

УДК 663.94

Аспирант Е. А. Острикова

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии хранения и переработки зерна,
тел. (473) 255-65-11

Определение энергетической эффективности линии получения обжаренных кофепродуктов методом эксергетического анализа

Выполнено разбиение схемы на семь контрольных поверхностей. Составлен эксергетический баланс системы. На каждой поверхности определены удельная эксергия и внутренние и внешние потери. Построена диаграмма Грассмана - Шаргута. Посредством определения эксергетического КПД произведен анализ путей возможного совершенствования системы.

The exergy analysis was carried out in the view of roasted coffee products production line energetic efficiency increase. The scheme dividing into seven reference surfaces was made. The system exergy balance was drawn up. Specific exergy and internal and external loss were calculated for every surface. Grassmann-Shargut diagram was constructed. By means of exergetic efficiency calculating the ways of system development were analyzed.

Ключевые слова: эксергетический анализ, энергетическая эффективность, обжаренные кофепродукты.

Для определения возможных направлений повышения энергетической эффективности технологических схем необходимо оценивать уровень использования энергетических ресурсов. Для этого применяют эксергетический метод термодинамического анализа. Энергетическая эффективность производства определяется тем, насколько полно используется подаваемая извне и производимая внутри энергия, то есть насколько низки ее потери [1].

Задача эксергетического анализа – оценка на основе второго закона термодинамики степени термодинамического совершенства технической системы в целом, а также выявление тех стадий технического процесса, на которых сосредоточены основные потери эксергии с целью повышения эффективности ее работы [1].

Ранее [2] была предложена технологическая линия получения обжаренных кофепродуктов посредством трехстадийной термической обработки в камерах кондуктивного нагрева, сушки и обжарки с применением отработанных теплоносителей посредством организации процесса в замкнутом цикле и использования теплонасосной установки для регенерации паровоздушной смеси.

Эксергетический анализ выполнен по методике [1], в соответствии с которой теплотехнологическая система производства обжаренных кофепродуктов (рис. 1) условно отделена от окружающей среды замкнутой контрольной поверхностью, а внутри системы с учетом протекающих теплообменных процессов выделены следующие контрольные поверхности: I – камера кондуктивного нагрева; II – теплонасосная установка; III – теплообменник и вентилятор; IV – камера сушки; V – парогенератор, насос для подачи воды и сборник для конденсата; VI – камера обжарки и насос для подачи воды на форсунки; VII – пароперегреватель и вентилятор для подачи пара.

Схема обмена рассматриваемой теплотехнологической системы различными потоками с окружающей средой, а также между контрольными поверхностями представлена на рис. 2.

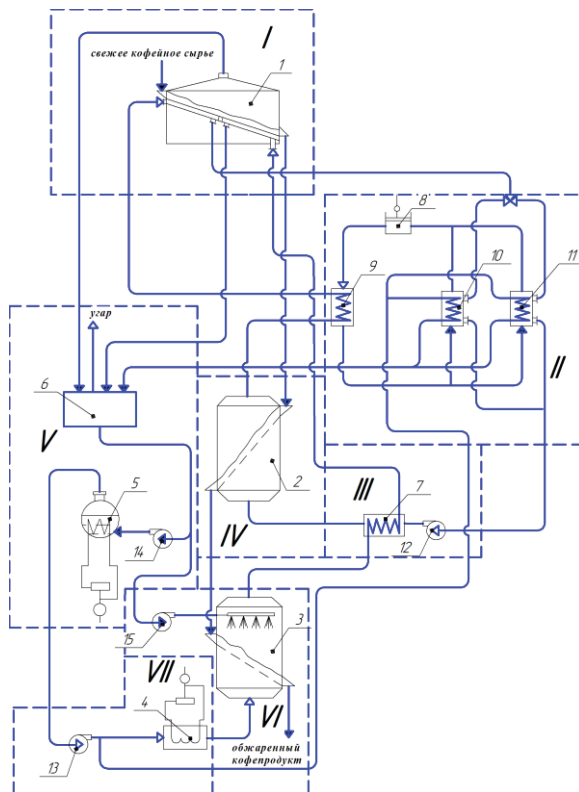


Рис. 1. Технологическая схема линии получения обжаренных кофейных продуктов: 1 – камера кондуктивного нагрева; 2 – камера сушки; 3 – камера обжарки с форсунками для подачи воды; 4 – пароперегреватель; 5 – парогенератор; 6 – емкость для сбора конденсата; 7 – теплообменник-рекуператор; 8 – компрессор теплонасосной установки; 9 – конденсатор; 10, 11 – рабочая и резервная секции испарителя; 12, 13 – вентиляторы; 14, 15 – насосы

В качестве абсолютного эксергетического параметра, используемого в расчетах, выбрана удельная эксергия e , кДж/кг, учитывающая энергию материальных и тепловых потоков с учетом массовой производительности. Эксергия в каждой контрольной поверхности изучаемой технологической системы, состоящей из классических необратимых процессов, уменьшается с течением времени, что связано с диссипацией энергии [1]:

$$\sum_{i=1}^n e_i^e = \sum_{k=1}^l e_k^y + \sum_{j=1}^m D_j, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n e_i^e$ – суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и

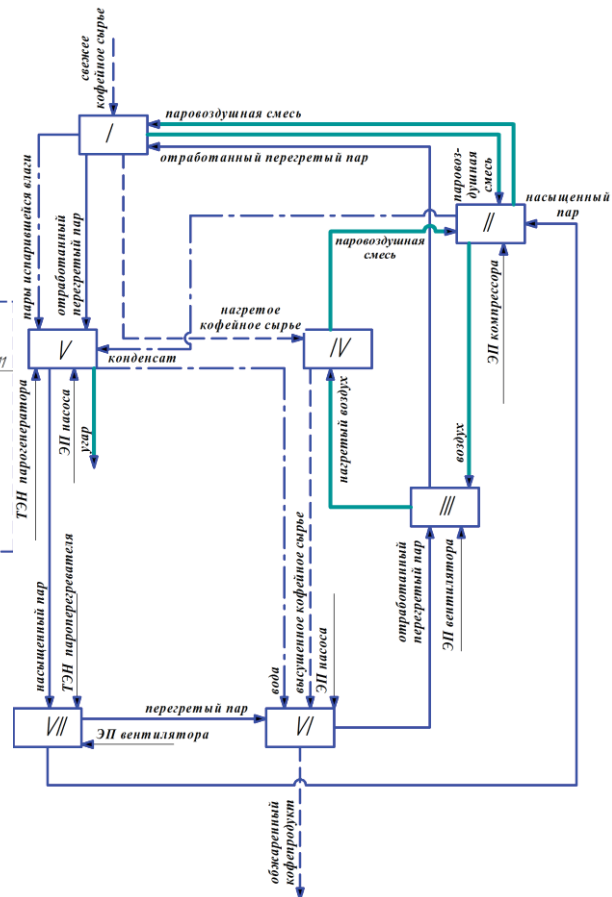


Рис. 2. Схема обмена рассматриваемой теплотехнологической системы материальными, тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой

энергетических потоков; $\sum_{i=1}^l e_i^y$ – суммарная эксергия выводимых из контрольной поверхности полезных материальных и энергетических потоков; $\sum_{j=1}^m D_j = T_0 \cdot \Delta S$ – суммарные эксергетические потери (уравнение Гюи - Стодоль); $i = \overline{1; n}$ – количество вводимых материальных и энергетических потоков; $k = \overline{1; l}$ – количество выходящих полезных потоков; $j = \overline{1; m}$ – количество эксергетических потерь.

Соотношение (1) для технологической линии производительностью 1 т/ч [2] обжа-

ренных кофепродуктов (ячмень, корни цикория, желуди, каштаны) рассматривалось на примере ячменя в следующем виде:

$$e_1^i + e_2^i + e_3^i + \sum e^{\ddot{y}} = e^{\ddot{a}} + \sum D^i + \sum D^e, (2)$$

где $e_1^i, e_2^i, e_3^i, e^{\ddot{a}}$ – удельная эксергия: свежего кофейного сырья воздуха, воды, подаваемых в систему; готового кофепродукта, (кДж/кг); $\sum e^{\ddot{y}}$ суммарная эксергия, вводимая в систему с электроэнергией для работы приводов машин; $\sum D^i$ – сумма потерь эксергии в результате необратимости процессов, происходящих внутри контрольной поверхности; $\sum D^e$ – сумма потерь эксергии во внешнюю среду.

Уравнение (2) отражает изменение эксергии теплотехнологической системы за счет ввода свежего кофейного сырья, воздуха и воды, подвода электроэнергии к ТЭНам парогенератора и пароперегревателя; покрытие потерь, возникающих вследствие необратимости процессов тепловой обработки сырья и продуктов; изменения их теплофизических свойств; компенсации потерь, обусловленных действием окружающей среды.

Эксергия вводимых в систему внешних материальных потоков: исходного кофейного сырья e_1^i , воздуха e_2^i , воды e_3^i , находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю, поэтому исключается из баланса.

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

$$\dot{a}_{y.e.} = \dot{a} - \dot{a}_0 = h - h_0 - T_0(S - S_0),$$

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.

Удельную изобарную теплоемкость ячменя (Дж/кг·К), определяли по эмпирической формуле [3]:

$$c = (891,7 + 87,49W - 1,545W^2 + 0,01149W^3) \times \\ \times (1 + 0,287 \cdot 10^{-3} \cdot (25 - W) \cdot (t - 28)) ,$$

где W – влажность зерна ячменя, %; t – температура зерна ячменя, °С.

Теплофизические свойства веществ, образующих материальные потоки, взяты из справочной литературы [4, 5].

Рассмотрено влияние на систему двух групп энергетических потерь: внутренних D^i и внешних D^e . Первые связаны с необратимостью любых реальных процессов, а вторые – с условиями взаимодействия системы с окружающей средой.

В суммарное количество внутренних эксергетических потерь входили потери от конечной разности температур в результате рекуперативного теплообмена между продуктом и теплоносителями (паром и воздухом) и гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема теплоносителя при его поступлении из трубопровода в камеры кондуктивного нагрева, сушки и обжарки.

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

$$D^{\ddot{a}} = Q^{\ddot{a}} \cdot \bar{\tau}_a, (3)$$

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

Фактор Карно, или эксергетическая температурная функция, [1] равен термическому КПД цикла Карно между температурами контрольной поверхности и условно принятой окружающей среды:

$$\tau_a = (\dot{O}_{\text{et}} - \dot{O}_0) / \dot{O}_{\text{et}}, (4)$$

где $\dot{O}_{\text{et}}$ – температура теплоносителя внутри контрольной поверхности, К.

Эксергетические потери вследствие падения давления паровоздушной смеси при их подаче в контрольную поверхность определяли по формуле:

$$D^{\ddot{a}} = G_0 \cdot g \cdot \Delta \dot{I}_a \cdot \frac{\dot{O}_{\text{et}}}{\dot{O}_{\text{ao}}}, (5)$$

где G_0 и $\dot{O}_{\text{ao}}$ – расход, кг/ч, и температура, К теплоносителя на входе в контрольную поверхность; $\Delta \dot{I}_a$ – гидравлические потери, м.

По формуле Дарси - Вейсбаха [6] найдены гидравлические потери при входе теплоносителя в контрольную поверхность:

$$\Delta \dot{I}_a = \xi \cdot \frac{v_{ao}^2}{2g}, \quad (6)$$

где v_{ao} – средняя скорость прохождения теплоносителя по сечению подводящего трубопровода, м/с; ξ – коэффициент сопротивления, определяемый отношением внутреннего объема оборудования, рассматриваемого в качестве контрольной поверхности, к поперечному сечению трубопровода.

Внешние потери D^e связаны с условиями сопряжения системы с окружающей средой. Эти потери обусловлены отличием температуры теплоносителей от температуры окружающей среды, несовершенством тепловой изоляции оборудования, сбросом неконденсирующихся газов (угара) при регенерации теплоносителей.

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

$$D^{\dot{o}} = Q_{\dot{e}c} \cdot \tau_{\dot{a}}, \quad (7)$$

где $Q_{\dot{e}c}$ – суммарные потери тепла в окружающую среду через контрольную поверхность, кДж; τ_e – фактор Карно.

Эксергетические потери готового продукта на выходе из камеры обжарки при достижении им термодинамического равновесия с окружающей средой были вычислены по следующей формуле:

$$D_{\dot{a}i} = G_{\dot{a}i} \cdot \left(h_{\dot{a}i} - h_0 - \dot{Q}_0 \cdot \bar{n} \cdot \ln \frac{\dot{Q}_{\dot{a}i}}{\dot{Q}_0} \right), \quad (8)$$

где $G_{\dot{a}i}$ – производительность линии по обжаренному кофепродукту, кг/ч; $h_{\dot{a}i}$, $T_{\dot{a}i}$ – энтальпия, кДж/кг, и температура, К, готового продукта; $\bar{c}$ – средняя удельная теплоемкость готового продукта, кДж/(кг·К).

Оценку термодинамического совершенства теплотехнологической системы производства обжаренных кофепродуктов проводили по эксергетическому КПД [1]:

$$\eta_{\text{yen}} = \frac{\sum_{k=1}^l e_i^i}{\sum_{i=1}^n e_i^e} = \frac{\dot{a}^{\dot{a}i} + \sum_{j=1}^3 e_j^{\dot{o}}}{e_1^i + \dot{a}_2^i + \dot{a}_3^i},$$

где $\sum_{k=1}^l e_i^i$ – суммарная удельная эксергия полезных

потоков, кДж/кг; $\sum_{i=1}^n e_i^e$ – суммарная затраченная удельная эксергия, кДж/кг; e_1^i , e_2^i , e_3^i –

удельная эксергия свежего кофейного сырья воздуха, воды, подаваемых в систему, кДж/кг; $e^{\dot{a}i}$ – удельная эксергия готового кофепродукта, кДж/кг;

$\sum_{j=1}^3 e_j^m$ – удельная эксергия теплоносителей, применяемых в трех камерах термической обработки продукта, и воды, подаваемой на распыл в камеру обжарки, кДж/кг.

Эксергия каждого материального и энергетического потока, а также внутренние и внешние эксергетические потери, рассчитанные по формулам (3)-(8), составили эксергетический баланс теплотехнологической системы производства обжаренных кофепродуктов (табл. 1).

При построении эксергетических диаграмм Грассмана - Шаргута (рис. 3) в качестве абсолютного эксергетического параметра использовалась удельная эксергия e , кДж/кг. Обозначение потоков на рис. 3 представлено в табл. 2.

При построении эксергетических диаграмм Грассмана - Шаргута (рис. 3) в качестве абсолютного эксергетического параметра использовалась удельная эксергия e , кДж/кг. Обозначение потоков на рис. 3 представлено в табл. 2.

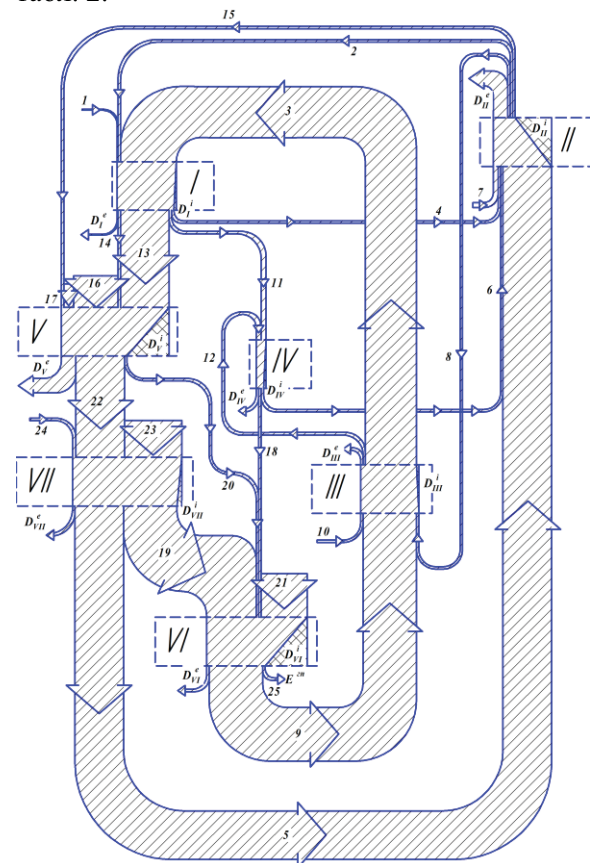


Рис. 3. Эксергетическая диаграмма линии получения обжаренных кофепродуктов

Т а б л и ц а 1

Эксергетический баланс исследуемой линии получения обжаренных кофепродуктов

Контроль-ная поверхность	Наименование	Удельная эксергия, кДж/кг				Вклад потерь в общие потери, %	КПД (η), %
		Воспри-нятая	Пере-данная	Потери			
				Обо-значе-ние	кДж/кг		
I	Камера кондуктивного нагрева	548,69	542,59	D^i_I D^e_I	4,08 2,02	0,22 0,11	98,89
II	Теплонасосная установка	635,60	7,80	D^i_{II} D^e_{II}	520,11 107,70	28,55 5,91	1,23
III	Теплообменник и вентилятор	568,37	545,97	D^i_{III} D^e_{III}	12,51 9,89	0,69 0,54	96,06
IV	Камера сушки	9,12	9,00	D^i_{IV} D^e_{IV}	0,07 0,04	0,004 0,002	98,76
V	Парогенератор, насос для подачи воды и сборник для конденсата	1103,79	523,34	D^i_V D^e_V	455,70 124,75	25,01 6,85	47,41
VI	Камера обжарки и насос для подачи воды на форсунки	1114,26	582,62	D^i_{VI} D^e_{VI} E^{zn}	509,43 4,41 17,80	27,96 0,24 0,98	52,29
VII	Пароперегреватель и вентилятор для подачи пара	1175,41	1121,85	D^i_{VII} D^e_{VII}	42,23 11,33	2,32 0,62	95,44
Итого		5155,24	3333,17		1822,07	100	62,08

Т а б л и ц а 2

Эксергетический баланс исследуемой линии получения обжаренных кофепродуктов

№ по-тока	Наименование потока	e , кДж/кг
1	Свежее кофейное сырье	0
2	Паровоздушная смесь, подаваемая на нагрев сырья	9,98
3	Отработанный перегретый пар, подаваемый на нагрев сырья	538,70
4	Паровоздушная смесь, подаваемая в рабочую секцию испарителя	4,66
5	Насыщенный пар, подаваемый в резервную секцию испарителя	522,35
6	Паровоздушная смесь, подаваемая в конденсатор теплонасосной установки	0,59
7	Электроэнергия привода компрессора	108,00
8	Воздух	1,05
9	Отработанный перегретый пар, подаваемый в теплообменник	564,82
10	Электроэнергия вентилятора, подающего воздух	2,51
11	Нагретое кофейное сырье	1,84
12	Нагретый воздух	7,27
13	Отработанный перегретый пар, подаваемый в сборник конденсата	526,20
14	Пары испарившейся влаги	4,80
15	Конденсат	3,18
16	Электроэнергия ТЭНа парогенератора	455,70
17	Электроэнергия насоса, подающего воду в парогенератор	113,92
18	Высушенное кофейное сырье	4,34
19	Перегретый пар	599,50
20	Вода	0,99
21	Электроэнергия насоса, подающего воду в камеру обжарки	509,43
22	Насыщенный пар, полученный в парогенераторе	522,35
23	Электроэнергия ТЭНа пароперегревателя	647,44
24	Электроэнергия вентилятора, подающего насыщенный пар	5,62
25	Обжаренный кофепродукт	17,80

Полученный эксергетический КПД равен 62,08 %, что существенно выше, чем у известных технологий [7]. Это говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы за счет использования отработанных теплоносителей и организации работы системы в замкнутом цикле, но оставляет возможность для дальнейшего совершенствования системы.

Каждая взятая в отдельности контрольная поверхность имеет достаточно большой эксергетический КПД, за исключением теплонасосной установки. Это явилось предметом исследования организации термодинамического цикла с использованием парозежкторной холодильной машины, обеспечивающей энергетическое совершенство рассматриваемой технологической линии. Кроме того, таким образом удастся повысить эксплуатационную надежность оборудования, а также снизить себестоимость готовой продукции и повысить экологическую безопасность производства обжаренных кофепродуктов за счет использования дешевого хладагента – воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 287 с.
2. Шевцов, А. А. Управление ресурсосберегающей технологией обжарки зерен кофе [Текст] / А. А. Шевцов, Е. А. Острикова // Автоматизация и современные технологии. – 2010. – № 7. – С. 15-18.
3. Жидко, В. И. Зерносушение и зерносушилки [Текст] / В. И. Жидко, В. А. Резчиков, В. С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
4. Богословский, С. В. Физические свойства газов и жидкостей [Текст] / С. В. Богословский. – СПб.: СПбГУАП, 2001. – 73 с.
5. Вукалович, М. П. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст] / М. П. Вукалович. – М.: Машиностроение, 1967. – 160 с.
6. Процессы и аппараты пищевых производств. Кн. 1 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовицкий, А.А. Шевцов [и др.]: под ред. А.Н. Острикова. – С-Пб.: ГИОРД, 2007. – 704 с.
7. Остриков, А. Н. Обжарка кофе перегретым паром [Текст] / А. Н. Остриков, А. А. Шевцов, В. М. Кравченко, А. Н. Зотов. Воронеж, 2003. – 174 с.