

УДК 664.854.8

Аспирант В.Д. Демьянов

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств. тел. (473) 255-35-54

E-mail: Demmonrio@mail.ru

Graduate V.D. Dem'shanov

(Voronezh state university of engineering technologies) Department of technology of fats, processes and devices, chemical and food industries. phone (473) 255-35-54

E-mail: Demmonrio@mail.ru

## Эксергетический анализ технологической линии производства фруктовых цукатов

### Exergy analysis of production line candied fruit

Реферат. 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. Использование эксергетического анализа позволяет решать широкий круг технических задач на основе унифицированной термодинамической методики. Эксергетический анализ выполнен по методике, в соответствии с которой теплотехнологическая система производства фруктовых цукатов условно отделена от окружающей среды замкнутой контрольной поверхностью. Схема обмена рассматриваемых теплотехнологических производств фруктовых цукатов материальными, тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой, а также между контрольными поверхностями. Эксергия вводимых в систему внешних материальных потоков: атмосферного воздуха, питьевой воды и раствора лимонной кислоты, а также выводимых потоков, не получивших приращение эксергии в процессе прохождения через контрольную поверхность – отработанных воздуха и воды после мойки, находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю. В суммарное количество внутренних эксергетических потерь входят потери от конечной разности температур в результате теплообмена между сушим сырьем и нагретым воздухом, электромеханические, возникающие при необратимом изменении структурно-механических свойств продукта, и гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема воздуха при ее поступлении в рабочую камеру сушилки. Полученный эксергетический КПД равен 8,87 %, что на 3,7 % выше, чем при использовании технологии-прототипа, основанной на воздушно-солнечной сушке продукта. Это говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы при использовании СВЧ-нагрева продукта в сочетании с отводом влаги в атмосферу низкотемпературным теплоносителем, что исключает значительные внешние потери эксергии на этапе сушки.

Summary. The task of exergy analysis - evaluation based on the second law of thermodynamics, thermodynamic degree of technical perfection of the whole system, as well as to identify those stages of a technical process, which contains the bulk of the loss of exergy in order to improve its efficiency. Using exergy analysis allows to solve a wide range of technical problems on the basis of a unified thermodynamic methods. Exergy analysis was performed by the method whereby thermotechnological system candied fruit production, conventionally separated from the environment of the closed control surface. Exchange scheme under consideration thermotechnological candied fruit production material, thermal and energy flows to the environment, as well as between the control surfaces. Exergy in external input material streams: air and water and citric acid, as well as output streams without having increment Shih-exergy in the process of passing through the reference surface - of running air-water and after washing, are in thermodynamic equilibrium with the surroundings is zero. In the total number of internal exergy losses include losses from the final result of the temperature difference in the heat exchange between the raw material to be dried and heated air electromechanical arising from irreversible alteration of structural and mechanical properties of the product, and the hydraulic loss due to the sudden increase of the specific volume of air as it enters the working chamber dryer. The resulting exergy efficiency is 8.87 %, which is 3.7 % higher than when using the technology of the prototype based on solar air-dried product. This indicates an increase in the degree of perfection of the thermodynamic system by using microwave heating of the product in combination with the removal of moisture in the atmosphere low temperature coolant, which precludes significant outside exergy loss on drying step.

*Ключевые слова:* Эксергетический анализ, энергетическая эффективность, цукаты.

*Keywords:* energy analysis, energy efficiency, candied

Эксергетический анализ является относительно новым методом термодинамической оценки совершенства теплотехнологических систем и базируется на использовании понятия эксергия при исследовании технических процессов. Этот метод применяют при анализе процессов, протекающих как при повышенных температурах, так и с использованием холодильных агрегатов. Развиваются также и технико-экономические приложения эксергетического метода [1].

Для определения возможных направлений повышения энергетической эффективности технологических схем необходимо оценивать уровень использования энергетических ресурсов. Для этого применяют эксергетический метод термодинамического анализа. Эксергетический анализ является относительно новым методом и базируется на использовании понятия эксергия при исследовании технических процессов.

© Демьянов В.Д., 2014

Понятия эксергия и энергия отличаются: энергия определяется фундаментальными свойствами материи, а эксергия характеризует пригодность энергии в данных условиях окружающей среды, параметры которой независимы от воздействия рассматриваемой теплотехнологической системы [2].

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. Использование эксергетического анализа позволяет решать широкий круг технических задач на основе унифицированной термодинамической методики.

Эксергетический метод анализа позволяет оценить степень использования энергии, ее потери, а также получить распределение этих потерь по отдельным аппаратам производства, то есть выявить наименее эффективные из них.

Эксергетический анализ выполнен по методике, в соответствии с которой теплотехнологическая система производства фруктовых цукатов (рисунок 1) условно отделена от

окружающей среды замкнутой контрольной поверхностью, а внутри системы с учетом протекающих теплообменных процессов выделены следующие контрольные поверхности: I – подготовка сырья; II – удаление семенного гнезда; III – резка; IV – сульфитация; V – сушка.

Схемы обмена рассматриваемых теплотехнологических производства фруктовых цукатов 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:

$$\Sigma E_x = \Sigma E_y + \Sigma D, \quad (1)$$

где  $\Sigma E_y$  – суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков;  $\Sigma E_x$  – суммарная эксергия выводимых из контрольной поверхности полезных материальных и энергетических потоков;  $\Sigma D = T_0 \cdot \Delta S$  – суммарные эксергетические потери (уравнение Гюи-Стодолы).

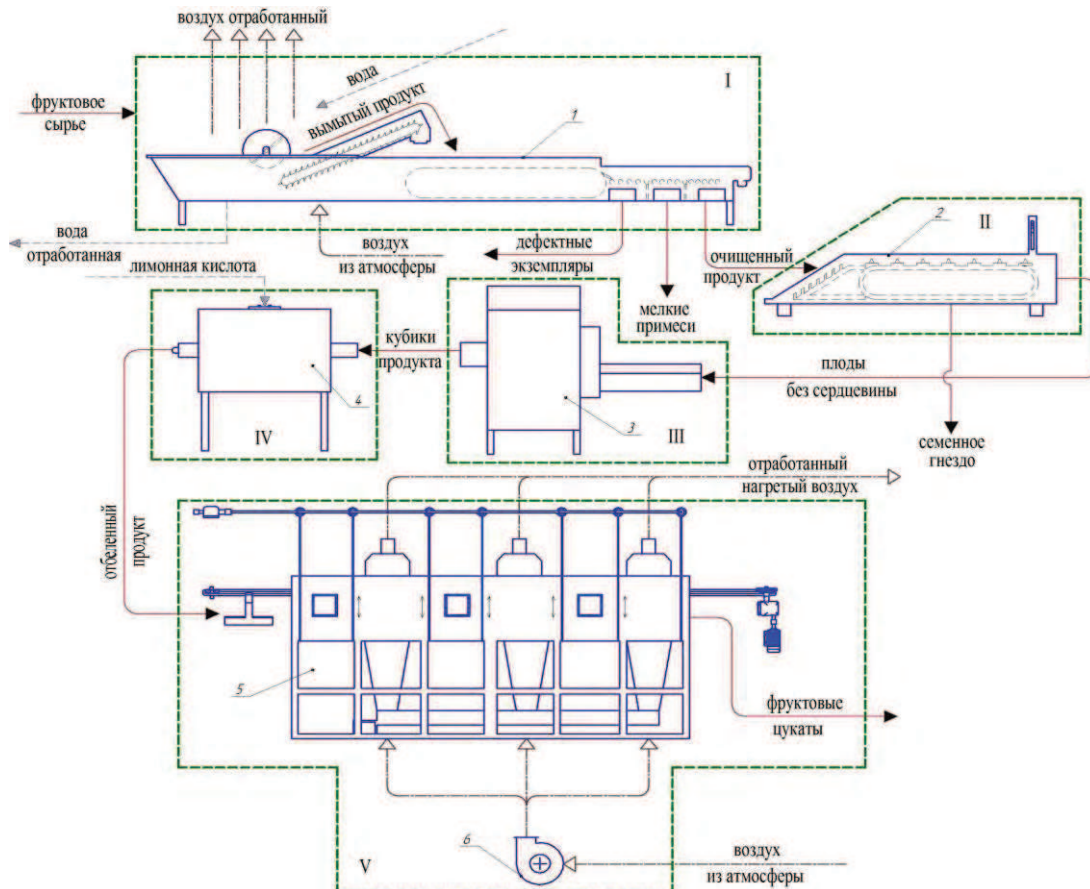


Рисунок 1. Схема технологического процесса: — продукт; — жидкость; — воздух; — границы контрольных поверхностей. 1 – моечно-калибровочный комплекс; 2 – машина для удаления семенного гнезда; 3 – резательная машина; 4 – сульфитатор; 5 – СВЧ-конвективная сушилка; 6 – вентилятор

Соотношение (1) для рассматриваемой технологии [9] рассматривалось в следующем виде:

$$E_1'' + \sum E_2'' + \sum E_3'' + \sum E_4'' + \sum E_5'' = E_1^K + \sum E_2^K + \sum D_i + \sum D_e, \quad (2)$$

где слагаемые этих уравнений – эксергия (кДж): исходного фруктового сырья  $E_1''$ ; атмосферного воздуха  $\sum E_2''$ ; питьевой воды  $\sum E_3''$ , лимонной кислоты для сульфитации  $\sum E_4''$ , суммарной электроэнергии  $\sum E_5''$ ; фруктовых

цукатов (готовый продукт)  $E_1^K$ ; воздуха, выбрасываемого в атмосферу  $\sum E_2^K$ , отводимой после мойки сырья воды  $\sum E_3^K$ ; сумма потерь эксергии в результате необратимости процессов, происходящих внутри контрольной поверхности  $\sum D_i$ ; сумма потерь эксергии во внешнюю среду  $\sum D_e$ .



Рисунок 2. Схема обмена потоками между контрольными поверхностями предлагаемой теплотехнологической системы: — — — — — продукт; — — — — — вода; — — — — — воздух; — — — — — электроэнергия; — — — — — границы контрольных поверхностей

Уравнение (2) отражает изменение эксергии теплотехнологической системы за счет ввода исходного фруктового сырья, атмосферного воздуха, подвода электроэнергии к магнетронам; необратимых изменений структурно-механических свойств продукта, сопряженных с затратами электроэнергии на приводы технологического оборудования; приращения эксергии от механического трения в процессе удаления семенного гнезда, калибрования фруктов и измельчения; покрытия потерь, возникающих при необратимости процессов тепловой обработки промежуточного продукта в сушилке; изменения его теплофизических свойств; компенсации потерь, обусловленных действием окружающей среды.

Эксергия вводимых в систему внешних материальных потоков: атмосферного воздуха, питьевой воды и раствора лимонной кислоты, а также выводимых потоков, не получивших приращение эксергии в процессе прохождения через контрольную поверхность – отработанных возду-

ха и воды после мойки, 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:

$$e_{\text{э.к.}} = e - e_0 = h - h_0 - T_0(S - S_0), \quad (3)$$

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.

Данные по теплофизическим свойствам воздуха, воды, сырья и продукта различной влажности и температуры взяты из справочной литературы [3-5].



Эксергию влажного воздуха, участвующего в процессе сушки сырья (в качестве охлаждающего агента), определяли, рассматривая его как бинарную смесь, состоящую из 1 кг воздуха и  $X$  кг водяных паров:

$$e_B = \bar{c}_B \cdot (T - T_0) - \left[ T_0 \cdot \bar{c}_B \cdot \ln \frac{T}{T_0} - R_B \cdot \ln \frac{p - \phi \cdot p_s(T)}{p_0 - \phi_0 \cdot p_s(T_0)} + \right. \\ \left. + X \cdot (h_n - h_n^0 - T_0 \cdot (S_n - S_n^0)) \right], \quad (4)$$

где  $\bar{c}_B$  – средняя удельная изобарная теплоемкость влажного воздуха между его текущим состоянием в потоке и состоянием равновесия с окружающей средой, кДж/(кг·К);  $p$ ,  $p_0$  и  $\phi$ ,  $\phi_0$  – полное давление, Па и относительная влажность воздуха, % в потоке и в окружающей среде;  $p_s(T)$ ,  $p_s(T_0)$  – давление насыщенного водяного пара при температуре потока и окружающей среды, Па;  $h_n$ ,  $h_n^0$  и  $S_n$ ,  $S_n^0$  – энтальпия и энтропия водяного пара при параметрах потока и окружающей среды, кДж/кг и кДж/(кг·К).

В работе рассмотрено влияние на систему внутренних  $D^i$  и внешних  $D^e$  эксергетических потерь.

В суммарное количество внутренних эксергетических потерь входят потери от конечной 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 ее поступлении в рабочую камеру сушилки.

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

$$D^{mo} = Q^{mo} \cdot \bar{\tau}_e, \quad (5)$$

где  $Q^{mo}$  – 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 равна термическому КПД цикла Карно между температурами контрольной поверхности и условно принятой окружающей среды:

$$\tau_e = (T_{кл} - T_0) / T_{кл}, \quad (6)$$

где  $T_{кл}$  – температура теплоносителя внутри контрольной поверхности, К.

Эксергетические потери вследствие падения давления воздуха при его подаче в контрольную поверхность (при его подводе в моечную ванну) определяли по формуле:

$$D^e = g \cdot \Delta H_e \cdot \frac{T_{кл}}{T_{ex}}, \quad (7)$$

где  $T_{ex}$  – температура, К воздуха на входе в контрольную поверхность;  $\Delta H_e$  – гидравлические потери, м.

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

$$\Delta H_e = \xi \cdot \frac{v_{ex}^2}{2g}, \quad (8)$$

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

Электромеханические потери эксергии тождественны мощности приводов технологического оборудования (моечно-калибровочный комплекс, машина для удаления семенного гнезда и т.д.), используемого в процессе обработки сырья и промежуточных продуктов [8].

Внешние потери  $D^e$  связаны с условиями сопряжения системы с окружающей средой. Они обусловлены различием температур теплоносителя и окружающей среды, несовершенством теплоизоляции оборудования, выбросом отработанного воздуха в атмосферу.

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

$$D^e = Q_{из} \cdot \tau_e, \quad (9)$$

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

Эксергетические потери готовых фруктовых цукатов на выходе из последней секции сушилки при достижении ими термодинамического равновесия с окружающей средой были вычислены по следующей формуле:

$$D_{np} = h_{np} - h_{np}^0 - T_0 \cdot \bar{c} \cdot \ln \frac{T_{np}}{T_{np}^0}, \quad (10)$$

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

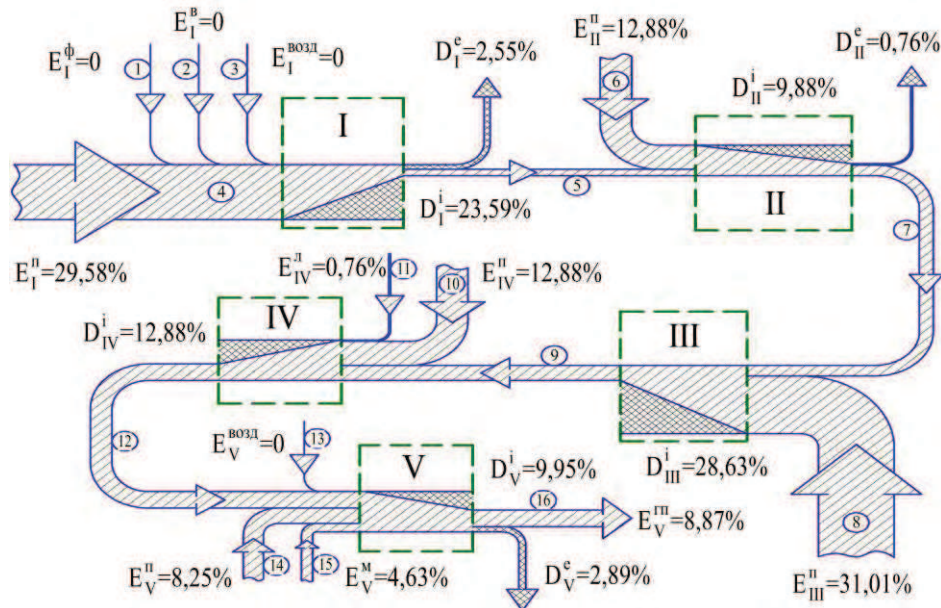


Рисунок 3. Диаграмма Грассмана-Шаргута для исследуемой технологии. I-V – номера контрольных поверхностей

Т а б л и ц а 1

Обозначения потоков на диаграмме Грассмана-Шаргута исследуемой линии  
(прочерк – в значении внутренних потоков)

| № потока | Наименование потока                         | $E$ , кДж/ч |
|----------|---------------------------------------------|-------------|
| 1        | Исходное фруктовое сырье                    | 0           |
| 2        | Вода                                        | 0           |
| 3        | Воздух из атмосферы в камеру мойки          | 0           |
| 4        | Приводы моечно-калибровочного комплекса     | 12400       |
| 5        | Промытое и очищенное от примесей сырье      | –           |
| 6        | Привод машины для удаления семенного гнезда | 5400        |
| 7        | Плоды без сердцевин                         | –           |
| 8        | Привод резательной машины                   | 13000       |
| 9        | Кубики продукта                             | –           |
| 10       | Привод сульфитатора                         | 5400        |
| 11       | Лимонная кислота (0,15%-ный раствор)        | 320         |
| 12       | Отбеленный продукт                          | –           |
| 13       | Воздух из атмосферы в сушилку               | 0           |
| 14       | Приводы вентилятора и транспортера          | 3460        |
| 15       | Электроэнергия магнетронов                  | 1940        |
| 16       | Готовый продукт                             | 3720        |

Т а б л и ц а 2

Эксергетический баланс исследуемой линии получения цукатов

| Контрольная поверхность | Подвод эксергии           |              |             |                      | Отвод и потери эксергии                                             |             |             |                      |
|-------------------------|---------------------------|--------------|-------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|----------------------|
|                         | Наименование              | Обозначение  | $E$ , кДж/ч | % суммарной эксергии | Наименование                                                        | Обозначение | $E$ , кДж/ч | % суммарной эксергии |
| 1                       | 2                         | 3            | 4           | 5                    | 6                                                                   | 7           | 8           | 9                    |
| I                       | подготовка сырья          | $E_I^a$      | 0           | 0                    | Внутренние потери<br>Внешние потери<br>(отработанные воздух и вода) | $D_I^i$     | 9890        | 23,59                |
|                         |                           | $E_I^φ$      | 0           | 0                    |                                                                     | $D_I^e$     | 1070        | 2,55                 |
|                         |                           | $E_I^{возд}$ | 0           | 0                    |                                                                     |             |             |                      |
|                         |                           | $E_I^n$      | 12400       | 29,58                |                                                                     |             |             |                      |
| II                      | удаление семенного гнезда | $E_{II}^n$   | 5400        | 12,88                | Внутренние потери                                                   | $D_{II}^e$  | 4140        | 9,88                 |
|                         |                           |              |             |                      | Внешние потери                                                      | $D_{II}^i$  | 320         | 0,76                 |
| III                     | резка                     | $E_{III}^n$  | 13000       | 31,01                | Внутренние потери                                                   | $D_{III}^i$ | 12000       | 28,63                |
| IV                      | сульфитация               | $E_{IV}^n$   | 5400        | 12,88                | Внутренние потери                                                   | $D_{IV}^i$  | 5400        | 12,88                |
|                         |                           | $E_{IV}^m$   | 320         | 0,76                 |                                                                     |             |             |                      |

| 1                    | 2     | 3                                                      | 4            | 5            | 6                                                      | 7                                                                        | 8                    | 9                    |
|----------------------|-------|--------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| V                    | сушка | $E_{\text{в}}^{\text{п}}$<br>$E_{\text{в}}^{\text{м}}$ | 3460<br>1940 | 8,25<br>4,63 | Готовый продукт<br>Внутренние потери<br>Внешние потери | $E^{\text{п}}$<br>$D_{\text{в}}^{\text{в}}$<br>$D_{\text{в}}^{\text{е}}$ | 3720<br>4170<br>1210 | 8,87<br>9,95<br>2,89 |
| ИТОГО:               |       |                                                        | 41920        | 100          | –                                                      | –                                                                        | 41920                | 100                  |
| Эксергетический КПД: |       |                                                        |              |              | 8,87%                                                  |                                                                          |                      |                      |

Оценку термодинамического совершенства теплотехнологической системы производства фруктовых цукатов проводили по эксергетическому КПД, исходя из значения эксергии готовой продукции:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\sum_{k=1}^l e_i^{\text{э}}}{\sum_{i=1}^n e_i^{\text{э}}} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^{\text{э}} - \sum_{j=1}^m D_j}{\sum_{i=1}^n e_i^{\text{э}}}, \quad (11)$$

где  $\sum_{k=1}^l e_i^{\text{э}}$  – суммарная удельная эксергия цукатов, кДж/кг;  $\sum_{i=1}^n e_i^{\text{э}}$  – 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 фор-

мулам (5-10), составили эксергетический баланс теплотехнологической системы производства фруктовых цукатов (таблица 2). Обозначение потоков на рисунок 3 представлено в таблице 1. При построении эксергетических диаграмм Грассмана-Шаргута (рисунок 3) в качестве абсолютного эксергетического параметра выбрана эксергетическая мощность  $E$ , кДж/ч.

Полученный по формуле (11) эксергетический КПД равен 8,87 %, что на 3,7 % выше, чем при использовании технологии-прототипа, основанной на воздушно-солнечной сушке продукта. Это говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы при использовании СВЧ-нагрева продукта в сочетании с отводом влаги в атмосферу низкотемпературным теплоносителем, что исключает значительные внешние потери эксергии на этапе сушки.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический анализ и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
- 2 Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии. М.: Химия, 1992. 208 с.
- 3 Гуляев В.Н., Дремина Н.В., Кац З.А. и др. Справочник технолога пищевого концентратного и овощесушильного производства. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 488 с.
- 4 Богословский С.В. Физические свойства газов и жидкостей. СПб.: СПбГУАП, 2001. 73 с.
- 5 Чубик И.А., Маслов А.М. Справочник по теплофизическим свойствам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 184 с.
- 6 Остриков А.Н., Красовицкий Ю.В., Шевцов А.А. и др. Процессы и аппараты пищевых производств. Кн. 1. СПб.: ГИОРД, 2007. 704 с.
- 7 Калашников Г.В., Остриков А.Н. Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов. Воронеж: Издательство ВГУ, 2001. 356 с.
- 8 Кац З.А. Производство сушеных овощей, картофеля и фруктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 216 с.

#### REFERENCES

- 1 Brodyanskii V.M., Fratscher V., Mikhalek K. Eksergeticheskii analiz i ego prilozheniia [Exergy analysis and its applications]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 288 p. (In Russ.).
- 2 Sazhin B.S., Bulekov A.P. Eksergeticheskii metod v khimicheskoi tekhnologii [Exergic method in chemical engineering]. Moscow, Khimiia, 1992. 208 p. (In Russ.).
- 3 Guliaev V.N., Dremina N.V., Kats Z.A. et al. Spravochnik tekhnologa pishchekontsentratsionogo i ovoshchesushil'nogo proizvodstva [Directory technologist-food and vegetable drying the concentrate production]. Moscow, Legkaia i pishchevaia promyshlennost', 1984. - 488 p. (In Russ.).
- 4 Bogoslovskii S.V. Fizicheskie svoistva gazov i zhidkosti [The physical properties of gases and liquids]. Saint-Petersburg, SPbGUAP, 2001. 73 p. (In Russ.).
- 5 Chubik I.A., Maslov A.M. Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam produktov i polufabrikatov [Handbook on thermophysical properties of food products and semi-manufactured goods]. Moscow, Pishchevaia promyshlennost', 1970. 184 p. (In Russ.).
- 6 Ostrikov A.N., Krasovitskii Iu.V., Shevtsov A.A. et al. Protessy i apparaty pishchevykh proizvodstv [Processes and devices of food manufactures]. Saint-Petersburg, GIORД, 2007. 704 p. (In Russ.).
- 7 Kalashnikov G.V., Ostrikov A.N. Resursosberegaiushchie tekhnologii pishchevykh kontsentratsion [Saving technologies of food concentrates]. Voronezh, Izdatel'stvo VGU, 2001. 356 p. (In Russ.).
- 8 Kats Z.A. Proizvodstvo sushenykh ovoshchei kartofelia i fruktov [Production of dried vegetables, potatoes and fruits] Moscow, Legkaia i pishchevaia promyshlennost', 1984. 216 p. (In Russ.).