

Научная статья

УДК 664.8.034:66-971

DOI 10.24888/2541-7835-2023-28-46-57

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОГО НАСЫЩЕНИЯ ПАРАМИ ПРЯНО-КОПТИЛЬНЫХ АРОМАТИЗАТОРОВ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Шубкин Сергей Юрьевич^{1✉}, Мокренский Денис Николаевич²

^{1,2}Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, Россия

¹shubkin.92@mail.ru[✉]

²dmokrensky@mail.ru

Аннотация. В статье представлена методика эксергетического анализа энерготехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения. Представлены функциональные зависимости, которые позволяют учитывать уровень эффективности энергетического потенциала, способствующего выполнению полезной работы системы. Проведен термодинамический анализ эффективности энерготехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения, учитывая ее рабочие параметры, а также тепловые, материальные, энергетические и другие потоки. Произведенный расчет и наглядная интерпретация эксергетического баланса в виде диаграммы Грассмана-Шаргута потоков и потерь эксергии, позволили качественно оценить весь комплекс потерь эксергии в элементах установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения, в результате протекающих в ней как обратимых, так и необратимых процессов тепло- и массообмена. Установлено, что значение эксергетического КПД составило 6,9 %, что на 2,4 % выше, чем при использовании технологии-прототипа. Это свидетельствует о повышении степени термодинамического совершенства энерготехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения.

Ключевые слова: термодинамическая оценка, эксергетический анализ, пряно-копильные ароматизаторы, вакуумное насыщение, энергоэффективность.

Для цитирования: Шубкин С.Ю., Мокренский Д.Н. Термодинамическая оценка эффективности процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения // Агропромышленные технологии Центральной России. 2023. № 2(28). С. 46-57. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-28-46-57>.

Original article

THERMODYNAMIC EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF VACUUM SATURATION WITH VAPORS OF SPICY-SMOKY FLAVORS OF EXTRUDED FUNCTIONAL PRODUCTS

Sergey Yu. Shubkin^{1✉}, Denis N. Mokrenskiy²

^{1,2}Bunin Yelets State University, Yelets, Russia

¹shubkin.92@mail.ru[✉]

²dmokrensky@mail.ru

Abstract. The article presents a method of exergetic analysis of the energy-technological system of vacuum saturation with vapors of spicy-smoky flavors of extruded functional products. Functional dependencies are presented that allow taking into account the level of efficiency of the energy potential that contributes to the performance of useful work of the system. The thermodynamic analysis of the efficiency of the energy-technological system of vacuum saturation with vapors of spicy-smoky flavors of extruded functional

products, taking into account its operating parameters, as well as thermal, material, energy and other flows, is carried out. The calculation and visual interpretation of the exergetic balance in the form of a Grassman-Shargut diagram of flows and exergy losses made it possible to qualitatively assess the entire complex of exergy losses in the elements of the installation for carrying out the process of vacuum saturation with vapors of spicy-smoky flavors of extruded functional products, as a result of both reversible and irreversible heat and mass transfer processes occurring in it. It was found that the value of the exergetic efficiency was 6.9%, which is 2.4% higher than when using the prototype technology. This indicates an increase in the degree of thermodynamic perfection of the energy-technological system of vacuum saturation with vapors of spicy-smoky flavors of extruded functional products.

Keywords: thermodynamic evaluation, exergetic analysis, spicy-smoky flavors, vacuum saturation, energy efficiency.

For citation: Shubkin S.Yu., Mokrenskiy D.N. Thermodynamic evaluation of the efficiency of the process of vacuum saturation with vapors of spicy-smoky flavors of extruded functional products. *Agro-industrial technologies of Central Russia*. 2023. No. 2(28). Pp. 8-14. <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2023-28-46-57>.

Введение

В настоящее время для исследований энергетических превращений в технических системах применяются два подхода [18, 20]. Первый подход связан с различными методами анализа прямых и обратных циклов [3, 17]. Второй подход опирается на использование термодинамических потенциалов для анализа процессов превращения энергии в различных системах [1, 6, 10, 12]. Данные подходы основаны на первом и втором законах термодинамики и позволяют найти связи между параметрами системы и энергетическими потоками, такими как количество теплоты и работа, а также некоторыми внутренними параметрами [5, 6, 18].

Существует несколько методов анализа прямых и обратных циклов, которые были подробно исследованы и активно используются [1, 7, 9]. Основываясь на первом и втором начале термодинамики, можно выявить связь между параметрами системы и внешними энергетическими потоками [5, 18]. Путем анализа энергетического баланса системы, в которой происходит исследуемый цикл, можно определить соответствующие коэффициенты, такие как термодинамический КПД, холодильный или тепловой коэффициенты, коэффициент трансформации и т.д. и сравнить их с коэффициентами идеальных циклов [8, 12].

Важным аспектом правильно выбранных термодинамических потенциалов является определение работы (например, механической или электрической) в различных условиях [16, 19]. С использованием этого свойства потенциалов можно оценить работоспособность потоков вещества и энергии в любой точке системы, независимо от ее типа, структуры и сложности [20].

Анализируя то, как используются энергетические ресурсы, можно выявить несколько вариантов совершенствования энергетической эффективности технологических процессов [7, 9, 10]. Перспективным методом оценки термодинамической эффективности энерготехнологических систем является эксергетический метод термодинамического анализа [10, 19]. Этот подход используется для изучения процессов, которые происходят при высоких температурах или при использовании систем охлаждения [1, 7, 17, 18]. Существует следующее отличие между понятиями эксергии и энергии: энергия является фундаментальным свойством материи, тогда как эксергия отражает возможность использования энергии в конкретных условиях окружающей среды [11].

В комплексных производствах имеет значение то, как проходит распределение расходов энергии или топлива между продуктами. Эксергетический метод позволяет обоснованно определить технический уровень различного оборудования по энергетическим, весовым и другим характеристикам [17, 18].

Эксергетический анализ направлен на определение эффективности системы с точки зрения второго закона термодинамики и выявление «узких мест» технологии, где наблюда-

ются основные потери эксергии, которые могут быть устранены для достижения энергосбережения [7, 11].

Цель исследования – провести оценку термодинамического совершенства энерготехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения путем эксергетического анализа.

Материалы и методы исследований

Исследования по оценке термодинамического совершенства энерготехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов проводились в 2022-2023 гг. на базе агропромышленного института Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина в научно-исследовательских лабораториях по изучению процессов и аппаратов пищевых производств, а также электрофизических методов обработки пищевых сред. Вакуумному насыщению парами пряно-копильных ароматизаторов подвергали экструдированные мясорастительные продукты. В состав продукта входили следующие компоненты – мука вигны, крупа манная, мясо индейки, порошкообразные молочно-овощные полуфабрикаты, полуфабрикат на желатиновой основе, соль поваренная, мускатный орех, перец красный молотый, перец душистый молотый, чеснок сушеный. Подробное описание рецептов экструдированных продуктов приведено в работах [13, 14].

Проведение исследований по изучению процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения осуществлялось в специальной установке (рис. 1), сведения о конструктивном исполнении которой, ее технических характеристиках и рациональных режимных параметрах подробно изложены в [15].

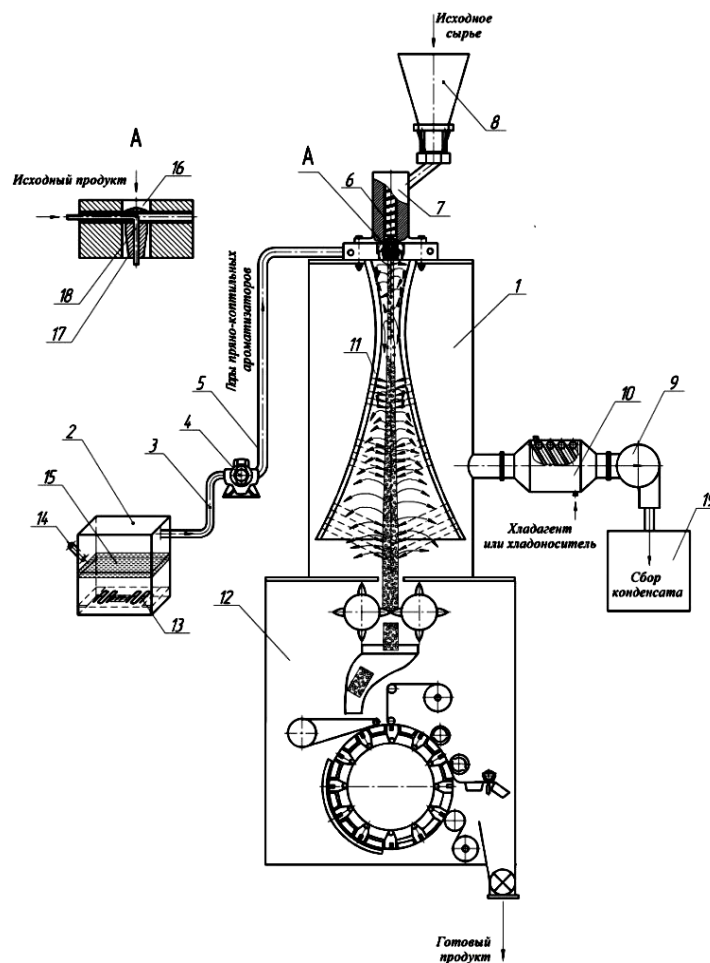


Рисунок 1. Принципиальная схема установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов

Путем экспериментально-статистического метода были найдены оптимальные параметры вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов, позволяющие получить готовый продукт высокого качества при заданных параметрах [13, 14]. В качестве субоптимальных интервалов изменения параметров были приняты: температура 38...43 °С и давление, создаваемое вакуум-насосом в трубопроводе, 45-50 кПа [14].

Для проведения анализа энергетических процессов использовались рекомендации из источников [3, 5, 14, 18], согласно которым теплотехнологическая система вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов (рис. 2) условно отделена от окружающей среды замкнутой контрольной поверхностью, а внутри неё с учетом теплообменных процессов выделен ряд контрольных поверхностей:

- I – парогенератор;
- II – подготовка копильных компонентов;
- III – зона формирования структуры продукта;
- IV – зона вакуумного насыщения продукта пряно-копильными компонентами;
- V – отвод копильной смеси.

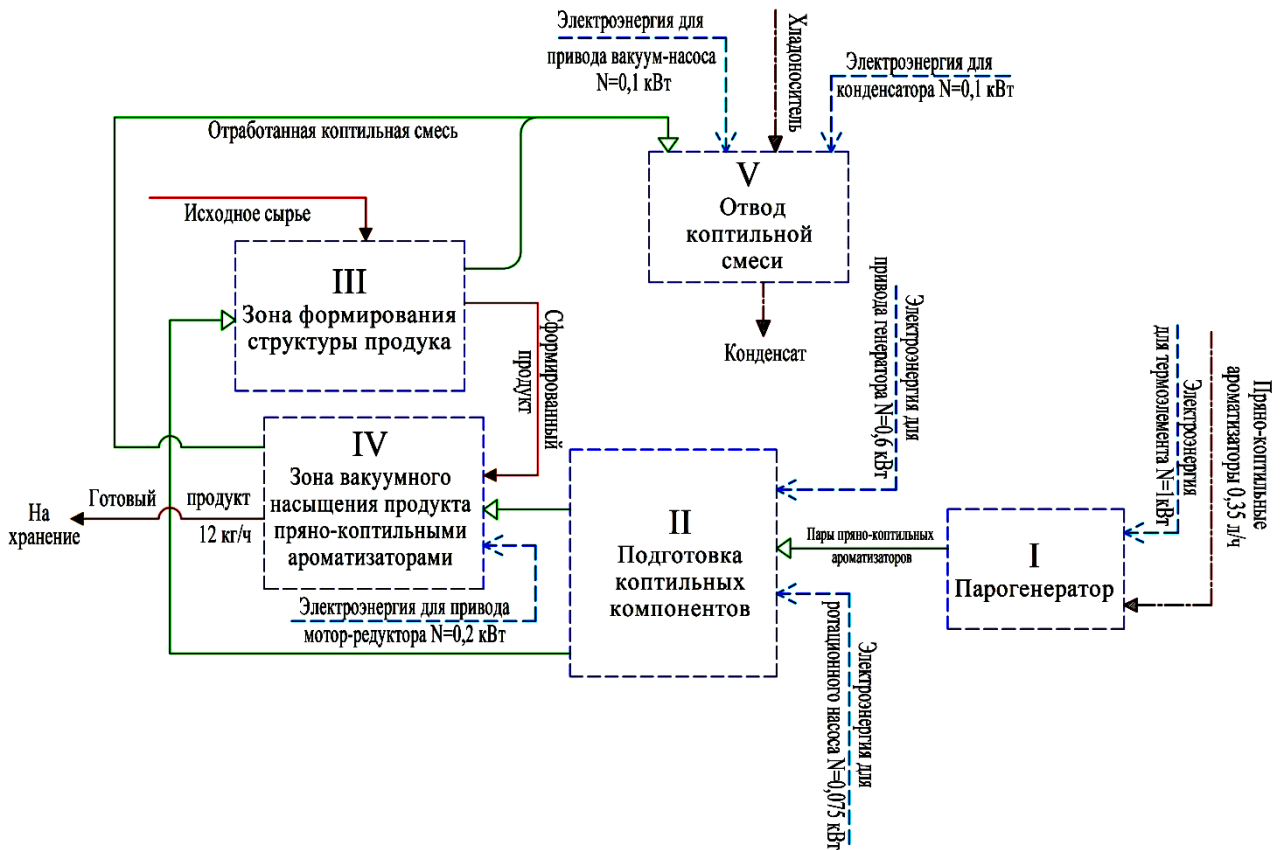


Рисунок 2. Схема обмена потоками между контрольными поверхностями теплотехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения:

- ▶— сыпучие вещества; —▶— жидкости; —▶— газы; —▶— электроэнергия;
- — — границы контрольных поверхностей; I-V – номера контрольных поверхностей

На рис. 2 представлена блок-схема обмена анализируемой установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов тепловыми, материальными и энергетическими потоками с внешней средой и внутри системы между контрольными поверхностями.

Результаты исследований и их обсуждение

Эксергетическим параметром анализируемой установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов (см. рис. 1) является эксергетическая мощность, учитывающая как энергию материальных, энергетических и тепловых потоков, так и расход вещества в потоке. В контрольных поверхностях системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов эксергетическая мощность уменьшается с течением времени, что обусловлено явлением диссипации тепловой энергии:

$$\sum E_s = \sum E_o + \sum D, \quad (1)$$

где $\sum E_s$ – суммарная эксергия подводимых к контрольной поверхности материальных и энергетических потоков;

$\sum E_o$ – суммарная эксергия отводимых от контрольной поверхности полезных материальных и энергетических потоков;

$\sum D = T_0 \cdot \Delta S$ – сумма эксергетических потерь (уравнение Гюи-Стодолы).

Соотношение (1) для рассматриваемой теплотехнологической системы приведено в следующем виде:

$$E_I^e + E_{III}^e + E_V^e + \sum E_i^e = E_{IV}^e + \sum D_i + \sum D_e, \quad (2)$$

где слагаемые этих уравнений – эксергия (кДж):

- пряно-копильных ароматизаторов E_I^e ;
- исходного сырья E_{III}^e ;
- хладоносителей E_V^e ;
- суммарной подводимой электроэнергии $\sum E_i^e$;
- готового продукта E_{IV}^e ;
- внутренние эксергетические потери $\sum D_i$;
- внешние эксергетические потери $\sum D_e$.

В соотношении (2) отражено изменение эксергии теплотехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов за счет ввода исходного сырья, пряно-копильных ароматизаторов, хладоносителя, подвода электроэнергии к термоэлементу, генератору аэродисперсной смеси и приводам оборудования; необратимых изменений структурно-механических свойств продукта, сопряженных с затратами электроэнергии на приводы технологического оборудования; покрытия потерь от необратимости процессов теплообмена в процессе парообразования и теплообмена между копильной смесью и продуктом; электромеханических потерь; компенсации потерь, обусловленных действием окружающей среды.

Эксергия вводимого в систему внешних потоков исходного сырья для получения функционального мясорастительного продукта и пряно-копильных ароматизаторов, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю.

В процессе нагрева сырья, получения и отвода копильных ароматизаторов в технологическом оборудовании их химическая эксергия постоянна, так как его состав в процессе переработки не претерпевает изменений [11, 17]. Поэтому учитывается только его удельная термическая эксергия, определяемая в соответствии с уравнением Гюи-Стодолы:

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

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

Данные по теплофизическим свойствам коптильной смеси, хладоносителя, конденсата, сырья и продуктов взяты из справочной литературы [2, 4, 5].

Исследовали 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 сырьем, сырьем и вспомогательными потоками (нагретые или охлажденные вода и воздух); электромеханические, возникающие при необратимом изменении структурно-механических свойств продукта, и гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема коптильной смеси при её поступлении в коптильную камеру, вакуум-насос и т.д.

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

$$D^{mo} = Q^{mo} \cdot \bar{\tau}_e, \quad (4)$$

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:

$$\tau_e = (T_{kn} - T_0) / T_{kn}, \quad (5)$$

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

Эксергетические потери вследствие падения давления дымовоздушной смеси при её подаче в контрольную поверхность определяли по формуле:

$$D^c = g \cdot \Delta H_z \cdot \frac{T_{kn}}{T_{ex}}, \quad (6)$$

где T_{ex} – температура воздуха на входе в контрольную поверхность, К;

ΔH_z – гидравлические потери, м.

По формуле Дарси-Вейсбаха [2, 4, 5, 12] найдены гидравлические потери при входе теплоносителя в контрольную поверхность:

$$\Delta H_z = \xi \cdot \frac{v_{ex}^2}{2g}, \quad (7)$$

где v_{ex} – средняя скорость прохождения воздуха по сечению подводящего трубопровода, м/с;

ξ – коэффициент сопротивления, определяемый отношением внутреннего объема оборудования, рассматриваемого в качестве контрольной поверхности к поперечному сечению входного отверстия.

Электромеханические потери эксергии тождественны мощности приводов технологического оборудования, используемого в процессе обработки сырья и промежуточных продуктов.

Внешние потери D^e связаны с условиями сопряжения системы с окружающей средой. Они обусловлены различием температур дымовоздушной смеси и окружающей среды, несовершенством теплоизоляции оборудования.

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

$$D^e = Q_{из} \cdot \tau_e, \quad (8)$$

где $Q_{из}$ – суммарные потери тепла в окружающую среду через контрольную поверхность, кДж;

τ_e – фактор Карно.

Эксергетические потери копчёного продукта при его выгрузке из оборудования при достижении термодинамического равновесия с окружающей средой были вычислены по следующей формуле:

$$D_{np} = h_{np} - h_{np}^0 - T_0 \cdot \bar{c} \cdot \ln \frac{T_{np}}{T_{np}^0}, \quad (9)$$

где h_{np} , T_{np} – энтальпия, кДж/кг и температура К, готового 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).

Оценку термодинамического совершенства теплотехнологической системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов проводили по формуле:

$$\eta_{экс} = \frac{\sum_{k=1}^l e_i^3}{\sum_{i=1}^n e_i^3} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^3 - \sum_{j=1}^m D_j}{\sum_{i=1}^n e_i^3}, \quad (10)$$

где $\sum_{k=1}^l e_i^3$ – суммарная удельная эксергия готового продукта, 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.

На основе расчета по формулам (5–9), потоков эксергии, внутренних и внешних эксергетических потерь был составлен эксергетический баланс теплотехнологической системы (табл. 2). Графически эксергетический баланс выполнен в виде диаграммы Грассмана-Шаргута (рис. 4). Обозначение потоков на рис. 2 дано в табл. 1.

Таблица 1. Обозначения потоков на диаграмме Грассмана-Шаргута процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения

Позиция на диаграмме	Наименование потока	Контрольная поверхность	
		отдающая	принимающая
1	Исходный продукт	–	III
2	Сформированный продукт	III	IV
3	Готовый продукт	IV	–
4	Пряно-копильные ароматизаторы	–	I
5	Пары пряно-копильных ароматизаторов (исходная смесь)	I	II
6	Копильные компоненты подготовленные (в зону вакуумного насыщения продукта пряно-копильными компонентами)	II	IV
7	Копильные компоненты подготовленные (в зону формирования структуры продукта)	II	III

8	Коптильная смесь отработанная (из зоны формирования структуры продукта)	III	–
9	Коптильная смесь отработанная (из зоны вакуумного насыщения продукта пряно-копильными компонентами)	IV	–
10	Коптильная смесь отработанная (объединенный поток)	–	V
11	Коптильная смесь сконденсированная	V	–
12	Хладоноситель	–	V
13	Электроэнергия для термоэлемента	–	I
14	Электроэнергия для генератора аэродисперсной смеси	–	II
15	Электроэнергия для привода ротационного насоса	–	II
16	Электроэнергия для привода мотор-редуктора	–	IV
17	Электроэнергия для привода конденсатора	–	V
18	Электроэнергия для привода вакуум-насоса	–	V

Таблица 2. Эксергетический баланс установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения

№ п/п	Наименование контрольной поверхности	Абсолютная эксергетическая мощность E, кДж/ч	Относительная эксергетическая мощность, %
I. Парогенератор			
Приход			
1	Пряно-копильные ароматизаторы	0,0	0,0
2	Электроэнергия для термоэлемента	2400,0	34,5
Суммарная эксергия, подводимая к контрольной поверхности		3600,0	2400,0
Расход			
3	Внутренние эксергетические потери	1635,4	23,5
4	Внешние эксергетические потери	655,6	9,4
Суммарная эксергия, отводимая от контрольной поверхности		3495,0	2291,0
II. Подготовка копильных компонентов			
Приход			
1	Электроэнергия для привода ротационного насоса	220,0	3,2
2	Электроэнергия для генератора аэродисперсной системы	3016,0	43,4
Суммарная эксергия, подводимая к контрольной поверхности		5586,0	3236,0
Расход			
3	Внутренние эксергетические потери	2129,7	30,6
4	Внешние эксергетические потери	659,2	9,5
Суммарная эксергия, отводимая от контрольной поверхности		5133,1	2788,9
III. Зона формирования структуры продукта			
Приход			
1	Исходный продукт	0,0	0,0
Суммарная эксергия, подводимая к контрольной поверхности		0,0	0,0
Расход			
1	Внутренние эксергетические потери	49,6	0,5
2	Внешние эксергетические потери	0,0	0,0
Суммарная эксергия, отводимая от контрольной поверхности			

IV. Зона вакуумного насыщения продукта пряно-копильными компонентами			
Приход			
1	Электроэнергия для привода мотор-редуктора	520,0	7,5
Суммарная эксергия, подводимая к контрольной поверхности		520,0	7,5
Расход			
2	Готовый продукт	481,3	6,9
3	Внутренние эксергетические потери	438,1	6,3
4	Внешние эксергетические потери	88,1	1,3
Суммарная эксергия, отводимая от контрольной поверхности		1007,5	14,5
V. Отвод копильной смеси			
Приход			
1	Электроэнергия для конденсатора	320,0	4,6
2	Электроэнергия для привода рециркуляционного насоса	320,0	4,6
3	Хладоноситель	159,0	2,3
Суммарная эксергия, подводимая к контрольной поверхности		799,0	11,5
Расход			
4	Внутренние эксергетические потери	795,9	11,4
5	Внешние эксергетические потери	22,1	0,3
Суммарная эксергия, отводимая от контрольной поверхности		818,0	11,8
Общий подвод		6955,0	100,0
Общий отвод		6955,0	100,0

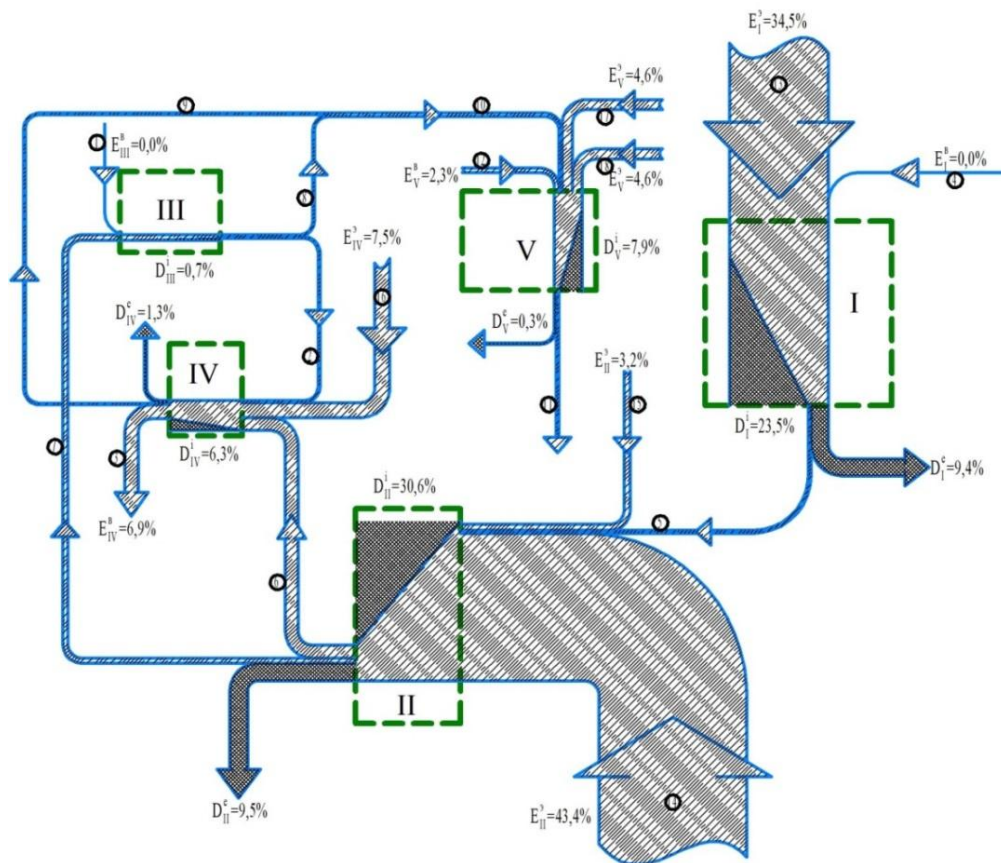


Рисунок 3. Диаграмма Грассмана-Шаргута для исследуемой системы вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения: I-V – номера контрольных поверхностей

Выводы

1. В рамках исследования были изучены потоки эксергии в линии установки для вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов функционального назначения. Было установлено, что расход эксергии на электромеханические потери равен мощности, потребляемой приводами технологического оборудования, используемого при обработке сырья и промежуточных продуктов. Внешние потери эксергии связаны с условиями сопряжения системы с окружающей средой. Причинами таких потерь является разница температур между копильной смесью и окружающей средой, а также недостаточная теплоизоляция оборудования.

2. В результате проведенной термодинамической оценки эффективности процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов методом эксергетического анализа выявлено, что значение эксергетического КПД, полученного по формуле (10), составило 6,9 %, что на 2,4 % выше, чем при использовании технологии-прототипа [11]. Это свидетельствует о повышении степени термодинамического совершенства теплотехнологической линии вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов.

Список источников

1. Ангелюк В.П., Скотников Д.А., Шибанова Е.А. Эксергетический анализ процесса стерилизации // Аграрный научный журнал. 2014. № 10. С. 43-45.
2. Богословский С.В. Физические свойства газов и жидкостей. СПб.: СПбГУАП, 2001. 73 с.
3. Вент Д.П., Ляшенко А.И., Соболев А.В. Управление процессом теплообмена на основе эксергетического анализа // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. 2011. Т. 13, № 1. С. 93-99.
4. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн. Москва: Химия, 1981. 812 с.
5. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массообменные характеристики пищевых продуктов // Москва: Пищевая промышленность, 1982. 280 с.
6. Задоянный А.В., Евдокименко Ю.Н. Углубленный эксергетический анализ основных психрометрических процессов в системах кондиционирования воздуха // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2020. № 16. С. 71-75.
7. Конструктивные особенности установки для обезвоживания мелкодисперсных сыпучих продуктов в активном гидродинамическом режиме и ее эксергетический анализ / А.А. Малибеков, С.В. Шахов, И.А. Глотова, П.В. Груздов // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 3-4. С. 66-70.
8. Михеев П.Ю., Тананаев А.В. Методика эксергетического анализа жизненных циклов энергетических объектов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. № 1-2 (147). С. 70-77.
9. Морозюк Т.В. Новый этап в развитии эксергетического анализа // Холодильная техника и технология. 2014. Т. 50. № 4. С. 13-17.
10. Рубан Н.В., Кульнева Н. Г., Журавлев М.В. Обоснование энергетической эффективности технологии термохимической подготовки свекловичной стружки к экстрагированию сахарозы с помощью эксергетических методов анализа // Health, Food & Biotechnology. 2019. Т. 1. № 3. С. 69-83.
11. Термодинамическая оценка эффективности процесса электростатического копчения мелкокусковых рыбопродуктов в пересыпающемся слое / С.Ю. Шубкин, С.С. Бунеев, С.В. Елецких, И.Н. Сухарев // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. № 4. С. 168-179.

12. Шадрина Е.М., Углов А.С. Эксергетический анализ процесса ректификации бинарной смеси // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2011. Т. 54. № 8. С. 102-104.

13. Шубкин С.Ю. Исследование свойств экструдированных мясорастительных продуктов и процесса их вакуумного насыщения бездымными пряно-копильными ароматизаторами // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 3. С. 243-253.

14. Шубкин С.Ю., Бунеев С.С. Оптимизация процесса получения экструдированных продуктов функционального назначения с добавлением бездымных пряно-копильных ароматизаторов // Агропромышленные технологии Центральной России. 2022. № 4(26). С. 41-47.

15. Шубкин С.Ю., Шахов С.В. Разработка установки для проведения процесса вакуумного насыщения парами пряно-копильных ароматизаторов экструдированных продуктов // Агропромышленные технологии Центральной России. 2022. № 4(26). С. 95-101.

16. Шурак А.А., Шагарова А.А. Оценка энергоэффективности сушилок на основе эксергетического анализа // Булатовские чтения. 2020. Т. 5. С. 330-334.

17. Эксергетический анализ вакуум-сублимационной установки / В.Е. Добромиров, С.В. Шахов, Т.И. Некрылова, С.А. Бокадаров // Вестник Международной академии холода. 2011. № 4. С. 46-48.

18. Эксергетический анализ концентрирующей вымораживающей установки / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, А.А. Корчинский // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 78-83.

19. Юшкова Е.А. Эксергетический метод анализа теплоэнергетических систем // Достижения вузовской науки: сб. матер. XXX Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 82-86.

20. Exergetic analysis of the technological line preparing of triticale grain for grinding. A. V. Drannikov, A. A. Shevtsov, L. I. Lytkina [et al.]. Modern Science and Innovations. 2022. No. 1(37). Pp. 44-54.

References

1. Angelyuk V.P., Skotnikov D.A., Shibanova E.A. Exergetic analysis of the sterilization process. Agrarian Scientific journal. 2014. No. 10. Pp. 43-45.

2. Bogoslovsky S.V. Physical properties of gases and liquids. St. Petersburg: SPbGUAP, 2001. 73 p.

3. Vent D.P., Lyashenko A.I., Sobolev A.V. Heat transfer process control based on exergetic analysis. Bulletin of the International Academy of Systems Research. Computer science, ecology, economics. 2011. Vol. 13. No. 1. Pp. 93-99.

4. Gelperin N.I. Basic processes and apparatuses of chemical technology. In 2 books. Moscow: Chemistry, 1981. 812 p.

5. Ginzburg A. S., Savina I. M. Mass-exchange characteristics of food products. Moscow: Food industry, 1982. 280 p.

6. Zadoyanny A.V., Evdokimenko Yu.N. In-depth exergetic analysis of the main psychrometric processes in air conditioning systems. Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences. 2020. No. 16. Pp. 71-75.

7. Design features of an installation for dewatering fine bulk products in an active hydrodynamic mode and its exergetic analysis. A.A. Malibekov, S.V. Shakhov, I.A. Glotova, P.V. Gruzlov. Scientific Review. Pedagogical sciences. 2019. No. 3-4, Pp. 66-70.

8. Mikheev P.Yu., Tananaev A.V. Methodology of exergetic analysis of life cycles of energy facilities. Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. 2012. No. 1-2 (147). Pp. 70-77.

9. Morozyuk T.V. A new stage in the development of exergetic analysis. Refrigeration technology and technology. 2014. Vol. 50. No. 4, Pp. 13-17.

10. Ruban N.V., Kulneva N. G., Zhuravlev M.V. Substantiation of the energy efficiency of the technology of thermochemical preparation of beet chips for sucrose extraction using exergetic analysis methods. *Health, Food & Biotechnology*. 2019. Vol. 1. No. 3. Pp. 69-83.
11. Thermodynamic evaluation of the efficiency of the process of electrostatic smoking of small-scale fish products in the interstitial layer. S. Y. Shubkin, S. S. Buneev, S. V. Yeletskikh, I. N. Sukharev. *Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex – healthy food products*. 2021. No. 4. Pp. 168-179.
12. Shadrina E.M., Uglov A.S. Exergetic analysis of the process of rectification of a binary mixture. *Izvestiya of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2011. Vol. 54. No. 8. Pp. 102-104.
13. Shubkin S. Yu. Investigation of the properties of extruded meat and vegetable products and the process of their vacuum saturation with smokeless spicy-smoky flavors. *Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex – healthy food products*. 2022. No. 3. Pp. 243-253.
14. Shubkin S.Yu., Buneev S.S. Optimization of the process of obtaining extruded functional products with the addition of smokeless spicy-smoky flavors. *Agro-industrial technologies of Central Russia*. 2022. No. 4(26). Pp. 41-47.
15. Shubkin S.Yu., Shakhov S.V. Development of an installation for carrying out the process of vacuum saturation with vapors of spicy-smoky flavors of extruded products. *Agro-industrial technologies of Central Russia*. 2022. No. 4(26). Pp. 95-101.
16. Shurak A.A., Shagarova A.A. Evaluation of the energy efficiency of dryers based on exergetic analysis. *Bulatovskie readings*. 2020. Vol. 5. Pp. 330-334.
17. Exergetic analysis of a vacuum-sublimation installation. V.E. Dobromirov, S.V. Shakhov, T.I. Nekrylova, S.A. Bokadarov. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2011. No. 4. Pp. 46-48.
18. Exergetic analysis of a concentrating freezing plant. S.T. Antipov, V.Y. Ovsyannikov, Ya.I. Kondratieva, A.A. Korchinsky. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2017. No. 2. Pp. 78-83.
19. Yushkova E.A. Exergetic method of analysis of thermal power systems // *Achievements of university science: Collection of materials of the XXX International Scientific and Practical Conference*. 2017. Pp. 82-86.
20. Exergetic analysis of the technological line preparing of triticale grain for grinding. A. V. Drannikov, A. A. Shevtsov, L. I. Lytkina [et al.]. *Modern Science and Innovations*. 2022. No. 1(37). Pp. 44-54.

Информация об авторах

С.Ю. Шубкин – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии;

Д.Н. Мокренский – обучающийся агропромышленного института.

Information about the authors

S.Yu. Shubkin – candidate of technical sciences, associate professor of the department of technological processes in mechanical engineering and agroengineering;

D.N. Mokrenskiy – student of the agro-industrial institute.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-2213.2022.4).