

УДК 62-97

Профессор С.Т. Антипов, аспирант А.Н. Мартеха

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств, тел. (473) 255-38-96

## Термодинамический анализ процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в аппарате с виброкипящим слоем

В статье рассматриваются варианты минимально необходимых энергетических затрат на реализацию исследуемого технологического процесса. Проведен эксергетический анализ с целью повышения степени термодинамического совершенства теплотехнологической системы процесса сушки ферментированного пшеничного сырья в аппарате с виброкипящим слоем.

The article discusses options for the minimum required energy costs for the investigated process. Exergy analysis was conducted in order to increase the degree of thermodynamic perfection of technologically system of the drying process of fermented wheat raw materials in the device with a vibrated fluid layer.

*Ключевые слова:* сушка, эксергия, термодинамический анализ.

Эксергетический анализ конвективных сушилок выполнен по методике [1], в соответствии с которой они рассматривались в виде теплотехнологических систем сушки ферментированного пшеничного сырья (рисунок 1), условно отделенных от окружающей среды замкнутой контрольной поверхностью. Внутри систем с учетом протекающих теплообменных процессов выделен ряд контрольных поверхностей (таблица 1).

Т а б л и ц а 1

Контрольные поверхности

№	Предлагаемая сушилка
I	Рабочая камера
II	Нагрев воздуха
III	Осушение воздуха

Схемы обмена рассматриваемых теплотехнологических систем сушки корма материальными, тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой, а также между контрольными поверхностями представлена на рисунке 2.

Эксергия в каждой контрольной поверхности изучаемой технологической системы сушки, состоящей из классических необратимых процессов, уменьшается с течением времени, что связано с диссипацией энергии [2].

Эксергия вводимых в систему внешних материальных потоков: исходного сырья и атмосферного воздуха, находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю, поэтому исключается из баланса.

В процессе нагрева сырья в технологическом оборудовании его химическая эксергия постоянна, так как его состав в процессе переработки не претерпевает изменений. Поэтому учитывается только его удельная термическая эксергия, определяемая на основании уравнения Гюи-Стодолы:

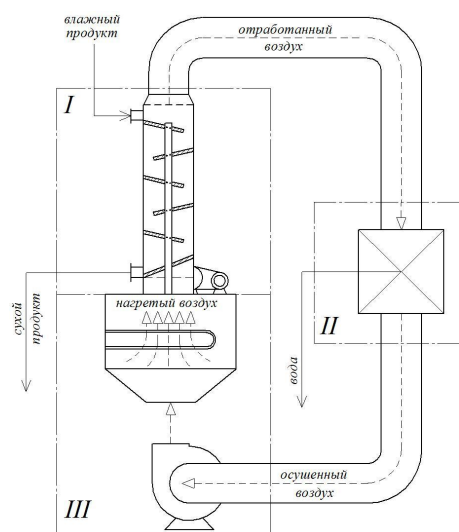


Рисунок 1 - Схема технологического процесса в предлагаемой сушилке:

— границы контрольных поверхностей;  
 - - - - - > - поток воздуха; —> - потоки продукта

$$e_{э.к.} = e - e_0 = h - h_0 - T_0(S - S_0), \quad (1)$$

где  $e$ ,  $e_0$ ,  $h$ ,  $h_0$ ,  $S$ ,  $S_0$  - удельная термическая эксергия, кДж/кг; удельная энтальпия, кДж/кг и энтропия, кДж/(кг·К) продукта при текущих параметрах технологического процесса и в состоянии равновесия с окружающей средой.

После сушки влажный воздух направляется сначала в осушитель, где от него отделялась влага, адсорбированная из продукта в процессе сушки, затем - в нагреватель. Транспортирование воздуха в сушилке осуществлялось в режиме рециркуляции, что позволило сократить энергозатраты на его нагрев перед поступлением в рабочую камеру сушилки.

Приращение полезной эксергии высушенного ферментированного пшеничного сырья в исследуемой сушилке достигается за счет его нагрева горячим воздухом.

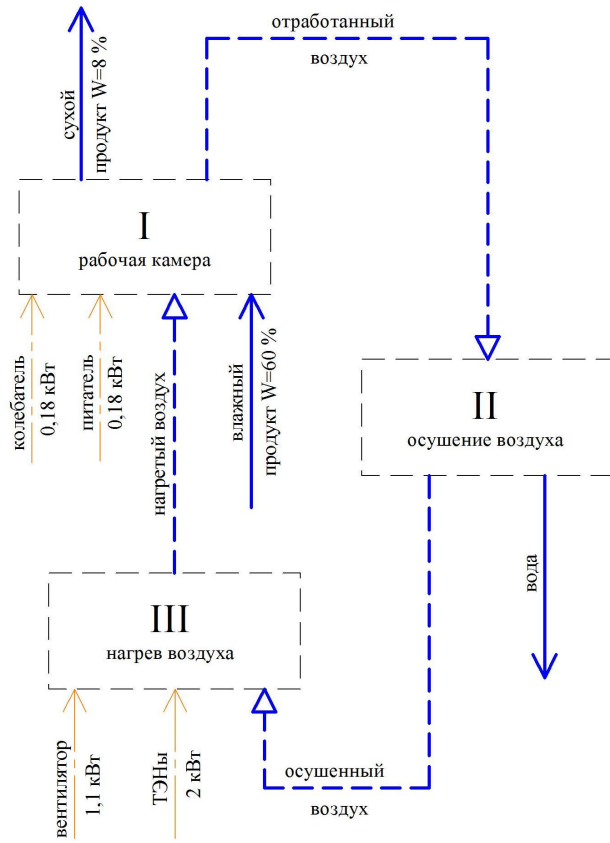


Рисунок 2 - Схема обмена потоками между контрольными поверхностями теплотехнологической системы сушки кормов для предлагаемой сушилки: потоки:  $\longrightarrow$  - продукта;  $\dashrightarrow$  - воздуха;  $\cdots$  - границы контрольных поверхностей;  $\dashrightarrow$  - электроэнергия.

В работе рассмотрено влияние на систему внутренних и внешних эксергетических потерь.

В суммарное количество внутренних эксергетических потерь входят потери от конеч-

ной разности температур в результате теплообмена между высушиваемым сырьем и нагретым воздухом, электромеханические, возникающие при необратимом изменении структурно-механических свойств продукта, и гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема воздуха при его поступлении в рабочую камеру сушилки.

Потери, обусловленные конечной разностью температур между потоками, определяли по формуле:

$$D^{mo} = Q^{mo} \cdot \bar{\tau}_e, \quad (2)$$

где  $Q^{mo}$  - количество теплоты, переданное от одного потока к другому, кДж;  $\bar{\tau}_e$  - среднее значение фактора Карно для двух взаимодействующих потоков.

Эксергетические потери вследствие падения давления воздуха при его подаче в контрольную поверхность определяли по формуле:

$$D^e = g \cdot \Delta H_z \cdot \frac{T_{кп}}{T_{ex}}, \quad (3)$$

где  $T_{ex}$  - температура теплоносителя на входе в контрольную поверхность, К;  $\Delta H_z$  - гидравлические потери, м.

По формуле Дарси-Вейсбаха найдены гидравлические потери при входе теплоносителя в контрольную поверхность:

$$\Delta H_z = \xi \cdot \frac{v_{ex}^2}{2g}, \quad (4)$$

где  $v_{ex}$  - средняя скорость прохождения воздуха по сечению подводящего трубопровода, м/с;  $\xi$  - коэффициент сопротивления, определяемый отношением внутреннего объема оборудования, рассматриваемого в качестве контрольной поверхности, к поперечному сечению входного отверстия.

Электромеханические потери эксергии тождественны мощности приводов оборудования (питатель, колебатель, вентилятор), используемого в процессе сушки [3].

Потери эксергии в окружающую среду, обусловленные несовершенством теплоизоляции были найдены по формуле:

$$D^e = Q_{из} \cdot \tau_e, \quad (5)$$

где  $Q_{из}$  - суммарные потери тепла в окружающую среду через контрольную поверхность, кДж;  $\tau_e$  - фактор Карно.

Обозначения потоков на диаграмме Грассмана-Шаргута

№ потока	Наименование потока
1	Исходное сырье
2	Электроэнергия привода питателя
3	Электроэнергия вибропривода
4	Нагретый воздух
5	Готовый продукт
6	Отработанный воздух
7	Осушенный воздух
8	Электроэнергия нагревателя
9	Электроэнергия вентилятора

В контрольной поверхности II предлагаемой сушилки в сумму внешних потерь также вошла эксергия воды, десорбируемой из отработанного воздуха.

Эксергетические потери высушенного корма на выходе из сушилки при достижении ими термодинамического равновесия с окружающей средой были вычислены по следующей формуле:

$$D_{np} = h_{np} - h_{np}^0 - T_0 \cdot \bar{c} \cdot \ln \frac{T_{np}}{T_{np}^0} \quad (6)$$

где  $h_{np}$ ,  $T_{np}$  – энтальпия, кДж/кг, и температура, К, высушенного корма;  $\bar{c}$  – средняя удельная теплоемкость высушенного сырья между его текущим состоянием в момент выгрузки и в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой, кДж/(кг·К).

Оценку термодинамического совершенства теплотехнологических систем сушки проводили по эксергетическому КПД, исходя из значения эксергии высушенного продукта:

$$\eta_{экс} = \frac{\sum_{k=1}^l e_i^3}{\sum_{i=1}^n e_i^3} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^3 - \sum_{j=1}^m D_j}{\sum_{i=1}^n e_i^3}, \quad (7)$$

где  $\sum_{k=1}^l e_i^3$  – суммарная удельная эксергия полезных потоков (готовой продукции), кДж/кг;  $\sum_{i=1}^n e_i^3$  – суммарная затраченная удельная эксергия (подведенная в систему извне), кДж/кг;  $\sum_{j=1}^m D_j$  – суммарные эксергетические потери, кДж/кг.

Эксергия материальных и энергетических потоков, а также внутренние и внешние эксергетические потери, рассчитанные по формулам (2-6), составили эксергетический баланс теплотехнологических систем сушки продукта. При построении эксергетических диаграмм Грассмана-Шаргута (рисунок 3) в качестве абсолютного эксергетического параметра выбрана удельная эксергия  $e$ , кДж/кг. Обозначение потоков на рисунке 3 представлено в таблице 2.

Полученный по формуле (7) эксергетический КПД равен 8,4 %, что выше, чем при использовании сушилки-прототипа (учитывая подогрев воздуха перед сушкой) на 8 %. Это говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы при использовании контура рециркуляции по теплоносителю, осушающему воздуху, а также более эффективному теплообмену воздуха с высушиваемым продуктом при использовании вибропривода.

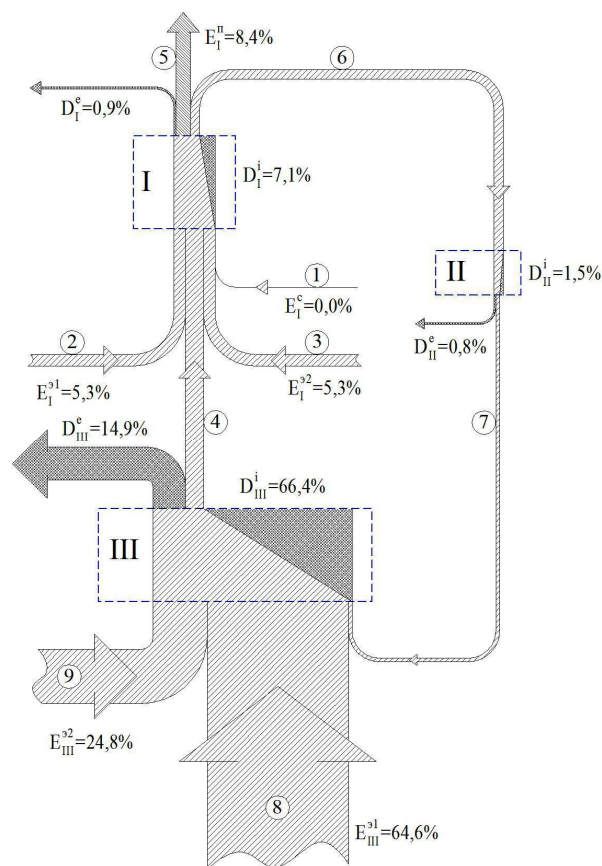


Рисунок 3 - Диаграмма Грассмана-Шаргута для предлагаемой конвективной сушилки. I–III – номера контрольных поверхностей.

**ЛИТЕРАТУРА**

1 Бродянский, В.М. Эксергетический анализ и его приложения [Текст] / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 288 с.

2 Сажин, Б.С. Эксергетический метод в химической технологии [Текст] / Б.С. Сажин, А.П. Булеков. – М.: Химия, 1992. – 208 с.

3 Процессы и аппараты пищевых производств. Книга 1 [Текст] / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовицкий, А.А. Шевцов и др. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 704 с.

**REFERENCES**

1 Brodyanskiy, V.M. Energy analysis and its applications [Text] / V.M. Brodyanskiy, V. Fratsher, K. Mihalek. – M.: Energoatomizdat, 1988 – 288 p.

2 Sazhin, B.S. Exergic method of chemical technology [Text] / B.S. Sazhin, A.P. Bulekov. – M: Chemistry, 1992. – 208 p.

3 Processes and equipment for food production. Volume 1/ A.N. Ostrikov, Y.V. Krasovitskiy, A.A. Shevtsov et al. - SPb: ГИОРД, 2007. – 704 p.