

Профессор В.В. Шитов,

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра промышленной энергетики,  
тел. (473) 255-44-66

аспирант С.А. Чернопятова, аспирант А.Н. Малахов

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств,  
тел. (473) 255-38-96

## Повышение эффективности работы теплового насоса

Рассмотрены методы повышения эффективности работы теплового насоса в результате исследования процессов, происходящих в отдельных элементах, входящих в его состав, на основе эксергетического метода анализа.

The article describes how to improve the efficiency of the heat pump as a result of the study of processes occurring in individual elements within its structure, based on the exergy analysis method.

*Ключевые слова:* конденсатор, эксергия, методы повышение эффективности.

В настоящее время для спиртовой отрасли Российской Федерации, функционирующей в современных условиях рынка, как никогда актуальны вопросы внедрения современных эффективных технологий, обеспечивающих не только снижение всех удельных производственных затрат, но и позволяющих стабильно получать высококачественную продукцию. Помимо собственно повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, это позволит уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду, что становится особенно актуальным в последнее время, когда антропогенное воздействие на природу достигло высокого уровня.

Перегонка и ректификация спирта являются заключительной технологической стадией спиртового производства, определяющей качество продукта. На этой стадии на спиртовых заводах расходуется большая часть тепловой энергии, потребляемой на технологические нужды, поэтому снижение энергопотребления на брагоректификационной установке наиболее существенно сокращает расход тепловой энергии по заводу в целом.

Теплонасосные системы представляются одним из наиболее эффективных альтернативных средств решения проблемы.

Для определения возможных путей совершенствования теплового насоса (ТН) были проведены исследования его термодинамического цикла и процессов,

происходящих в отдельных элементах, входящих в его состав, на основе эксергетического метода анализа [1, 2]. В результате проведенных исследований были определены внутренние и внешние потери эксергии  $d_i$  и  $d_e$  в элементах ТН и вес каждого элемента в общей сумме потерь эксергии  $\Sigma d$ , что, на первый взгляд, дает возможность определить целесообразность и последовательность их совершенствования в соответствии с величиной внутренних и внешних потерь эксергии.

В качестве примера приводится анализ пароконденсационного ТН с регенеративным теплообменным аппаратом на базе холодильной машины МКТ80-2-0 (рисунок). Внешние потери эксергии  $d_e$  составляют всего  $0,05e_{вх}$  (где  $e_{вх}$  – удельное количество эксергии, вводимой в ТН, кДж/кг). К внешним потерям эксергии относятся электромеханические потери в электроприводе компрессора. Внутренние потери эксергии  $d_i$ , по элементам распределяются следующим образом: 1) компрессор ( $0,139e_{вх}$ ), 2) дроссель ( $0,138e_{вх}$ ); 3) конденсатор ( $0,093e_{вх}$ ); 4) испаритель ( $0,064e_{вх}$ ); 5) регенеративный теплообменный аппарат (ТОА) ( $0,034e_{вх}$ ).

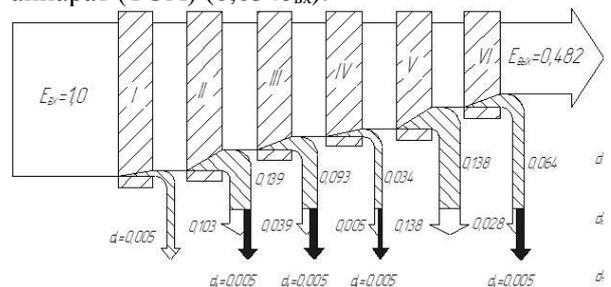


Рисунок. Диаграмма потоков эксергии в пароконденсационном тепловом насосе:  $e_{вх}$ ,  $e_{вых}$  – соответственно потоки эксергии на входе в ТН и выходе из ТН;  $d_e$ ,  $d_i$ ,  $d_c$ ,  $d_t$  – внешние, внутренние, собственные и технические потери эксергии в элементах ТН; I – электродвигатель; II – компрессор; III – конденсатор; IV – регенеративный ТОА; V – дроссель; VI – испаритель

На основании результатов полученных данных отметим: необходимость устранять потери в компрессоре и дросселе, затем в ТОА. В действительности данный уровень анализа является недостаточно строгим, т.к. не учитывает разделения внутренних  $d_i$  и внешних  $d_e$  потерь эксергии на собственные  $d_c$  и технические  $d_t$ , что не позволяет указать: в какой степени, до какого предела и каким образом потери эксергии могут быть снижены до минимума и можно ли полностью устранить потери в том или ином элементе ТН. Определение собственных и технических потерь эксергии дает возможность установить степень совершенствования каждого элемента ТН. Повысить эффективность ТН в целом можно путем снижения (в пределе – устранения) как собственных потерь эксергии в отдельных его элементах, что неизбежно приведет к изменению структуры ТН и связей между входящими в его состав элементами, так и устраняя технические потери эксергии, что позволит сохранить структуру ТН и внутренние связи между элементами.

По величине технических потерь эксергии, которые могут и, следовательно, должны быть устранены различными способами, включая режимные и конструктивные решения, элементы ТН располагаются в следующей последовательности: 1) конденсатор ( $0,054e_{вх}$ ); 2) компрессор ( $0,037e_{вх}$ ); 3) испаритель ( $0,035e_{вх}$ ); 4) регенеративный ТОА ( $0,029e_{вх}$ ). Так как наибольшие технические потери эксергии возникают в конденсаторе, то повышение эффективности ТН целесообразно начинать с совершенствования в первую очередь этого элемента с целью снижения технических потерь эксергии в процессах охлаждения перегретых паров рабочего тела и их последующей конденсации. Суммарные потери эксергии в зонах охлаждения перегретых паров рабочего тела (ОП) и их последующей конденсации (К) определяются следующим образом:

$$d_k = d_{з.оп.} + d_{з.к.},$$

где  $d_{з.оп.}$  – потери эксергии в зоне ОП, кДж/кг;  
 $d_{з.к.}$  – потери эксергии в зоне К, кДж/кг.

Таким образом, снижения потерь эксергии в конденсаторе на величину  $\Delta d_k$  можно достичь путем их понижения (в пределе – устранения) либо в зоне ОП или в зоне К, либо одновременно в этих зонах.

Рассмотрим некоторые из этих методов.

1. Физико-химический метод позволяет снизить потери эксергии путем замены одного рабочего тела на другое с заданными свойствами, например, применение многокомпонентного рабочего тела (МРТ). Процесс конденсации однокомпонентного рабочего тела (ОРТ) является изотермическим, т.е. температура конденсации ОРТ остается постоянной по всей длине зоны конденсации конденсатора ТН.

Основные потери эксергии возникают в зоне конденсации рабочего тела, которые можно снизить, используя МРТ, т.е. проводя процесс конденсации неизотермично, при изменяющейся по длине зоны К температуре конденсации.

2. Расходный метод – снижение потерь эксергии происходит за счет изменения режимных параметров конденсатора, например, за счет регулирования расхода нагреваемой в нем среды. В зависимости от зоны конденсатора, в которой происходит регулирование, возможны следующие варианты данного метода: «расходный-К», «расходный-ОП» и «общий расходный»:

- расходный-К метод связан с регулированием расхода нагреваемой среды через конденсатор. При этом расход нагреваемой среды через зону конденсации равен ее расходу через зону охладителя перегретых паров при постоянной теплопроизводительности этих зон;

- расходный-ОП метод – снижение потерь эксергии в зоне охлаждения перегретых паров рабочего тела достигается за счет разделения нагретой в зоне конденсации среды на два потока. Первый поток отводится из конденсатора ТН после зоны конденсации, а второй поток поступает в зону ОП. Уменьшение расхода нагреваемой среды через зону ОП позволяет снизить неэквивалентность между теплообменивающимися потоками в ней с одновременным снижением разности температур между ними;

- общий расходный метод осуществляется при одновременном использовании рассмотренных выше «расходного-К» и «расходного-ОП» методов. Уменьшение расхода нагреваемой среды на входе в зону К с последующим разделением потока после нее на два,

первый из которых после зоны К отводится из конденсатора, а второй поток проходит через зону ОП, что приводит к снижению неэквивалентности теплообменивающихся сред одновременно в зонах К и ОП;

- аппаратный метод позволяет снизить потери эксергии в конденсаторе ТН за счет изменения его конструктивных параметров (например, использование высокоэффективных поверхностей теплообмена, позволяющих получать высокие коэффициенты теплопередачи; увеличение поверхности теплообмена и т.п.) при постоянных тепловых нагрузках зон К и ОП и неизменном расходе нагреваемой среды, проходящей через конденсатор;

- комбинированный метод позволяет снизить потери эксергии в зонах К и ОП путем одновременного использования двух и более методов, включая и рассмотренные выше;

- физико-химический и расходный-ОП методы. Данный вариант комбинированного метода осуществляется при одновременном регулировании расхода нагреваемой среды через зону ОП и использовании в качестве рабочего тела МРТ, что сопровождается изменением температуры конденсации рабочего тела в зоне К;

- физико-химический и общий расходный методы. Применение данного варианта комбинированного метода позволяет снизить потери эксергии путем уменьшения расхода нагреваемой среды на входе в зону К с последующим разделением после нее на два потока, первый из которых отводится из конденсатора, а второй – проходит через зону ОП с расходом. В качестве рабочего тела применяется МРТ.

С целью определения метода, позволяющего максимально снизить потери эксергии в процессах теплообмена между рабочим телом и нагреваемой средой в конденсаторе ТН, был проведен сравнительный анализ предложенных выше вариантов. По величине устраненных потерь эксергии методы располагаются в следующей последовательности:

а) при переменной разности температур  $\Delta T_i = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  – физико-химический и общий расходный, физико-химический и расходный – ОП, физико-химический, общий расходный, расходный – ОП, аппаратный и расходный-К;

б) при  $\Delta T_i = 1 \text{ }^\circ\text{C}$  – физико-химический и общий расходный, физико-химический и рас-

ходный-ОП, аппаратный, общий расходный, физико-химический, расходный-К и расходный-ОП.

Таким образом, повышение эффективности работы конденсатора зависит не только от применяемого метода снижения потерь эксергии в нем, но и от значения разностей температур  $\Delta T_i$  между теплообменивающимися средами в аппарате. Кроме рассмотренных методов, существуют и другие, применение которых позволяет уменьшить потери эксергии в конденсаторе ТН либо путем изменения технологической схемы ТН, т.е. изменением связей между элементами ТН (технологический метод), либо путем замены части элементов ТН на принципиально отличные.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 гг.» по гос. контракту № 16.516.11.6028 от 21.04.11 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. - М.: Энергоатомиздат, - 1988. - 288 с.

2 Бродянский, В.М. Эксергетические расчеты технических систем [Текст] /: справ. пособие / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев [и др]. - Киев: Наук. Думка, 1991. – 360 с.