

УДК 66.047–912

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ В АКТИВНОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И ЕЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

<sup>1</sup>Малибеков А.А., <sup>2</sup>Шахов С.В., <sup>3</sup>Глотова И.А., <sup>2</sup>Груздов П.В.

<sup>1</sup>Таразский государственный университет имени М.Х. Дулати, Тараз,  
e-mail: gruzdov90100@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I»,  
Воронеж

Рассмотрена конструкция установки для дегидратации мелкодисперсных сыпучих продуктов в активном гидродинамическом режиме. Охарактеризованы конструктивные особенности сушильной установки для управляемой дегидратации мелкодисперсных сыпучих продуктов, на примере семян рапса, с применением активного гидродинамического режима. Представлена термодинамическая оценка функционирования ее теплотехнологической системы. Объектом исследований являлась теплотехническая система теплообменных и массообменных процессов при управляемой дегидратации биополимерных систем семян рапса, имеющих структуру коллоидного капиллярно-пористого биоматериала. Проведена оценка термодинамического совершенства теплотехнической системы тепломассообменных процессов при обезвоживании семян рапса в активном гидродинамическом режиме. Расчетным путем установлены эксергетические потери процесса удаления влаги из семян рапса. Результаты показывают, что наибольшие потери эксергии возникают из-за необратимости процессов удаления влаги при фазовом превращении, а также из-за падения давления в аппарате. Определение эксергетических и тепловых потоков и их анализ для процесса обезвоживания семян рапса в активном гидродинамическом режиме являются важным этапом создания ресурсосберегающей системы процессов получения биопродуктов с заданным уровнем гидратации биополимерных систем в их составе.

**Ключевые слова:** эксергетический анализ, активный гидромеханический режим, дегидратация, рапс

## CONSTRUCTIVE FEATURES OF INSTALLATION FOR DECOMPOSITION OF FINE-FOLDED BULBS IN THE ACTIVE HYDRODYNAMIC MODE AND ITS EXERGETIC ANALYSIS

<sup>1</sup>Malibekov A.A., <sup>2</sup>Shakhov S.V., <sup>3</sup>Glotova I.A., <sup>2</sup>Gruzdov P.V., <sup>2</sup>Zaporozhskiy A.A.

<sup>1</sup>M. Kh. Dulaty Taraz State University, Taraz, e-mail: gruzdov90100@mail.ru;

<sup>2</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh;

<sup>3</sup>Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Grate, Voronezh

The design of the installation for the dehydration of fine granular products in the active hydrodynamic mode is considered. The design features of the drying unit for controlled dehydration of fine granular products, for example, rapeseed, using the active hydrodynamic regime are characterized. A thermodynamic evaluation of the functioning of its thermal technology system is presented. The object of research was the heat engineering system of heat exchange and mass transfer processes in the controlled dehydration of biopolymer systems of rapeseed, having the structure of a colloidal capillary-porous biomaterial. The evaluation of the thermodynamic perfection of the heat engineering system of heat and mass transfer processes during the dehydration of rapeseed in the active hydrodynamic mode is carried out. Exergy losses of the process of removing moisture from rapeseed are established by calculation. The results show that the greatest exergy losses occur due to the irreversibility of the processes of moisture removal during phase transformation, as well as due to the pressure drop in the apparatus. The determination of exergic and heat fluxes and their analysis for the process of dehydration of rapeseed seeds in the active hydrodynamic mode are an important step in creating a resource-saving system for obtaining bioproducts with a given level of hydration of biopolymer systems in their composition.

**Keywords:** exergy analysis, active hydro-mechanical mode, dehydration, rapeseed

В послеуборочной обработке семян зерновых и масличных культур важную роль играют процессы дегидратации до заданного значения влажности. Специфика структуры семян рапса как коллоидного капиллярно-пористого материала, с одной стороны, и особенности их биохимического состава, с другой, требуют более мягких режимов процесса сушки относительно зерна злаковых культур [1–3]. Анализ конструкций

сушилок, применяемых в технологии послеуборочной обработки семян, представляющих собой мелкодисперсные сыпучие продукты, показывает, что для них характерны отсутствие рециркуляционных контуров, невысокая интенсивность тепло- и массообменных процессов [1, 2, 4]. Например, сушка зерна рапса преимущественно осуществляется на шахтных прямоточных, колонковых (модульных) и башенных (бун-

кернах) зерносушилках, не позволяющих обеспечить снижение начальной влажности зерна до установленных значений за один пропуск через сушилку. Для интенсификации процессов удаления влаги из семян рапса, сафлора, киноа, амаранта, являющихся коллоидными телами с капиллярно-пористой структурой, целесообразно и эффективно использовать конструктивные подходы, позволяющие реализовать активный гидродинамический режим [4].

Цель работы: анализ конструктивных особенностей сушильной установки для управляемой дегидратации мелкодисперсных сыпучих продуктов, на примере семян рапса, с применением активного гидродинамического режима, и термодинамическая оценка функционирования ее теплоэнергетической системы.

Объект и методика исследования. Объектом исследований является теплотехническая система теплообменных и массообменных процессов при управляемой дегидратации биополимерных систем семян рапса, имеющих структуру капиллярно-пористого биоматериала.

В качестве теплотехнической системы использовали оригинальную установку для тепло- и массообменной обработки мелкодисперсных сыпучих продуктов, функционирующую в активном гидродинамическом режиме. Схема установки с основными конструктивными элементами представлена на рис. 1. Преимущества установки по сравнению с аналогичными по назначению единицами оборудования обеспечиваются за счет следующих конструктивных особенностей:

- применение в качестве оборудования для предварительной подсушки продукта транспортирующего шнека с рубашкой обеспечивает предварительный подогрев, частичное снижение влажности продукта, что обеспечивает гарантированное удаление влаги за счет интенсификации внутреннего теплообмена;

- установка на выходе из массообменного аппарата последовательно дымососа, циклона и фильтра обеспечивает эффективную и надежную очистку отработанного теплоносителя;

- соединение выходного канала мембранного генератора для обедненной кислородом воздушной смеси с инжектором обеспечивает интенсификацию процесса влагоудаления;

- соединение выходного канала мембранного генератора для обогащенного кислородом воздуха с горелкой газового теплогенератора обеспечивает эффективность и интенсификацию процесса горения.

С целью термодинамической оценки функционирования теплотехнической системы сушильной установки был применен эксергетический анализ [4, 5].

Каждый элемент системы рассматривается как самостоятельная термодинамическая система. Эффективность работы каждого элемента системы оценивается путём сравнения эксергии на входе в этот элемент с потерей в нём работоспособности, т.е. с потерей эксергии в результате необратимых процессов, протекающих в этом элементе, и обусловленных как внутренней, так и внешней необратимостью. Это даёт информацию о возможности повышения совершенства во всех элементах и позволяет создавать наиболее совершенную систему. Это является основной целью эксергетического метода анализа.

Анализируемая система (рис. 1) характеризуется материальным, тепловым и эксергетическим балансами.

Методика расчета эксергетических потерь процесса удаления влаги из семян рапса (выпаривания) состоит из теплового и эксергетического баланса контрольной поверхности. Эффективность теплообменных и массообменных процессов оценивается анализом рассматриваемых материальных потоков с помощью эксергии на основе второго закона термодинамики [4, 5]. Эксергия материальных и энергетических потоков, а также внутренние и внешние эксергетические потери составили эксергетический баланс системы.

Простейшим методом термодинамического анализа энерготехнологических систем (ЭТС) является энергетический, основанный на первом законе термодинамики. Этот метод позволяет оценить потери энергии в ЭТС и в её отдельных элементах, а также выявить элементы ЭТС, процессы в которых протекают с наибольшими потерями.

Существенным недостатком энергетического метода является то, что в нём не учитывается ценность различного вида энергии, т.е. их практическая пригодность, что неверно с точки зрения второго закона термодинамики. В реально протекающих процессах происходят потери энергии на необратимость. Поэтому в настоящее время применяются два метода термодинамического анализа систем, учитывающих необратимость термодинамических процессов: энтропийный (метод циклов) и эксергетический. Оба метода основаны на втором законе термодинамики и по существу решают одну и ту же задачу определения потерь работоспособности, потерь на необратимость реально протекающих процессов.

Однако на базе эксергетического метода можно более тщательно провести термодинамический анализ ЭТС и найти наиболее эффективные пути уменьшения затрат ресурсов при одновременном повышении технологических показателей.

Эксергетический метод анализа основан на широком использовании эксергии, представляющей собой максимальную работу, которую вещество может совершить в обратимом процессе с окружающей средой в качестве источника теплоты, если в конце

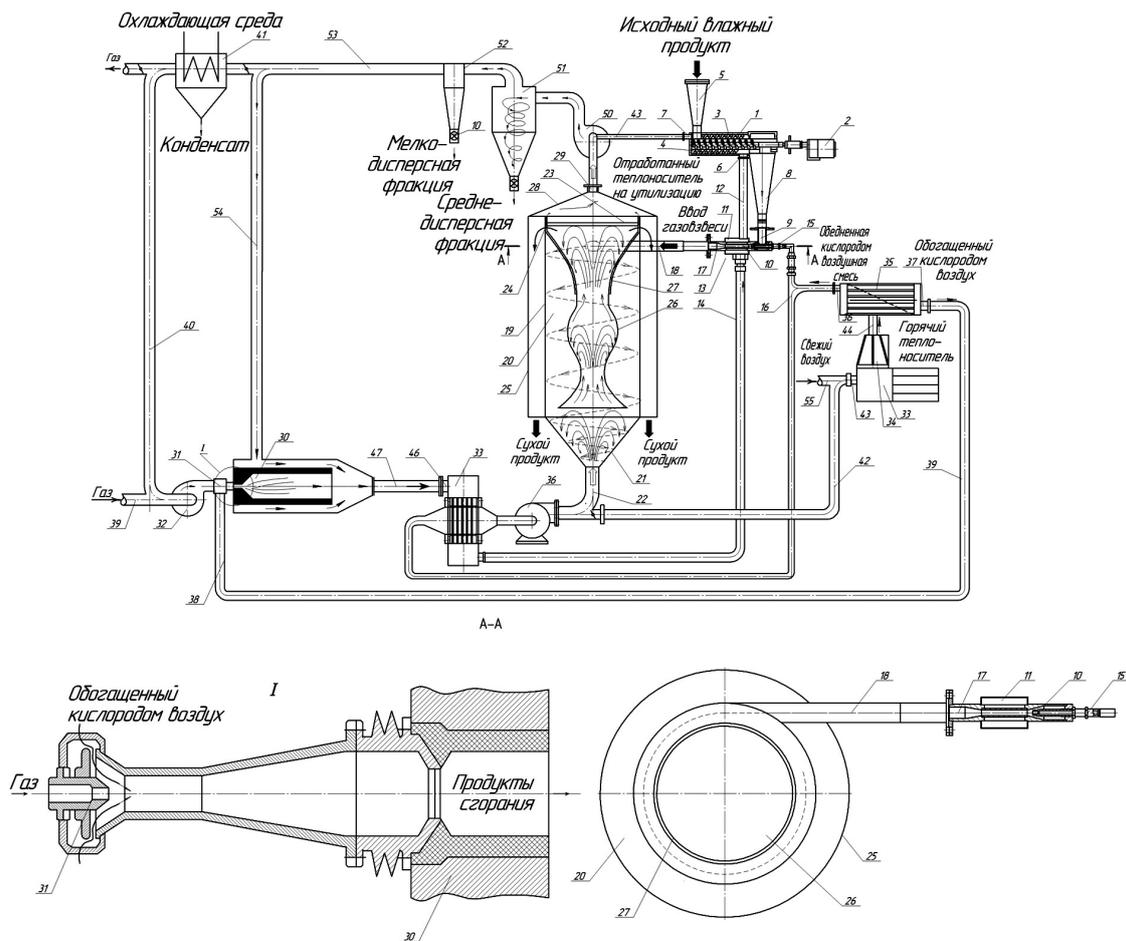


Рис. 1. Установка для тепло-массообменной обработки мелкодисперсных сыпучих продуктов: 1 – транспортирующий шнек, 2 – привод транспортирующего шнека, 3 – рубашка, 4 – шнековая навивка, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 15, 18, 21, 22, 28, 29, 36, 37, 43 – патрубки, 10 – инжектор, 11 – греющая рубашка инжектора, 12, 14, 16, 38, 39, 40, 42, 44, 46, 47, 48, 49, 53, 54, 55 – трубопроводы, 17 – выходное сопло, 19 – цилиндрическая камера, 20 – массообменный аппарат для сушки в активном гидродинамическом режиме, 21 – конфузор, 23 – отражатель (отбойник), 24 – окна для выхода газодвеси отработанного продукта, 25 – кожух, 26 – полая вставка с чередующимися узкими и расширяющимися частями, 27 – канал регулируемого сечения для отвода паровой фазы, крышка в виде диффузора; 30 – газовый теплогенератор, 31 – горелка, 32 – газодувка, 33 – калорифер, 34 – компрессор, 35 – мембранный генератор, 41 – конденсатор, 5 – теплообменник, калорифер; 50 – дымосос, 51 – циклон; 52 – фильтр

этого процесса все участвующие в нём виды материи переходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды [5]. Все реально протекающие процессы являются необратимыми, и в каждом случае необратимость – причина снижения совершенства процесса.

Для исследования рассматриваемой энерготехнологической системы (ЭТС) был составлен эксергетический баланс. Перед составлением баланса была выделена система, подлежащая исследованию, для чего мысленно отделяют ее от других объектов контрольной поверхностью, а эксергии всех проходящих через неё потоков вещества и энергии включаются в эксергетический баланс.

Графически эксергетический баланс обезвоживания семян рапса на установке рассматриваемой конструкции (см. рис. 1) представлен на рис. 2. Основные потери эксергии обусловлены необратимостью процессов влагоудаления вследствие фазового превращения влаги, перепада давления в аппарате с активным гидродинамическим режимом. В процессе влагоудаления из семян рапса отводится пар и конденсат, составляющий в тепловом балансе 90,13%, а в эксергетическом – около 75,35%. Суммарные потери эксергии в контрольной поверхности при влагоудалении из семян рапса в аппарате с активным гидродинамическим режимом составляют 17,4%.

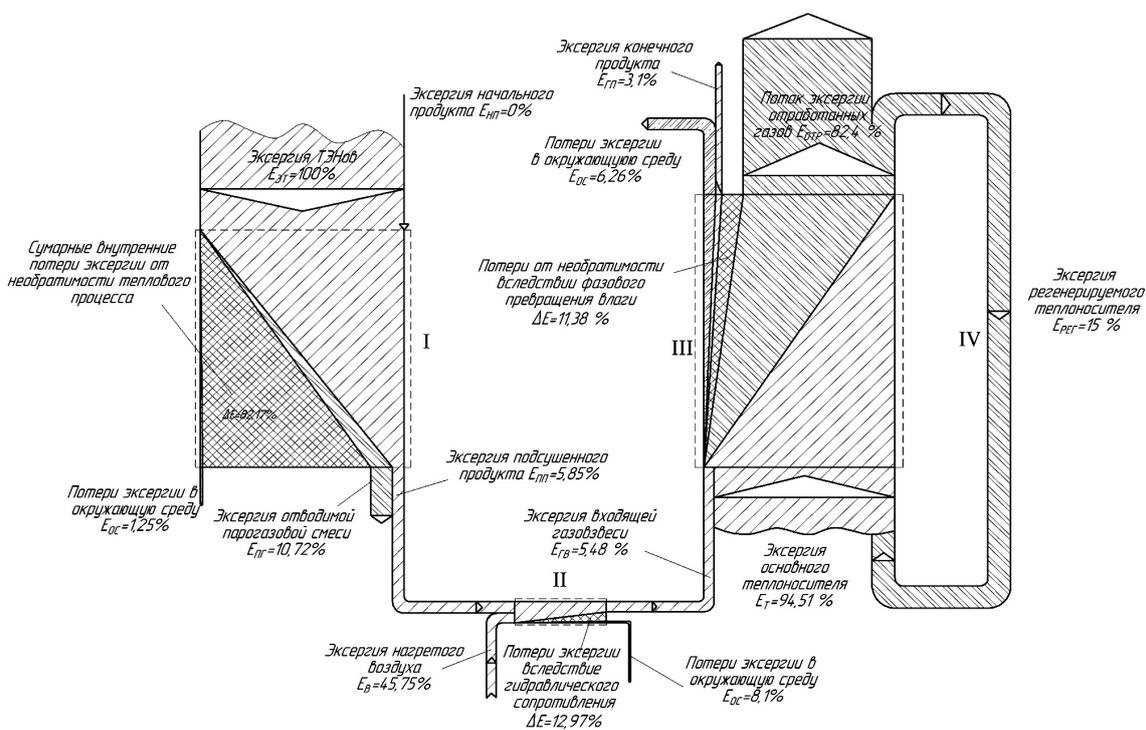


Рис. 2. Диаграмма эксергетического анализа обезвоживания семян рапса:  
I – кондуктивная подсушка сыпучих продуктов; II – ввод сыпучего материала в аппарат;  
III – сушка семян в основном аппарате; IV – регенерация теплоносителя

### Выводы

При послеуборочной обработке семян зерновых и масличных культур необходимо решать задачу организации энергоэффективного процесса их дегидратации до заданной влажности. Для оценки термодинамического совершенства теплотехнической системы тепломассообменных процессов при обезвоживании семян рапса в активном гидродинамическом режиме был использован эксергетический анализ. Расчетным путем установлены эксергетические потери процесса удаления влаги из семян рапса, которые рассматриваются как совокупность биополимеров в структуре коллоидного капиллярно-пористого материала.

Определены материальные потоки контрольной поверхности влагоудаления, поскольку все эксергетические превращения осуществляются при взаимодействии этих потоков. Установка с рециркуляцией теплоносителя также является энергетически и эксергетически эффективной для процессов дегидратации при послеуборочной обработке таких мелкодисперсных сыпучих объектов, как семена сафлора, амаранта, имеющих многокомпонентный состав биополимеров.

Определение эксергетических и тепловых потоков и их анализ для процесса обезвоживания семян рапса в активном гидродинамическом режиме являются важным этапом создания ресурсосберегающей системы процессов получения биопродуктов с заданным уровнем гидратации биополимерных систем в их составе.

### Список литературы

1. Голубкович А.В. Сушка рапса в карусельной сушилке СЗК-8 / А.В. Голубкович, А.П. Орехов, С.А. Павлов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2009. – № 3. – С. 36–40.
2. Сушка семян рапса в карусельной сушилке при осциллирующем режиме / А.В. Голубкович, С.А. Павлов, А.П. Орехов, В.П. Козлов // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 4. – С. 25–28.
3. Тенденции и инновации при производстве и переработке масличных культур / Е.З. Матеев, Н.В. Королькова, В.Е. Константинов, А.Н. Кубасова, И.А. Глотова, С.В. Шахов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3 (54). – С. 123–131.
4. Сравнительная энергетическая оценка способов сушки зерна с применением тепловых насосов методом эксергетического анализа / А.А. Шевцов, Д.А. Бритиков, Е.А. Острикова, А.В. Пономарев // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2012. – № 4(328). – С. 88–92.
5. Плотников В.В. Эксергетический метод в системном анализе химико-технологических схем / В.В. Плотников, О.Г. Петрова // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 4. – С. 27–29.