

Профессор В.Н. Василенко, аспирант М.В. Копылов,
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра процессов и аппаратов химических и
пищевых производств, тел. (473) 255-35-54

студент Ю.В. Таркаев

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

Эксергетический анализ технологии холодного отжима растительного масла с получением гранулированного жмыха

Посредством эксергетического анализа проведена оценка термодинамической эффективности технологических линий холодного отжима растительных масел с учетом степени использования различных видов энергии, затрачиваемых в технологических процессах, исходя из свойств сырья, осуществленной над системой работы и суммарного количества всех видов энергии, привлеченных извне.

Through energy analysis evaluated the thermodynamic efficiency of cold pressed vegetable oils production lines. The following indicators were considered: degree of use of different types of energy used in production processes, the properties of raw materials, work carried out on the system and the total number of all types of energy, attracted from the outside.

Ключевые слова: метод холодного отжима, масличные культуры, эксергия.

Степень эффективности маслопрессующего шнекового оборудования оценивается анализом рассматриваемых материальных потоков с помощью эксергии на основе второго закона термодинамики. С целью получения наиболее полной информации процесса отжима был выполнен эксергетический анализ и составлен эксергетический баланс.

Эксергетический анализ выполнен по методике [1, 2], в соответствии с которой теплотехнологическая система (рис. 1) условно отделена от окружающей среды замкнутой балансовой поверхностью, а внутри системы с учетом протекающих теплообменных процессов выделен ряд контрольных поверхностей (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
Разделение теплотехнологической системы на контрольные поверхности

№ контрольной поверхности	Наименование контрольной поверхности
I	Хранение исходного сырья
II	Предварительная гидротермическая обработка
III	Подогрев теплоносителя
IV	Охлаждение теплоносителя
V	Маслопресс
VI	Подготовка жмыха
VII	Хранение масел
VIII	Смешивание масел
IX	Фасовка смеси масел

© Василенко В.Н., Копылов М.В., Таркаев Ю.В., 2013

Блок - схема обмена рассматриваемой теплотехнологической системы материальными, тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой, а также между контрольными поверхностями представлена на рис. 2.

Для получения информации о степени термодинамического совершенства исследуемой системы эксергетическому анализу была подвергнута традиционная технология отжима масла холодным способом. Разделение системы-прототипа на контрольные поверхности представлено на рис. 3.

Эксергия в каждой контрольной поверхности изучаемой технологической системы, состоящей из классических необратимых процессов, уменьшается с течением времени, что связано с диссипацией энергии [1]:

$$\sum_{i=1}^n E_i^3 = \sum_{k=1}^l E_k^3 + \sum_{j=1}^m D_j, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n E_i^3$ – суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков; $\sum_{i=1}^n E_i^3$ – 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-Стодолы); $i = \overline{1; n}$ – количество

вводимых материальных и энергетических потоков; $k = (\overline{1; l})$ – количество выходящих

полезных потоков; $j = (\overline{1; m})$ – количество эксергетических потерь.

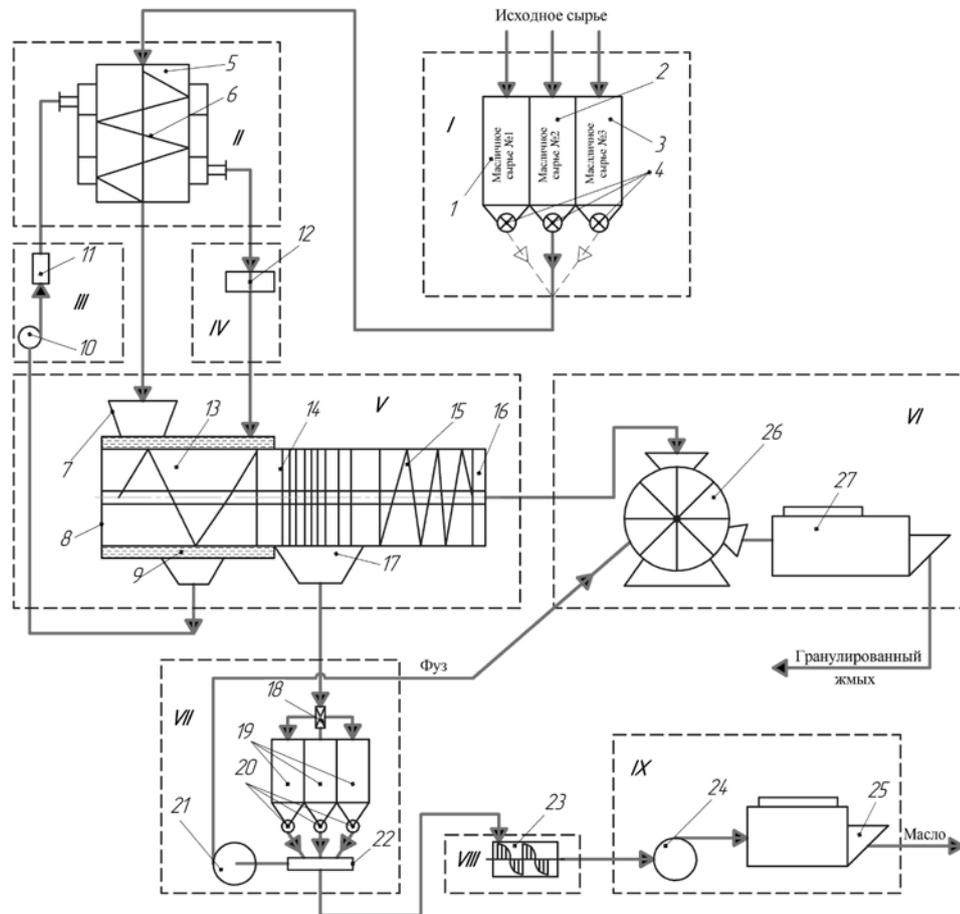


Рис. 1. Схема разделения теплотехнологической системы холодного отжима растительного масла с получением гранулированного жмыха: 1-3 – бункера для сырья; 4 – дозаторы 5 – устройство для предварительной обработки сырья; 6 – шнековый транспортер 8 – маслопресс (7 – загрузочная воронка; 9 – терморушашка; 13 – первая секция; 14 – секция маслопрессования; 17 – сборник масла); 10 – насос; 11 – калорифер; 12 – холодильное устройство; 15 – промежуточная секция; 16 – гранулирующая матрица; 18 – переключатель; 19 – танки для хранения масла; 20 – дозаторы масла; 21 – насос для фуза; 22 – фильтр; 23 – перемешивающее устройство; 24 – насос масла; 25 – разливно-упаковочный аппарат; 26 – аппарат для нанесения жировитаминных добавок; 27 – фасовочный аппарат

Соотношение (1) для рассматриваемой технологической линии производительностью 150 л/ч по маслу и 500 т/ч по жмыху [3] рассматривалось в следующем виде:

$$\sum E_1^H + E_2^H + \sum E^{эн} = \sum E_1^{эн} + E_2^{эн} + \sum D_i + \sum D_e, \quad (2)$$

где слагаемые этих уравнений – эксергия (кДж): суммарная вводимого в систему масличного сырья (рапс, горчица, подсолнечник) – $\sum E_1^H$; витаминов – E_2^H ; готового купажа растительных масел – $E_1^{эн}$; готового гранулированного жмыха с витаминами – $E_2^{эн}$; суммарная

эксергия, вводимая в систему с электроэнергией для работы приводов машин – $\sum E^{эн}$; сумма потерь эксергии в результате необратимости процессов, происходящих внутри контрольной поверхности – $\sum D_i$; сумма потерь эксергии во внешнюю среду – $\sum D^e$.

Уравнение (2) отражает изменение эксергии теплотехнологической системы за счет ввода масличного сырья и витаминов, необратимых изменений структурно-механических свойств продуктов, сопряженных с затратами электроэнергии на приводы машин и аппаратов; косвенно – через подвод электроэнергии к ТЭНам калорифера для получения пара; по-

крытия потерь, возникающих вследствие необратимости процессов тепловой обработки сырья и продуктов; изменения их теплофизи-

ческих свойств; компенсации потерь, обусловленных действием окружающей среды.

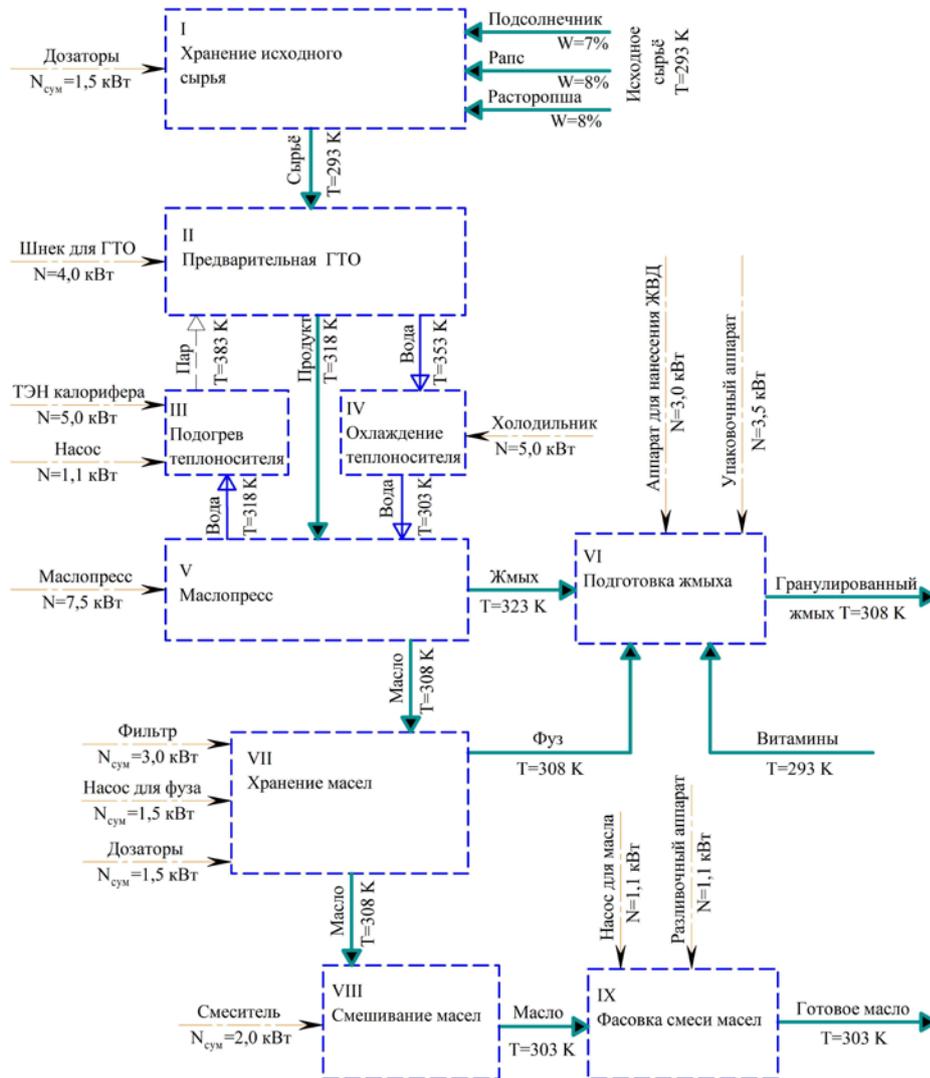


Рис. 2. Блок-схема обмена потоками между контрольными поверхностями теплотехнологической системы. Потоки: \rightarrow – сырья и продукта; \triangleright – воды; \dashrightarrow – паров; \dashrightarrow – электроэнергия; \dashrightarrow – границы контрольных поверхностей

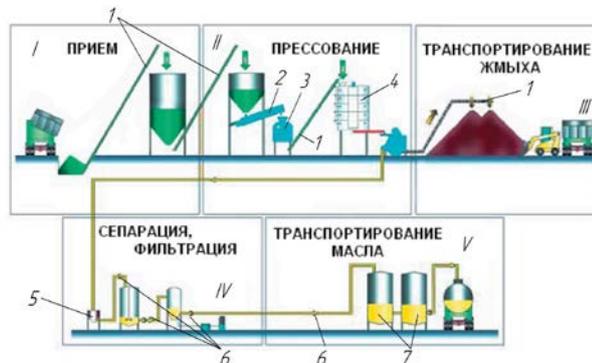


Рис. 3. Технологическая схема традиционной технологии отжима масла холодным способом: 1 – транспортеры; 2 – магнитный уловитель; 3 – измельчитель; 4 – устройство термообработки; 5 – фильтр; 6 – насосы; 7 – емкости для масла. Контрольные поверхности указаны на рисунке.

Эксергия вводимых в систему внешних материальных потоков, а именно, исходного маслянистого сырья – E_1^H и жировитаминных добавок – E_2^H , находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю, поэтому исключается из баланса.

В процессе нагрева сырья и продуктов в технологическом оборудовании его химическая эксергия постоянна, так как состав получаемой смеси в процессе переработки не претерпевает изменений. Поэтому учитывается только его удельная термическая эксергия, определяемая на основании уравнения 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 и энтропия, кДж/(кг·К) продукта при текущих параметрах технологического процесса и в состоянии равновесия с окружающей средой, соответственно.

Удельную изобарную теплоемкость маслянистых компонентов определяли по эмпирической формуле [4]:

$$c_p = 4,19 \cdot (0,25 + 0,01 \cdot W_c), \quad (4.1)$$

где W_c – относительная влажность маслянистого зерна (рапс, горчица, подсолнечник) на сухую массу, %.

Удельную изобарную теплоемкость растительных масел, полученных из указанных культур, определяли по следующей эмпирической формуле:

$$c = A \cdot c_{303} \cdot \left(\frac{\rho_{303}}{\rho} \right)^{1/3}, \quad (4.2)$$

где c , c_{303} ; ρ , ρ_{303} – удельная изобарная теплоемкость и плотность растительного масла при искомой температуре и 303 К; A – эмпирическая константа, определяемая температурой масла (при $T=273...363$ К $A=0,439+0,00185T$).

Удельную эксергию готовой продукции – гранулированного жмыха из смеси различных маслянистых культур и купажа растительных масел определяли, рассматривая её как систему, состоящую из нескольких компонентов (в первом случае – смеси жмыха различных культур и витаминов, во втором – смеси растительных масел, полученных из различных культур):

$$e_{1,2}^{эH} = h - \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot h_i^0 - T_0 \cdot \left(S - \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot S_i^0 \right), \quad (5)$$

где h , h_i^0 , S , S_i^0 – удельная энтальпия, кДж/кг и энтропия, кДж/(кг·К) готовых гранулированного жмыха или купажа масел при текущих параметрах технологического процесса и в состоянии равновесия с окружающей средой; ω_i – массовая доля компонентов в полученной продукции, %; n – количество компонентов.

Приращение полезной эксергии сырья и промежуточных продуктов технологии достигается за счет их нагрева паром в устройстве для предварительной гидротермической обработки и в маслопрессе за счет трения и повышенного давления.

Дополнительно приращение полезной эксергии растительных масел происходит в экструдере при порционном отделении их от эндосперма маслянистых культур. Менее интенсивный нагрев осуществляется при механическом воздействии (перемешивание, перемещение насосом, фильтрование).

Необходимо отметить, что приведенная технологическая схема (рис. 1) и блок-схема (рис. 2) носят условный характер, так как переработка различного сырья, используемого в технологии, производится порционно на одних и тех же аппаратах: аппарате для предварительной ГТО и маслопрессе, и только потом осуществляется смешивание (в аппаратах 26 и 23 для жмыха и масла, соответственно). Поэтому в эксергетической диаграмме будем условно разделять эксергию мощности указанного оборудования на n частей, соответствующих количеству компонентов, а соответствующие контрольные поверхности так же разбивать на n частей.

Теплофизические свойства веществ, образующих материальные потоки, взяты из справочной литературы [4-6].

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 сырьем и паром; электромеханические, возникающие при необратимом изменении структурно-механических свойств продукта; гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема пара, воды и растительного масла при поступлении из трубопровода в оборудование.

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

$$D^{mo} = Q^{mo} \cdot \bar{\tau}_e, \quad (6)$$

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 [1] равна термическому КПД цикла Карно между температурами контрольной поверхности и условно принятой окружающей среды:

$$\tau_e = (T_{kn} - T_0) / T_{kn}, \quad (7)$$

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

Эксергетические потери вследствие падения давления вещества в потоке при подаче в контрольную поверхность определяли по формуле:

$$D^z = G_m \cdot g \cdot \Delta H_z \cdot \frac{T_{kn}}{T_{ex}}, \quad (8)$$

где G_m и T_{ex} – расход, кг/ч и температура, К теплоносителя на входе в контрольную поверхность; ΔH_z – гидравлические потери, м.

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

$$\Delta H_z = \xi \cdot \frac{v_{ex}^2}{2g}, \quad (9)$$

где v_{ex} – 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.

Внутренние потери эксергии при механической обработке продукта рабочими органами машин и аппаратов D^{zm} (шнека в аппарате предварительной ГТО, маслопресса, аппарата для нанесения жировитаминных добавок, насосов) возникают вследствие необратимости изменения механической энергии, связанной с необратимостью изменения структуры его частиц. Электромеханические потери эксергии тождественны мощности приводов оборудования.

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

$$D^e = Q_{из} \cdot \tau_e, \quad (10)$$

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

Эксергетические потери готового гранулированного жмыха и смеси растительных масел на выходе из балансовой контрольной поверхности при достижении ими термодинамического равновесия с окружающей средой были вычислены по следующей формуле:

$$D_{zn} = G_{zn} \cdot \left(h_{zn} - h_0 - T_0 \cdot \bar{c} \cdot \ln \frac{T_{zn}}{T_0} \right), \quad (11)$$

где G_{zn} – производительность линии по гранулированному жмыху или по растительному маслу, кг/ч; h_{zn} , T_{zn} – энтальпия, кДж/кг и температура, К готового жмыха или растительного масла; \bar{c} – средняя удельная теплоемкость готового жмыха или растительного масла, кДж/(кг·К).

Оценку термодинамического совершенства теплотехнологической системы технологии холодного отжима растительного масла с получением гранулированного жмыха проводили по эксергетическому КПД:

$$\eta_{экс} = \frac{\sum_i E_i^z}{\sum_p E_p^z} = \frac{E^m + E^{жс}}{\sum_p E_p^z} = \frac{\sum_j E_j^z - \sum_m D_m}{\sum_p E_p^z}, \quad (12)$$

где $\sum_i E_i^z$ – суммарная эксергетическая мощность полезных потоков (готовой продукции: E^m – кулажа растительных масел и $E^{жс}$ – гранулированного жмыха), кДж/ч; $\sum_p E_p^z$ – суммарная затраченная эксергетическая мощность (подведенная в систему извне), кДж/ч; $\sum_m D_m$ – суммарные эксергетические потери, кДж/ч.

При этом эксергетический КПД определяли, исходя из значения эксергии готовой продукции – готового жмыха и растительного масла.

Эксергия каждого материального и энергетического потока, а также внутренние и внешние эксергетические потери, рассчитанные по формулам (6 – 11), составили эксергетический баланс теплотехнологической системы холодного отжима растительного масла с по-

лучением гранулированного жмыха (табл. 1). При построении эксергетических диаграмм Грассмана-Шаргута (рис. 4) в качестве абсолютного эксергетического параметра была выбрана эксергетическая мощность E , кДж/ч, учитывающая энергию материальных и тепловых

потоков с учетом массовой производительности, которая особенно важна в технологических системах с разветвленной структурой однородных по эксергии потоков. Обозначение потоков на рис. 4 представлено в табл. 3.

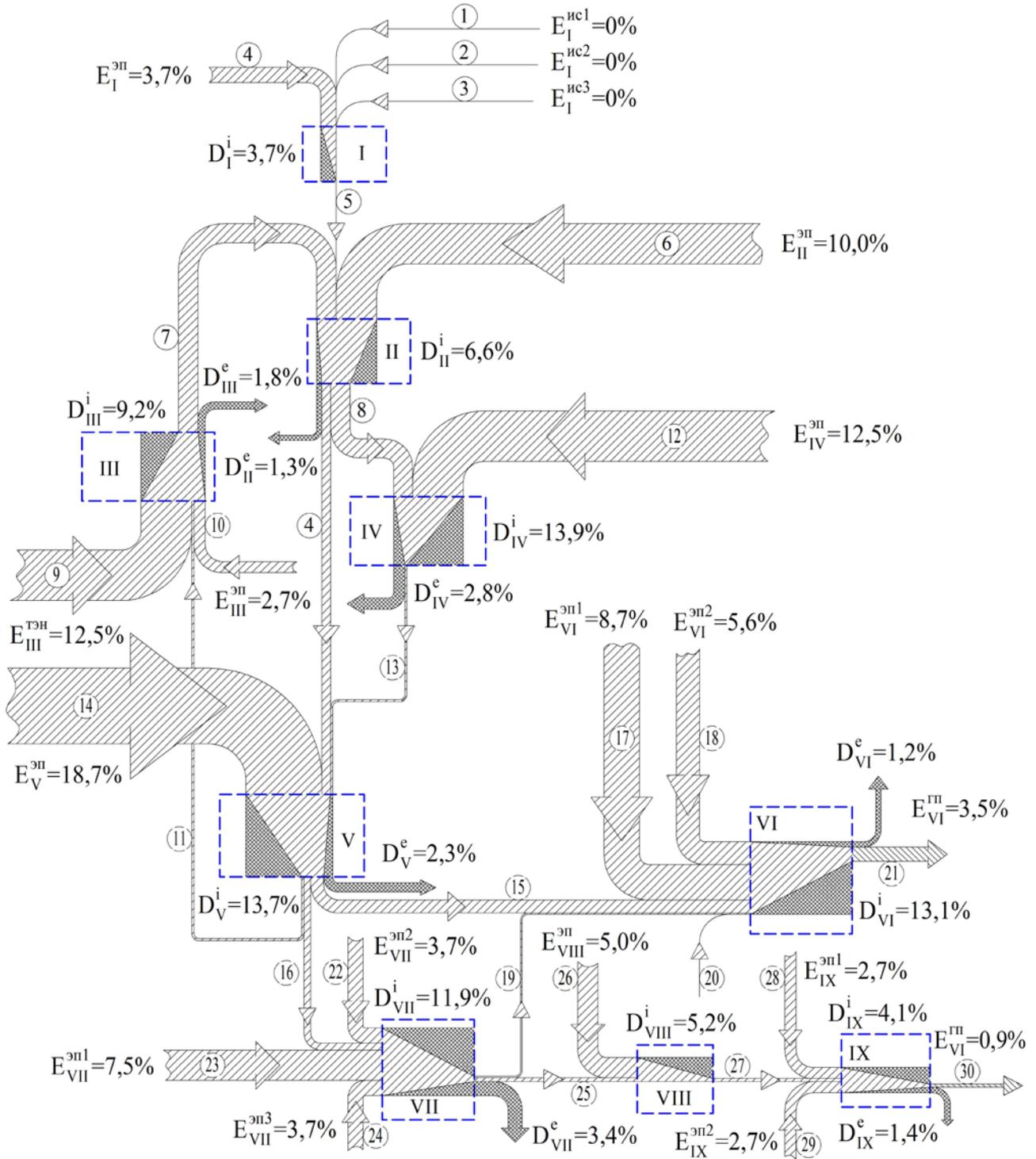


Рис. 4. Эксергетическая диаграмма линии производства смесей растительных масел холодным отжимом и получение гранулированного жмыха

Эксергетический баланс предлагаемой технологии

Контрольная повехность	Подвод эксергии			Отвод и потери эксергии			
	Наименование	E , 10^3 кДж/ч	% от сум- марной эксер- гии	Наименование	Обозначение	кДж/ч	% от суммар- ной эксергии
I	Приводы дозаторов Исходное сырьё	5,40 0	3,7 0	Внутренние потери	D^i_I	5,45	3,7
II	Привод шнека аппарата для предварительной ГТО	14,40	10,0	Внутренние потери Внешние потери	D^i_{II} D^e_{II}	9,49 1,83	6,6 1,3
III	ТЭН калорифера Привод насоса	18,00 3,96	12,5 2,7	Внутренние потери Внешние потери	D^i_{III} D^e_{III}	13,28 2,60	9,2 1,8
IV	Привод холодильного устройства	18,00	12,5	Внутренние потери Внешние потери	D^i_{IV} D^e_{IV}	20,05 4,01	13,9 2,8
V	Привод маслопресса	27,00	18,7	Внутренние потери Внешние потери	D^i_V D^e_V	19,80 3,25	13,7 2,3
VI	Привод аппарата нанесения ЖВД Привод аппарата упаковки Витамины	8,11 12,60 0	5,6 8,7 0	Внутренние потери Внешние потери Гранулированный жмых	D^i_{VI} D^e_{VI} E_{VI}^{rn}	18,91 1,80 5,10	13,1 1,2 3,5
VII	Привод фильтра Привод насоса для фуза Приводы дозаторов	10,80 5,40 5,40	7,5 3,7 3,7	Внутренние потери Внешние потери	D^i_{VII} D^e_{VII}	17,14 4,95	11,9 3,4
VIII	Привод смесителя	7,21	5,0	Внутренние потери	D^i_{VIII}	7,51	5,2
IX	Привод насоса для масла Привод разливающего аппарата	3,96 3,96	2,7 2,7	Внутренние потери Внешние потери Готовое масло	D^i_{IX} D^e_{IX} E_{IX}^{rn}	5,93 2,00 1,10	4,1 1,4 0,9
ИТОГО:		144,20	100	И Т О Г О:		144,20	100
Эксергетический КПД:				$\eta_{экс} = (E_{VI}^{rn} + E_{IX}^{rn}) / \sum e_i^2 = 4,4 \%$			

Т а б л и ц а 3

Обозначения потоков на диаграмме Грассмана-Шаргута

№ пото- ка	Наименование потока	№ пото- ка	Наименование потока
1	Исходное сырьё (рапс)	16	Масло из маслопресса
2	Исходное сырьё (расторопша)	17	Привод упаковочного аппарата
3	Исходное сырьё (подсолнечник)	18	Привод аппарата для нанесения ЖВД
4	Приводы дозаторов	19	Фуз
5	Дозированное сырьё	20	Витамины
6	Привод шнека	21	Гранулированный жмых
7	Пар из калорифера	22	Привод насоса для фуза
8	Нагретая вода	23	Привод фильтра
9	ТЭН калорифера	24	Приводы дозаторов
10	Привод насоса	25	Дозированные масла
11	Вода из маслопресса	26	Привод смесителя масел
12	Привод холодильного устройства	27	Купаж масел
13	Охлажденная вода	28	Привод насоса для масла
14	Привод маслопресса	29	Привод разливающего аппарата
15	Жмых из маслопресса	30	Готовое масло (купаж)

Полученный эксергетический КПД равен 4,4 %, что существенно выше, чем у сходной технологии, представленной на рис. 3. Это говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы при использовании новых технических решений.

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 Василенко, В. Н. Термодинамическая оценка технологической линии по переработке масличного и зернобобового сырья [Текст] / В. Н. Василенко, Е. А. Татаренков, М. В. Копылов // Вестник ВГТА, 2011. – №1. – С. 17-23.

4 Чубик, И. А. Справочник по теплофизическим свойствам пищевых продуктов и полуфабрикатов [Текст] / И. А. Чубик, А. М. Маслов. – М.: Пищевая промышленность, 1970. – 184 с.

5 Афанасьев, В. А. Мобильные комбикормовые заводы [Текст]: монография / В. А. Афанасьев, А. Н. Остриков, В. Н. Василенко. – Воронеж: Изд-во ВГУИТ, 2012. – 330 с.

6 Остриков, А. Н. 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 Brodyanskii, V. M. energy analysis and its application [text] / V.M. Brodyansky, Fratsher B., K. Michalek. - M. Energoatomizdat, 1988 - 288 p.

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

3 Vasilenko, V. N. Thermodynamic assessment of the production line for processing of oilseeds and pulses raw [Text] / V. N. Vasilenko, E. A. Tatarenkov, M. V. Kopylov // Bulletin VSTA, 2011. - № 1. - S. 17-23.

4 Chubik, I. A. Handbook of thermo-sky properties of food and polufabri-cates [Text] / I. A. Chubik, A.M. Maslov. - M.: Food Industry, 1970. - 184 p.

5 Afanasyev, V. A. Mobile mixed feed plants curves [text]: monograph / V. A. Afanasiev, A. N. Ostrikov, V. N. Vasilenko. - Voronezh: Izd VGUIT, 2012. - 330 p.

6 Ostrikov, A. N. Processes and equipment for food production. Book 1 [text] / A. N. Ostrikov, U. V. Krasovitsky A. A. Shevtsov, etc. - St.: Giord, 2007. - 704 p.