



УДК 66.047.75

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУШИЛОК НА ОСНОВЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА



EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF DRYERS BASED ON EXERGY ANALYSIS

Шурак Антон Анатольевич

магистрант кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет
a-shurak2@mail.ru

Шагарова Анжелика Анатольевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет
shagarang@mail.ru

Аннотация. В работе приводится описание энергоэффективной сушилки с псевдоожиженным слоем и эксергетический анализ предлагаемой конструкции в сравнении с аппаратами, используемыми в промышленности.

Ключевые слова: псевдоожиженный слой, сушка, энергоэффективность, эксергетический анализ.

Shurak Anton Anatolyevich

Master Student of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University
a-shurak2@mail.ru

Shagarova Anzhelika Anatolevna

PhD, Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University
shagarang@mail.ru

Annotation. The work describes an energy-efficient fluidized-bed dryer and an exergy analysis of the proposed design in comparison with devices used in industry.

Keywords: fluidized bed, drying, energy efficiency, exergy analysis.

Аппараты с псевдоожиженным слоем (ПС) находят применение в различных технологических процессах [1–3]:

- механических (перемешивание, гранулирование, транспортировка твердых сыпучих материалов и др.);
- массообменных (сушка в кипящем слое, сушка суспензий на твердых инертных телах и др.)
- химических (катализ, обжиг и др.).

Принципиальные схемы таких аппаратов, широко применяемых на производствах, представлены на рисунке 1. В указанных аппаратах первая зона предназначена для проведения процессов, а вторая – для осаждения уносимых газовым потоком частиц.

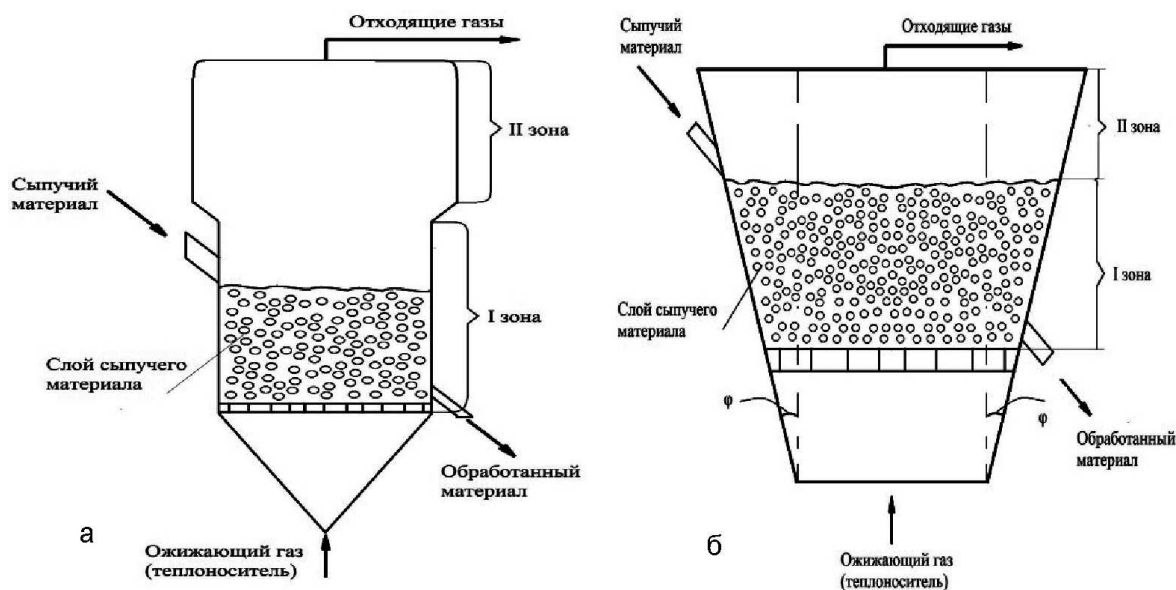


Рисунок 1 – Принципиальные схемы аппаратов с псевдоожиженным слоем:
а – цилиндрический; б – конический



Для достижения более однородного «кипения» используют разделение объема псевдооживленного слоя на отдельные камеры с вертикальными перегородками.

Примером такого технического решения может служить сушилка Турбо-фло [3].

К недостаткам таких аппаратов можно отнести повышенный расход энергии, пылеобразование материала и пр. Поэтому разработка энергоэффективных аппаратов для проведения процесса сушки в ПС является актуальной задачей.

На основе результатов моделирования работы сушилки представленных в работе [4] разработана конструкция установки для создания псевдооживленного /«кипящего»/ слоя дисперсных частиц, в восходящем газовом потоке [5]. С ее помощью возможно проведение химических реакций, сушки и других массообменных процессов между твердыми частицами и газовой средой. Конструкция модели предполагает обеспечение более однородного псевдооживления за счет уменьшения размеров газовых пузырей и равномерном их распределении по объему слоя. Кроме того, обеспечивается значительное снижение уноса частиц с отработанным газом. Эти задачи достигаются размещением в объеме слоя вертикальных труб, по которым удаляется из аппарата псевдооживляющий газ, а на входе газа в вертикальные трубы размещены колпачки, препятствующие попаданию частиц в трубы.

Каждый колпачок снабжен подвижным фильтрующим элементом, представляющим собой каркас, установленный соосно трубе, имеющий возможность совершать возвратно-поступательные движения и выполненный из витой цилиндрической пружины, на которой закреплен фильтровальный материал, при этом на нижнем конце фильтрующего элемента закреплен диск с центральным отверстием.

Схема установки представлена на рисунке 2.

Установка работает следующим образом. Газовый сушильный агент поступает в конусно-цилиндрическую дутьевую камеру 2, далее через газораспределительную решетку 1 попадает в цилиндрическую рабочую камеру 3.

Дисперсный материал, подлежащий обработке, подается питателем 10 в цилиндрическую рабочую камеру 3, где происходит массоперенос влаги от поверхности высушиваемых частиц к газовому сушильному агенту.

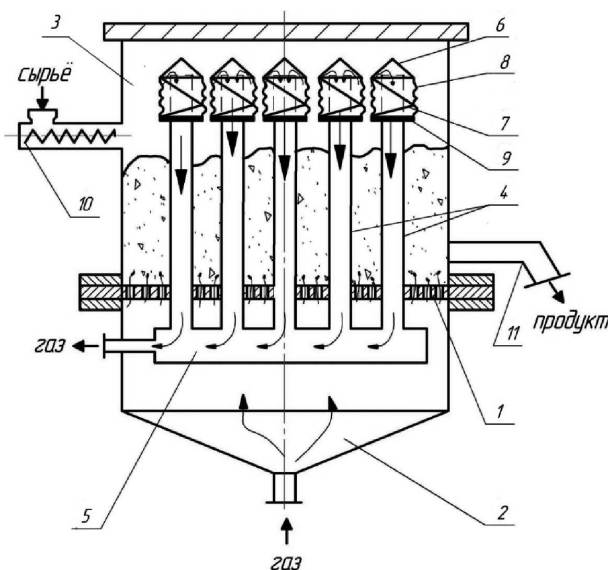


Рисунок 2 – Установка для обработки сыпучих тел в псевдооживленном слое: 1 – газораспределительная решетка; 2 – дутьевая камера; 3 – рабочая камера; 4 – вертикальные трубы; 5 – коллектор; 6 – колпачки; 7 – пружина; 8 – фильтровальный материал; 9 – диск; 10 – питатель; 11 – патрубок

Запыленный газ фильтруется через поры фильтровального материала 8, а частицы тонкой фракции дисперсионной фазы накапливаются около пор фильтровального материала 8.

Фильтровальный материал 8 фильтрующего элемента совершает возвратно-поступательные движения за счет колебаний упругой витой пружины 7, вызванных действием оживляющего агента, при этом происходит самоочистка фильтровального материала 8.

Установленный с минимальным зазором относительно наружной поверхности трубы 4 диск 9 фильтрующего элемента препятствует уносу мелких частиц твердой фазы через зазор, образованный стенкой трубы 4 и фильтрующим элементом.

Отработанный газовый сушильный агент поступает внутрь труб 4 через поры фильтровального материала 8 и далее через открытые нижние концы труб 4 попадает в общий коллектор 5, из которого выводится отработанный газ. Готовый продукт выводится из рабочей камеры 3 через патрубок 11.



Такое техническое решение позволяет снизить габаритные размеры сушильной камеры, обеспечить однородность «кипения», повысить эффективность разделения дисперсной и газовой фаз за счет установки фильтрующего элемента, препятствующего уносу мелкой дисперсной фазы.

Для определения энергетической эффективности предлагаемой конструкции необходимо оценить уровень использования энергетических ресурсов в технологической схеме. Для этого применяют эксергетический метод термодинамического анализа. Эксергетический анализ является относительно новым методом термодинамической оценки совершенства технологических систем и базируется на понятии эксергия при исследовании технических процессов [6].

Эксергетический анализ выполнялся по методике, в соответствии с которой технологическая система условно отделена от окружающей среды, а внутри системы с учетом протекающих теплообменных процессов выделены следующие контрольные поверхности, представленные на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема технологического процесса: I – нагревание воздуха, II – сушка, III – фильтрация

Эксергия в каждой контрольной поверхности рассматриваемой технологической системы, состоящей из классических необратимых процессов, определяется как:

$$\sum E_B = \sum E_{\text{Э}} + \sum D, \tag{1}$$

где $\sum E_B$ – суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков; $\sum E_{\text{Э}}$ – суммарная эксергия выводимых из контрольной поверхности материальных и энергетических потоков; $\sum D = T_0 \cdot \Delta S$ – суммарные эксергетические потери (уравнение Гюи-Стодолы).

Оценку термодинамического совершенства технологической системы процесса сушки производили по эксергетическому КПД, исходя из значения эксергии готовой продукции:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^{\text{э}}}{\sum_{i=1}^n e_i^{\text{з}}} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^{\text{з}} - \sum_{j=1}^m D_j}{\sum_{i=1}^n e_i^{\text{з}}}, \tag{2}$$

где $\sum e_i^{\text{э}}$ – суммарная эксергия ПВХ, кДж/кг; $\sum e_i^{\text{з}}$ – суммарная затраченная удельная эксергия, кДж/кг; $\sum D_j$ – суммарные эксергетические потери кДж/кг.

Таблица 1 – Эксергетический баланс процесса сушки суперфосфата с использованием трубы-сушилки

Контрольная поверхность	Подвод эксергии				Отвод и потеря эксергии			
	Наименование	Обозначение	E, МДж/ч	% суммарной эксергии	Наименование	Обозначение	E, МДж/ч	% суммарной эксергии
I	Нагревание воздуха	E ₁	1183	100	Внешние потери	E _{D1}	238	20,12
II	Сушка				Внешние потери	E _{D2}	182,8	15,45
					Внутренние потери	E _{D 2}	511,2	43,22
III	Фильтрация				Внешние потери	E _{D3}	204,7	17,3
					Готовый продукт	E ^э	46,3	3,91
Итого:		–	1183	100	–	–	1183	100
Эксергетический КПД	3,91 %							



Эксергия материальных и энергетических потоков, а также внутренние и внешние эксергитические потери составили эксергетический баланс технологической системы процесса сушки суперфосфата с использованием трубы-сушилки (табл. 1) и предлагаемой конструкции энергоэффективной сушилки (табл. 2).

Таблица 2 – Эксергетический баланс процесса сушки суперфосфата с использованием энергоэффективной сушилки

Контрольная поверхность	Подвод эксергии				Отвод и потеря эксергии			
	Наименование	Обозначение	Е, МДж/ч	% суммарной эксергии	Наименование	Обозначение	Е, МДж/ч	% суммарной эксергии
I	Нагревание воздуха	E_1^I	1183	100	Внешние потери	E_{D1}	238	20,12
II	Сушка				Внешние потери	E_{D2}	161	13,61
					Внутренние потери	$E_{D1/2}$	511,2	43,22
III	Фильтрация	Готовый продукт	E_{II}^{\ominus}	72,5	6,13			
		Внешние потери	E_{D3}	182,7	15,45			
	Готовый продукт	E_{III}^{\ominus}	17,6	1,47				
Итого:		–	1183	100	–	–	1183	100
Эксергетический КПД		7,6 %						

При построении эксергетических диаграмм Гассмана-Шаргута (рис. 4) в качестве абсолютного эксергетического параметра выбрана эксергетическая мощность E , МДж/ч.

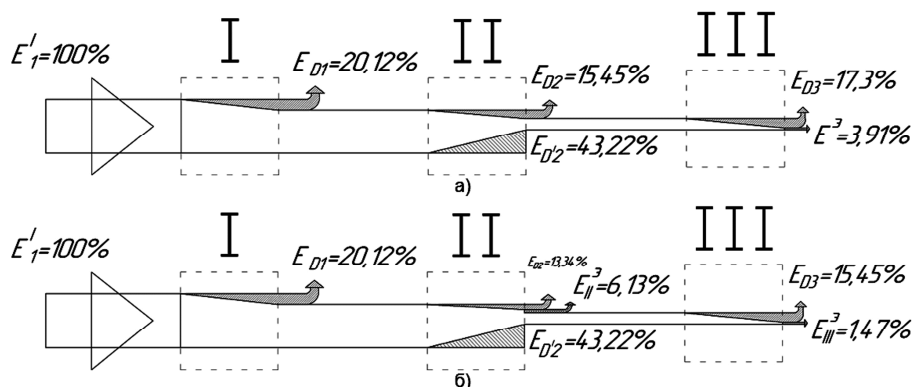


Рисунок 4 – Диаграмма Гассмана-Шаргута для трубы сушилки(а) и энергоэффективной сушилки (б), I–III номера контрольных поверхностей

Сравнительная оценка рассчитанных по формуле (2) эксергетических КПД показывает, что КПД для разработанной конструкции энергоэффективной сушилки составляет 7,6 %, что на 3,69 % выше, чем в применяемой технологии с использованием трубы-сушилки. Это говорит о повышении степени термодинамического совершенства системы и на основании этого можно сделать вывод, что совмещение процессов сушки и улавливания дает возможность снизить энерго- и ресурсозатраты на улавливаемое в технологической линии циклоны и фильтры для санитарной очистки отработанного сушильного агента перед выбросом в атмосферу и таким образом существенно уменьшить общие энергетические затраты на сушку.

Литература:

1. Расчет аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л. : Химия, 1986. – 352 с.
2. Муштаев В.И., Тимонин А.С., Лебедев В.Я. Конструирование и расчёт аппаратов со взвешенным слоем. – М. : Химия, 1991. – 344 с.
3. Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов. – М. : Химия, 1988. – 352 с.
4. Исследование влияния геометрических характеристик аппаратов с псевдооживленным слоем на технологические параметры процесса сушки / А.А. Шурак, А.А. Шагарова, Тхи Хонг Ньонг Нгуен // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ–32) : сб. тр. XXXII междунар. науч. конф. В 12 т. Т. 1 / под общ. ред. А.А. Большакова ; Санкт-Петербургский гос. технологический ин-т (техн. ун-т), Санкт-Петербургский ин-т инфор-



матики и автоматизации РАН, Санкт-Петербургский политехнический ун-т Петра Великого, Саратовский гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А. [и др.]. – СПб., 2019. – С. 21–24.

5. П.м. 186511 Российская Федерация, МПК В01J 8/24, F26B 3/08, В01D 46/02 Установка для обработки сыпучих тел в псевдооживленном слое / А.А. Шагарова и др.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – № 2018131799; заявл. 03.09.18; опубл. 22.01.2019, бюл. № 3.

6. Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии – М. : Химия, 1992. – 208 с.

References:

1. Calculation of fluidized bed apparatus: reference book / ed. I.P. Mukhlenova, B.S. Sazhin, V.F. Frolov. – L. : Chemistry, 1986. – 352 p.

2. Mushtaev V.I., Timonin A.C., Lebedev V.Ya. Design and calculation of devices with a weighted layer. – M. : Chemistry, 1991. – 344 p.

3. Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. Drying of dispersed materials. – M. : Chemistry, 1988. – 352 p.

4. Investigation of the influence of the geometric characteristics of fluidized bed apparatuses on the technological parameters of the drying process / A.A. Shurak, A.A. Shagarova, Thi Hong Nying Nguyen // Mathematical Methods in Engineering and Technology (ММТТ – 32): Sat. tr XXXII Int. scientific conf. In 12 t. T. 1 / under the total. ed. A.A. Bolshakova; St. Petersburg state. Technological Institute (techn. University), St. Petersburg Institute of Informatics and Automation RAS, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, Saratov State. tech. un-t them. Gagarina Yu.A. [et al.]. – St. Petersburg, 2019. – P. 21–24.

5. Pm 186511 Russian Federation, IPC B01J 8/24, F26B 3/08, B01D 46/02 Installation for processing bulk solids in a fluidized bed / A.A. Shagarova and others; Applicant and patent holder: FSBEI HE VolgSTU. – № 2018131799; declared 09/03/18; publ. 01/22/2019, bull. № 3.

6. Sazhin B.S., Bulekov A.P. Exergetic method in chemical technology. – M. : Chemistry, 1992. – 208 p.