

чика представлены на рис. 2, а зависимостями 3, 4, которые расположены заметно ниже результатов прямого измерения силы 1, 2. Это можно объяснить постоянной погрешностью, возникающей при погружении тела в жидкость. В остальном изменения поля с использованием простого преобразования (9) передают все нюансы изменений силы при перемещениях тела в жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вислович А.Н. Механомагнитный эффект при плавании немагнитных тел в магнитных резервуарах // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: – Минск, 2000. – С.235–237.
2. Vislovich A.N. Mechanomagnetic effects in magnetic reservoir // ICMF 9. – Bremen, 2001. – P. 231.
3. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Силы, действующие на пластину в магнитной жидкости в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью // Десятая Международная Плесская конференция по магнитным жидкостям. – Плес, 2002. – С. 206–214.
4. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Силы, действующие на пластину в магнитной жидкости в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью // МЖГ. – 2001. – № 6. – С. 3–14.

УДК 620.9:657.471

В.И. Володин, д-р техн. наук; С.В. Здитовецкая, аспирант

ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЕПЛА

The problem of optimization of vapor-compression heat transformers is considered. The diagrams of conjugate optimization of cycle and equipment parameters are given.

В процессе использования теплоты в промышленности, жилищно-коммунальном секторе, сельском хозяйстве образуются энергетические отходы в этой же форме, но с более низким потенциалом, который характеризуется температурой носителя тепла. При этом наибольшее количество отходов имеют температуру, отличающуюся от температуры окружающей среды от нескольких до десятков градусов.

Такую теплоту, как и теплоту окружающей среды, непосредственно использовать в качестве полезной не представляется возможным. Для этих целей применяют специальные преобразователи – трансформаторы тепла, представляющие собой холодильную машину, которая может работать в режимах охлаждения, нагрева или нагрева–охлаждения.

В настоящее время наиболее распространенными типами трансформаторов тепла являются пароконденсационные, которые также называют компрессионными. Однако, несмотря на их широкое применение, в настоящее время отсутствуют адекватные методы для выбора оптимальных режимных и конструктивных параметров в процессе их проектирования и эксплуатации.

Рассмотрим, какие проблемы существуют при реализации комплексной задачи оптимизации.

Трансформатор тепла представляет собой сложную техническую систему, включающую взаимосвязанное оборудование. Схема компрессионного трансформатора тепла дана на рис. 1. С помощью рабочего тела (хладагента), циркулирующего внутри

замкнутого контура с оборудованием, реализуется холодильный цикл и устанавливается связь между оборудованием.

Потоки внешних рабочих веществ хладо- и теплоносителя, проходящие через испаритель и конденсатор, по отношению к трансформатору тепла представляют собой окружающую среду, связанную с потреблением холода и тепла. Кроме того, в компрессоре происходит обмен энергией с окружающей средой в форме работы. Таким образом, трансформатор тепла является неизолированной термодинамической системой.

Существует несколько подходов к изучению и анализу трансформаторов тепла. Например, их можно представить в виде теплообменной или информационной системы.

Такой подход к анализу тепловых процессов получил достаточно широкое распространение в химической технологии [1, 2] с использованием показателя глобальной оптимальности. В нем много внимания уделяется связям между отдельными элементами, но при этом упрощаются физико-химические процессы, которые влияют на эффективность работы этих элементов.

Для анализа сложных явлений используется также системная оптимизация конструктивных и режимных параметров процессов технологической теплофизики [3]. В отличие от упомянутого подхода здесь анализ проводится на многокритериальной основе как с учетом глобальных, так и частных критериев эффективности. Вопросы, связанные с описанием процессов, по-прежнему отходят на второй план.

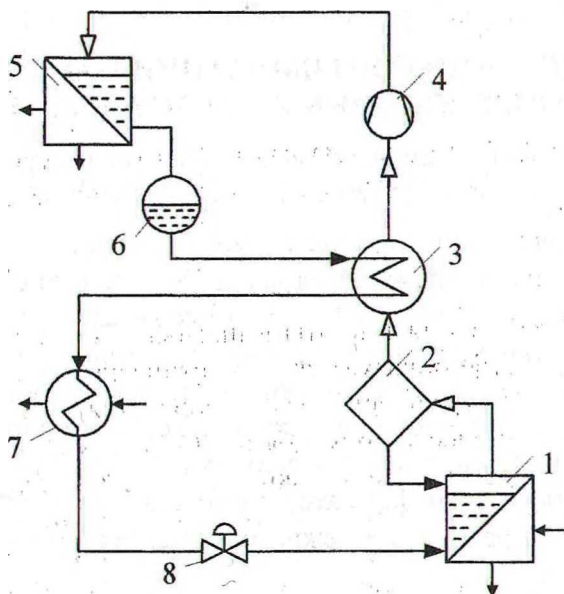


Рис.1. Схема компрессионного трансформатора тепла:

- 1 – испаритель; 2 – отделитель жидкости; 3 – регенератор; 4 – компрессор;
5 – конденсатор; 6 – ресивер; 7 – охладитель; 8 – терморегулирующий вентиль

Такие же проблемы оптимизации стоят и при тепловом проектировании летательных аппаратов, к которым предъявляются повышенные требования по надежности. Взаимосвязанное тепловое проектирование их систем получило глубокое развитие [4], в том числе с учетом развернутого описания физико-химических процессов.

Анализ всех рассмотренных технических систем, включая трансформаторы тепла, может проводиться на основе математических моделей с полным и приближенным

описанием процессов. Полное описание базируется на решении трех- и двухмерных уравнений переноса энергии и вещества. Приближенное описание – на одномерных уравнениях и на усредненных характеристиках исследуемой системы.

Первый подход трудоемок в реализации, но дает возможность получить более точные адекватные результаты, не прибегая к дорогостоящим экспериментам. Второй подход более прост в реализации, но требует привлечения значительного числа эмпирических данных. В инженерной практике чаще используется второй подход, так как он легче реализуется.

Какой из этих подходов наиболее приемлем для оптимизации конструктивных и режимных параметров трансформаторов тепла при проектировании и эксплуатации?

На основе накопленного эмпирического опыта имеются общие рекомендации по выбору эффективных трансформаторов тепла. Их энергетическая эффективность оценивается холодильным коэффициентом, коэффициентом преобразования или суммой этих коэффициентов и зависит от отношения давлений при всасывании и выхлопе рабочего вещества (хладагента) в компрессоре, т. е. в ветвях низкого и высокого давления трансформатора тепла.

Эффективность будет выше при малом сжатии в компрессоре. При этом значение давлений при всасывании и на выхлопе рабочего тела устанавливается не произвольно, а зависит от требующихся по технологическим условиям температур хладо- и теплоносителя, которые являются внешними средами в испарителе и конденсаторе.

Общие рекомендации предписывают, что температурные напоры при использовании жидких внешних рабочих сред должны составить $3-7^{\circ}\text{C}$, а для газовых – не менее чем на 10°C . Регламентируются также предельные потери давления со стороны внутренней рабочей среды – хладагента. В испарителе они не должны превышать в среднем 40 кПа, в конденсаторе – 50 кПа.

Следование этим рекомендациям не дает полной гарантии, что спроектированный трансформатор тепла будет оптимальным. Это связано с тем, что действуют взаимоисключающие тенденции.

Увеличение температурных напоров и потерь давления в основных аппаратах контура, с одной стороны, приводит к компактным теплообменникам, но с другой – растет сжатие в компрессоре и снижается энергетическая эффективность трансформатора тепла.

Априори найти оптимум не представляется возможным. Чтобы сделать окончательный вывод требуется проведение большего объема трудоемких вычислений.

До сих пор наиболее часто рекомендуется метод последовательных приближений. Вначале на основе известных температур хладо- и теплоносителя, выбираются температуры, а следовательно, и давления рабочего тела в испарителе и конденсаторе. Далее рассчитывается цикл трансформатора тепла и затем на основе параметров цикла уточняются режимные и определяются конструктивные параметры теплообменников. Если они не удовлетворяют заданным ограничениям по перепадам давлений, расчет повторяется.

Число переменных, которые подлежат оптимизации, весьма значительно. В каждом аппарате это скорости и температуры рабочих сред, конструктивные параметры (проходные сечения, оребрение и т. п.).

Возможны ограничения на потребление энергии вентиляторами и насосами, на габариты и массу. Это приводит к многопараметрической задаче оптимизации.

Встает также задача выбора и представления функции цели. Здесь имеются свои трудности. Упрощенное представление функции цели в виде аналитической зависимости не дает возможности достичь желаемого результата. Например, для формирования функции цели по такому принципу в 70-х годах были попытки широко использовать такое направление, как планирование эксперимента. Это себя не оправдало. Опыт показывает, что перспективным является представление функции цели в виде системы замкнутых уравнений. В настоящее время решение сопряженной задачи оптимизации трансформатора тепла наиболее быстро может быть достигнуто, если функция цели будет построена на решении одномерных и усредненных уравнений.

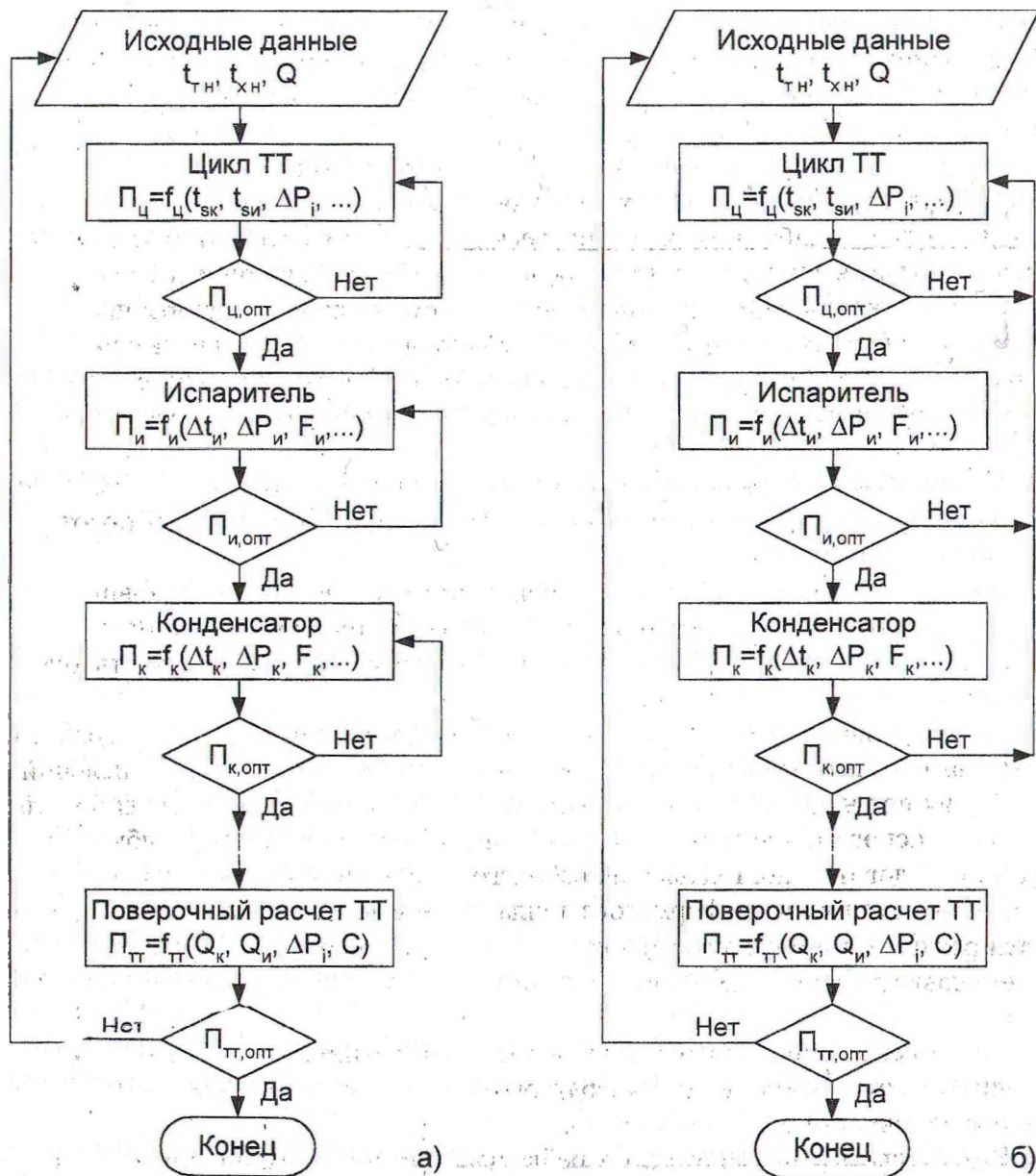


Рис. 2. Линейная (а) и кольцевая (б) схемы сопряженной оптимизации трансформатора тепла

Таким образом, необходимо решить задачу оптимизации с учетом взаимоисключающих тенденций при изменении параметров контура и теплообменников трансформаторов тепла. При этом могут быть реализованы две схемы анализа: линейная и кольцевая. Рассмотрим особенности этих схем, которые даны на рис. 2.

Особенностью линейной схемы сопряженной оптимизации является то, что вначале последовательно проводится оптимизация параметров цикла и теплообменных аппаратов на основе частных показателей. Затем обобщенный анализ заканчивается поверочным расчетом, когда проверяется достижимость экстремума функции цели на основе глобального показателя оптимальности $\Pi_{\text{тг}}$. Если оптимум $\Pi_{\text{тг,опт}}$ не достигнут, то расчетный цикл повторяется. В данной схеме возможен параллельный расчет теплообменных аппаратов.

Отличие кольцевой схемы расчета от линейной заключается в том, что при оптимизационном последовательном расчете каждого аппарата уточняются также параметры цикла. И лишь после такого уточнения для всех аппаратов контура проводится поверочный оптимизационный расчет.

В зависимости от назначения трансформатора тепла при оптимизации цикла в качестве частного показателя оптимальности $\Pi_{\text{ц}}$ используется холодильный коэффициент, коэффициент преобразования или их сумма. А явными и неявными переменными являются температуры конденсации $t_{\text{ск}}$ и кипения $t_{\text{си}}$, потери давления в элементах контура ΔP_i .

Показателями оптимальности испарителя $\Pi_{\text{и}}$, конденсатора $\Pi_{\text{к}}$ и других теплообменников чаще всего выступают их габариты, масса или затраты в зависимости от режимных температурных Δt и гидродинамических ΔP параметров, а также конструктивных параметров F . При этом часть из этих параметров выступает в качестве переменных, а другая часть в качестве неявных ограничений. Например, в качестве переменных чаще всего берутся скорости потоков, линейные размеры элементов поверхности теплообмена, а потери давления и габариты – в виде неявных ограничений.

Наиболее значимым глобальным показателем оптимальности $\Pi_{\text{тг}}$ трансформатора тепла является стоимость генерируемого холода и тепла. Эта стоимость зависит от внешних сценариев их потребления.

Отправными точками анализа в обеих схемах оптимизации являются температуры теплоносителя $t_{\text{тн}}$ и хладоносителя $t_{\text{хн}}$, требуемая теплопроизводительность $Q_{\text{к}}$, холодопроизводительность $Q_{\text{и}}$ или теплохолодопроизводительность $(Q_{\text{к}}+Q_{\text{и}})$, что соответствует работе трансформатора тепла в режиме холодильной машины, теплового насоса или холодильно-нагревательной машины. На основе этих данных выбираются компрессор и конструктивные особенности поверхностей теплообмена, удовлетворяющие заданным условиям эксплуатации и технологическим возможностям изготовления.

В процессе оптимизационного расчета цикла определяется наиболее приемлемое соотношение между температурными напорами Δt_i в испарителе и конденсаторе, а также потери давления в контуре. При оптимизационном проектном расчете аппаратов эти параметры уточняются, что позволяет организовать обратную связь для определения характеристик цикла. Обратная связь в линейной схеме оптимизации реализуется при проведении завершающего поверочного расчета контура. В кольцевой схеме оптимизации эта связь осуществляется на каждом шагу оптимизации.

Для реализации рассмотренных схем сопряженной оптимизации трансформаторов тепла необходимо создание математической модели процессов, на основе которой вычисляются целевые функции, как частные, так и глобальные. Эффективность поиска

экстремума целевой функции зависит от расчетной схемы процессов и аппаратов и метода оптимизации. Предпосылкой решения задачи является разработанный метод комплексного расчета холодильных машин [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
2. Налетов А.Ю. Информационный анализ в химической технологии. Стратегия и тактика энергосбережения. – М.: Химия, 2001. – 240 с.
3. Лившиц М.Ю. Системная оптимизация технологических процессов и проектирования установок промышленной теплофизики // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: МЭИ, 2002. – Т. 1. – С. 155–158.
4. Панкратов Б.М. Основы теплового проектирования транспортных космических систем. – М.: Машиностроение, 1988. – 304 с.
5. Володин В.И. Комплексный подход к расчету параметров компрессионной холодильной машины // Холодильная техника. – 1998. – № 2. – С. 8–10.

УДК 532.529

А.А. Андрижиевский, профессор; А.Г. Трифонов, д-р техн. наук;
А.Г. Лукашевич¹, канд. техн. наук

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СБРОСОВ В ВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Spatial simulation of heat release into water system is considered. Multifunctional code complex for forecasting of dynamics of release is represented.

В данной работе представлена методология пространственного моделирования тепловых сбросов в водные системы на основе разработанного авторами программного пакета **SPACEMORPH_THERMO**.

Программный пакет **SPACEMORPH_THERMO** предназначен для пространственного моделирования динамики тепловых выбросов в водные объекты с морфологическими особенностями и включает:

- расчет динамики полей скоростей в газовой и жидкой средах;
- расчет динамики полей давлений в газовой и жидкой средах;
- расчет динамики поля температур в газовой и жидкой средах;
- расчет динамики поля температур в твердой среде;
- расчет эффекта волнообразования на межфазной границе.

Основной подход к формированию базовой модели программного пакета основан на использовании системы многомерных нестационарных уравнений сохранения с учетом термофизических и структурных характеристик газожидкостных сред. Определяющим моментом при этом является моделирование тепломассообменных процессов на межфазной поверхности, включая процессы переноса тепла через границу твердого тела.

Численная реализация комплексной базовой модели выполнена с использованием численной схемы расщепления по отдельным физическим процессам, метода маркиро-

¹ ОИЭЯИ НАН Беларуси