

УДК 66.047.2:536.422.4

Эксергетический анализ вакуум-сублимационной установки

**Канд. техн. наук В. Е. ДОБРОМИРОВ,
канд. техн. наук С. В. ШАХОВ, Т. И. НЕКРЫЛОВА, С. А. БОКАДАРОВ**
Воронежская государственная технологическая академия
394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19

Sublimation is one of the most effective directions of refrigerating engineering use for foodstuff, biological materials and medical preparations preservation. However, freeze-drying is complex technological process. It demands the careful analysis from the point of view of its effective functioning. On the base of exergetic method it is possible to carry out the thermodynamic analysis of system more carefully and to find the most effective ways of reduction of power resources expenses at simultaneous increasing of technological characteristics. We have carried out the exergetic analysis of the installation and according to the results we made the exergetic balance and the diagram of exergy streams and losses.

Key words: freeze-drying, exergy, intensification.

Ключевые слова: вакуум-сублимационная сушка, эксергия, интенсификация.

Сублимационное консервирование — одно из наиболее эффективных направлений использования холодильной техники для сохранения пищевых продуктов, биологических материалов и медицинских препаратов, совмещающее в себе ряд преимуществ, присущих методу консервирования как традиционной сушкой, так и замораживанием. Однако вакуум-сублимационная сушка — сложный технологический процесс, требующий тщательного анализа с точки зрения его эффективного функционирования.

Энергетический метод анализа, основанный на первом законе термодинамики, позволяет оценить потери энергии в энерготехнологических системах и в ее отдельных элементах, а также выявить элементы систем, процессы в которых протекают с наибольшими потерями. Существенным недостатком этого метода является то, что в нем не учитывается ценность различных видов энергии, т. е. их практическая пригодность, что неверно с точки зрения второго закона термодинамики, так как в реально протекающих процессах происходят потери энергии на необратимость [1].

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 задачу определения потерь работоспособности на необратимость реально протекающих процессов. Однако на базе эксергетического метода можно более тщательно провести термодинамический анализ системы и найти эффективные пути уменьшения затрат энергетических ресурсов при одновременном повышении технологических показателей.

Эксергетический метод анализа является универсальным способом термодинамического исследования различных процессов преобразования энергии. Он 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 этого про-

цесса все участвующие в нем виды материи переходят в состояние термодинамического равновесия со всеми компонентами окружающей среды. Каждый элемент системы при таком анализе рассматривается как самостоятельная термодинамическая система. Эффективность работы такой системы оценивается путем сравнения эксергии на входе в указанный элемент с потерей в нем работоспособности, т. е. с потерей эксергии в результате необратимых процессов, протекающих в данном элементе. Это позволяет создавать наиболее совершенную систему, что является основной целью эксергетического метода анализа.

Процесс работы вакуум-сублимационной установки, схема которой показана на рис. 1, состоит из ряда следующих необратимых процессов: подвода энергии в двухступенчатом компрессоре, конденсации паров хладагента в конденсаторе, кипения паров в испарителе.

Способ процесса вакуум-сублимационной сушки по принципу теплового насоса осуществляется следующим образом. В начальный момент пуска холодильной машины установки включается компрессор 10, который сжимает хладагент сначала в первой 11, а затем во второй 12 ступенях. Температура и давление хладагента при этом повышаются сначала до промежуточных значений $t_{\text{пп}}$ и $P_{\text{пп}}$, а затем до температуры, соответствующей давлению нагнетания [2].

После выхода холодильной машины на рабочий режим сушильная камера 1 вакуумируется до остаточного рабочего давления (50–100 Па).

Затем по линии 21 через шлюзовой затвор 14 в барабан 16 с рабочей частотой вращения $5,7 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ подаются замороженные частицы структурного продукта или замороженные гранулы бесструктурного продукта (до рациональной степени заполнения барабана, например 30 %). Горячий пар хладагента с температурой 70–80 °C после компрессора поступает в змеевик 18, находящийся в слое замороженных частиц продукта. Темпера та хладагента через трубы змеевика 18 передается замороженным частицам, из которых происходит сублимация влаги, удаляемая затем в десублиматор 8.

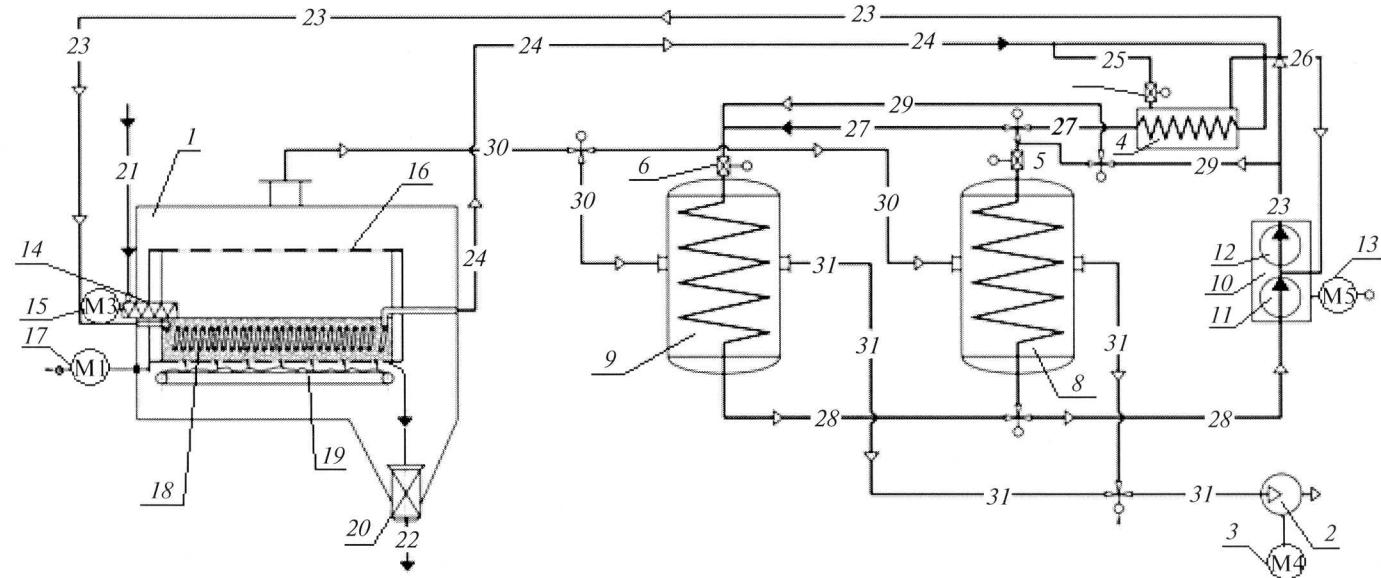


Рис. 1. Схема вакуум-сублимационной установки:

- 1 — герметичная сушильная камера; 2 — вакуум-насос; 3 — привод; 4 — теплообменник промежуточного давления; 5, 6, 7 — терморегулирующие вентили; 8, 9 — десублиматоры; 10 — компрессор; 11, 12 — первая и вторая ступени компрессора; 13, 15, 17 — привод; 14, 20 — шлюзовые затворы; 16 — перфорированный барабан; 18 — нагревательный элемент (змеевик); 19 — ленточный транспортер; 21 — линия подачи замороженного продукта в сушильную камеру; 22 — линия удаления сухого продукта из сушильной камеры; 23 — линия подачи горячего хладагента в трубы змеевика 18; 24 — линия отвода хладагента из трубок змеевика 18; 25 — линия подачи хладагента в теплообменник 4; 26 — линия хладагента, предназначенного для снижения температуры между первой 11 и второй 12 ступенями компрессора; 27 — линия переохлажденного хладагента, подаваемого в десублиматоры 8 и 9 через терморегулирующие вентили 5 и 6; 28 — линия отвода хладагента из десублиматоров и подачи его в компрессор; 29 — линия подачи горячего хладагента из компрессора в десублиматоры для их регенерации; 30 — линия удаления из сушильной камеры парогазовой смеси; 31 — линия удаления из десублиматоров воздуха и неконденсирующихся газов

Хладагент в змеевике 18 охлаждается до температуры насыщения (например, 30 °С для R 22) и в результате конденсации при постоянных температуре конденсации $t_k = 30$ °С и давлении конденсации $P_k = 1,2$ МПа снова превращается в жидкость.

Жидкий хладагент из змеевика 18 через фильтр-дегидратор подается в теплообменник 4 промежуточного давления. Перед теплообменником 4 жидкий хладагент разделяется на два потока. Основной поток поступает в змеевик теплообменника 4, где переохлаждается, отдавая теплоту кипящей жидкости, и в состоянии глубокого переохлаждения поступает в испаритель десублиматора 8 (или 9) через терморегулирующий вентиль 5 (или 6), в котором он дросселируется от давления конденсации $P_k = 1,2$ МПа до давления кипения $P_o = 0,045$ МПа при температуре кипения $t_k = 57$ °С. Другой поток жидкости также дросселируется в терморегулирующем вентиле 7 перед теплообменником 4 от давления конденсации $P_k = 1,2$ МПа до промежуточного давления $P_{\text{пр}} = 0,23$ МПа при постоянном значении энталпии i и поступает в межзмеевиковое пространство теплообменника 4, где благодаря его кипению при $P_{\text{пр}} = 0,23$ МПа и $t_{\text{пр}} = -25$ °С происходит переохлаждение жидкого хладагента, идущего по змеевику теплообменника 4. Испаренный в межзмеевиковом пространстве хладагент из теплообменника 4 используется для промежуточного охлаждения при $P_{\text{пр}} = \text{const}$ (например, 0,23 МПа) нагнетаемых паров, подводимых во вторую ступень 12 компрессора 10.

Анализ данной вакуум-сублимационной сушильной установки проводился на основании эксергетического баланса [3]:

$$\Sigma e_{\text{вх}} = \Sigma e_{\text{вых}} + \Sigma d, \quad (1)$$

где $\Sigma e_{\text{вх}}$, $\Sigma e_{\text{вых}}$ — сумма удельных эксергий на входе и выходе установки, кДж/кг;

Σd — суммарные потери эксергии в элементах установки, кДж/кг.

Данное уравнение можно записать следующим образом:

$$e_m + e_{km} + e_q = e'_m + e_{vl} + e_{v.n} + \Sigma d, \quad (2)$$

где e_m , e'_m — эксергия высушиваемого продукта на входе и выходе установки, кДж/кг;

e_{km} — поток эксергии в компрессоре двухступенчатой холодильной машины, кДж/кг;

$e_{v.n}$ — поток эксергии в вакуум-насосе, кДж/кг;

e_q — поток эксергии в нагревателе, кДж/кг;

e_{vl} — эксергия влаги, выделившейся из продукта, кДж/кг.

Потери эксергии, связанные с необратимостью процессов в сублимационной камере, выражаются формулой

$$\Sigma d = d_{vl} + d_{o.c} + d_h, \quad (3)$$

где $d_{o.c}$ — потери в окружающую среду, кДж/кг;

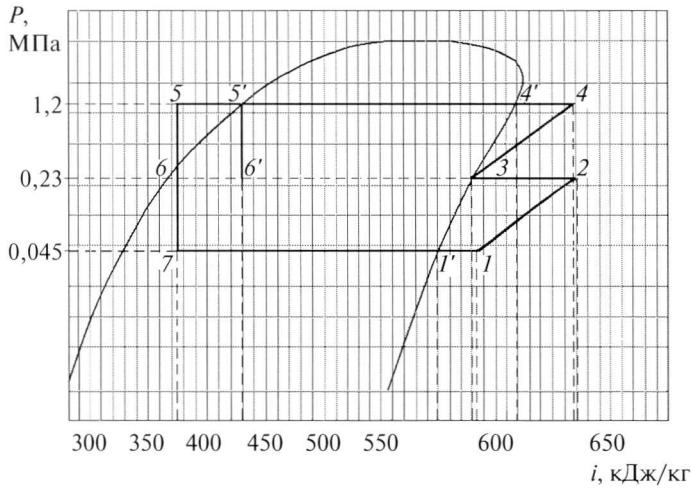


Рис. 2. Цикл работы двухступенчатой холодильной машины

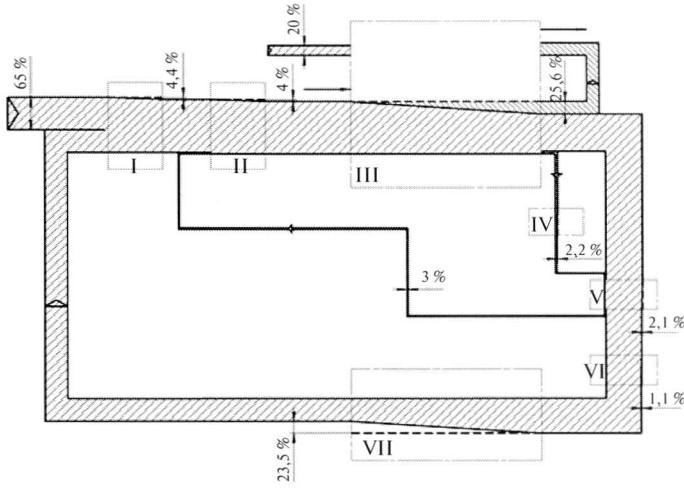


Рис. 3. Диаграмма потоков и потерь эксергии:
 I — компрессор (низкая ступень);
 II — компрессор (высокая ступень);
 III — конденсатор (сублимационная камера);
 IV — регулирующий вентиль (PB1);
 V — переохладитель;
 VI — регулирующий вентиль (PB2);
 VII — испаритель

Эксергетический баланс установки

Подвод эксергии			Отвод эксергии		
Параметр	кДж/кг	%	Параметр	кДж/кг	%
Электроэнергия:			Внутренние потери в компрессоре	44,04	8,4
на компрессор	340	65	Потери в конденсаторе	133,7	25,6
в переохладителе	104,6	20	Потери в переохладителе	10,68	2,1
в сублимационной камере	78,4	15	Потери в PB1	11,72	2,2
			Потери в PB2	5,86	1,1
			Потери в испарителе	123	23,5
Всего	523	100	Возвращается в систему	194	37,1
			Всего	523	100

d_n — потери эксергии, связанные с необратимостью процессов теплообмена между высушиваемым продуктом и нагревателями, кДж/кг.

Параметры холодильного агента в характерных точках цикла, необходимые для расчета, определялись по $\lg p - i$ -диаграмме (рис. 2).

Значения эксергии в характерных точках цикла рассчитывались по формуле

$$e_i = i_i - T_{o.c} S_i - (i_{o.c} - T_{o.c} S_{o.c}), \quad (4)$$

где $i_{o.c}$, $S_{o.c}$ — энталпия и энтропия фреона при параметрах окружающей среды.

Эксергетический баланс сублимационной сушильной установки приведен в таблице.

При эксергетическом анализе использовалась диаграмма потоков и потерь эксергии Грассмана—Шаргута (рис. 3).

На диаграмме показаны величины потерь эксергии в системе и их распределение между элементами про-

цесса в результате протекающих в них необратимых процессов. На рассматриваемой диаграмме каждый поток эксергии изображен полосой, ширина которой пропорциональна значению эксергии. Из диаграммы видно, что наибольшие потери в системе наблюдаются в конденсаторе. Эти потери используются в качестве источника теплоты при сублимационной сушке продукта.

Список литературы

- Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. — М.: Энергия, 1973.
- Пат. 2255279 Российской Федерации, МКИ F 26 В 25/22. Способ автоматического управления процессом вакуум-сублимационной сушки по принципу теплового насоса / Шахов С. В., Ширимов А. Н., Моисеева И. С., Бляхман Д. А., Бокадаров С. А. Заявл. 27.06.2005, № 2004107153/06; Опубл. в Б. И. 2005. № 18.
- Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. — Л.: Энергия, 1968.