

УДК 664

## Оценка термодинамической эффективности линии производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья

Д-р техн. наук В. Н. ВАСИЛЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук Л. Н. ФРОЛОВА<sup>2</sup>,  
Н. А. МИХАЙЛОВА, канд. техн. наук А. А. ДЕРКАНОСОВА<sup>3</sup>,  
Д. А. ТАРКАЕВА, К. Ю. РУСИНА

<sup>1</sup>vvn\_1977@mail.ru, <sup>2</sup>fln-84@mail.ru, <sup>3</sup>aa-derk@yandex.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий  
394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19

*Для оценки энергоэффективности рассматриваемой технологии нами был выполнен анализ технологической линии производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья, с учетом степени использования различных видов энергии, затрачиваемых в технологических процессах, исходя из свойств исходного сырья, осуществленной над системой работы и суммарного количества всех видов энергии, привлеченных извне. Была рассчитана эксергетическая мощность каждого из потоков, а также внешние и внутренние потери. Расчетное значение эксергетического КПД составило 11,86%, что на 5,7% выше, чем при использовании технологии-прототипа, что свидетельствует об энергетической эффективности данной технологии. Результаты расчетов говорят о повышении степени термодинамического совершенства системы благодаря комбинированию операций измельчения ядра, тепловой обработки и отжима масла в экструдере-маслоотделителе.*

**Ключевые слова:** эксергетический анализ, закон термодинамики, энергетическая эффективность, масличные культуры, экструдер-маслоотделитель.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 23.03.2016, принята к печати 08.07.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-3-37-42

### Ссылка для цитирования

Василенко В. Н., Фролова Л. Н., Михайлова Н. А., Дерканосова А. А., Таркаева Д. А., Русина К. Ю. Оценка термодинамической эффективности линии производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья // Вестник Международной академии холода. 2016. № 3. С. 37–42.

## Thermodynamic efficiency of vegetable oil production line with pre extrusion treatment of raw materials

D. Sc. V. N. VASILENKO<sup>1</sup>, Ph. D. L. N. FROLOVA<sup>2</sup>, N. A. MIKHAYLOVA,  
Ph. D. A. A. DERKANOSOVA<sup>3</sup>, D. A. TARKAYEVA, K. Yu. RUSINA

<sup>1</sup>vvn\_1977@mail.ru, <sup>2</sup>fln-84@mail.ru, <sup>3</sup>aa-derk@yandex.ru

Voronezh state university of engineering technologies  
394036, Russia, Voronezh, avenue Revolyutsii, 19

*To evaluate the energy efficiency of the technology under investigation manufacturing line for vegetable oil production with pre extrusion treatment of raw materials was analyzed, taking into account the use of different types of energy consumed in the processes based on the properties of the material; work executed on the system; and the total amount of all forms of external energy. Exergy power was calculated for each of the defects, as well as external and internal loss. Calculated value for the coefficient of efficiency was 11.86%, that is 5.7% higher than that when a prototype technology was used, that proves the energy efficiency of technology in question. The calculation results indicate increasing thermodynamic perfection degree of the system due to the combination of seed kernel grinding, heat treatment and oil extraction in an extruder-oil separator.*

**Keywords:** exergy analysis, the law of thermodynamics, energy efficiency, oilseeds, oil separator-extruder.

Реальные теплотехнологические системы переработки растительного сырья, использующие экструзионные технологии, потребляют достаточно большое количество энергии. Высокое энергопотребление вызвано небольшим термодинамическим потенциалом энергии, получаемой в теплопроизводящих аппаратах, нерациональным

построением технологических цепочек, значительными энергопотерями и слабым использованием вторичных теплоносителей или же их выбросом во внешнюю среду.

В связи с этим, в настоящее время на первый план в прикладных научных исследованиях выходит термо-

динамический анализ проектируемых или модернизируемых теплотехнологических, позволяющий выявить «узкие» звенья в технологии и наметить пути к их исправлению или замены на более эффективно функционирующие [3, 4]. Наиболее эффективным методом термодинамического анализа является эксергетический, основанный на втором начале термодинамики. Данный метод позволяет учесть на единой методологической основе все виды энергии, поступающие в систему или получаемые внутри нее.

На текущий момент научно-теоретическая база эксергетического метода термодинамического анализа разработана достаточно хорошо. Однако, несмотря на все более остро встающую проблему эффективности производств, в первую очередь благодаря снижению энергопотребления, его практическое использование в пищевой промышленности при создании новых технологий является недостаточным.

Важнейшим инструментом оценки термодинамической эффективности сложных технологических систем, к которым в полной мере относится технология получения растительных масел, как система взаимосвязанных процессов [5–7], является эксергетический анализ [8–11], позволяющий выявить участки технологии, где имеется потенциал энергосбережения.

В данной работе приводится эксергетический анализ теплотехнологической системы производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой масляного сырья. В качестве абсолютного эксергетического параметра выбрана эксергетическая мощность, определяемая не только термодинамическим потенциалом потока, но и расходом вещества в нем.

В соответствии со способом производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья (рис. 1), осуществляется следующим образом, происходит обрушивание семян с получением рушанки, разделением ее на лузгу и ядро.

Далее лузгу измельчают до определенного гранулометрического состава и направляют ее на фильтрование, в качестве как одного из фильтрующего элемента, ядро измельчают и одновременно осуществляют ее экструзионную обработку, позволяющей совмещать процесс измельчения ядра, тепловую обработку и отжим масла. Ядро сжимается при высоком давлении 7 МПа, нагревается до температуры 105 °С, при этом раскрывается клеточная структура ядра и происходит влаготепловая обработка мятки. Затем мятка вакуумируется и сразу направляется на отжим масла, получен-

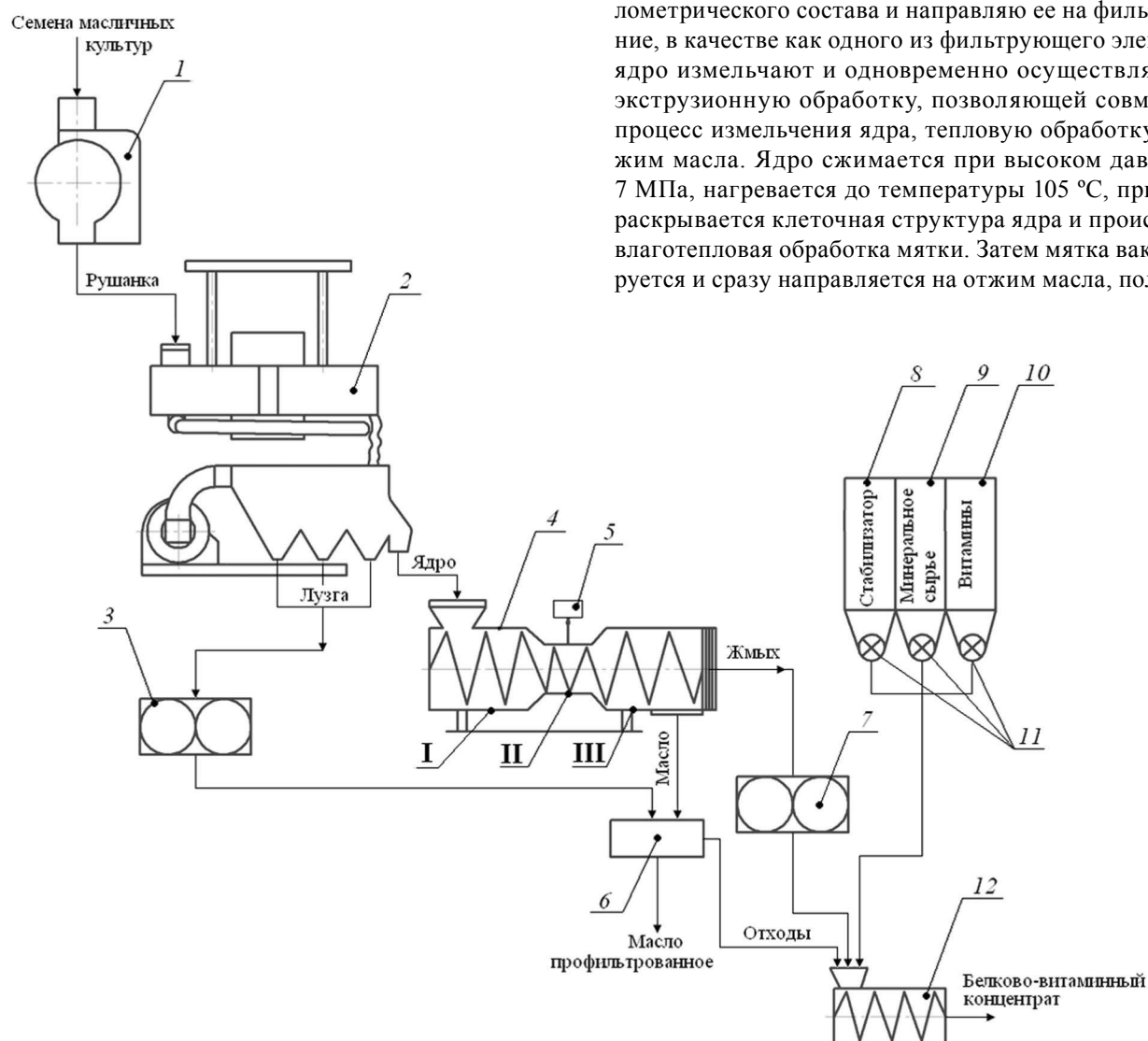


Рис. 1. Линия производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья; 1 — измельчающая машина; 2 — сортировочная машина; 3 — вальцовый станок, 4 — экструдер-маслопресс, состоящий из секции I предварительной экструзионной обработки сырья, секции II предназначена для отвода паров, 5 — вакуум-насос, 6 — фильтр; 7 — дробилка, 8 — бункер для хранения стабилизаторов, 9 — бункер для хранения минерального сырья, 10 — бункер для хранения витаминов, 11 — роторные дозаторы, 12 — смеситель

ное нефилтрованное масло направляют на фильтрование, полученный при отжиме масла жмых измельчают, смешивают с отходами после фильтрования, со стабилизатором, минеральным сырьем и витаминами с получением белково-витаминно-минерального концентрата и направляют на хранение или корм животным.

В соответствии с методикой В. М. Бродянского [1], на рис. 2 показана технологическая система производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья. Внутри системы, с учетом протекающих теплообменных процессов, выделен ряд контрольных поверхностей: I — обрушивание семян; II — фракционирование рушанки; III — измельчение лузги; IV — отжим и фильтрация масла; V — измельчение жмыха; VI — получение белково-витаминного концентрата.

Схема обмена рассматриваемой теплотехнологической системы материальными и энергетическими потоками с окружающей средой и внутри (между контрольными поверхностями) показана на рис. 3.

В качестве абсолютного эксергетического параметра, используемого в расчетах, выбрана эксергетическая мощность  $P_e$ , кДж/ч, учитывающая энергию материальных и тепловых потоков. Изменение эксергии по каждой контрольной поверхности технологической системы, состоящей из классических необратимых процессов с течением времени, определяется по формуле [2]:

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

где  $\sum_{i=1}^n E_i^3$  — суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков;  $\sum_{k=1}^l E_k^3$  — 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 — Стодоля);  $i = (\overline{1}; n)$  — количество вводимых материальных и энергетических потоков;  $k = (\overline{1}; l)$  — количество выходящих

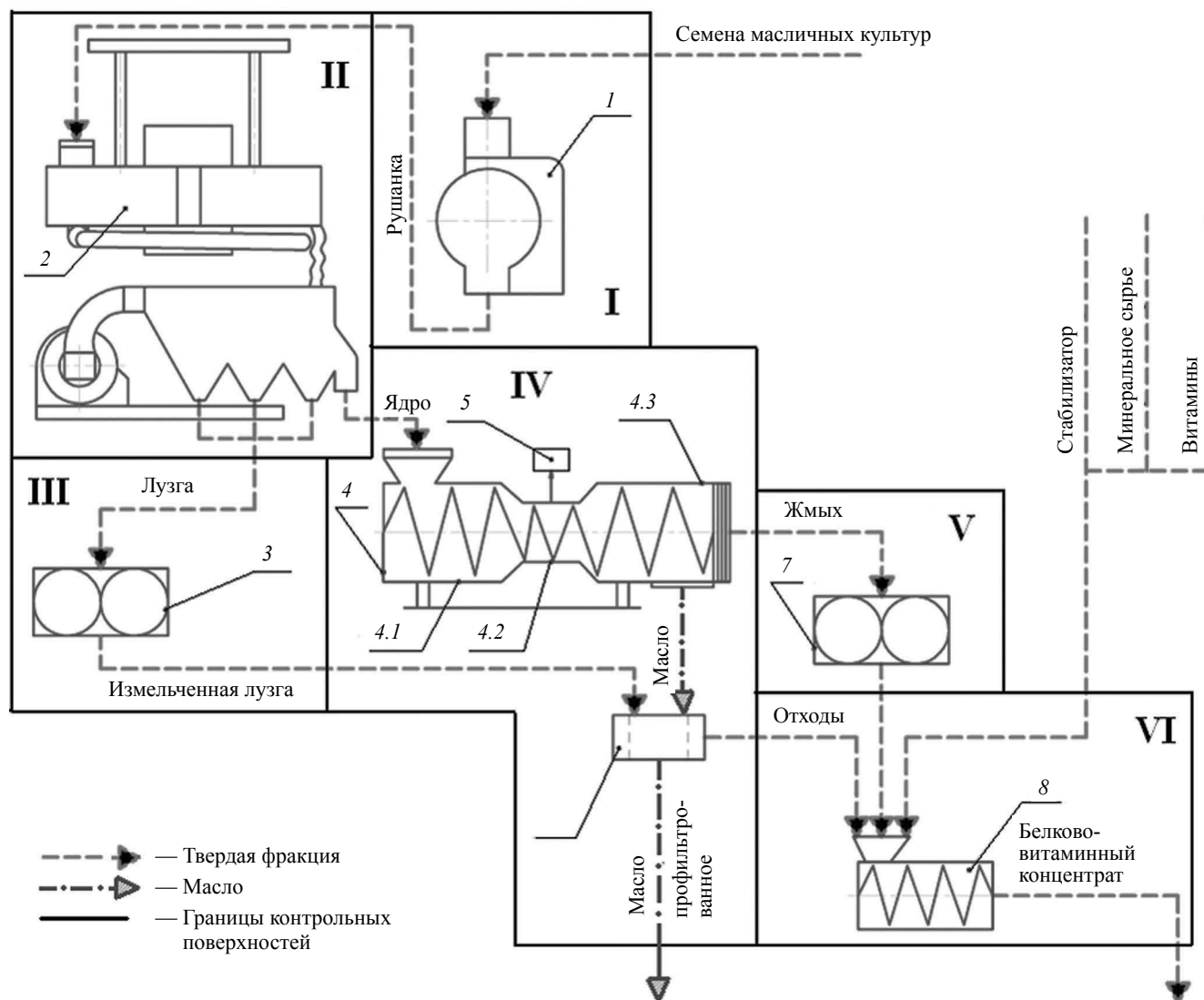


Рис. 2. Технологическая схема производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья:  
 1 — измельчающая машина; 2 — сортировочная машина; 3 — вальцовый станок; 4 — экструдер-маслопресс (секции: 4.1 — предварительной экструзионной обработки сырья, 4.2 — отвода паров, 4.3 — отжима масла);  
 5 — вакуум-насос; 6 — фильтр; 7 — дробилка; 8 — смеситель

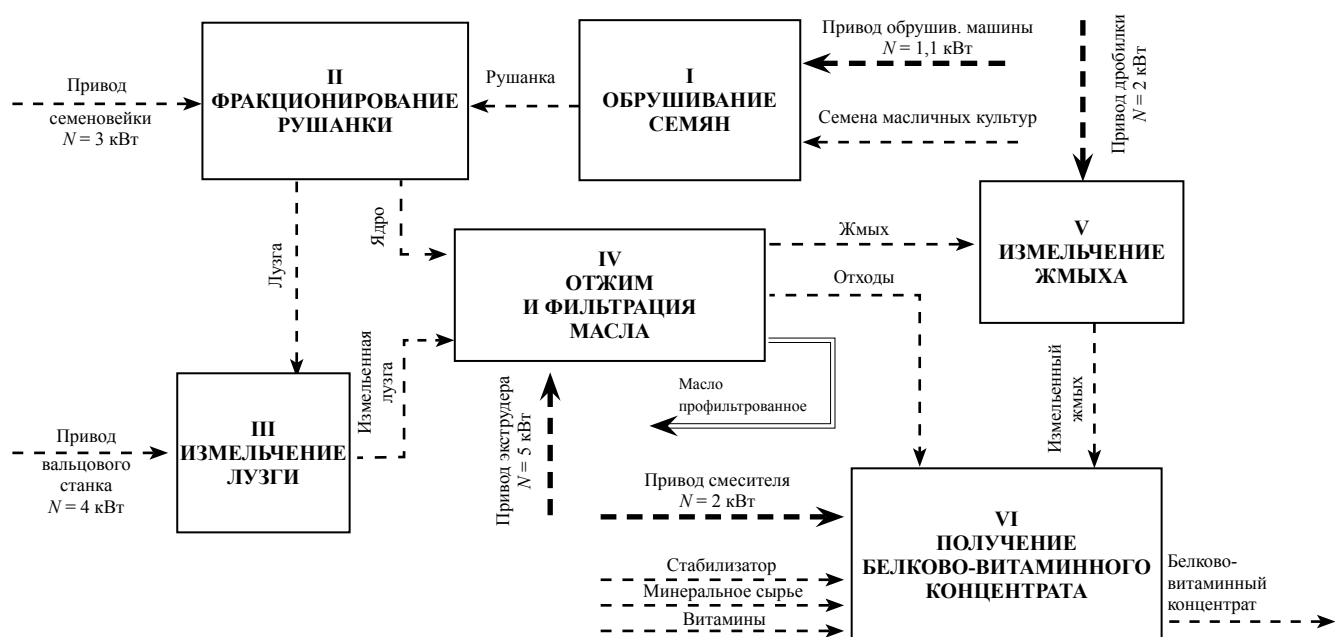


Рис. 3. Контрольные поверхности теплотехнологической системы

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

Выражение (1) для рассматриваемой технологии экструзионной обработки сырья рассматривалось в следующем виде:

$$E_1^n + E_2^n + \sum E_3^n = E_1^k + E_2^k + \sum D_i + \sum D_e, \quad (2)$$

где слагаемые этих уравнений — эксергетическая мощность (кДж/ч): исходных семян масличных культур  $E_1^n$  и добавок стабилизатора, минерального сырья и витаминов  $E_2^n$ ; общей подведенной к системе электроэнергии  $\sum E_3^n$ ; профильтрованного масла  $E_1^k$  и белково-витаминного концентрата  $E_2^k$ ; сумма потерь эксергии от не-

обратимости процессов, происходящих внутри контрольной поверхности  $\sum D_i$ ; сумма потерь эксергии в окружающую среду  $\sum D_e$ .

В соотношении (2) отражено изменение эксергии системы за счет подвода к ней семян масличных культур; подвода электроэнергии к приводам технологического оборудования; необратимых изменений структуры продукта, связанных с затратами электроэнергии на приводы оборудования; приращения эксергии продукта от механического воздействия рабочих органов вальцового станка, смесителя и дробилки; покрытия потерь, возникающих из-за необратимости теплообмена при конечной разности температур между пото-

### Эксергетический баланс линии производства растительных масел

Контрольная поверхность	Подвод эксергии			Отвод и потери эксергии			
	Наименование	$E$ , 10 <sup>3</sup> кДж/ч	% от суммарной эксергии	Наименование	Обозначение	кДж/ч	% от суммарной эксергии
I	Обрушивание семян	3,56	5,78	Внутренние	D <sup>i</sup> <sub>I</sub>	3,56	5,78
II	Фракционирование рушанки	10,20	16,57	Внутренние	D <sup>i</sup> <sub>II</sub>	9,40	15,27
				Внешние	D <sup>e</sup> <sub>II</sub>	0,80	1,30
III	Измельчение лузги	14,40	23,39	Внутренние	D <sup>i</sup> <sub>III</sub> D <sup>e</sup> <sub>I</sub>	11,66 2,04	18,94 3,31
IV	Отжим и фильтрация масла	17,40	28,27	Внутренние	D <sup>i</sup> <sub>IV</sub>	10,10	16,41
				Внешние	D <sup>e</sup> <sub>IV</sub>	3,30	5,36
V	Измельчение жмыха	6,70	10,88	Внутренние	D <sup>i</sup> <sub>V</sub>	5,95	9,67
				Внешние	D <sup>e</sup> <sub>V</sub>	0,75	1,22
VI	Получение белково- витаминного концентрата	10,00	16,24	Внутренние	D <sup>i</sup> <sub>VI</sub>	4,60	7,47
				Внешние	D <sup>e</sup> <sub>VI</sub>	2,10	3,41
ИТОГО:		61056	100		ИТОГО:		288,72
Эксергетический КПД, %:			11,86				

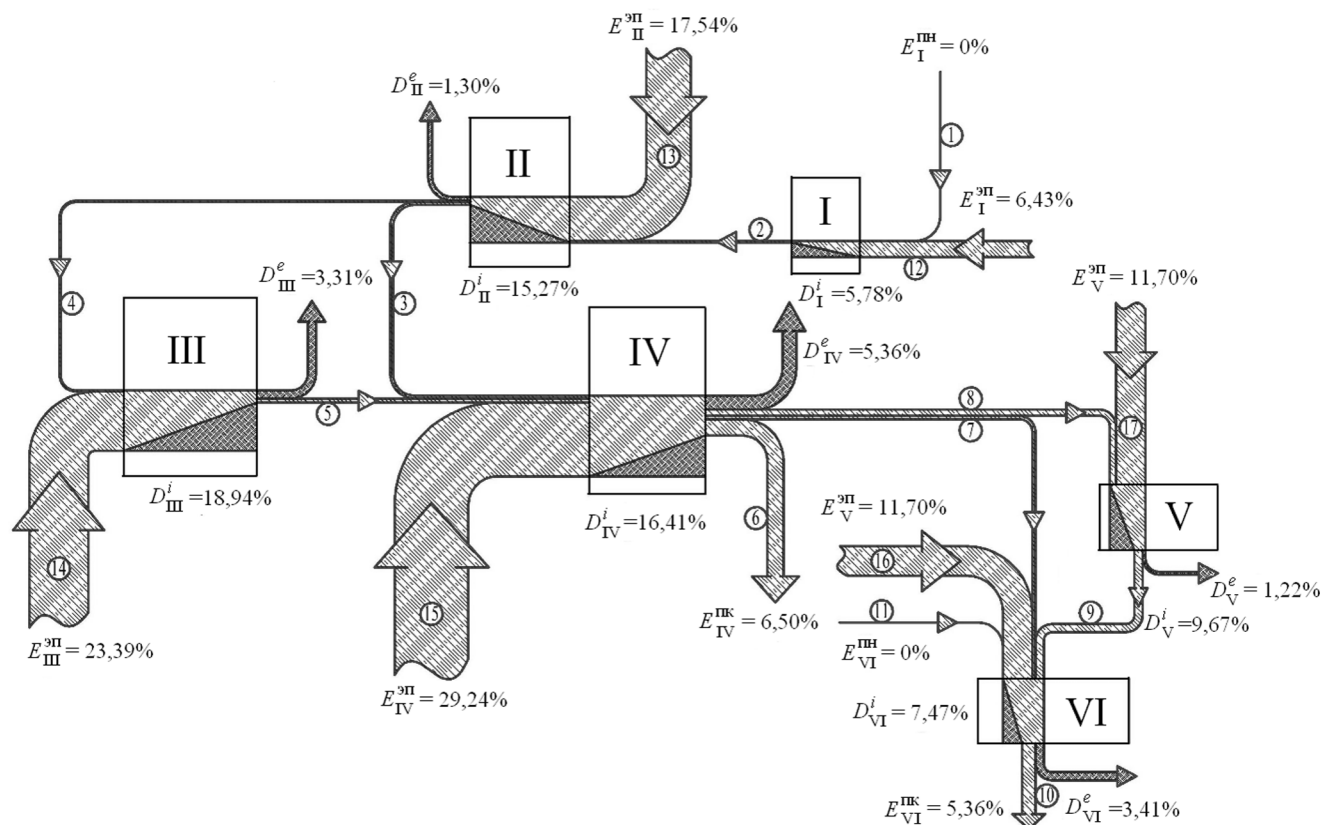


Рис. 4. Диаграмма Грассмана — Шаргута для исследуемой технологии; I–VI — номера контрольных поверхностей

ками; изменения теплофизических свойств сырья и продукта.

Термодинамическое совершенство исследуемой теплотехнологической системы производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья оценивали согласно величине эксергетического КПД, определяемому исходя из значения эксергии готовой продукции:

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

где  $\sum_{k=1}^l e_i^3$  — суммарная удельная эксергия готового масла и белково-витаминного концентрата, кДж/кг;  $\sum_{i=1}^n e_i^3$  — суммарная подведенная удельная эксергия, кДж/кг;  $\sum_{j=1}^m D_j$  — суммарные эксергетические потери, кДж/кг. Пересчет между эксергетической мощностью и удельной эксергией проводился с привлечением величины производительности потока.

По эксергетической мощности потоков в теплотехнологической системе, внутренним и внешним потерям эксергии, вычисленным в соответствии с формулами (1)–(3), был составлен эксергетический баланс системы производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья (таблица), графически представленный диаграммой Грассмана — Шаргута (рис. 4).

Полученный по формуле (3) эксергетический КПД составил 11,86%, что на 5,7% выше, чем при использовании технологии-прототипа [4, 8].

Эксергетический анализ сложной технологической системы производства растительных масел с предварительной экструзионной обработкой сырья говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы благодаря комбинированию операций измельчения ядра, тепловой обработки и отжима масла в экструдере-маслоотделителе.

## Литература

1. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический анализ и его приложения. — М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
2. Василенко В. Н. Разработка теоретических и технологических основ комплексной переработки масличного сырья: монография / В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, И. В. Драган. — Воронеж: ВГУИТ, 2014. 148 с.
3. Василенко В. Н., Копылов М. В. Исследование кинетических закономерностей процесса извлечения растительных масел в шнековом маслопрессе. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2012. № 1. С. 10–12.
4. Новое в технологии купажирования растительных масел: монография / А. Н. Остриков, В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, М. В. Копылов. — Воронеж: ВГУИТ, 2013. 225 с.
5. Остриков А. Н., Абрамов О. В., Логинов А. В., Красовитский Ю. В., Василенко В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. — СПб.: ГИОРД, 2012. 616 с.

6. Шевцов А. А., Фролова Л. Н., Василенко В. Н., Драган И. В. Автоматическая оптимизация процесса прессования семян масличных культур по технико-экономическому показателю // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 3. С. 18–22.
7. Пат. № 2560191 Российская федерация, МПК<sup>51</sup> С11В 1/00. Линия комплексной двухступенчатой переработки масличных культур [Текст] / В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, И. В. Драган, К. Ю. Русина. / Заявитель и патентообладатель Воронежский государственный университет инженерных технологий. № 2014119198/13; заявл. 13.05.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23, с. 9.
8. Блягоз Х. Р., Кошевой Е. П., Схалыхов А. А. Разработка линии комплексной переработки растительных масел с применением мембранных аппаратов. // Новые технологии. 2011. № 1. С. 11–14.
9. Рудаков О. Б., Королькова Н. В., Полянский К. К., Котик О. А., Рудакова Л. В. Технохимический контроль жиров и жирозаменителей: учебное пособие. — СПб: Лань, 2011. 576 с.
10. Фролова Л. Н., Василенко В. Н., Драган И. В., Михайлова Н. А. Изучение закономерностей предварительной экстракционной подготовки масличных культур к процессу прессования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2 (64). С. 27–29.
11. Фролова Л. Н., Василенко В. Н., Драган И. В., Дерканосова А. А., Михайлова Н. А. Эксергетический анализ линии комплексной двухступенчатой переработки масличных культур. // Вестник Международной академии холода. 2015. № 4. с. 78–84.
3. Vasilenko V. N., Kopylov M. V. Research of kinetic regularities of process of extraction of vegetable oils in a shnekovy maslopress. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*. 2012. No 1. p. 10–12. (in Russian)
4. New in technology of blending of vegetable oils: monograph / A. N. Ostrikov, V. N. Vasilenko, L. N. Frolova, M. V. Kopylov. Voronezh: VGUIT, 2013. 225 p. (in Russian)
5. Ostrikov A. N., Abramov O. V., Loginov A. V., Krasovitskii Yu. V., Vasilenko V. N. Processes and devices of food productions the textbook for higher education institutions. St. Petersburg. 2012. 616 p. (in Russian)
6. Shevtsov A. A., Frolova L. N., Vasilenko V. N., Dragan I. V. Automatic process improvement of pressing of seeds of oil-bearing crops on a technical and economic indicator. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*. 2014. № 3. S. 18–22. (in Russian)
7. Patent No. 2560191 Russian Federation, MPK51 S11B 1/00. Line of complex two-level processing of oil-bearing crops. / V. N. Vasilenko, L. N. Frolova, I. V. Dragan, K. Yu. Rusina. / Applicant and patent holder Voronezh state university of engineering technologies. No. 2014119198/13; it is declared 13.05.2014; it is published 20.08.2015, the Bulletin No. 23, p. 9. (in Russian)
8. Blyagov Kh. R., Koshevoi E. P., Skhalyakhov A. A. Development of the line of complex conversion of vegetable oils using membrane devices. *Novye tekhnologii*. 2011. No 1. p. 11–14. (in Russian)
9. Rudakov O. B., Korol'kova N. V., Polyanskii K. K., Kotik O. A., Rudakova L. V. Technical and chemical control of fats and zhirozamenitel: education guidance. St. Petersburg. Lan', 2011. 576 p. (in Russian)
10. Frolova L. N., Vasilenko V. N., Dragan I. V., Mikhailova N. A. Study of the regularities of pre-extrusion preparation of oilseeds for the process of pressing. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*. 2015. No. 2 (64). p. 27–29. (in Russian)
11. Frolova L. N., Vasilenko V. N., Dragan I. V., Derkanosova A. A., Mikhailova N. A. Exergy analysis of the line complex two-stage processing of oilseeds. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2015. No 4. P.78–84. (in Russian)

## References

1. Brodyanskii, V. M. Eksergetichesky analysis and its appendices. / V. M. Brodyanskii, V. Fratscher, K. Mikhalek. — М.: Energoatomizdat, 1988. 288 p. (in Russian)
2. Vasilenko, V. N. Development of theoretical and technological bases of complex processing of olive raw materials: monograph / V. N. Vasilenko, L. N. Frolova, I. V. Dragan. — Voronezh: VGUIT, 2014. 148 p. (in Russian)

## О Перечне рецензируемых научных изданий

В соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г., **1 декабря 2015 г.** сформирован Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издания, текущие номера которых или их переводные версии входят хотя бы в одну из международных реферативных баз данных и систем цитирования Web of Science, Scopus, Astrophysics Data System, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, Agris или GeoRef считаются входящими в Перечень по отраслям науки, соответствующим их профилю.

**Вестник Международной академии холода** включен в Перечень двум международным базам: **Agris (Agricultural Research Information System)** и **Chemical Abstracts**.