

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ТОМ 36

6



2014

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

Vol. 36

№ 6 2014

ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА

THEMES OF JOURNAL

- | | |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Тепло- и массообменные процессы | <input checked="" type="checkbox"/> Heat and Mass Exchange Processes |
| <input checked="" type="checkbox"/> Тепло- и массообменные аппараты | <input checked="" type="checkbox"/> Heat and Mass Exchange Apparatus |
| <input checked="" type="checkbox"/> Теория и практика сушки | <input checked="" type="checkbox"/> Theory and Practice of Drying |
| <input type="checkbox"/> Теплоэнергетические установки | <input type="checkbox"/> Heat Power Units |
| <input type="checkbox"/> Использование и сжигание топлива | <input type="checkbox"/> Fuel Utilization and Burning |
| <input checked="" type="checkbox"/> Атомная энергетика | <input checked="" type="checkbox"/> Nuclear Power |
| <input checked="" type="checkbox"/> Коммунальная и промышленная теплоэнергетика | <input checked="" type="checkbox"/> District and Industrial Heat Power |
| <input checked="" type="checkbox"/> Нетрадиционная энергетика | <input checked="" type="checkbox"/> Nontraditional Energy Sources |
| <input type="checkbox"/> Энергосбережение | <input type="checkbox"/> Energy Saving |
| <input type="checkbox"/> Энергоэффективность зданий. Строительная теплофизика | <input type="checkbox"/> Energy Efficiency in Buildings. Building Thermophysics |
| <input type="checkbox"/> Экономическая эффективность энергетических проектов | <input type="checkbox"/> Economic Efficiency of Power Projects |
| <input type="checkbox"/> Термодинамика и процессы переноса | <input type="checkbox"/> Thermodynamics and Transport Phenomena |
| <input checked="" type="checkbox"/> Экология теплоэнергетических объектов | <input checked="" type="checkbox"/> Ecology of Heat-Power Generation |
| <input type="checkbox"/> Измерение, контроль, автоматизация тепловых процессов | <input type="checkbox"/> Measurement, Control, Automation of Thermal Processes |
-
-

Журнал «Промышленная теплотехника» входит в перечень научных профильных изданий ВАК Украины, реферируется в общегосударственной реферативной базе данных «УКРАЇНІКА НАУКОВА» (реферативный журнал «Джерело»), в реферативном журнале «ВИНИТИ РАН» (Российская Федерация), представлен в подписном каталоге «ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY» американского издательства Bowker, в базе данных «GEOREF» Американского Института Наук о Земле.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Институт технической теплофизики НАН Украины
2а, ул. Желябова, 03680, Киев, Украина
тел.: (38 044) 456-48-67
E-mail: shmorgun@ittf.kiev.ua, ihe@nas.gov.ua
Свидетельство о государственной регистрации
КВ № 2321 от 05.12.96 г.

Печатается по решению Ученого совета
Института технической теплофизики НАН Украины

© Институт технической теплофизики
НАН Украины

ADDRESS:

National Academy of Sciences of Ukraine
Institute of Engineering Thermophysics
2a, Zhelyabov str., 03680, Kyiv, Ukraine
tel.: (38 044) 456-48-67

E-mail: shmorgun@ittf.kiev.ua, ihe@nas.gov.ua

Certificate of State Registration KB No. 2321 of Dec. 5, 1996

Сдано в набор 15.11.2014. Подписано в печать 28.11.2014.
Формат 60x90/8. Бум. офс. № 1.
Гарнитура Times New Roman.
Печать офс. Усл. печ. л. 17,3.

Уч.-изд. л. 18,9. Тираж 242 экз. Заказ 4068.
Отпечатано из оригинал-макета в издательском
доме «Академперіодика» НАН Украины.

Украина, 01001, Киев-4, ул. Терещенковская, 4.
ИД «Академперіодика»

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ
НАН УКРАИНЫ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ
ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год

Основан в 1979 г.

Том 36, № 6, 2014

Главный редактор – Долинский А.А.

Редакционная коллегия:

Авраменко А.А.

Бабак В.П.

Базеев Е.Т.

Басок Б.И. – зам. главного редактора

Буляндра А.Ф.

Гелетуха Г.Г.

Дубовской С.В.

Клименко В.Н.

Круковский П.Г.

Письменный Е.Н.

Пятничко А.И.

Сигал А.И.

Снежкин Ю.Ф.

Фиалко Н.М.

Халатов А.А.

Чайка А.И.

Шморгун В.В. – ответственный секретарь

Редакционный совет:

Алексеенко С.В. (Россия)

Вацлавик Ю. (Польша)

Коверда В.П. (Россия)

Коновалов В.И. (Россия)

Люриг Х. (Германия)

Маджамдар А. (Канада)

Мартыненко О.Г. (Беларусь)

Матеи И. (Румыния)

Мизута И. (Япония)

Минг-Шан-Жу (Китай)

Накоряков В.Е. (Россия)

Сайред Н. (Великобритания)

Тоттен Дж. Е. (США)

КОММУНАЛЬНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Долинський А.А., Сігал О.І., Кучин Г.П., Корінчук К.О.,
Логвин В.О.

Перспективи зниження витрат природного газу в системах
центрального тепlopостачання України..... 5

Долинський А.А., Халатов А.А., Тимченко М.П., Сігал О.І.

Електроенергія як газозамінювальний енергоносіє в сфері
тепlopостачання 12

Снежкин Ю.Ф., Уланов Н.М.

Тепловые насосы – важнейший путь при модернизации
коммунальной теплоэнергетики..... 22

Демченко В.Г.

Організація виробництва та впровадження вітчизняних
опалювально-варочних печей..... 29

Бабак В.П., Назаренко О.О., Назаренко А.О.

Автоматизовані системи керування теплоспоживанням:
сучасний стан та перспективи впровадження..... 38

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Сінат-Радченко Д.Є., Василенко С.М., Недбайло О.М.

Тепловіддача при перехідному режимі течії рідини
у горизонтальних трубах..... 46

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Иваницкий Г.К., Гоженко Л.П.

Аналитическое исследование условий возникновения
кавитации в трубе пульсационного диспергатора
ударного типа 49

Ободович А.Н., Лымарь А.Ю.

Исследование влияния температуры на вязкость водо-
зерновой смеси при обработке в роторно-пульсационном
аппарате (РПА)..... 57

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУШКИ

Самойленко С.Н., Шутюк В.В., Василенко С.М.,
Бессараб А.С.

Методологические основы анализа энергетической эф-
фективности сушильной установки..... 62

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Наффаа Х.М., Шевелев Д.В., Балашевский А.С.

Расчетное моделирование работы системы пассивного
отвода тепла от защитной оболочки при большой течи
первого контура с полным обесточиванием энергоблока... 70

УДК 66.047:536.7-1

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Самойленко С.Н., Шутюк В.В., канд. техн. наук, Василенко С.М., докт. техн. наук, Бессараб А.С., канд. техн. наук

Национальный университет пищевых технологий, ул. Владимирская, 68, г. Киев, 01601, Украина

Сформульовано комплексну задачу аналізу енергетичної ефективності промислової сушильної установки та розроблено взаємопов'язані науковообґрунтовані засади аналізу енерговикористання, в основу яких покладено поняття термодинамічної необоротності реальних процесів. Використовуючи розроблену методику, визначено та проаналізовано джерела необоротності установки в якості споживачів палива з метою отримання інформації для розроблення послідовних етапів реконструкції.

Сформулирована комплексная задача анализа энергетической эффективности промышленной сушильной установки и разработаны взаимосвязанные научно обоснованные принципы анализа энергопотребления, в основу которых положено понятие термодинамической необратимости реальных процессов. Используя разработанную методику, определены и проанализированы источники необратимости установки в качестве потребителей топлива с целью получения информации для разработки последовательных этапов реконструкции.

The methodological framework for the analysis of industrial energy use efficiency of the dryer, which are based on the concept of thermodynamic irreversibility of real processes. Using this method, a comparative analysis of the flow of heat and entropy growth dryer for the development of successive stages of reconstruction of the installation in order to increase efficiency.

Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова: сушилка, эффективность, необратимость, термодинамика, потребление тепловой энергии.

b – удельный расход топлива на компенсацию необратимости;

B – расход топлива, кг/с;

H – энтальпия потока, Вт;

k – коэффициент пропорциональности;

Q – поток теплоты, Вт;

Q_0 – «потери» теплоты, Вт;

S – энтропия потока, Вт/К;

ΔS_{irrev} – генерация (увеличение) энтропии от необратимости процессов, Вт/К;

T – температура, К;

ω – относительный коэффициент необратимости.

Сокращения:

«ЧЭЭН» – числовой эквивалент энергетического несовершенства;

«ЧЭЭЭ» – числовой эквивалент энергетической эффективности.

Верхние индексы:

in – вход;

out – выход;

tot – общий;

кг – камера горения;

кс – камера смешивания;

с – сушильный барабан;

су – сушильная установка.

Нижние индексы:

0 – окружающая среда;

в – воздух;

ж – жом;

са – сушильный агент.

Введение

Главная цель сушки в пищевой промышленности – сохранение качества продукта. По-

нижение влагосодержания предотвращает или значительно снижает интенсивность протекания микробных и ферментативных реакций. Однако

процесс испарения воды связан со значительным расходом энергии. Так в современных сушильных установках с рекуперацией теплоты удельный расход энергии составляет 2,6...3,0 МДж/кг [1]. В своих трудах Brammer и Bridgwater утверждают, что теоретический расход энергии на испарение воды в сушильных установках составляет 2,48...2,57 МДж/кг при температуре окружающей среды 15 °С, в зависимости от относительной влажности воздуха [2].

В большинстве развитых стран от 7 до 15 % энергии, потребляемой промышленностью, используется на сушку [3–5]. Поэтому важнейшим направлением современных исследований в области сушки является разработка технологий с эффективным использованием энергии. Для этого применяют рекуперацию тепла, перегретый пар, тепловые насосы, рекомпрессию пара, а также, как инструмент усовершенствования сушильных установок – энергетический, экономический и эксергетический анализ [6–9].

Авторами разработана методика анализа необратимых тепловых потерь сушильной установки, включая этапы сжигания топлива, подготовки сушильного агента и процесса сушки. Применение данных научно-методических принципов термодинамического анализа сушильных установок в настоящем исследовании дает возможность значительно уменьшить потребление энергии для сушки продуктов топливными газами [10, 11].

Материалы и методы

Учитывая то, что все природные процессы несколько несовершенны, или, выражаясь языком термодинамики, «необратимы», реальная сушильная установка (СУ) требует больше энергии, чем это было бы возможно в так называемых «обратимых» процессах. Поскольку мера несовершенства определяет энергетическую эффективность системы, то общую стратегию анализа сформулируем так: если целью анализа поставить достижение максимальной энергетической эффективности, то способом реализации поставленной цели будет достижение минимального энергетического несовершенства.

На некоторой рациональной основе этой цели можно достичь, рассматривая СУ как сложную термодинамическую систему и применяя соот-

ветствующий потенциал термодинамики.

Результаты и обсуждение

Мера несовершенства реальных процессов определяет энергетическую эффективность системы, поэтому общую стратегию анализа сформулируем так: если целью анализа является достижение максимальной энергетической эффективности, то способом реализации поставленной цели будет достижение минимального энергетического несовершенства.

Современная термодинамика позволяет достичь этой цели, увязав энергетическую эффективность и энергетическое несовершенство (термодинамический синоним – необратимость), являющиеся абстрактными понятиями, с соответствующими числовыми эквивалентами. Условно данную связь можем записать в следующем виде:

$$\langle\langle\text{ЧЭЭЭ}\rangle\rangle = k \langle\langle\text{ЧЭЭН}\rangle\rangle. \quad (1)$$

Традиционно энергетическая эффективность характеризуется удельным расходом топлива на производство единицы продукции или переработки единицы сырья, что в нашем случае соответствует содержанию стратегии анализа и может быть применена как соответствующий числовой эквивалент.

Под числовым эквивалентом энергетического несовершенства будем понимать абсолютную характеристику необратимости, которая в термодинамике представлена ростом энтропии адиабатной системы от необратимости процессов и определяется в процессе энтропийного термодинамического анализа.

Энтропийный термодинамический анализ проводится на основе уже предварительно известных термодинамических параметров СУ, полученных либо в эксперименте, либо расчетным путем. Минимальное число параметров должно быть таким, чтобы для исследуемой СУ и любой ее части можно было составить материальный, энергетический и энтропийный балансы. В общем случае анализ сводится к операциям, которые условно можно разбить на следующие этапы.

Первым этапом является выделение термодинамической системы, которую выбирают так, чтобы можно было ее определить однозначно.

На втором этапе в зависимости от цели исследования для СУ или ее части, необходимо составить соответствующие балансы. Для анализа достаточно знать только параметры на контрольной поверхности системы.

На третьем этапе для каждой рассматриваемой части и системы в целом на основе энтропийного баланса записываются термодинамические характеристики двух видов – абсолютные и относительные. Первые дают величины генерации энтропии от необратимости различных процессов, вторые показывают степень термодинамического совершенства и относительное значение данной части необратимости по отношению к общей необратимости системы.

Для нахождения указанных характеристик разработана следующую методику аналитических и графических приемов, которая в каждом конкретном случае из всего арсенала характеристик предполагает вычисление только того минимума показателей, который необходим для решения задачи.

Далее рассмотрим анализ энергетической эффективности СУ энтропийным методом термодинамического анализа. Для анализа специально выбрана СУ простейшей конфигурации (без использования энергии вторичных энерго-ресурсов (ВЭР) и дополнительных систем) с целью выявления всех узлов несовершенства, установления степени их влияния на общую

эффективность системы и разработки комплексных мероприятий по уменьшению энергопотребления.

Так, в общем случае СУ можно рассматривать как единую открытую термодинамическую систему с соответствующими потоками вещества и энергии, которые пересекают ее границы (рис. 1). Очевидно, такое представление, не вдаваясь в подробности процессов, протекающих внутри системы, дает возможность связать подведенные к системе ТЭР с источниками их потерь.

В этом смысле, важным инструментом анализа могут стать общие балансы (ОБ) СУ. В дальнейшем под ОБ будем понимать систему уравнений энергетического и энтропийного балансов, записанные для СУ в целом. То есть, если записать замкнутую систему аналитических энергетических и энтропийных балансов для всех взаимосвязанных элементов СУ, то она упростится до единого ОБ, составляющими которого будут потоки, не завязанные внутри системы, а такие, которые связывают СУ с окружающей средой (ОС).

Согласно рис. 1 составим энергетический общий синтетический баланс (ОСБ) СУ, что по определению устанавливает равенство между поступлением и расходом энергии:

$$BQ_H^p + H_B^{kr} + H_B^{kc} + H_{ж}^{in} = H_{ж}^{out} + H_{ca}^{out} + \sum Q_0^{in}. \quad (2)$$

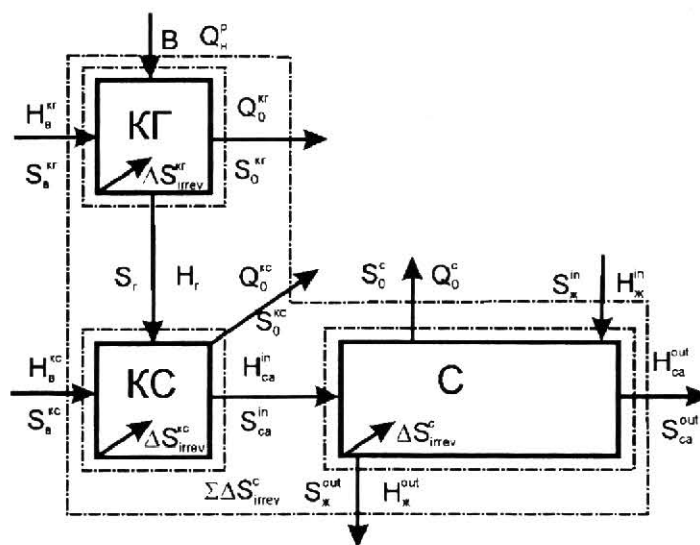


Рис. 1. Схема сушильной установки для составления энергетического и энтропийного балансов: КГ – камера сгорания топлива; КС – камера смешения; С – сушилка.

При составлении энтропийного ОБ важно учесть необратимость всех процессов СУ, что при использовании синтетического баланса сделать сложно. Поэтому с целью определения глубины и характера использования потенциалов энергии смысл имеет аналитический баланс.

Запишем энтропийный общий аналитический баланс (ОАБ) в соответствии с рис. 2, принимая во внимание следующие условия:

- применим к анализу гипотетическую термодинамическую систему – условную подсистему внешней необратимости (УПВН), где происходит падение потенциалов выходных потоков СУ к параметрам ОС;

- воспользуемся такой формой записи уравнения, когда все члены являются абсолютными величинами;

- в соответствии со свойствами энтропии, последняя может как подводиться так и выводиться с потоками теплоносителей и теплоты, а также увеличиваться от необратимости процессов; с левой стороны уравнения записываются члены, отражающие поступления энтропии в систему, справа – ее выход, причем рост энтропии от необратимости процессов необходимо понимать как дополнительный подвод энтропии;

- для упрощения анализа будем считать, что теплотворная способность топлива на начальном этапе энергетических преобразований является организованной, безэнтропийной формой

энергии.

Энтропийный ОАБ имеет вид:

$$S_B^{кг} + S_B^{кк} + S_ж^{ин} + \sum \Delta S_{итев}^{су} = S_ж^{out}(T_0) + S_{ca}^{out}(T_0) + \sum S_0, \quad (3)$$

где $\sum S_0 = \sum Q_0/T_0$ – поток энтропии, поступающей в ОС с суммарными «потерями» теплоты.

Суммарные «потери» теплоты включают «потери» теплоты с поверхности подсистем СУ ($\sum Q_0^{ин}$) и с ВЭР, которые, исходя из СУ, имеют температуру большую от температуры ОС ($\sum Q_0^{ВЭР}$) и рассчитывают из следующего уравнения:

$$\sum Q_0 = \sum Q_0^{ин} + \sum Q_0^{ВЭР}. \quad (4)$$

Если энергию входных потоков ВЭР подсистемы УПЗН обозначить как $\sum H_i(T)$, а выходных – $\sum H_i(T_0)$, то «потери» теплоты с ВЭР определяются уравнением:

$$\sum Q_0^{ВЭР} = \sum H_i(T) - \sum H_i(T_0). \quad (5)$$

Так как $\sum \Delta S_{итев}^{су}$ является числовой характеристикой полной необратимости объединенной системы СУ + ОС, то ее целесообразно разделить на две составляющие: «внутреннюю необратимость» и «внешнюю необратимость» при генерации энтропии от необратимого взаимодействия теплоты ВЭР и теплоты «потерь»:

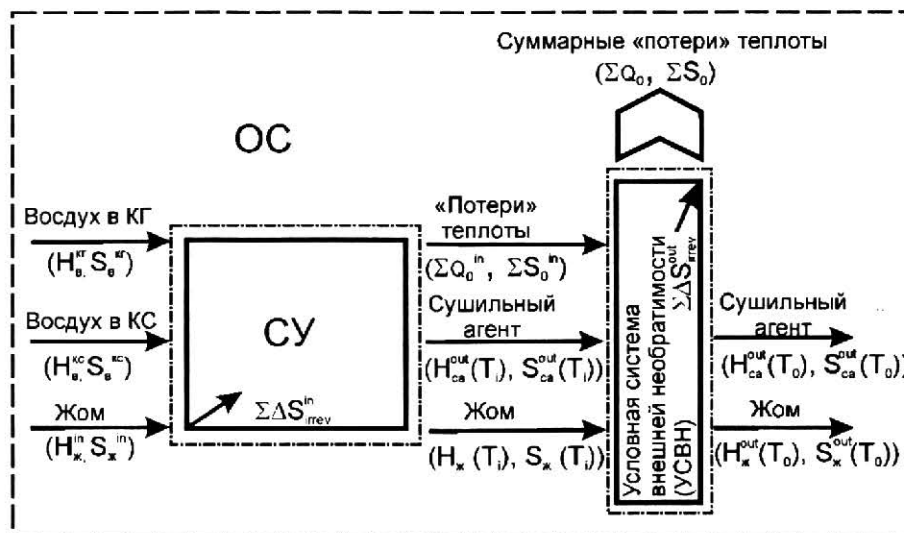


Рис. 2. Схема сушильной установки для составления энтропийного общего аналитического баланса.

$$\sum \Delta S_{irrev}^{cy} = \sum \Delta S_{irrev}^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out}. \quad (6)$$

Для определения $\sum \Delta S_{irrev}^{in}$ запишем баланс энтропии термодинамической подсистемы СУ (рис. 3). При этом будем считать, что теплота $\sum Q_0^{in}$ выходит из системы не меняя исходного потенциала (трансформация происходит в УПВН).

$$S_b^{kr} + S_b^{kc} + S_{ж}^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{in} = S_{ж}^{out}(T_i) + S_{ca}^{out}(T_i) + \sum S_0^{in}, \quad (7)$$

Где $\sum S_0^{in} = \sum \frac{Q_0^{in}}{T_i}$ – поток энтропии из подсистемы СУ к подсистеме УПЗН.

$\sum \Delta S_{irrev}^{out}$ определяется с баланса подсистемы УПВН (рис. 4):

$$S_{ж}^{out}(T_i) + S_{ca}^{out}(T_i) + \sum S_0^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out} = S_{ж}^{out}(T_0) + S_{ca}^{out}(T_0) + \sum S_0. \quad (8)$$

Очевидно, введенные понятия «внутренняя необратимость» и «внешняя необратимость» эффективны при локализации источников необратимости – потребителей топлива. Для определения степени влияния слагаемых уравнения (6) на общий рост энтропии можно использовать следующие коэффициенты:

$$\omega^{in} = \sum \Delta S_{irrev}^{in} / \sum \Delta S_{irrev}^{cy}, \quad (9)$$

$$\omega^{out} = \sum \Delta S_{irrev}^{out} / \sum \Delta S_{irrev}^{cy}. \quad (10)$$

Учитывая аддитивность энтропии, уравнение (6) перепишем в другом виде:

$$\sum \Delta S_{irrev}^{cy} = (\Delta S_{irrev}^{kr} + \Delta S_{irrev}^{kc} + \Delta S_{irrev}^c)^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out}. \quad (11)$$

Из анализа уравнения (11) делаем вывод, что в реальной СУ происходят такие необратимые процессы:

- 1) преобразование химической энергии топлива во внутреннюю энергию дымовых газов;
- 2) смешивание потоков теплоносителей с различными температурами – снижение потенциала сушильного агента;
- 3) необратимый теплообмен с окружающей средой.

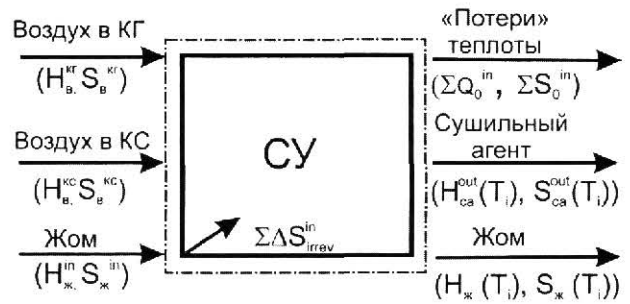


Рис. 3. Схема сушильной установки для составления энтропийного баланса её подсистемы.

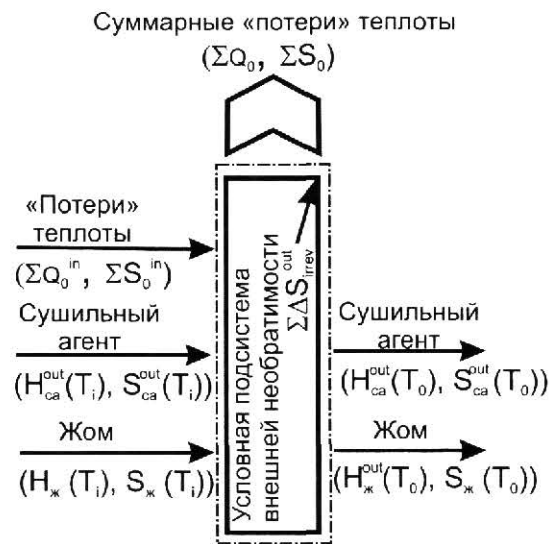


Рис. 4. Схема условной подсистемы внешней необратимости сушильной установки.

Термодинамическую эффективность компонентов СУ можно определить с помощью критериев, в основе которых – фундаментальные, абсолютные характеристики необратимости: энтропийный коэффициент термодинамического несовершенства

$$\eta_s^{imp} = \frac{\Delta S_{irrev}}{\Delta S_{irrev}^{max}}, \quad (12)$$

или энтропийный коэффициент термодинамического совершенства

$$\eta_s^p = 1 - \frac{\Delta S_{irrev}}{\Delta S_{irrev}^{max}}, \quad (13)$$

при этом

$$\eta_s^{imp} + \eta_s^p = 1. \quad (14)$$

$$\sum \Delta S_{irrev}^{cy} = \sum \Delta S_{irrev}^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out}. \quad (6)$$

Для определения $\sum \Delta S_{irrev}^{in}$ запишем баланс энтропии термодинамической подсистемы СУ (рис. 3). При этом будем считать, что теплота $\sum Q_0^{in}$ выходит из системы не меняя исходного потенциала (трансформация происходит в УПВН).

$$S_B^{kr} + S_B^{kc} + S_{ж}^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{in} = S_{ж}^{out}(T_i) + S_{ca}^{out}(T_i) + \sum S_0^{in}, \quad (7)$$

Где $\sum S_0^{in} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_0^i}{T_i}$ – поток энтропии из подсистемы СУ к подсистеме УПЗН.

$\sum \Delta S_{irrev}^{out}$ определяется с баланса подсистемы УПВН (рис. 4):

$$S_{ж}^{out}(T_i) + S_{ca}^{out}(T_i) + \sum S_0^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out} = S_{ж}^{out}(T_0) + S_{ca}^{out}(T_0) + \sum S_0^i. \quad (8)$$

Очевидно, введенные понятия «внутренняя необратимость» и «внешняя необратимость» эффективны при локализации источников необратимости – потребителей топлива. Для определения степени влияния слагаемых уравнения (6) на общий рост энтропии можно использовать следующие коэффициенты:

$$\omega^{in} = \sum \Delta S_{irrev}^{in} / \sum \Delta S_{irrev}^{cy}, \quad (9)$$

$$\omega^{out} = \sum \Delta S_{irrev}^{out} / \sum \Delta S_{irrev}^{cy}. \quad (10)$$

Учитывая аддитивность энтропии, уравнение (6) перепишем в другом виде:

$$\sum \Delta S_{irrev}^{cy} = \sum (\Delta S_{irrev}^{kr} + \Delta S_{irrev}^{kc} + \Delta S_{irrev}^c)^{in} + \sum \Delta S_{irrev}^{out}. \quad (11)$$

Из анализа уравнения (11) делаем вывод, что в реальной СУ происходят такие необратимые процессы:

- 1) преобразование химической энергии топлива во внутреннюю энергию дымовых газов;
- 2) смешивание потоков теплоносителей с различными температурами – снижение потенциала сушильного агента;
- 3) необратимый теплообмен с окружающей средой.

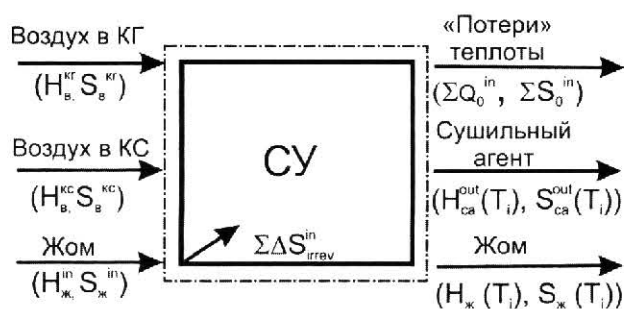


Рис. 3. Схема сушильной установки для составления энтропийного баланса её подсистемы.

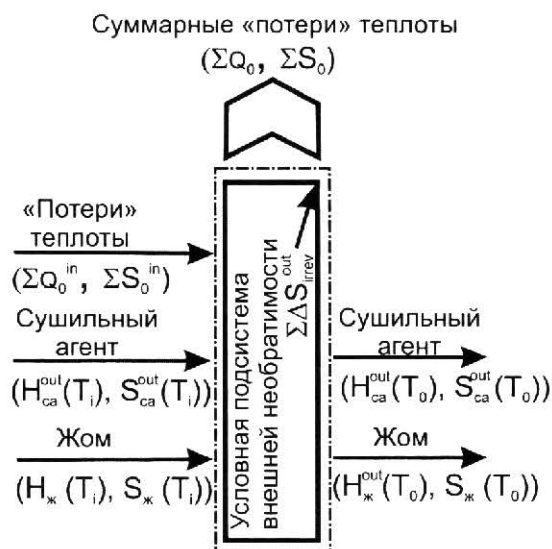


Рис. 4. Схема условной подсистемы внешней необратимости сушильной установки.

Термодинамическую эффективность компонентов СУ можно определить с помощью критериев, в основе которых – фундаментальные, абсолютные характеристики необратимости: энтропийный коэффициент термодинамического несовершенства

$$\eta_s^{imp} = \frac{\Delta S_{irrev}}{\Delta S_{irrev}^{max}}, \quad (12)$$

или энтропийный коэффициент термодинамического совершенства

$$\eta_s^p = 1 - \frac{\Delta S_{irrev}}{\Delta S_{irrev}^{max}}, \quad (13)$$

при этом

$$\eta_s^{imp} + \eta_s^p = 1. \quad (14)$$

Для СУ в целом, как независимой энергетической системы, информативность предыдущих коэффициентов, учитывая их содержание, будет незначительной. Поэтому приоритетным направлением решения этой задачи может стать разработка методики определения минимальной технологической необратимости, что будет рассматриваться как эталон энергетического совершенства.

Для определения коэффициента пропорциональности в уравнении (1) рассмотрим произвольную систему А (рис. 5), в которой энергия топлива в количестве $E_x = BQ_h^p$ через последовательность необратимых энергетических преобразований поступает в НС (система С) в виде теплоты Q_{E_x} с температурой T_0 . При данных условиях общий рост энтропии, ввиду предположения безэнтропийности химической энергии топлива на начальном этапе энергетических преобразований, рассчитаем из уравнения:

$$\Delta S_{irrev}^{tot} = \frac{BQ_h^p}{T_0}. \quad (15)$$

Тогда, расход топлива, расходуемого на компенсацию единицы необратимости полной последовательности энергетических преобразований, включая этапы преобразования первичной упорядоченной (безэнтропийной) энергии в неупорядоченную и срабатывания потенциалов последней к параметрам НС, учитывая уравнения (15), определим следующим образом:

$$b_{irrev}^{tot} = \frac{B}{\Delta S_{irrev}^{tot}} = \frac{T_0}{Q_h^p}. \quad (16)$$

После определения коэффициента пропорциональности между энергетической эффективностью и энергетической несовершенством (b_{irrev}^{tot})

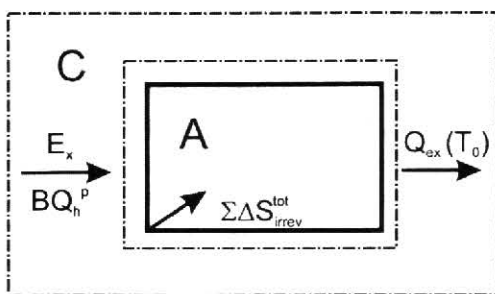


Рис. 5. Произвольная система сушильной установки.

расход топлива на компенсацию необратимости процессов в i -й подсистеме СУ определится из уравнения:

$$\Delta B_i = b_{irrev}^{tot} \Delta S_{irrev}. \quad (17)$$

Заключение

Разработанная методика позволяет получить разностороннюю и подробную информацию об энергетических преобразованиях в сушильной установке и о взаимосвязи системы с окружающей средой. Эта информация может быть использована для дальнейшей работы над совершенствованием системы в рамках следующих направлений:

- для параметрической термодинамической оптимизации;
- для структурной термодинамической оптимизации;
- при решении термоэкономических оптимизационных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chihiro F., Yasuki K., Muhammad A. Novel Drying Process Based on Self-Heat Recuperation Technology. *Drying Technology*, 2011, № 29. – P. 105 – 110.
2. Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I. Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering* 2002, № 22. – P. 1763 – 1775.
3. Syahrul S., Dincer I., Hamdullahpur F. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. *International Journal of Thermal Science* 2003, № 42. – P. 691 – 701.
4. Karthikeyan M., Wu Z., Mujumdar A.S. Low-rank coal drying technologies – Current status and new developments. *Drying Technology* 2009, № 27. – P. 403 – 415.
5. Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I. Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy: An International Journal* 2002, № 2. – P. 87–98.
6. Krokida M.K., Bishar G.I. Heat recovery from dryer exhaust air. *Drying Technology* 2004, № 22. – P. 1661 – 1674.
7. Minea V. Energetic and ecological aspects of softwood drying with high-temperature heat pumps. *Drying Technology* 2008, № 26. – P. 1373 – 1381.

8. *Dincer I., Sahin A.Z.* A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2004, № 47. – P. 645 – 652.

9. *Brammer J.G., Bridgwater A.V.* Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1999, № 3. – P. 243 – 289.

10. *Самійленко С.М.* Методологічні засади термодинамічного аналізу теплообмінних сис-

тем цукрового виробництва. Частина 1 / С.М. Самійленко, С.М. Василенко [та ін.] // Наукові праці НУХТ. – 2012. – № 44. – С. 61 – 70.

11. *Самійленко С.М.* Методологічні засади термодинамічного аналізу теплообмінних систем цукрового виробництва. Частина 2 / С.М. Самійленко, С.М. Василенко [та ін.] // Наукові праці НУХТ. – 2012. – № 45. – С. 43 – 52.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DRYING UNIT ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS

Samiylenko S.N., Shutyuk V.V., Vasylenko S.M., Bessarab O.S.

National University of Food Technologies, 68,
Vladimirskaya st., Kiev, 01601, Ukraine

The methodological framework for the analysis of industrial energy use efficiency of the dryer, which are based on the concept of thermodynamic irreversibility of real processes. In order to localize sites of imperfection and analyze the effectiveness of the use of waste energy introduced the concepts of internal and external irreversibility of the dryer as a whole.

A system of synthetic material, heat and entropy balances dryer. Using this method, a comparative analysis of the flow of heat and entropy growth dryer for the development of successive stages of reconstruction of the installation in order to increase efficiency. References 11, figures 5.

Key words: dryer, efficiency, irreversibility, thermodynamics, heat consumption.

1. *Chihiro F., Yasuki K., Muhammad A.* Novel Drying Process Based on Self-Heat Recuperation

Technology. *Drying Technology*, 2011, № 29. – P. 105 – 110.

2. *Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I.* Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering* 2002, № 22. – P. 1763 – 1775.

3. *Syahrul S., Dincer I., Hamdullahpur F.* Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. *International Journal of Thermal Science* 2003, № 42. – P. 691 – 701.

4. *Karthikeyan M., Wu Z., Mujumdar A.S.* Low-rank coal drying technologies – Current status and new developments. *Drying Technology* 2009, № 27. – P. 403 – 415.

5. *Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I.* Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy: An International Journal* 2002, № 2. – P. 87–98.

6. *Krokida M.K., Bishar G.I.* Heat recovery from dryer exhaust air. *Drying Technology* 2004, № 22. – P. 1661 – 1674.

7. *Minea V.* Energetic and ecological aspects of softwood drying with high-temperature heat pumps. *Drying Technology* 2008, № 26. – P. 1373 – 1381.

8. *Dincer I., Sahin A.Z.* A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2004, № 47. – P. 645 – 652.

9. *Brammer J.G., Bridgwater A.V.* Drying technologies for an integrated gasification bio-energy

plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1999, № 3. – P. 243 – 289.

10. *Samiylenko S.N.* Methodological principles of thermodynamics analysis of heat-exchange systems of saccharine production. Part 1 / Samiylenko S.N., Vasylenko S.M. [and others.] // *Scientific works NUFT.* – 2012. – № 44. – P. 61 – 70. (Ukr).

11. *Samiylenko S.N.* Methodological principles of thermodynamics analysis of heat-exchange systems of saccharine production. Part 2 / Samiylenko S.N., Vasylenko S.M. [and others.] // *Scientific works NUFT.* – 2012. – № 45. – P. 43 – 52. (Ukr).

Получено 02.06.2014

Received 02.06.2014