

УДК 621.561

С. В. Здитовецкая, кандидат технических наук, ассистент (БГТУ);
В. И. Володин, доктор технических наук, профессор (БГТУ)

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЕПЛА

Разработан метод совместного численного анализа параметров цикла и теплообменного оборудования контура парокомпрессионных трансформаторов тепла, учитывающий нестационарный режим работы и необратимые потери в аппаратах и трубопроводах контура. Метод реализован в виде пакета программ и может использоваться при проектировании или выборе трансформатора тепла с учетом хладагента и действительного оборудования, входящего в его состав.

The method of the joint numerical analysis of loop variables and the heatexchange equipment of a contour of vapor-compression transformers of heat, considering non-stationary operating mode and irreversible losses in devices and contour pipelines is developed. The method is realized in the form of the software package and can be used at design or a choice of the transformer of heat taking into account a coolant and the valid equipment entering into its structure.

Введение. В условиях широкого применения в различных отраслях промышленности парокомпрессионных трансформаторов тепла, технические системы нового поколения должны иметь высокую надежность, длительный срок эксплуатации, невысокую металлоемкость. Трансформаторы тепла включают широкую номенклатуру устройств и в зависимости от области применения классифицируются на холодильные машины, тепловые насосы и комбинированные холодильно-нагревательные устройства.

В процессе внедрения или проектирования трансформатора тепла встает проблема выбора энергоэффективного устройства в целом или его комплектующих, в первую очередь, теплообменных аппаратов и компрессора. Сделать такой выбор достаточно сложно, потому что на эффективность влияют различные внутренние и внешние факторы, которые определяются условиями эксплуатации.

Наиболее успешно данную проблему можно решить, используя расчетные методы анализа и проектирования, которые позволяют провести исследование системы с учетом заданных требований. Анализ показал, что предлагаемые модели численного расчета не позволяют совместно рассчитывать параметры цикла и теплообменные аппараты контура, учитывать нестационарный режим работы и потери давления в элементах контура [1–7]. Таким образом, разработка комплексного метода анализа, который включает взаимосвязанный расчет параметров цикла и теплообменников контура парокомпрессионных трансформаторов тепла, учитывает нестационарный режим, работу компрессора и потери давления в аппаратах и трубопроводах контура, является актуальной и представляет научный интерес.

Основная часть. Парокомпрессионный трансформатор тепла представляет собой сложную техническую систему, включающую как основное, так и вспомогательное оборудование (рис. 1). К основному оборудованию относят испаритель, компрессор, конденсатор и терморегулирующий вентиль.

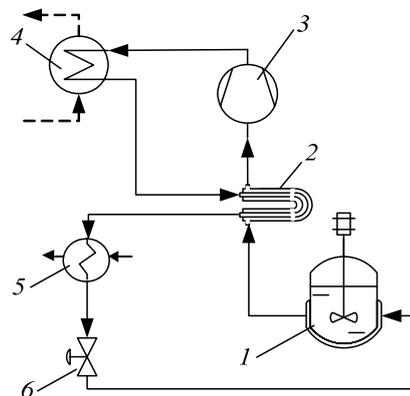


Рис. 1. Схема трансформатора тепла:
 1 – испаритель; 2 – регенератор;
 3 – компрессор; 4 – конденсатор;
 5 – охладитель;
 6 – терморегулирующий вентиль

Разработанный метод расчета представляет собой взаимосвязанные блоки для расчета элементов оборудования и контура трансформатора тепла. На рис. 2 представлена укрупненная схема комплексного расчета, которая показывает возможные направления исследования.

Расчетная схема образует замкнутую систему и позволяет осуществлять, как совместный расчет параметров цикла и теплообменников, входящих в контур, так и проектирование отдельных элементов оборудования.

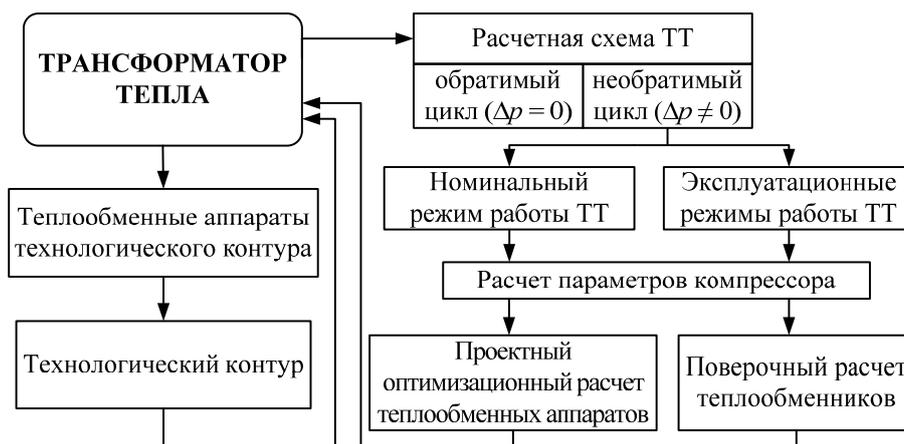


Рис. 2. Схема комплексного метода расчета трансформатора тепла

Комплексный метод расчета включает следующие пункты:

- определение параметров цикла при обратимом и необратимом сжатии рабочего вещества в компрессоре;
- расчет эксплуатационных режимов работы, т. е. совместный расчет параметров цикла и теплообменных аппаратов контура заданной конструкции в нестационарном или стационарном режиме с учетом действительной работы компрессора и потерь давления в элементах контура;
- комплексное расчетное проектирование, т. е. взаимосвязанный расчет параметров цикла с оптимизацией теплообменного оборудования контура с учетом действительной работы компрессора и потерь давления в элементах контура;
- индивидуальный проектный или поверочный расчет теплообменников трансформатора тепла и технологических контуров, связанных с источником и потребителем теплоты.

Принципиальным отличием представленного метода является возможность анализа работы трансформаторов тепла в нестационарном режиме, учет потерь давления в элементах контура и возможность унифицированного оптимизационного расчета теплообменных аппаратов различного конструктивного исполнения и назначения.

Теплообменное оборудование может иметь различное конструктивное исполнение, что потребовало разработки унифицированного подхода к методике его численного расчета, которая учитывает и нестационарный режим.

Основные теплообменные аппараты (испаритель и конденсатор) рассчитываются по двум участкам: с фазовым переходом и для однофазного потока. Каждый из участков описывается отдельными системами уравнений теплопередачи и теплового баланса. В этом случае общая поверхность теплообмена

$$F = F_I + F_{II}, \quad (1)$$

где F_I – поверхность участка кипения (конденсации), m^2 ; F_{II} – поверхность участка однофазного потока перегретого пара, m^2 .

При анализе работы трансформатора тепла в нерасчетных режимах граница между участками изменяется при $F = \text{const}$. Это позволяет получить адекватные результаты.

Нестационарный режим работы трансформатора тепла определяется работой испарителя и изменяющимися внешними условиями. Теплоперенос в испарителе описывается системой уравнений:

$$\frac{dQ}{d\tau} = k\Delta tF;$$

$$\frac{dQ}{d\tau} = \eta_1 G_1 [c_{p,1}(t_{1,1} - t_{1,2}) + h_{fg}(1-x)]; \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \eta_2 M_2 c_{p,2},$$

где Q – теплота, Дж; τ – время, с; k – коэффициент теплопередачи, Вт/($m^2 \cdot K$); Δt – средний температурный напор, $^{\circ}C$; η – эффективность с учетом потерь при нагреве или охлаждении среды; G – массовый расход, кг/с; c_p – теплоемкость, Дж/(кг·K); t – температура, $^{\circ}C$; h_{fg} – теплота фазового перехода, Дж/кг; x – степень сухости пара; M – масса охлаждаемой среды, кг. Индексы: 1 – хладагент; 2 – охлаждаемый теплоноситель в испарителе или нагреваемый теплоноситель в конденсаторе; 1,1 – вход; 1,2 – выход.

При численном интегрировании принимается, что для достаточно малого интервала времени dt режим работы квазистационарный. Для исследуемых случаев минимальный интервал времени dt устанавливался в результате вычислительного эксперимента таким образом, чтобы конечный результат существенно не изменялся. На каждом временном интервале квазистационарной работы рассчитываются также конденсатор и вспомогательные аппараты.

Система уравнений (1)–(2) дополняется расчетом коэффициента теплопередачи и среднелогарифмического температурного напора с учетом поправки на схему течения рабочих сред [4]. Коэффициенты теплоотдачи для однофазных потоков и при конденсации рассчитываются по соотношениям, приведенным в [3–5], при кипении хладагентов – по данным [7, 8]. При проектном расчете трансформатора тепла замкнутая система уравнений решается относительно поверхности теплообмена, а при поверочном – находится тепловой поток как функция параметров источника и потребителя тепла. Одновременно с тепловым расчетом теплообменников определяются потери давления при течениях потоков рабочих сред, обусловленные сопротивлением трения и местными сопротивлениями. Эксплуатационные характеристики компрессора определяются на основании функциональных зависимостей коэффициента подачи, индикаторного и электромеханического КПД от степени сжатия.

Метод позволяет проводить также оптимизационные расчеты теплообменников. В зависимости от задачи проектирования в качестве показателя оптимальности выступают масса аппарата, тепловой поток или другой требуемый показатель. Явные ограничения на функцию цели определяют диапазон изменения конструктивных параметров, неявные – предельные значения потерь давления, мощности на прокачку теплоносителя, коэффициента обребрения для ребристых поверхностей теплообмена. Минимум функции цели находится итеративным методом сеток с переменным шагом.

Разработанный метод расчета реализован в виде пакета программ HEATTR [9, 10]. Пакет позволяет рассчитывать параметры работы трансформаторов тепла, выбирать наиболее оптимальные конструктивные решения при проектировании и выборе теплообменного оборудования.

Сформирована база данных с параметрами компрессорного оборудования и распространенных хладагентов R22, R134a, R218, R290, R600a, которая при необходимости может рас-

ширяться. Метод расчета применим в интервале температур хладагента от -40 до 150°C соответственно в испарителе и конденсаторе.

Достоверность разработанного метода анализа подтверждена сравнением с опытными данными в процессе проведения вычислительного эксперимента [11].

Проводилось сравнение данных для холодильно-нагревательной установки, полученных с помощью разработанного пакета программ, с данными, полученными с помощью программы Refrigeration Utilities [12], которая позволяет рассчитывать только параметры цикла и не учитывает работу оборудования, входящего в состав контура. Результаты сравнения приведены в таблице. Холодильно-нагревательная установка работает в нестационарном режиме, который определяется работой испарителя. Аппарат выполнен в виде непроточного теплообменника объемного типа. В испаритель загружается охлаждаемое молоко объемом 1000 л с начальной температурой 35°C . Для интенсификации процесса оно перемешивается мешалкой. Теплота, отводимая от молока, с повышением потенциала в конденсаторе используется для нагрева воды, применяемой на технологические нужды. В исследуемой установке конденсатор представляет собой однозаходный змеевиковый теплообменник с вытеснителем. Температура конденсации поддерживалась на уровне 50°C . Температура воды на входе в конденсатор составляла 5°C . При работе установки должно выполняться предельное требование по времени охлаждения молока – не более 3 ч до температуры 4°C . В качестве рабочего вещества использовался хладагент R22.

Для сравнения выбраны два квазистационарных режима, соответствующие 10 и 130 мин работы установки, которые приведены в таблице. Результаты сравнения параметров, соответствующие выбранным интервалам времени, согласуются удовлетворительно. Максимальное отклонение результатов по холодопроизводительности составляет 1,8%, а по теплопроизводительности – 1,9%.

Сравнение параметров цикла холодильно-нагревательной установки, полученных с помощью HEATTR и Refrigeration Utilities

Параметр	Время работы установки			
	10 мин		130 мин	
	HEATTR	Refrigeration Utilities	HEATTR	Refrigeration Utilities
Удельная холодопроизводительность, кДж/кг	152,0	153,7	145,2	147,8
Удельная теплопроизводительность, кДж/кг	189,20	191,02	203,39	207,38
Удельная работа, кДж/кг	37,82	37,28	58,21	59,54
Степень сжатия	2,81	2,79	4,58	4,56
Коэффициент преобразования	5,08	4,12	3,49	2,48

Заключение. Разработан комплексный метод, реализованный в виде пакета программ, для совместного анализа параметров цикла, теплообменных аппаратов и элементов обвязки контура пароконденсационных трансформаторов тепла с учетом нестационарного режима работы и необратимых потерь.

Данный метод анализа позволяет проектировать трансформаторы тепла и прогнозировать действительно достигаемые ими параметры с учетом конкретного оборудования в номинальном и нерасчетных режимах работы.

Литература

1. Быков, А. В. Холодильные машины и тепловые насосы / А. В. Быков, И. М. Калнинь, А. С. Крузе. – М.: Агропромиздат, 1988. – 286 с.
2. Бубялис, Э. Процессы энергопереноса в тепловых насосах / Э. Бубялис, В. Макарявичус; под ред. А. Жукаускаса. – Вильнюс: Мокслас, 1990. – 186 с.
3. Шавра, В. М. Основы холодильной техники и технологии пищевых отраслей промышленности / В. М. Шавра. – М.: ДеЛи принт, 2002. – 126 с.
4. Бажан, П. И. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Кавенец, В. М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 367 с.
5. Гопин, С. Р. Воздушные конденсаторы малых холодильных машин / С. Р. Гопин, В. М. Шавра. – М.: Агропромиздат, 1987. – 149 с.
6. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г. Н. Данилова [и др.]; под общ. ред. Г. Н. Даниловой. – Л.: Машиностроение, 1986. – 302 с.
7. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин / А. А. Гоголин [и др.]; под общ. ред. А. А. Гоголина. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 223 с.
8. Баттерворс, Д. Теплопередача в двухфазном потоке / Д. Баттерворс, Г. Хьюитт; под ред. Д. Баттерворса. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
9. Здитовецкая, С. В. Пакет прикладных программ для комплексного анализа компрессионных тепловых насосов / С. В. Здитовецкая, В. И. Володин // Энергетика: изв. высш. учеб. заведений и энерг. об-ний СНГ. – 2009. – № 5. – С. 85–90.
10. Пакет программ для расчета параметров пароконденсационных трансформаторов тепла: свидетельство № 402 / В. И. Володин, С. В. Здитовецкая; Белорус. гос. технол. ун-т. – № С20120010; заяв. 06.02.12; опубл. 01.03.12. – Минск, 2012. – С. 1.
11. Володин, В. И. Тепловой расчет теплообменной установки при нестационарном режиме работы / В. И. Володин, С. В. Здитовецкая // Heat and Mass Transfer: Proc. of V Int. Forum, Minsk, 24–28 May 2004, Vol. 10 [Электронный ресурс]. – Минск, 2004. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв. – 6 с.
12. Интернет-портал Technical University of Denmark [Электронный ресурс]. – Copenhagen, 2011. – Режим доступа: <http://www.et.dtu.dk/Cool>. – Дата доступа: 01.09.2011.

Поступила 20.02.2013