УДК 664

# Эксергетический анализ линии комплексной двухступенчатой переработки масличных культур

*Канд. техн. наук* **Л. Н. ФРОЛОВА**[1], *д-р техн. наук* **В. Н. ВАСИЛЕНКО**[2], **И. В. ДРАГАН,** *канд. техн. наук* **А. А. ДЕРКАНОСОВА**[3], **Н. А. МИХАЙЛОВА**
[1]fln-84@mail.ru, [2]vvn_1977@mail.ru, [3]aa-derk@yandex.ru
*Воронежский государственный университет инженерных технологий*
*394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19*

***Посредством эксергетического анализа проведена оценка термодинамической эффективности технологической линии 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. Основной задачей являлась оценка, на основе второго закона термодинамики, степени термодинамического совершенства технической системы в целом, а также выявление этапов технического процесса, на которых сосредоточены основные потери эксергии, с целью повышения эффективности ее работы. Для оценки энергоэффективности рассматриваемой технологии был выполнен анализ, основанный на методике Бродянского, в соответствии с моделью окружающей среды Шаргута, который показал ее высокую степень термодинамического совершенства за счет использования отработанных теплоносителей и организации работы системы в замкнутом цикле.***

***Ключевые слова:*** эксергетический анализ, масличные культуры, закон термодинамики.

# Exergy analysis of the line complex two-stage processing of oilseeds

*Ph.* **D. L. N. FROLOVA**[1], *D. Sc.* **V. N. VASILENKO**[2], **I. V. DRAGAN**, *Ph. D.* **A. A. DERKANOSOVA**[3], **N. A. MIKHAILOVA**
[1]fln-84@mail.ru, [2]vvn_1977@mail.ru, [3]aa-derk@yandex.ru
*Voronezh State University of Engineering Technologies*
*394036, Russia, Voronezh, avenue Revolyutsii, 19*

***By exergy analysis evaluated the thermodynamic efficiency of the production line-pressed vegetable oils to the extent that the use of different types of energy used in industrial processes, is-walking from the properties of raw materials, work carried out on the system and the total number of all types of energy, attracted from outside. The main objective was to assess on the basis of the second law of thermodynamic degree of technical perfection of the whole system, as well as identifying the technical stages of the process, on which major losses Exergy, in order to increase its effectiveness. To evaluate the efficiency considered technology we performed an analysis based on the procedure Brodyansky in accordance with the model environment Sharguta which showed its high degree of thermodynamic perfection through the use of waste heat transfer and organization of the system in a closed cycle.***

***Keywords:*** exergy analysis, oilseeds, dynamics, thermodynamics law.

Достижения теории, техники и технологии переработки масличных культур подготовили условия для научного подхода к инновационному развитию технологических процессов, обеспечивающих наименьшие затраты энергетических ресурсов при высоком качестве получаемых продуктов, в частности, композиционного растительного масла и кормового продукта — экспеллерного гранулированного жмыха.

Для определения возможных направлений повышения энергетической эффективности технологических схем необходимо оценивать уровень использования энергетических ресурсов.

Важнейшим инструментом оценки термодинамической эффективности технологической системы является эксергетический метод термодинамического анализа [1], перспективный метод оценки термодинамического совершенства теплотехнологических систем. Этот метод учитывает на основе второго закона термодинамики степень использования различных видов энергии, затрачиваемых в технологических процессах, исходя из свойств сырья, осуществленной над системой работы и суммарного количества всех видов энергии, привлеченных извне.

В технологии производства растительных масел тепловые процессы играют важнейшую роль в энергетических и механических превращениях и определяют термодинамическое совершенство системы в целом.

Задача эксергетического анализа — оценка, на основе второго закона термодинамики, степени термодинами-

ческого совершенства технической системы в целом, а также выявление этапов 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 основан на методике академика Бродянского [1, 2], в соответствии с моделью окружающей среды Шаргута. Теплотехнологическая система переработки масличных культур (рис. 1) условно отделена от окружающей среды замкнутой контрольной поверхностью, а внутри нее, с учетом теплообменных процессов, выделены контрольные поверхности.

Схемы обмена рассматриваемой теплотехнологической системы двухступенчатой переработки масличных культур материальными, тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой, а также между контрольными поверхностями показаны на рис. 2.

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

$$\sum E_З = \sum E_Э + \sum D, \qquad (1)$$

где $\sum E_З$ — суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков; $\sum E_Э$ — суммарная эксергия выводимых из контрольной поверхности полезных материальных и энергетических потоков; $\sum D$ — суммарные эксергетические потери (уравнение Гюи-Стодолы), $\sum D = T_0 \Delta S$.

Соотношение (1) для рассматриваемой технологии [9, 10] переработки масличных культур рассматривалось в следующем виде:

$$E_1^{н} + E_2^{н} + E_3^{н} + E_4^{н} + \sum E_э^{н} = \\ = E_1^{к} + E_2^{к} + E_3^{к} + \sum E_4^{mn} + \sum D_i + \sum D_e, \qquad (2)$$

где слагаемые этих уравнений — эксергия (кДж): исходного сырья — мятки рыжика $E_1^{н}$, кукурузы $E_2^{н}$ и подсолнечника $E_3^{н}$; воды $E_4^{н}$; суммарной электроэнергии $\sum E_э^{н}$; готовой продукции — композиционного масла первого $E_1^{к}$ и второго $E_2^{к}$ отжимов, побочных кормовых продуктов — фуза и твердых примесей, полученных на этапе фильтрования $\sum E_4^{mn}$; 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 исходного сырья — мятки масличных культур и воды, подвода электроэнергии к ТЭНам жаровни; необратимых изменений структурно-механических свойств продукта, сопряженных с затратами электроэнергии на приводы технологического оборудования; приращения эксергии продукта от механического воздействия ротора мешалки, в процессе дробления и прессования; приращения эксергии вспомогательных потоков от и ТЭНов пароперегревателя; покрытия потерь, возникающих вследствие необратимости процессов тепловой обработки сырья; изменения его теплофизических свойств; гидравлических потерь в чанной жаровне; компенсации потерь, обусловленных действием окружающей среды.

Эксергия вводимого в систему внешних материальных потоков сырья и воды, находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю, поэтому исключается из баланса.

В процессе нагрева и охлаждения сырья и промежуточных продуктов 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:

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

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 воды, пара, сырья, промежуточных и готовых продуктов добавки взяты из справочной литературы [3–5].

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 теплоносителями (паром и водой) и промежуточными продуктами, электромеханические, возникающие при необратимом изменении структурно-механических свойств продукта, и гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема пара при его поступлении в рабочую камеру технологического оборудования из подводящих трубопроводов.

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

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

где $Q^{то}$ — 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:

$$\tau_e = \left(T_{кп} - T_0\right) / T_{кп}, \qquad (5)$$

где $T_{КП}$ — температура теплоносителя внутри контрольной поверхности, К.

Эксергетические потери вследствие падения давления пара при его подаче в контрольную поверхность определяли по формуле:

$$D^{г} = g \cdot \Delta H_{г} \frac{T_{кп}}{T_{вх}}, \qquad (6)$$

где $T_{ВХ}$ — температура пара на входе в контрольную поверхность, К; $\Delta H_{Г}$ — гидравлические потери, м.

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

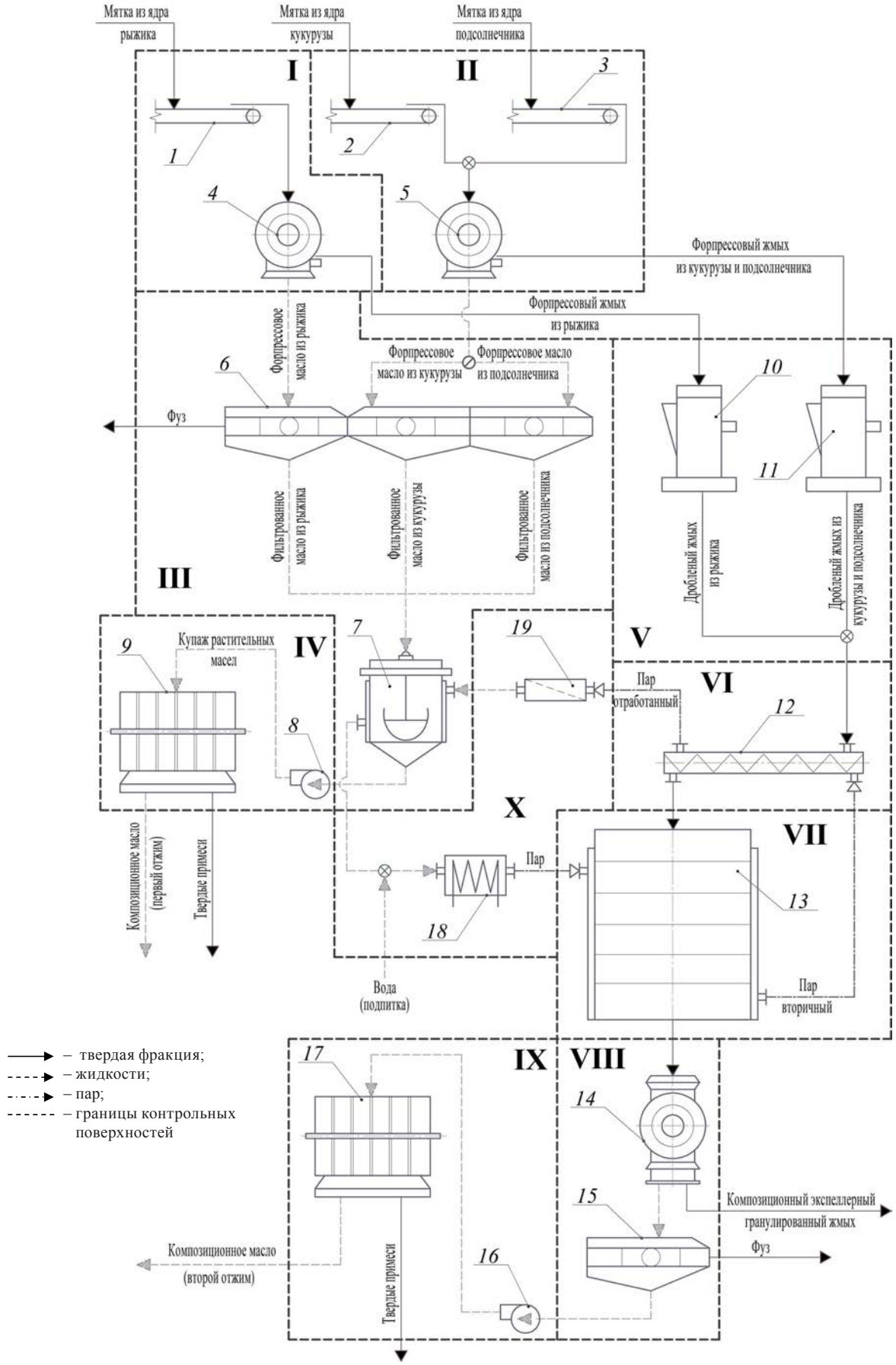



*Рис. 1. Схема технологического процесса:*
*1–3 — сотрясательные сита; 4, 5 — форпрессы; 6 — фузоловушка трехсекционная; 7 — емкость для смешивания растительных масел; 8, 16 — насос; 9, 17 — фильтр-пресс; 10, 11 — молотковые дробилки; 12 — шнековый смеситель-пропариватель, 13 — чанная жаровня 14 — экспеллер; 15 — фузоловушка; 18 — паронагреватель; 19 — фильтр-конденсатор*

$$\Delta H_{г} = \xi \frac{v_{вх}^2}{2g}, \qquad (8)$$

где $v_{вх}$ — средняя скорость прохождения пара по сечению подводящего трубопровода, м/с; $\xi$ — 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 [7, 8, 11–14].

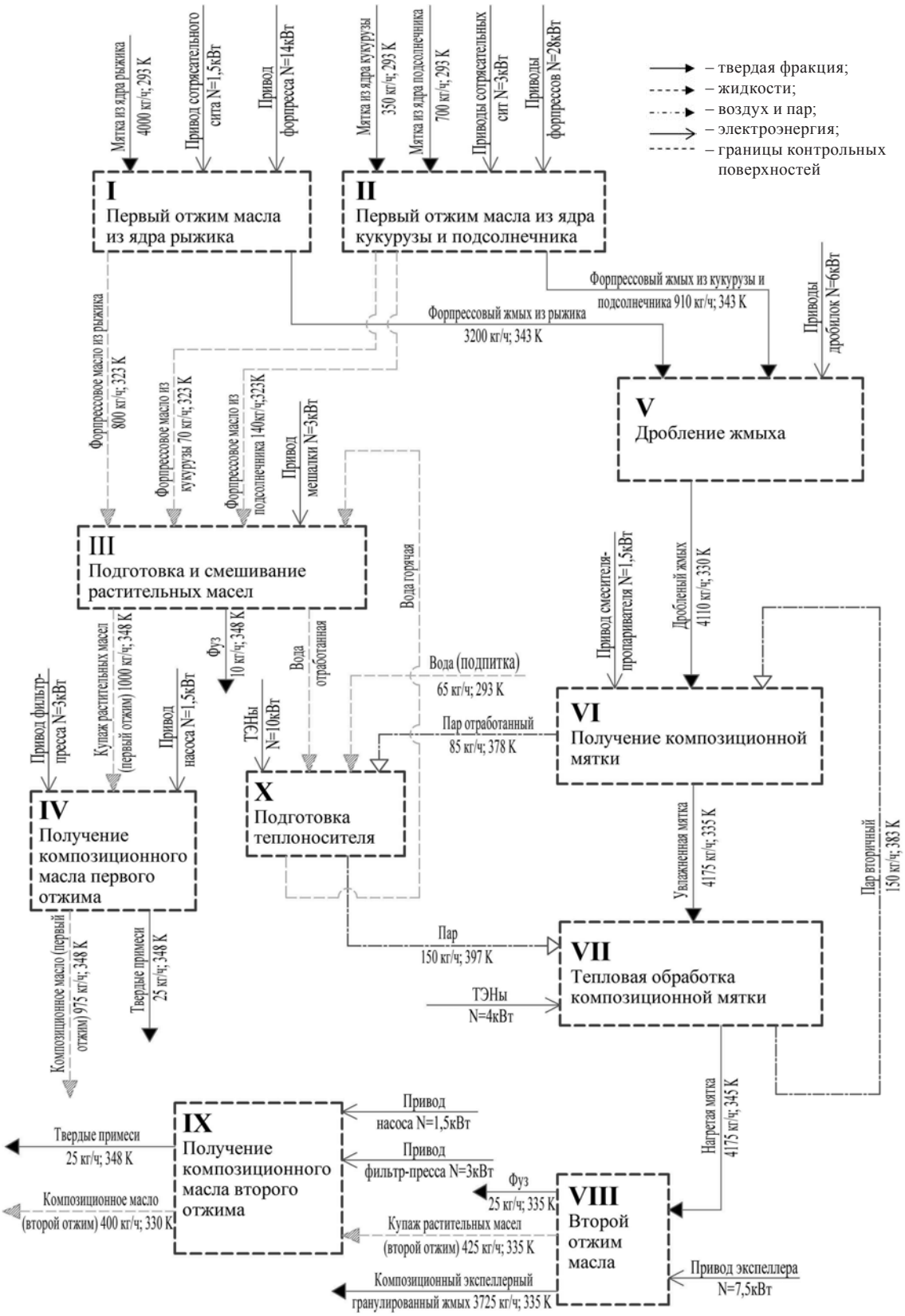



*Рис. 2. Схема обмена потоками между контрольными поверхностями предлагаемой теплотехнологической системы*

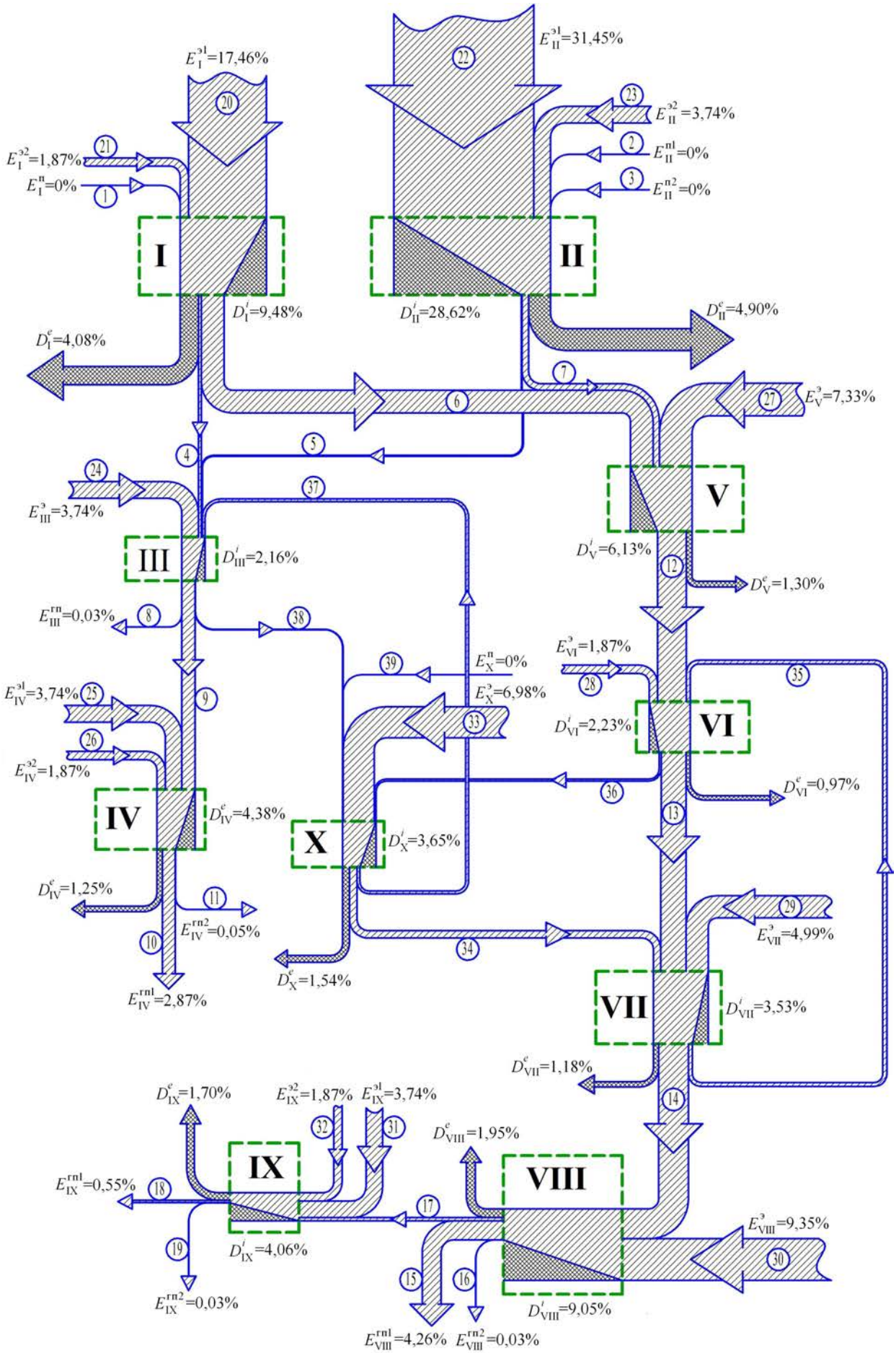



*Рис. 3. Диаграмма Грассмана-Шаргута для исследуемой технологии: I–X — номера контрольных поверхностей*

**Эксергетический баланс линия комплексной двухступенчатой переработки масличных культур**

| Контро. Пов-ть | Подвод эксергии | | | Отвод и потери эксергии | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Наименование | $E$, $10^3$ кДж/ч | % от суммарной эксергии | Наименование | Обозначение | кДж/ч | % от суммарной эксергии |
| I | Первый отжим масла из ядра рыжика | 55,80 | 19,33 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{I}}$<br>$D^e_{\text{I}}$ | 27,37<br>11,79 | 9,48<br>4,08 |
| II | Первый отжим масла из ядра кукурузы и подсолнечника | 101,60 | 35,19 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{II}}$<br>$D^e_{\text{II}}$ | 82,63<br>14,15 | 28,62<br>4,90 |
| III | Подготовка и смешивание растительных масел | 10,80 | 3,74 | Внутренние | $D^i_{\text{III}}$ | 6,33 | 2,19 |
| IV | Получение композиционного масла первого отжима | 16,20 | 5,61 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{IV}}$<br>$D^e_{\text{IV}}$ | 12,66<br>3,60 | 4,38<br>1,25 |
| V | Дробление жмыха | 21,16 | 7,33 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{V}}$<br>$D^e_{\text{V}}$ | 17,69<br>3,75 | 6,13<br>1,30 |
| VI | Получение композиционной мятки | 5,40 | 1,87 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{VI}}$<br>$D^e_{\text{VI}}$ | 6,43<br>2,81 | 2,23<br>0,97 |
| VII | Тепловая обработка композиционной мятки | 14,40 | 4,99 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{VII}}$<br>$D^e_{\text{VII}}$ | 10,18<br>3,42 | 3,53<br>1,18 |
| VIII | Второй отжим масла | 27,00 | 9,35 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{VIII}}$<br>$D^e_{\text{VII}}$ | 26,12<br>5,62 | 9,02<br>1,95 |
| IX | Получение композиционного масла второго отжима | 16,20 | 5,61 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{IX}}$<br>$D^e_{\text{IX}}$ | 11,73<br>4,92 | 4,06<br>1,70 |
| X | Подготовка теплоносителя | 20,16 | 6,98 | Внутренние<br>Внешние | $D^i_{\text{X}}$<br>$D^e_{\text{X}}$ | 10,55<br>4,45 | 3,65<br>1,54 |
| И Т О Г О: | | 288,72 | 100 | И Т О Г О: | | 288,72 | 100 |
| Эксергетический КПД, %: | | | 7,83 | | | | |

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

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

$$D^e = Q_{\text{из}}\,\tau_e, \tag{9}$$

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

Эксергетические потери готового масла, жмыха и кормовых побочных продуктов при выгрузке из соответствующего оборудования при достижении ими термодинамического равновесия с окружающей средой были вычислены по формуле:

$$D_{\text{пр}} = h_{\text{пр}} - h^0_{\text{пр}} - T_0 \cdot \overline{c} \cdot \ln\frac{T_{\text{пр}}}{T^0_{\text{пр}}} \tag{10}$$

где $h_{\text{ПР}}$, $T_{\text{ПР}}$ — энтальпия, кДж/кг и температура, К продукта, $\overline{c}$ — 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 переработки масличных культур проводили по эксергетическому КПД, исходя из значения эксергии готовой продукции:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\sum_{k=1}^{l} e^{\text{э}}_i}{\sum_{i=1}^{n} e^{\text{э}}_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} e^{\text{э}}_i - \sum_{j=1}^{m} D_j}{\sum_{i=1}^{n} e^{\text{э}}_i}, \tag{11}$$

где $\sum_{k=1}^{l} e^{\text{э}}_i$ — суммарная удельная эксергия готовых продуктов (масло 1 и 2 отжима, композиционный жмых, фуз, твердые примеси), кДж/кг; $\sum_{i=1}^{n} e^{\text{э}}_i$ — 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 формулам (4–10), составили эксергетический баланс теплотехнологической системы переработки масличных культур (таблица).

Потоки, обозначенные на рис. 3, представлены в таблице. При построении эксергетических диаграмм Грассмана — Шаргута (рис. 3) в качестве абсолютного эксергетического параметра выбрана эксергетическая мощность Е, кДж/ч.

Полученный по формуле (11) эксергетический КПД равен 7,83%, что на 3,5 выше, чем при использовании традиционной технологии.

Эксергетический анализ сложной технологической системы комплексной двухступенчатой переработки

масличных культур показал ее высокую степень термодинамического совершенства за счет использования отработанных теплоносителей и организации работы системы в замкнутом цикле.

## Список литературы


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. *Гуляев, В. Н.* Справочник технолога пищеконцентратного и овощесушильного производства [Текст] / В. Н. Гуляев, Н. В. Дремина, З. А. Кац [и др.]. — М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1984. 488 с.
4. *Богословский, С. В.* Физические свойства газов и жидкостей [Текст] / С. В. Богословский. — СПб.: СПбГУАП, 2001. 73 с.
5. Чубик, И. А. Справочник по теплофизическим свойствам пищевых продуктов и полуфабрикатов [Текст] / И. А. Чубик, А. М. Маслов. — М.: Пищ. пром-сть, 1970. 184 с.
6. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов [Текст] / Остриков А. Н., Абрамов О. В., Логинов А. В., Красовитский Ю. В., Василенко В. Н. — СПб.: ГИОРД, 2012. 616 с.
7. *Пономарев, А. В.* Анализ термодинамической эффективности технологии комбикормов [Текст] / А. В. Пономарев, А. А. Шевцов, Л. И. Лыткина // Материалы III Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития)». — Воронеж: ВГТА, 2009. Т. 2. С. 319–321.
8. *Калашников, Г. В.* Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов [Текст] / Г. В. Калашников, А. Н. Остриков. — Воронеж: Изд. Воронежского университета, 2001. 356 с.
9. *Василенко, В. Н.* Разработка теоретических и технологических основ комплексной переработки масличного сырья [Текст]: монография / В. Н. Василенко, Л. Н. Фролова, И. В. Драган. — Воронеж: ВГУИТ, 2014. 148 с.
10. *Пономарева Е. И., Кустов В. Ю., Одинцова А. В.* Выбор рационального способа внесения муки из отрубей гречишных // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1 (63). С. 122–125.
11. Пат. № 2560191 Российская федерация, МПК[51] 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.
12. *Шаргут Я.* Эксергия [Текст] / Я. Шаргут, Р. Петела. — Москва: Энергия, 1968. 284 с.
13. *Василенко В. Н.* Математическая модель движения сырья в шнековом канале маслопресса [Текст] / В. Н. Василенко, М. В. Копылов, И. В. Драган, Л. Н. Фролова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 3. С. 18–22.
14. *Фролова Л. Н., Василенко В. Н., Драган И. В., Михайлова Н. А.* Изучение закономерностей предварительной экструзионной подготовки масличных культур к процессу прессования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2 (64). С. 27–29.


## References


1. Brodyanskii, V. M. Eksergeticheskу analysis and its appendices. / V. M. Brodyanskii, V. Fratsher, K. Mikhalek. — M.: Energoatomizdat, 1988. 288 p. (in Russian)
2. Sazhin, B. S. Эксергетический метод в химической технологии. / B. S. Sazhin, A. P. Bulekov. — M.: Khimiya, 1992. 208 p. (in Russian)
3. Gulyaev, V. N. Reference book of the technologist of pishchekontsentratny and ovoshchesushilny production. / V. N. Gulyaev, N. V. Dremina, Z. A. Kats [ets.]. — Moscow. 1984. 488 p. (in Russian)
4. Bogoslovskii, S. V. Physical properties of gases and liquids / S. V. Bogoslovskii. / St. Petersburg. 2001. 73 p. (in Russian)
5. Chubik, I. A. Reference book on heatphysical properties of foodstuff and semi-finished products. / I. A. Chubik, A. M. Maslov./ Moscow. 1970. 184 p. (in Russian)
6. Processes and devices of food productions the textbook for higher education institutions / Ostrikov A. N., Abramov O. V., Loginov A. V., Krasovitskii Yu. V., Vasilenko V. N. St./ Petersburg. 2012. 616 p. (in Russian)
7. Ponomarev, A. V. Analysis of thermodynamic efficiency of technology of compound feeds / A. V. Ponomarev, A. A. Shevtsov, L. I. Lytkina//Materials III of the International scientific and technical conference «Innovative Technologies and Equipment for the Food Industry (Development Priorities)».. — Voronezh: VGTA, 2009. vol. 2. p. 319–321. (in Russian)
8. Kalashnikov, G. V. Resource-saving technologies of food concentrates. / G. V. Kalashnikov, A. N. Ostrikov. — Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 2001. 356 p. (in Russian)
9. 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)
10. Ponomareva E. I., Kustov V. U., Odintsova A. V. The choice of rational method of making flour from the buckwheat bran. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta enzhenernih technologiy* [Proceedings the Voronezh state University of engineering technologies]. 2015. No. 1 (63). p. 122–125. (in Russian)
11. Patent No. 2560191 Russian Federation, MPK51 S11B 1/00. Line of complex two-level processing of oil-bearing crops. / V. N. Vasilenko, L. N. Frolovoa, 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)
12. Shargut Ya. Exergy. / Ya. Shargut, R. Petela. — Moskva: Energiya, 1968. 284 p. (in Russian)
13. Vasilenko V. N. Mathematical model of the movement of raw materials in the shnekovy channel of a maslopress. / V. N. Vasilenko, M. V. Kopylov, I. V. Dragan, L. N. Frolova. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnolo-gii.* 2013. No 3. p. 18–22. (in Russian)
14. 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 enzhenernih technologiy* [Proceedings the Voronezh state University of engineering technologies]. 2015. No. 2 (64). p. 27–29. (in Russian)


*Статья поступила в редакцию 08.09.2015*