УДК 536.7, 664.8
DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.4.147

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОТЕИНСОДЕРЖАЩИХ ЗЕЛЕНЫХ РАСТЕНИЙ

Александр Анатольевич Шевцов
Алексей Викторович Дранников
Анна Александровна Дерканосова
Алиса Александровна Коротаева

Воронежский государственный университет инженерных технологий

Разработана технология комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений с получением протеинового зеленого концентрата (ПЗК) и сухого травяного жома. Эксергетический анализ позволил определить термодинамическую эффективность технологической линии получения ПЗК. В ходе исследования были учтены различные виды энергии, используемые в разной степени в рассматриваемых технологических процессах с учетом свойств сырьевых ингредиентов, совершенной над системой работой и общего количества всех видов энергии, привлеченных извне. Определение степени термодинамического совершенства технической системы в общем и поиск этапов технического процесса с наибольшими потерями энергии являлись основной задачей. Оценка энергоэффективности проводилась по методике Бродянского, в соответствии с моделью окружающей среды Шаргута. Были рассчитаны эксергетическая мощность каждого из потоков, а также внешние и внутренние потери. Составлен эксергетический баланс теплотехнологической системы комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений. Представлена схема обмена исследуемой теплотехнологической системы материальными, тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой и между контрольными поверхностями. Построена диаграмма Грассмана–Шаргута для разработанной технологии. В качестве абсолютного эксергетического параметра выбрана удельная эксергия *e*, кДж/кг. Высокое значение эксергетического КПД 9,64% в сравнении с технологией прототипа свидетельствует об энергетической эффективности технологии. Наблюдается повышение степени термодинамического совершенства системы за счет снижения энергозатрат при использовании контуров рециркуляции по теплоносителям (греющий и перегретый пар) и сушки сырья в «щадящих» температурных режимах, исключения дополнительных затрат энергии на вакуум-выпарной аппарат вследствие концентрирования сока в менее энергоемких микро- и ультрафильтрационных модулях.
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эксергетический анализ, закон термодинамики, энергетическая эффективность, протеинсодержащие зеленые растения, ПЗК.

EXERGY ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY OF COMPLEX PROCESSING OF PROTEIN-CONTAINING GREEN PLANTS

Alexandr A. Shevtsov
Aleksey V. Drannikov
Anna A. Derkanosova
Alisa A. Korotaeva

Voronezh State University of Engineering Technologies

The authors have developed the technology of complex processing of protein-containing green plants to obtain a protein green concentrate (PGK) and dried grass pulp. Exergy analysis allowed determining the thermodynamic efficiency of the processing line for producing PGK. The study considered different types of energy used to various extents and necessary for the investigated technological processes taking into account the properties of raw ingredients, the work done over the system and the total number of all types of energy attracted from the outside. The main objective was to determine the degree of thermodynamic perfection of the technical system in general and the search for the stages of technical process with the greatest energy losses. Energy efficiency evaluation was performed according to the procedure by Brodyansky and the model of environment by Shargut. Exergy power was calculated for each of the streams, as well as external and internal losses. The authors have drawn an exergy balance of the thermothechnical system of complex processing of protein-containing green plants and presented a scheme of exchange of the studied thermothechnical system by material, thermal and energy flows with the environment and between the control surfaces. The Grassmann-Shargut diagram for the developed technology was drawn. An absolute exergic parameter was specific exergy *e*, kJ/kg. A high exergy

efficiency coefficient of 9.64% compared to the prototype technology is indicative of power efficiency of the technology. There is an increase in the degree of thermodynamic perfection of the system due to the reduction in power consumption when using recirculation loops for heating media (heating and superheated steam) and raw material drying at temperature-sparing regimens, exclusion of additional energy costs for a vacuum evaporator due to the concentration of juice in less energy-consuming micro- and ultrafiltration modules.
KEY WORDS: exergy analysis, law of thermodynamics, energy efficiency, protein-containing green plants, protein green concentrate.

На базе Центра коллективного пользования «Контроль и управление энергоэффективными проектами» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» ведутся исследования, направленные на расширение ассортимента кормовых препаратов для сельскохозяйственных животных. Разработана и в производственных условиях реализована энергосберегающая технология производства протеинового зеленого концентрата (ПЗК) из листостебельной массы зеленых растений.

Особенностью предлагаемой технологии является комплексная переработка листостебельной массы трав с использованием ультрафильтрационной установки и распылительной сушилки при получении ПЗК. При этом сушку травяного жома, который является вторичным материальным ресурсом, осуществляют перегретым паром в активных гидродинамических режимах с отводом отработанного пара на реализацию тепловых процессов [2].

В технологии производства ПЗК основные процессы – тепловые, которые участвуют в энергетических и механических превращениях и определяют термодинамические показатели системы.

Был проведен эксергетический анализ технологии комплексной переработки листостебельной массы трав, позволивший определить термодинамическую эффективность технологической линии получения ПЗК. В ходе исследования были учтены различные виды энергии, используемые в разной степени в рассматриваемых технологических процессах с учётом свойств сырьевых ингредиентов, совершенной над системой работой и общего количества энергии, привлеченной извне.

Определение степени термодинамического совершенства технической системы в общем и поиск этапов технического процесса с наибольшими потерями энергии являлось основной задачей.

Эксергетический анализ проведен по методике Бродянского [1, 7], в соответствии с моделью окружающей среды Шаргута. Он показывает высокую степень термодинамического совершенства за счет использования отработанных теплоносителей и организации работы системы в замкнутом цикле [9, 10].

Получение ПЗК осуществляют следующим образом [5].

Предварительно измельченную массу зеленых растений отжимают в шнековом прессе *1* и получают травяной жом и зеленый сок. Подогретый очищенный от волокнистых примесей сок направляют в блок микрофильтрационных модулей *13* для тонкой очистки. Очищенный фильтрат собирается в накопительной емкости *14*, куда для увеличения сроков хранения готового продукта одновременно вводят раствор антиокислителя. Из накопительной емкости *14* фильтрат циркуляционным насосом *15* нагнетается в блок ультрафильтрационных модулей *16* с керамическими мембранами, с образованием контура рециркуляции до тех пор, пока не будет достигнуто содержание сухих веществ 25…35% в концентрате. Образующийся в модулях *16* пермеат используют в технологических целях, а полученный концентрат подают в распылительную сушилку *17* для сушки атмосферным воздухом, нагретым до температуры 75…80°С. На выходе из распылительной сушилки *17* получают порошкообразный протеиновый концентрат с влажностью 8…10%.

После шнекового пресса 1 травяной жом влажностью 65…70% вместе с твердой фазой после фильтра *10* и блока микрофильтрационных модулей *13* направляют в раз-

рыхлитель *2*. Далее травяной жом подают в вибросушилку *3*, где осуществляют его сушку перегретым паром атмосферного давления с температурой 120…130°С и скоростью 1,5…2,0 м/с в виброкипящем слое до влажности 10…12% в сухом травяном жоме.

Теплотехнологическая система комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений (рис. 1) представлена вне окружающей среды в замкнутой контрольной поверхности, а внутри неё с учетом теплообменных процессов выделены контрольные поверхности:

I – подготовка травяного жома;

II – фильтрация и подогрев зеленого сока;

III – концентрация зеленого сока;

IV – распылительная сушка концентрата;

V – вибрационная сушка жома;

VI – пароперегреватель;

VII – калорифер;

VIII – парогенератор.

Схема обмена рассматриваемой теплотехнологической системы материальными, тепловыми и энергетическими потоками с окружающей средой, а также между контрольными поверхностями представлена на рисунке 2.

Удельная эксергия в контрольных поверхностях [11, 6], включающая классические необратимые процессы, уменьшается с течением времени, что связано с диссипацией энергии

$$\sum e_з = \sum e_э + \sum D \ , \qquad (1)$$

где $\sum e_з$ – суммарная удельная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков;

$\sum e_э$ – суммарная эксергия выводимых из контрольной поверхности полезных материальных и энергетических потоков;

$\sum D = T_0 \cdot \Delta S$ – суммарные эксергетические потери (уравнение Гюи-Стодолы).

Соотношение (1) для разработанной технологии комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений [5] рассматривалось в следующем виде:

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

где $E_1^н$ – эксергия исходных измельченной массы зеленых растений, кДж;

$E_2^н$ – эксергия раствора антиокислителя, кДж;

$E_3^н$ – эксергия атмосферного воздуха, кДж;

$\sum E_э^н$ – эксергия суммарной электроэнергии, кДж;

$E_1^к$ – эксергия порошкообразного протеинового концентрата, кДж;

$E_2^к$ – эксергия сухого травяного жома, кДж;

$E_3^к$ – эксергия пермеата, кДж;

$\sum D_i$ – сумма потерь эксергии в результате необратимости процессов, происходящих внутри контрольной поверхности, кДж;

$\sum D_e$ – сумма потерь эксергии во внешнюю среду, кДж.

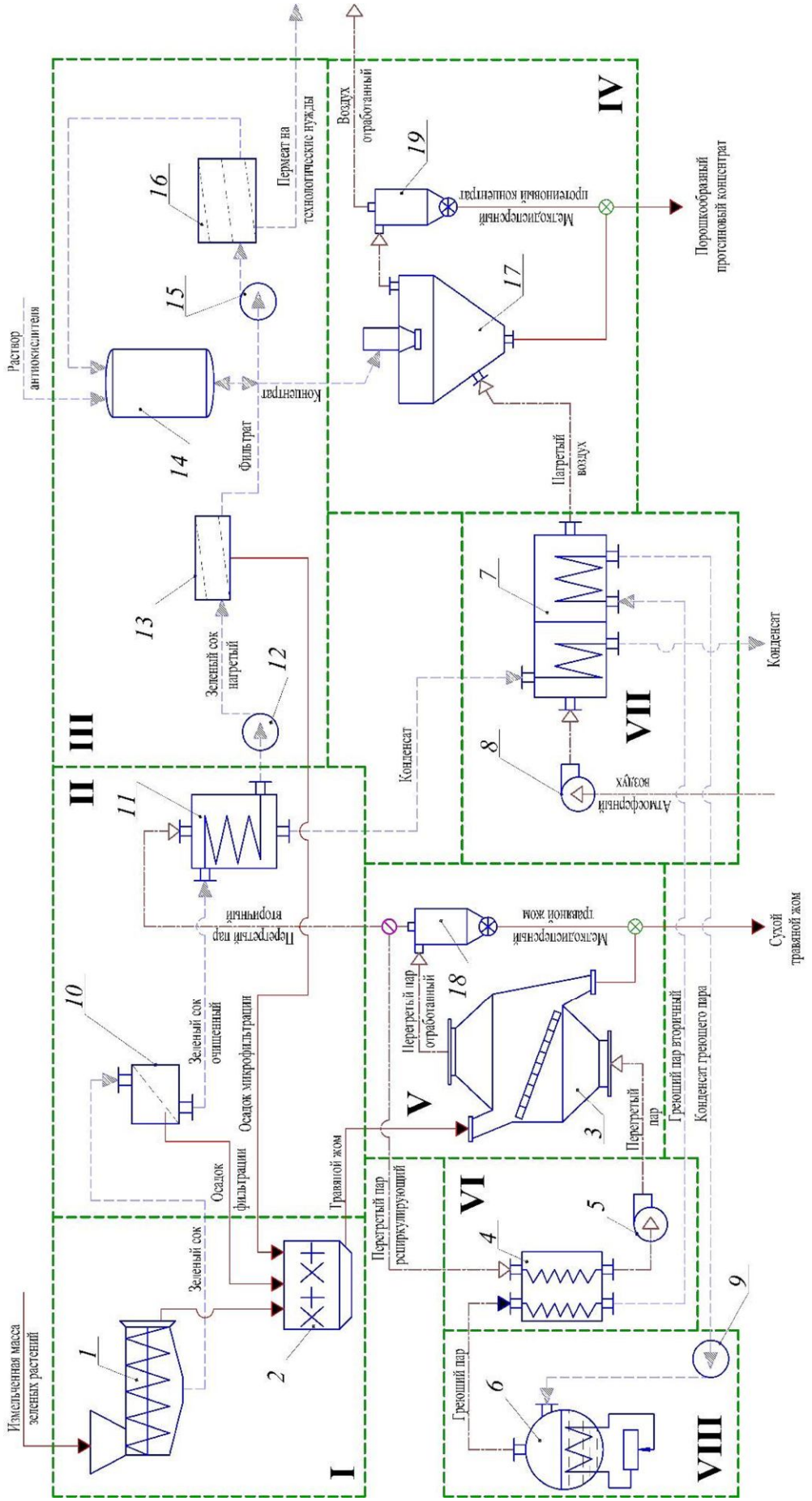

Рис. 1. Схема технологического процесса: – твердая фракция; – жидкости; – воздух и пар; – границы контрольных поверхностей. 1 – шнековый пресс; 2 – разрыхлитель; 3 – вибросушилка; 4 – пароперегреватель; 5 – вентилятор для перегретого пара; 6 – парогенератор; 7 – калорифер; 8 – вентилятор для атмосферного воздуха; 9 – насос для возврата конденсата в парогенератор; 10 – фильтр; 11 – подогреватель; 12 – насос для подачи очищенного зеленого сока; 13 – блок микрофильтрационных модулей; 14 – накопительная емкость; 15 – циркуляционный насос для фильтрата; 16 – блок ультрафильтрационных модулей; 17 – распылительная сушилка; 18, 19 – циклон-очиститель

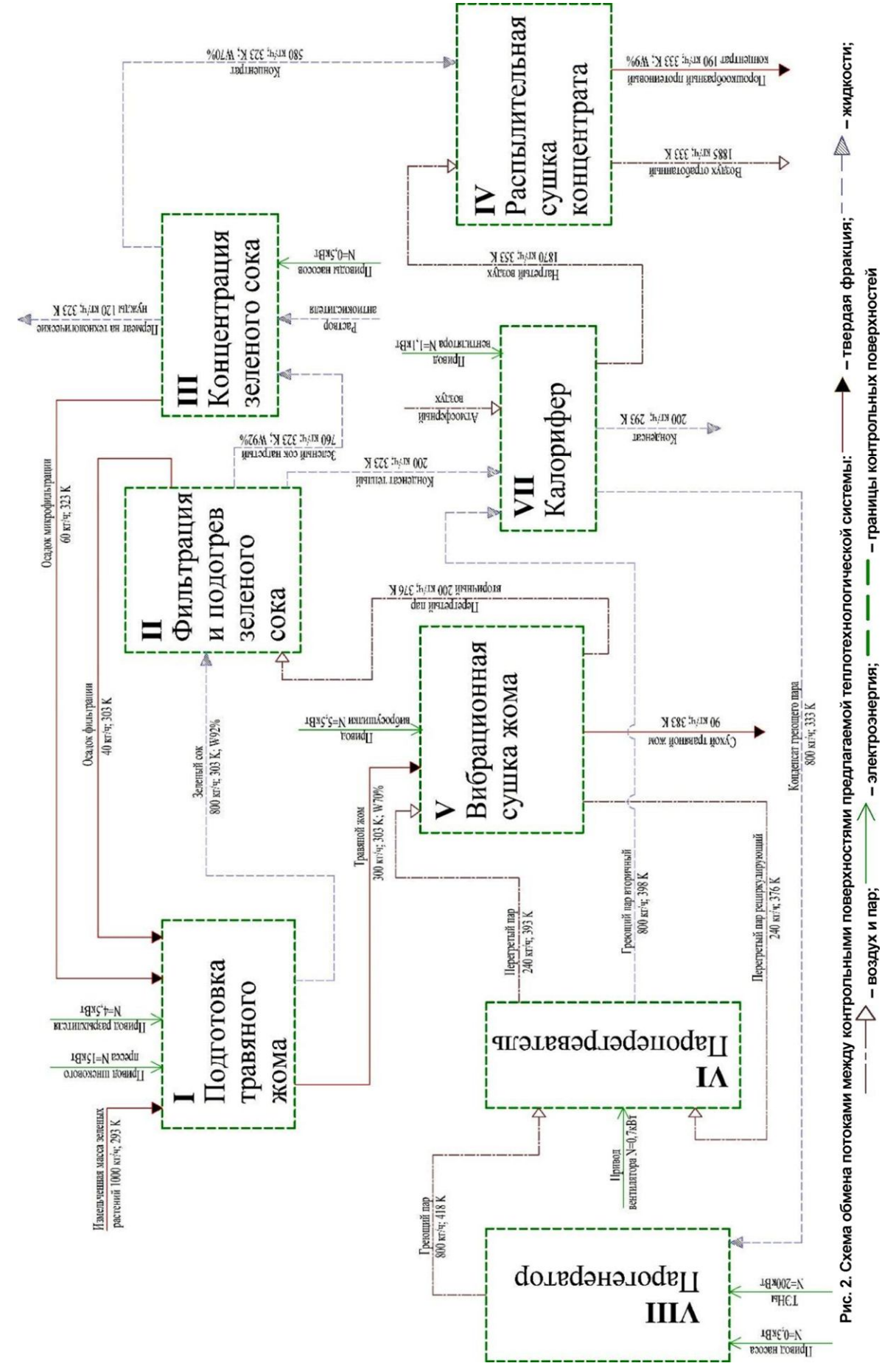

Рис. 2. Схема обмена потоками между контрольными поверхностями предлагаемой теплотехнологической системы:

Эксергия вводимых в систему внешних материальных потоков – исходного травяного сырья, раствора антиоксидантов и атмосферного воздуха, находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю, поэтому исключается из баланса [3].

Оценку термодинамического совершенства теплотехнологической системы комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений проводили по эксергетическому КПД, исходя из значения эксергии готовой продукции

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

где $\sum\limits_{k=1}^{l} e_i^{э}$ – суммарная удельная эксергия высушенного травяного жома, порошкообразного протеинового концентрата и пермеата, кДж/кг;

$\sum\limits_{i=1}^{n} e_i^{з}$ – суммарная затраченная удельная эксергия (подведенная в систему извне), кДж/кг;

$\sum\limits_{j=1}^{m} D_j$ – суммарные эксергетические потери, кДж/кг.

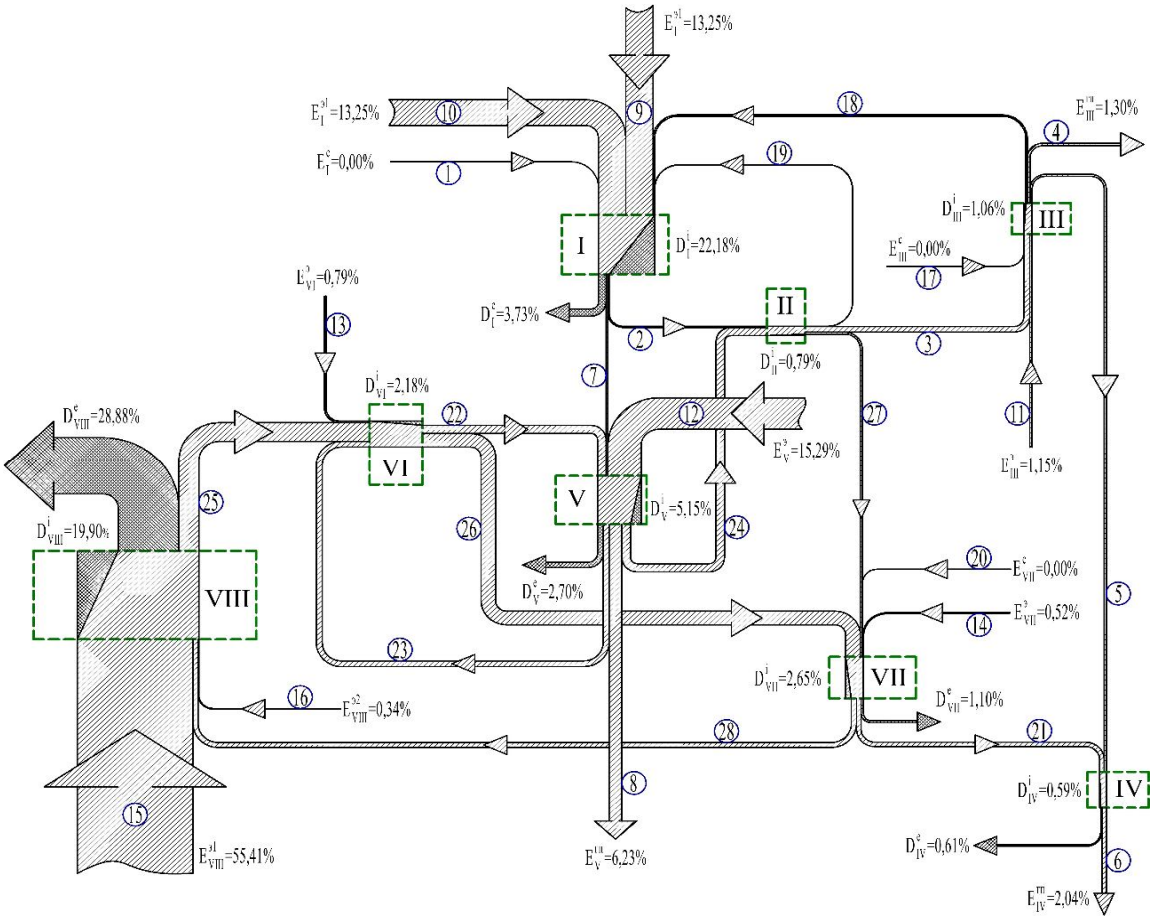

Рис. 3. Диаграмма Грассмана–Шаргута для исследуемой технологии (I-VIII – номера контрольных поверхностей)

Для эксергетических диаграмм Грассмана–Шаргута [9] (рис. 3) в качестве абсолютного эксергетического параметра выбрана удельная эксергия *e*, кДж/кг.

Наименования потоков на диаграмме Грассмана–Шаргута исследуемой линии представлены в виде таблицы, где потоки, входящие в эксергетический баланс, выделены жирным шрифтом.

Позиция на диаграмме	Наименование потока
1	**Измельченная масса зеленых растений**
2	Зеленый сок
3	Зеленый сок нагретый
4	**Пермеат на технологические нужды**
5	Концентрат
6	**Порошкообразный протеиновый концентрат**
7	Травяной жом
8	**Сухой травяной жом**
9	**Привод шнекового пресса**
10	**Привод разрыхлителя**
11	**Приводы насосов**
12	**Привод вибросушилки**
13	**Привод вентилятора**
14	**Привод вентилятора**
15	**ТЭНы**
16	**Привод насоса**
17	**Раствор антиокислителя**
18	Осадок микрофильтрации
19	Осадок фильтрации
20	**Атмосферный воздух**
21	Нагретый воздух
22	Перегретый пар
23	Перегретый пар рециркулирующий
24	Перегретый пар вторичный
25	Греющий пар
26	Греющий пар вторичный
27	Конденсат теплый
28	Конденсат греющего пара

Результат эксергетического КПД разработанной технологии – 9,64%, что на 3,82% превышает показатель существующей технологии (прототипа) [4]. Проведенные исследования подтверждают повышение степени термодинамического совершенства системы за счет снижения энергозатрат в результате использования контуров рециркуляции по теплоносителям (греющий и перегретый пар) и сушки сырья в «щадящих» температурных режимах, исключения дополнительных затрат энергии на вакуум-выпарной аппарат вследствие концентрирования сока в менее энергоемких микро- и ультрафильтрационных модулях.

Заключение

Предлагаемая технология комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений [5] по сравнению с известным способом [4] позволяет:

- производить сухой жом и ПЗК, сохраняя полезные вещества в результате сушки в «щадящих» температурных режимах;
- применять контуры рециркуляции по отработанному перегретому пару и конденсату греющего пара с увеличением экологичности и энергоэффективности технологии;
- снизить энергоемкость применяемой технологии за счет концентрирования сока с применением микро- и ультрафильтрационных модулей.

Библиографический список

1. Бродянский В.М. Эксергетический анализ и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
2. Дерканосова А.А. Перспективы использования протеинового зеленого концентрата (ПЗК) в кормопроизводстве / А.А. Дерканосова, А.А. Коротаева // Наука и технологии в современном обществе : матер. Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 частях. – Уфа : РИО ИЦИПТ, 2014. – Ч. 1. – С. 142-143.
3. Калашников Г.В. Ресурсосберегающие технологии пищевых концентратов / Г.В. Калашников, А.Н. Остриков. – Воронеж : Изд-во Воронежского университета, 2001. – 356 с.
4. Кудряшов В.А. Производство перспективных лечебно-профилактических белково-витаминных добавок из листостебельной биомассы по сквозной аграрно-пищевой технологии / В.А. Кудряшов // Инновационные технологии в пищевой промышленности : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф., 7-8 октября 2010 г., г. Минск / ред. колл.: В.Г. Гусаков и др. – Минск : РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», 2010. – С. 236-239.
5. Пат. 2528027 Российская Федерация, МПК A23K 1/14. Способ комплексной переработки протеинсодержащих зеленых растений / Шевцов А.А., Дранников А.В., Дерканосова А.А., Ключников А.И., Коротаева А. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ВГУИТ. – № 2013117658/13; заявл. 16.04.13; опубл. 10.09.14, Бюл. № 25. – 6 с.
6. Процессы и аппараты пищевых производств. Кн. 1 / под общ. ред. А.Н. Острикова. – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2007. – 704 с.
7. Сажин Б.С. Эксергетический метод в химической технологии / Б.С. Сажин, А.П. Булеков. – Москва : Химия, 1992. – 208 с.
8. Техника и технология тепловых и механических процессов в задачах энергосбережения на комбикормовых заводах / под общ. ред. Л.И. Лыткиной. – Воронеж : ВГТА, 2011. – 304 с.
9. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – Москва : Энергия, 1968. –284 с.
10. Эксергетический анализ технологических линий по производству функциональных продуктов / В.Н. Василенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2010. – № 1. – С. 19-24.
11. Янтовский Е.И. Потоки энергии и эксергии / Е.И. Янтовский. – Москва : Наука, 1988. – 144 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Принадлежность к организации

Александр Анатольевич Щевцов – доктор технических наук, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(920) 213-11-36, E-mail: shevalol@rambler.ru.

Алексей Викторович Дранников – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств, декан факультета пищевых машин и автоматов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(908) 130-62-25, E-mail: drannikov@list.ru.

Анна Александровна Дерканосова – кандидат технических наук, доцент кафедры сервиса и ресторанного бизнеса, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(920) 432-16-57, E-mail: aa-derk@yandex.ru.

Алиса Александровна Коротаева – аспирант кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(920) 212-82-28, E-mail: alisa-korotaeva@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 10.10.2016 Дата принятия к печати 27.10.2016

AUTHOR CREDENTIALS
Affiliations

Alexandr A. Shevtsov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Bakery Technology, Confectionery, Pasta and Grain Processing Industries, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(920) 213-11-36, E-mail: shevalol@rambler.ru.

Aleksey V. Drannikov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Machinery and Equipment for Food Production, Dean of the Faculty of Food Machines and Equipment, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(908) 130-62-25, E-mail: drannikov@list.ru.

Anna A. Derkanosova – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Service and Restaurant Business, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(920) 432-16-57, E-mail: aa-derk@yandex.ru.

Alisa A. Korotaeva – Post-graduate Student, the Dept. of Bakery Technology, Confectionery, Pasta and Grain Processing Industries, Voronezh State University of Engineering Technologies, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(920) 212-82-28, E-mail: alisa-korotaeva@mail.ru.

Date of receipt 10.10.2016 Date of admittance 27.10.2016