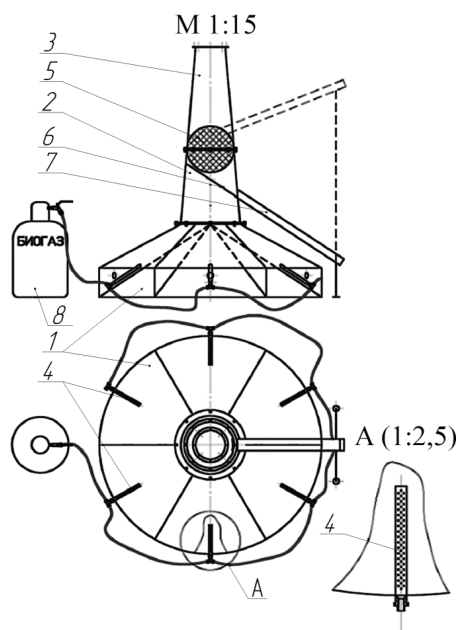


Рис. 1 – Установка сушки в «кипящем» слое: 1 – сопловой блок; 2 – нижний конус; 3 – верхний конус; 4 – горелка; 5 – газораспределительная решетка; 6 – устройство загрузки материала; 7 – устройство выгрузки материала; 8 – баллон с биогазом (попутным газом)

верхнего конуса 3.

Необходимые температура сушки и скорость газового потока, обеспечивающие псевдоожижение материала, регулируются расходом биогаза (попутного газа) в горелках.

По окончании сушки решетка 5 складывается и материал сыпается на решетку 6, к концу сушки принимающую наклонное положение под углом 45°. Материал перемещается в псевдоожиженном состоянии по решетке 6 и выгружается по лотку 7.

Целью работы являлся анализ тепловых процессов, протекающих при сушке сыпучих твердых порошков в восходящем потоке продуктов горения биогаза экспериментальной установки.

Объекты и методы исследований

Для разработки математической модели и расчета теплового баланса сушки в установке были описаны процессы теплоприхода и теплоотвода.

Теплота в сушильную камеру 1 поступает:

1) с сушильным агентом (продуктами горения смеси биогаза с воздухом):

$$Q_1 = LI_1, \quad (1)$$

где L – количество продуктов горения (ПГ) смеси биогаза с воздухом, поступающих в су-

шилку, кг/с; I_1 – энтальпия ПГ смеси биогаза с воздухом, кДж/кг;

2) с объектом сушки (высушиваемым материалом):

$$Q_2 = Gct_n, \quad (2)$$

где G – масса поступившего в сушилку сухого материала вместе с неудаляемой, прочно связанной влагой, кг; c – теплоемкость высушенного материала, кДж/(кг×°С); t_i – начальная температура материала, °С;

3) с влагой, испаряемой из материала,

$$Q_3 = \omega c_B t_n, \quad (3)$$

где ω – количество влаги, поступающей в сушилку с материалом, кг; c_B – теплоемкость воды, кДж/(кг×°С);

4) с решеткой, на которой размещается материал,

$$Q_4 = G_4 c_4 t_4, \quad (4)$$

где G_4 – масса решетки, кг; c_4 – теплоемкость материала, из которого изготовлена решетка, кДж/(кг×°С); t_4 – начальная температура решетки, °С.

Общее количество теплоты, вводимой в сушильную камеру,

$$Q_{BX} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (5)$$

Из сушильной камеры теплота уносится:

1) с продуктами горения, выходящими из сушилки,

$$Q_1' = LI_2, \quad (6)$$

где I_2 – энтальпия уходящих ПГ, кДж/кг;

2) с материалом, выходящим из сушилки,

$$Q_2' = Gct_k, \quad (7)$$

где t_k – конечная температура продукта, выходящего из сушилки, °С;

3) с влагой, удаляющейся в виде пара вместе с ПГ,

$$Q_3' = \omega i, \quad (8)$$

где i – энтальпия водяного пара, кДж/кг;

4) потери теплоты через стенки корпуса

сушильной камеры составляют Q_4 .

Общий расход теплоты равен

$$Q_{BYX} = Q_1' + Q_2' + Q_3' + Q_n \quad (9)$$

Тепловой баланс можно выразить уравнением:

$$Q_{BX} = Q_{BYX}, \quad (10)$$

или

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_1' + Q_2' + Q_3' + Q_n. \quad (11)$$

Рассчитаем количество теплоты Q_1 , необходимой для обеспечения выбранных условий сушки,

$$Q_1 = LI_2 + Gct_k + \omega i + Q_n - Gct_H - \omega c_B t_H - G_4 c_4 t_4 = \\ = LI_2 + Gc(t_k - t_H) + \omega(i - t_H) - G_4 c_4 t_4 + Q_n \quad (12)$$

Таким образом, теплота Q_1 , которая затрачивается на сушку, расходуется на нагревание материала $[Gc(t_k - t_H)]$, испарение воды $[\omega(i - t_H)]$ и на нагрев корпуса сушильной камеры Q_n .

Для расчета количества теплоты Q_1 , необходимой для обеспечения сушки твердых сыпучих материалов, с использованием выражения (12), необходимо выбрать условия сушки, характерные для разрабатываемой установки:

- 1) количество ПГ смеси биогаза с воздухом, поступающих в сушилку $L=1,85$ кг/с;
- 2) энтальпия уходящих ПГ $I_2 = 789$ кДж/кг;
- 3) масса поступившего в сушилку сухого материала $G = 40$ кг;
- 4) теплоемкость высушенного материала $c = 1,27$ кДж/(кг \times °C);
- 5) начальная температура материала $t_H = 20$ °C;
- 6) количество влаги, поступающей в сушилку с материалом $\omega = 10$ кг;
- 7) теплоемкость воды $c_B = 4,2$ кДж/(кг \times °C);
- 8) масса решетки $G_4 = 40$ кг;
- 9) теплоемкость материала, из которого изготовлена решетка $c_4 = 0,47$ кДж/(кг \times °C);
- 10) начальная температура решетки $t_4 = 20$ °C;
- 11) конечная температура материала, выходящего из сушилки $t_k = 120$ °C;
- 12) энтальпия водяного пара $i = 2650$ кДж/кг;
- 13) потери теплоты через стенки корпуса сушильной камеры $Q_4 = 90$ кДж/кг.

Подставляем исходные данные в выражение (12):

$$Q_1 = LI_2 + Gc(t_k - t_H) + \omega(i - t_H) - G_4 c_4 t_4 + Q_n = \\ = 1,85 \cdot 789 + 40 \cdot 1,27(120 - 20) + 10(2650 - 20) - \\ - 40 \cdot 0,47 \cdot 120 + 90 = 30704 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, для обеспечения выбранных условий сушки ПГ смеси биогаза (попутного газа) должны обладать энергией, равной 30704 кДж/кг.

Значение энергии ПГ зависит от многих факторов. В связи с этим рассмотрены важнейшие из этих зависимостей с целью оптимизации условий подачи ПГ в сушильную камеру разрабатываемой установки.

В соответствии с выражением (1) количество теплоты, подаваемой в сушильную камеру сушильным агентом (продуктами горения смеси биогаза с воздухом), равно произведению количества продуктов горения смеси биогаза с воздухом, поступающей в сушилку, и энтальпии продуктов горения смеси биогаза с воздухом.

Таким образом, необходимо рассмотреть факторы, определяющие значения данных параметров. Очевидно, что количество продуктов горения будет зависеть от следующих факторов:

- массоприхода биогаза из баллона 8 в зону горения (сопловой блок);
- степени смешения биогаза с воздухом (стехиометрическое соотношение горючих компонентов и окислителя в смеси).

Энтальпия ПГ смеси биогаза с воздухом зависит от факторов, определяемых термодинамикой процесса. К ним относятся: исходный состав смеси биогаза с воздухом; давление, при котором протекает горение; температура горения.

Следует отметить, что горение смеси биогаза с воздухом в сопловом блоке сушилки будет всегда протекать при атмосферном давлении (0,1 МПа). Поэтому энтальпия ПГ будет зависеть от состава исходной смеси и температуры горения.

Для исследования зависимости энергии продуктов горения смеси биогаза с воздухом от перечисленных факторов воспользуемся современным программным комплексом TERRA (АСТРА) «Программа термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств» [7, 8].

Энергия ПГ смеси биогаза с воздухом (теплота горения) является термодинамическим параметром. Одним из методов решения системы уравнений химического равновесия является

метод Ньютона [8, 9, 10], реализуемый на ЭВМ. Метод заключается в последовательном нахождении поправок относительно неизвестных величин решением системы линейных уравнений, записанных в общем виде следующим образом:

$$\sum \left(\frac{\partial f_k}{\partial \ln P_q} \right) \Delta \ln P_q + \left(\frac{\partial f_k}{\partial \ln M_n} \right) \Delta \ln M_n = -\delta_k, \quad (13)$$

где $\Delta \ln P_q$ – поправка к значениям парциальных давлений ПГ; $\Delta \ln M_n$ – поправка к значению, определяющему равенство масс исходной смеси и ПГ; δ_k – значение k -функций f_k в начальном приближении.

Уточнение значений неизвестных продолжается до выполнения задаваемых условий, описываемых следующим образом:

$$\sum_{k=1}^n |\delta_k| \leq \omega$$

где ω – наперед заданная малая величина, определяющая погрешность расчетов (как правило, ω выбирают равной 0,001).

Решение системы уравнений химического равновесия методом Ньютона не всегда обеспечивает сходимость последовательных приближений. В этих случаях можно использовать Программу термодинамического расчета состава фаз произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств TERRA (АСТРА).

В соответствии со вторым законом термодинамики равновесие системы характеризуется максимумом энтропии S относительно термодинамических степеней свободы, к числу которых относят концентрацию компонентов равновесной смеси M_i , температуру T и давление P . Удельный объем W , как и внутренняя энергия U , при этом остаются независимыми переменными, так как условия равновесия системы относительно окружающей среды могут быть выражены помощью равенств:

$$dW=0; dU=0;$$

$$S = \sum_{i=1}^k \left(S_i^0 - R_0 \ln \frac{R_0 T M_i}{W} \right) M_i + \sum_{n_1=1}^{N_1} \left(S_{n_1}^0 - R_0 \ln \frac{M_{n_1}}{M_{x_1}} \right) M_{n_1} + \sum_{n_2=1}^{N_2} \left(S_{n_2}^0 - R_0 \ln \frac{M_{n_2}}{M_{x_2}} \right) M_{n_2} + \sum_{r=1}^R S_r^0 M_r \Rightarrow S_{\max} \quad (14)$$

где k – количество газообразных компонентов в равновесной системе; R – количество конденсированных компонентов, образующих отдельные фазы; N_1, N_2 – количество компонентов конденсированных растворов; M_{x_1}, M_{x_2} – количество молей вещества в конденсированных растворах.

Внутренняя энергия и удельный объем также связаны с концентрацией компонентов термодинамической системы, с температурой и давлением при помощи известных соотношений:

$$\begin{cases} U - \sum_{i=1}^k U_i M_i - \sum_{r=1}^R U_r M_r - \sum_{n_1=1}^{N_1} U_{n_1} M_{n_1} - \sum_{n_2=1}^{N_2} U_{n_2} M_{n_2} = 0; \\ W - \frac{R_0 T}{P} \sum_{i=1}^k M_i = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где U – полная внутренняя энергия системы; $U_i, U_r, U_{n_1}, U_{n_2}$ – полная внутренняя энергия индивидуальных веществ, отнесенная к 1 молю и включающая в себя энтальпию образования:

$$U_\alpha = \int_{T_0}^T c_{v_\alpha} dT + \Delta H_f^0(T_0)_\alpha,$$

$$\alpha = i, r, n_1, n_2. \quad (16)$$

Уравнения (14 - 16) можно рассматривать как ограничения или связи, накладываемые на область допустимых значений переменных при установлении химического и фазового равновесия при достижении максимума энтропии S системы.

Дополнительные ограничения термодинамических степеней свободы обусловлены постоянством массы химических элементов и электронейтральностью всей системы в целом:

$$\begin{cases} -[Эл_j] + \sum_{i=1}^k n_{ji} M_i + \sum_{r=1}^R n_{jr} M_r + \sum_{n_1=1}^{N_1} n_{jn_1} M_{n_1} + \sum_{n_2=1}^{N_2} n_{jn_2} M_{n_2} = 0; \\ j = 1, m; \\ \sum_{i=1}^k n_{qi} M_i = 0, \end{cases} \quad (17)$$

где $[Эл_j]$ – содержание химических элементов; n_{ji} – количество атомов j -го элемента в i -м компоненте; m – количество химических элементов в системе; n_{e_i} – кратность ионизации i -го компонента.

Параметры равновесия термодинамической системы определяют путем нахождения экстремума S с учетом перечисленных связей. Для решения этой задачи составляют функцию Лагранжа.

Расчет термодинамических параметров ПГ с помощью программного комплекса TERRA (АСТРА) возможен, когда известны любые два термодинамических параметра и элементарный состав смеси биогаза с воздухом. В условиях горения смеси биогаза с воздухом удобно использовать в качестве входных параметров давление продуктов горения и их температуру.

Горение смеси биогаза с воздухом протекает на входе в сушилку в нижней части соплового блока. Высоконагретые ПГ разгоняются в диффузорах соплового блока 1 и далее в конусе 2 общего диффузора за счет естественной тяги и тяги, развиваемой за счет сужения канала течения. Продукты горения несут теплоту Q_1 слою высушиваемого материала, находящегося на решетке сушилки.

Результаты исследований

Для того чтобы оценить возможности разрабатываемой сушилки по теплотворной способности, проведены термодинамические расчеты с использованием программы TERRA с целью определения энтальпии ПГ, образующихся при сгорании смесей биогаза с воздухом различной концентрации при разных температурах. В частности, выбраны смеси биогаза с воздухом в соотношениях от 20/80 до 80/20 биогаза и воздуха соответственно. Термодинамические расчеты проводили при температурах 1500, 2000 и 2500 К.

В результате расчетов для семи смесей получены текстовые и графические данные. На рисунке 2 представлен график для смеси № 1, характеризующий состав ПГ при различных температурах.

Основной информацией из результатов расчета, необходимой в данном случае, являются данные по энтальпии ПГ при различных температурах. В частности, для смеси № 1 «биогаз – воздух 20/80» энтальпия ПГ оказалась равной 384 кДж/кг, 1306 кДж/кг и 2409 кДж/кг при температурах 1500 К, 2000 К и 2500 К соответственно.

Результаты термодинамических расчетов энтальпий при различных температурах для всех смесей сведены в таблицу.

В соответствии с выражением (1), зная энергосодержание (энтальпию) ПГ, можно регулировать подачу биогаза и воздуха в зону горения, обеспечивая требуемые условия по энтальпии ПГ.

На рисунке 3 представлены зависимости энтальпии ПГ от равновесной температуры для различных составов смесей «биогаз – воздух».

Полученные зависимости показывают, что с ростом равновесной температуры ПГ их энтальпия увеличивается. В то

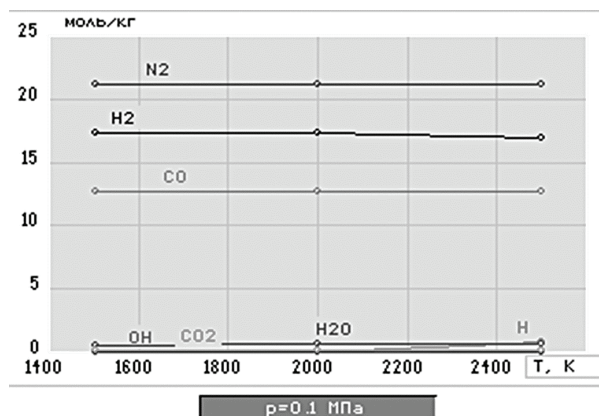


Рис. 2 - Состав продуктов горения при различных температурах (смесь № 1)

же время значительное влияние на энтальпию оказывает исходный состав смеси «биогаз – воздух».

Согласно графикам, наибольшая энтальпия соответствует соотношению компонентов смеси «биогаз – воздух» 80/20. Это связано в первую очередь с увеличением относительного содержания горючих элементов в смеси. Во-вторых, при таком соотношении биогаза и воздуха образуются преимущественно ПГ с высокой энтальпией. Следовательно, общая энтальпия, в силу своей аддитивности, возрастает.

Выводы

Для обеспечения условий сушки твердых сыпучих материалов в предлагаемой установке, продукты горения смеси биогаза (попутного газа) должны обладать энергией не менее 30704 кДж/кг.

В результате расчетов выявлено, что для смеси № 1 состава «биогаз – воздух 20/80» энтальпия ПГ оказалась равной 384 кДж/кг при температуре 1500 К, 1306 кДж/кг (при 2000 К) и 2409 кДж/кг (при 2500 К). Следовательно, теплотворная способность продуктов горения смесей «биогаз – воздух» обеспечивает требуемые условия по сушке твердых сыпучих материалов в «кипящем» слое, создаваемом в предлагаемой установке.

Таблица

Результаты термодинамических расчетов

Номер расчета (смеси)	Состав исходной смеси	Энтальпия продуктов горения I , кДж/кг, при различных температурах, К		
		1500	2000	2500
1	$C_{12,795} H_{35,849} N_{42,446} O_{13,185}$	384	1306	2409
2	$C_{18,945} H_{53,764} N_{37,769} O_{11,828}$	1019	2171	4115
3	$C_{25,101} H_{71,673} N_{33,094} O_{10,171}$	1553	2889	5414
4	$C_{31,255} H_{89,575} N_{28,421} O_{8,515}$	2087	3604	6404
5	$C_{37,407} H_{107,849} N_{23,749} O_{6,859}$	2621	4316	7357
6	$C_{43,557} H_{125,364} N_{19,079} O_{5,203}$	3155	5027	8276
7	$C_{49,704} H_{143,246} N_{14,411} O_{3,549}$	3687	5735	9156

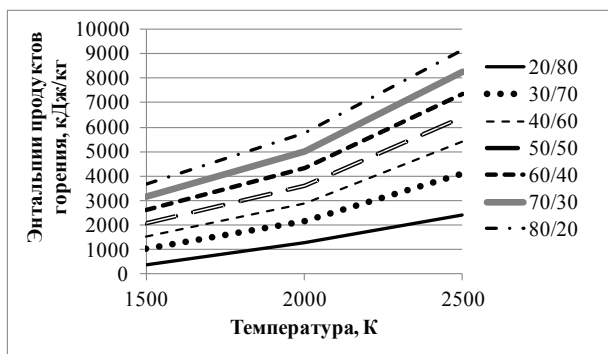


Рис. 3 – Зависимость энтальпии продуктов горения от равновесной температуры для различных составов смесей «биогаз – воздух»

Библиографический список

1. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин. – Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.
2. Чекайкин, С.В. Актуальное направление в совершенствовании зерносушилок контактного типа / С.В. Чекайкин, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сборник научных трудов международной научно-практической конференции. – Саранск: МГУ

им. Огарева, 2016. – С. 344-347.

3. Процессы и аппараты пищевых производств / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.В. Логинов [и др.]; под ред. А.Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2012. – 616 с.

4. Оборудование перерабатывающих производств / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, В.М. Зимняков, П.К. Воронина. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 363 с.

5. Пат. 2575491 Российская Федерация, МПК7 F26B 17/10. Установка для сушки сыпучих материалов в восходящем потоке продуктов горения биогаза или попутного газа / А.Б. Терентьев, С.В. Чекайкин, К.Ю. Мокроусова, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, В.М. Голощапов, П.К. Воронина; патентообладатель ООО НТК «Эврика!». – заявл. 16.07.2013; опубл. 20.02.2016 г. Бюл. № 5.

6. Терентьев, А.Б. Анализ энергоэффективности работы сушилки кипящего слоя / А.Б. Терентьев, К.Ю. Мокроусова, С.В. Чекайкин // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4 (01). – С. 23-25.

7. Метод, универсальный алгоритм и программа термодинамического расчета многокомпонентных гетерогенных систем / Б.Г. Трусов и [др.]. – М.: МВТУ, 1978. – 54 с.

8. Сияряев, Г.Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Сияряев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов. – М.: Наука, 1982. – 264 с.

TO THE ISSUE OF DRYING OF FREE-FLOWING SOLID POWDERS IN THE UPWARD FLOW OF COMBUSTION BIOGAS PRODUCTS

Chekaikin S.V.¹, Terentyev A.B.², Kurochkin A. A.¹

¹FSBEI HE "Penza State Technological University"

²FSGMEI HE "Penza branch of Military Academy of Service Support named after General A.V. Khrulev »

¹440039, Penza, Baidukova rd./ Gagarina st., 1a / 11;

tel.: 8 (8412) 49-56-99

²440005, Penza-5, the Military Town

e-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Keywords: biogas, energy balance, energy saving, heat balance, enthalpy, drying, fluidized (boiling) layer.

Currently, hot air is used as the coolant in dryers, the heat of which is provided by the use of various heating devices. The operation of these devices requires considerable consumption of various traditional types of energy. The driers themselves have a complex design, large mass and dimensions, high cost, they are difficult to service. To minimize the dependence of drying in the "boiling" layer on the use of traditional energy sources and to ensure complete autonomy of the process, it is possible to use, as a drying agent, highly heated combustion products of alternative energy sources (biogas or associated gas) dispersed in a drier under natural conditions of convection. The stock of such sources of thermal energy is almost inexhaustible, accessible, and their use is not associated with high costs. When developing a mathematical model for calculating the heat balance of drying in the installation, the processes of heat input and heat removal were described. To study the dependence of combustion product energy of biogas mixture with air on these factors, the modern program complex TERRA "The program for the thermodynamic calculation of the phase composition of arbitrary heterogeneous systems and their thermodynamic and transport properties" was used. As a result of calculations, text and graphic data for seven mixtures were received. Characteristic curves show that the enthalpy increases with the increase of SG temperature. At the same time, the initial composition of the "biogas-air" mixture exerts a significant influence on the enthalpy. Thermodynamic calculations have shown that the heat-providing ability of SG "biogas-air" mixtures provides the required conditions for drying of solid free-flowing materials in the "boiling" layer created in the developed installation.

Bibliography

1. Heat treatment of grain in installations of contact type: monograph / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, G.V. Karpenko, S.A. Sutyagin. - Ulyanovsk: USAA named after P.A. Stolypin, 2013. - 290 p.
2. Current direction in the improvement of grain dryers of contact type / S.V. Chekaikin, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: a collection of scientific papers of the international scientific-practical conference / Edited by: Senin P.V. [et al] - Saransk: Mordovian State University named after Ogarev, 2016. - P. 344-347.
3. Processes and plants of food production / A.N. Ostrikov, O.V. Abramov, A.V. Loginov [et al]; Edited by A.N. Ostrikov. - SPb.: GIORД, 2012. - 616 p.
4. Equipment of processing manufactures / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, V.M. Zimnyakov, P.K. Voronina. - Moscow: INFRA-M, 2015. - 363 p.
5. Pat. 2575491 Russian Federation, IPC 7 F26B 17/10. An installation for drying free-flowing materials in the upward flow of biogas or associated gas combustion products / Applicants: A.B. Terentyev, S.V. Chekaikin, K.Yu. Mokrousova, A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, V.M. Goloshchapov, P.K. Voronina; patent holder ООО НТК «Эврика!». - Appl. 07/16/2013; publ. 02/20/2016. Bull. № 5.
6. Terentyev, A.B. Analysis of energy efficiency of fluidized bed dryer / A.B. Terentyev, K.Yu. Mokrousov, S.V. Chekaikin // Innovative machinery and technology. 2014. - № 4 (01). - P. 23-25.
7. Trusov, B.G. Method, universal algorithm and program of thermodynamic calculation of multicomponent heterogeneous systems / B.G. Trusov et al. - Moscow: MHTC, 1978. - 54 p.
8. Sinyarev, G.B. The use of computers for thermodynamic calculations of metallurgical processes / G.B. Sinyarev, N.A. Vatoлин, B.G. Trusov. - Moscow: Nauka, 1982. - 264 p.