УДК 621.51:621.577:66.045.1:697.31

А. Н. ГАНЖА, д-р техн. наук, профессор
Э. Г. БРАТУТА, д-р техн. наук, профессор
О. В. КРУГЛЯКОВА, канд. техн. наук
В. Н. Подкопай, В. В. Чубарова
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, Украина

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ОТ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ

Разработаны математические модели, методики и алгоритмы, которые позволяют получить зависимость эффективности системы утилизации и отпуска теплоты от воздухоохладителя компрессорной установки. Методы и средства анализа эффективности на базе теплового и гидравлического расчета учитывают фактическое состояние и эксплуатационные характеристики оборудования и отдельных элементов системы. Ил. 4. Библиогр. 6 назв.

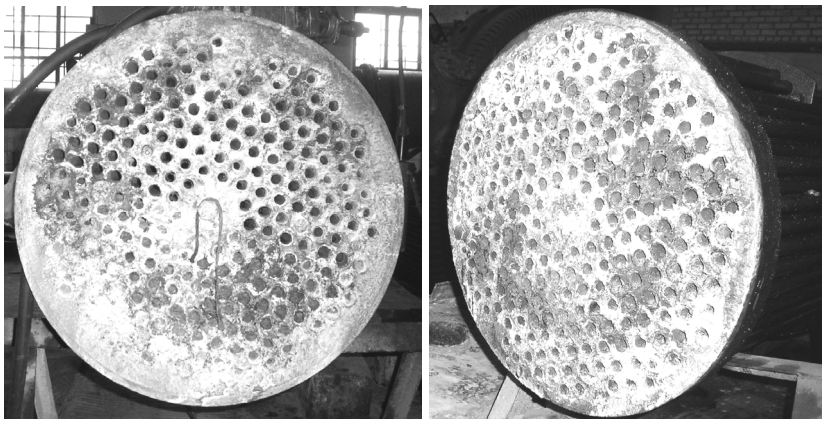
Розроблено математичні моделі, методики й алгоритми, які дозволяють отримати залежність ефективності системи утилізації та відпуску теплоти від повітроохолоджувача компресорної установки. Методи і засоби аналізу ефективності на базі теплового і гідравлічного розрахунку враховують фактичний стан та експлуатаційні характеристики обладнання та окремих елементів системи Іл. 4. Бібліогр. 6 назв.

Введение

В последнее время актуальной задачей является утилизация сбросной теплоты от двигателей и других установок с целью повышения их энергетической эффективности и экологической безопасности. Широкое распространение в промышленности и других сферах получили компрессорные установки различного технологического назначения. Для снижения затрат электроэнергии или топлива, потребляемых установками, используется многоступенчатое сжатие среды с промежуточным ее охлаждением [1 и др.]. Далее отведенная теплота сбрасывается через теплообменники-охладители непосредственно в атмосферу (воздушное охлаждение), либо через системы оборотного охлаждения (водоемы или градирни) в окружающую среду. Для компрессорных установок целесообразно отводить теплоту от охлаждаемой среды посредством нагрева сетевой воды, и далее отпускать ее на технологические или коммунально-бытовые нужды. Так как температурный потенциал отводимой теплоты небольшой, то для его повышения рационально использовать теплонасосные установки, которые будут потреблять часть сэкономленной электроэнергии на привод компрессора.

Постановка задачи

Большой опыт эксплуатации воздухоохладителей компрессорных установок показывает, что они подвергаются загрязнению как с наружной, так и с внутренней стороны. При охлаждении циркуляционной или сетевой водой загрязнение поверхностей происходит в основном с внутренней стороны (со стороны воды). Циркуляционная вода имеет сильное загрязнение, что приводит к отложениям на поверхностях или полному заглушению отдельных трубок (см. рис. 1).



а) загрязненный б) вышедший из строя

Рис. 1 Трубные решетки воздухоохладителя

Это характерно и для сетевой воды, так как, зачастую, в таких нетрадиционных способах снабжения тепловой энергией ее постоянная очистка является нерентабельной. Загрязнение теплообменников приводит к росту температуры воздуха на входе в следующую ступень компрессора, увеличению потребляемой мощности, росту гидравлического сопротивления, уменьшению расхода, ухудшению качества и параметров нагреваемой воды. Сопротивление аппаратов будет влиять на общий напор сети, куда он включен, и, следовательно – будет уменьшаться подача воды, которую обеспечивает насос. Поэтому расчеты по определению эффективности установки, следует вести в комплексе с насосным оборудованием, теплогидравлическим расчетом сети и теплонасосной системы потребления теплоты. Таким образом, разработка методов и средств, позволяющих определять эффективность всей системы охлаждения, утилизации и отпуска теплоты от компрессорных установок является важной задачей в энергосбережении.

Основная часть

Загрязнение и заглушение поверхностей теплообменников зависит от множества случайных факторов: отклонений качества воды и ее загрязнения продуктами стояночной коррозии и др., отклонений в структуре поверхности труб, отклонений технологии изготовления аппарата, количества пусков, простоев и пр.

Основным этапом анализа является гидравлический расчет водяной сети, куда включен воздухоохладитель и другое оборудование. В самом воздухоохладителе определяются расходы и скорости воды в каждом ряду труб с учетом заданного количества полностью заглушенных труб. Местные сопротивления на входе в каждый ряд труб определяются по зависимостям из [2] с учетом заданного распределения величин сужения диаметра на входе и длин загрязненных участков. Местные и гидравлические сопротивления всей сети определяются по зависимостям из [2] с учетом диаметров трубопроводов, их соединения и установленной арматуры. Распределение давлений по точкам сети определяется с учетом высот на местности и активного напора, который создает насос согласно его характеристике. Так как система охлаждения и тепловая сеть представляет собой сложную гидравлическую структуру, то для расчета распределения расходов воды используются алгоритмы теории графов [3] с использования метода поправочных контурных расходов.

После определения расходов и скоростей воды в каждом ряду труб производится тепловой расчет аппарата. Целью такого расчета является определение количества отведенной от воздуха теплоты или температуры воздуха на выходе из охладителя. Для решения поставленной задачи используется разработанный авторами алгоритм дискретного расчета сложного перекрестноточного аппарата [4].

Итеративный процесс гидравлического и теплового расчета происходит до достижения допустимой сходимости по перепаду давлений в сети, тепловой производительности аппарата и отпуска теплоты потребителю.

В итоге всего расчета определяется количество теплоты, отведенной от сжимаемого воздуха, расход воды в сети, сопротивление аппаратов и сети, напор, развиваемый насосом, мощность, которую потребляют электродвигатели с учетом коэффициента нагрузки, количество утилизированной теплоты и отпущенной потребителю от теплонасосной установки.

В работе рассмотрена система промежуточного охлаждения и утилизации теплоты от двухступенчатого компрессора (см. упрощенную схему на рис.2) с исходными параметрами, указанными на рисунке. У потребителя теплоты установлена теплонасосная установка.

В системе используется сетевой насос с напорной характеристикой с учетом дополнительных потерь и зависимостью КПД от расхода [5]. К насосу подключен электродвигатель номинальной мощностью 100 кВт с постоянной частотой вращения 2950 об/мин. В расчетах учитывается зависимость КПД электродвигателя от степени его нагружения.

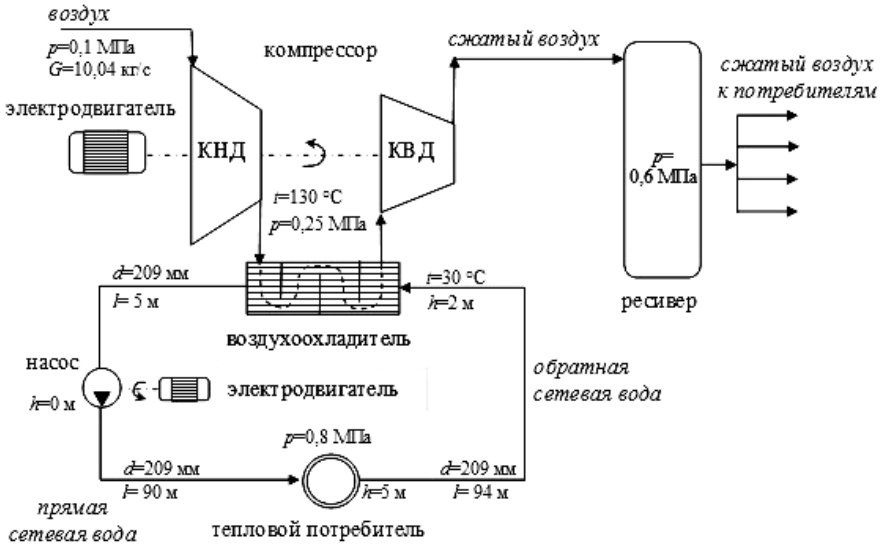


Рис. 2. Система охлаждения компрессора:
G – расход; p – давление; t – температура; l – длина; h – высота; d – диаметр

Коэффициент трансформации теплоты в теплонасосной системе потребителя составляет *COP*=2,8 (т. е. расход электроэнергии, потребляемой компрессором теплонасосной установки, составляет объем утилизируемой теплоты, умноженный на *COP*-1).

Так как процесс загрязнения воздухоохладителя носит преимущественно случайный характер, то для его анализа использована имитационная модель [6] с рассмотрением двух крайних случаев: а) нижние ряды труб полностью заглушены, а верхние – чистые; б) равномерное заглушение по каждому ряду труб. Предельный случай этих вариантов – максимальное заглушение, при котором нижние ряды полностью заглушены, а верхние – на 95 % и более.

Для выявления зависимости от неравномерности заглушения на эффективность аппарата генерируется распределение случайных величин, характеризующих загрязнение и влияющих на распределение расхода воды в каждом ряду труб: сужение диаметра на входе, длина загрязненного участка, количество полностью заглушенных труб в каждом ряду.

Анализ результатов показал, что изменение искомых параметров сильно зависит практически от одной величины φ, которая представляет собой отношение чистой площади (исходная площадь за вычетом площади полностью заглушенных труб) к исходной площади

поверхности. Результаты зависимости теплоты, отведенной от компрессора, расхода воды в сети и показатели энергоэффективности системы приведены на рис. 3, 4.

Как видно из результатов анализа, неравномерность распределения загрязнений по рядам труб слабо влияет на характеристики системы. При заглушении до 80 % поверхности расход сетевой воды и мощность привода насоса остаются практически неизменными, хотя теплота, отведенная от воздуха уменьшиться практически до 2 раз. При заглушении более 80 % поверхности начинает сильно падать расход сетевой воды ввиду роста сопротивления аппарата. При неработающем воздухоохладителе мощность, которую потребляет компрессор, увеличивается на 15 %, а работа теплонасосной системы утилизации и отпуска теплоты потребителям полностью теряет смысл (см. рис. 4).

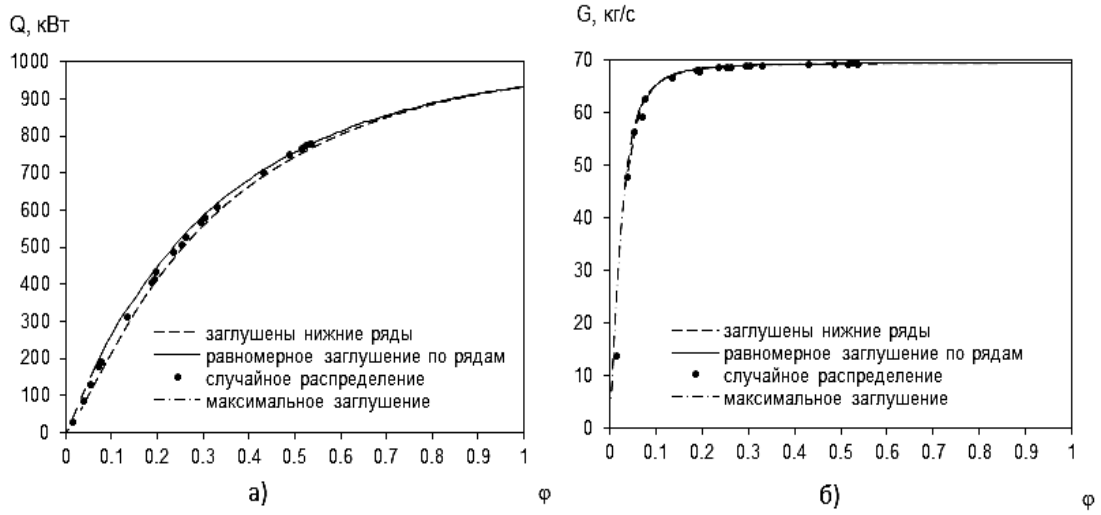


Рис. 3. Теплогидравлические характеристики системы:
а) утилизированная теплота; б) расход сетевой воды;

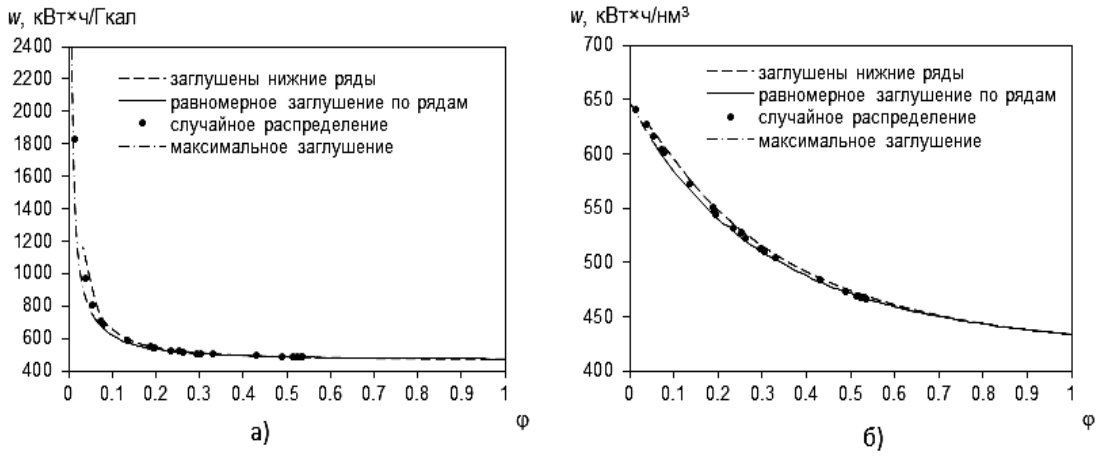


Рис. 4. Энергоэффективность системы:
а) электроэнергия в системе утилизации к отпуску теплоты потребителям;
б) электроэнергия, потребляемая компрессором к объему сжатого воздуха

Выводы

Разработанные методы и средства позволяют получить зависимость характеристик системы промежуточного охлаждения компрессора с теплонасосной системой утилизации и отпуска теплоты потребителям с учетом эксплуатационных факторов. Такие характеристики могут показать эффективность работы всей системы с учетом взаимного влияния оборудования. В дальнейшем результаты анализа могут быть использованы для оптимизации

работы и конструкции теплонасосной установки и ее элементов (испарительных и конденсаторных блоков и пр.).

Список литературы

1. Стационарные газотурбинные установки: справочник / [Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырышкин, И. А. Богов и др.] ; под ред. Л. В. Арсеньева и В. Г. Тырышкина. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 543 с.

2. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Идельчик И. Е. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.

3. Берж К. Теория графов и ее применение / Берж К.– М. : ИЛ, 1962. – 319 с.

4. Ганжа А. М. Комп'ютерне моделювання процесів у складних теплообмінних апаратах / А. М. Ганжа, Н. А. Марченко // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" : сб. науч. трудов : тематический выпуск "Системный анализ, управление и информационные технологии". – Х. : НТУ "ХПИ", 2010. – № 9. – С. 113–120.

5. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: справочник / [В. И. Манюк, Я. И. Каплинский, Э. Б. Хиж и др.]. – М. : Стройиздат, 1988 – 432 с 6. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб. : Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.

EFFECTIVENESS ANALYSIS OF THE HEAT PUMP SYSTEM OF HEAT RECOVERY FROM THE COMPRESSOR FACILITY IN VIEW OF THE INTERACTION OF THE EQUIPMENT PERFORMANCE CHARACTERISTICS

A. N. GANZHA, Doctor of Engineering, Professor
E. G. BRATUTA, Doctor of Engineering, Professor
O. V. KRUGLYAKOVA, Candidate of Engineering,
V. N. PODKOPAY, V. V. CHUBAROVA

The mathematical models, methods and algorithms to obtain the dependence of the efficiency of the heat recovery and delivery system on the air cooling device of the compressor unit were developed. The methods and tools of the effectiveness analysis based on the thermal and hydraulic calculations take into consideration the actual condition and performance characteristics of the equipment and individual elements of the system. Fig.: 4. Ref.: 6 titles.

Поступила в редакцию 11. 04 2013 г.