

УДК 621.438.564:620.9.004.8:504.64.43

ТЕПЛО-УТИЛИЗИРУЮЩИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГО-ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Б. Д. Билека

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом*
Контактный тел.: (044) 567-19-53, 456-63-65
E-mail: bilbo1@i.com.ua

Р. В. Сергиенко

Инженер I категории*
*ИТТФ НАН Украины
ул. Желябова, 2-А, г. Киев, 03057
Контактный тел.: (044) 456-28-57
E-mail: bilbo1@i.com.ua

Застосування енергетичних і холодильних циклів та установок вирішує задачу зниження енергозатратності перекачки газу та підвищує її продуктивність шляхом створення на компресорних станціях теплоутилізуючих установок на низькокиплячих робочих тілах, функціонуючих на високо- і низько потенційній скидній теплоті КС

Ключові слова: енергозатратність, тепло утилізація, енергетичні і холодильні установки, перекачка газу

Применение энергетических и холодильных циклов и установок решает задачу снижения энергозатратности перекачки газа и повышает ее производительность путем создания на компрессорных станциях теплоутилизующих установок на низькокипящих рабочих телах, функционирующих на высоко- и низкопотенциальной сбросной теплоте КС

Ключевые слова: энергозатратность, теплоутилизация, энергетические и холодильные установки, перекачка газа

Implementation of power and refrigeration cycles and plants allows solving the problem of decreasing energy consumption for gas transportation and increasing its efficiency by means of building heat utilization, power and refrigeration plants at compressor plants on low boiling working medium that function on the base of high and low-grade waste heat

Key words: Energy consumption, heat utilization, power and refrigeration plants, gas transportation

Наиболее важными задачами, определяющими повышение эффективности функционирования газотранспортных систем (ГТС), являются в первую очередь снижение энергозатратности, связанное с уменьшением расхода топливного газа в приводных двигателях, преимущественно газотурбинных, и электроэнергии, используемой на привод вентиляторов в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) компримируемого газа и масла, а также повышение производительности газоперекачки, т.е. пропускной способности газопроводов. Большую роль в решении этих задач могут сыграть технологии комбинированной выработки энергии, базирующиеся на использовании сбросной теплоты компрессорных станций (КС) с газотурбинным приводом. КС являются мощными постоянно действующими источниками высоко- и низкопотенциальной сбросной теплоты. Тепловые потенциалы одной КС средней мощности по высокопотенциальной теплоте (выхлопные газы при температурах 350...550°C) составляют 100...150 МВт, по низкопотенциальной (охлаждающий воздух после аппаратов воздушного охлаждения компримируемого газа при температуре 50...70°C) – до 20...30 МВт. В масштабах ГТС Украины этот потенциал сбросной теплоты можно оценить уровнями 8...12 млн. кВт и

2...2,5 млн. кВт соответственно. В настоящее время его следует рассматривать как уровень теплового загрязнения атмосферы.

Снизить энергозатратность за счет уменьшения расхода топливного газа на существующих газоперекачивающих агрегатах (ГПА), а также повысить производительность газоперекачки можно путем ввода новых приводных мощностей теплоутилизующих энергетических установок (ТУЭУ) с механическим или электрическим приводом нагнетателей. Повышение производительности газопровода также возможно за счет изменения параметров перекачиваемого газа, а именно за счет повышения глубины охлаждения компримируемого газа после нагнетателя. Глубина охлаждения газа в штатных АВО ограничивается охлаждающим потенциалом наружного воздуха. Проблемы в обеспечении номинальных расходов газа по магистрали особенно остры в жаркий летний период, когда АВО не могут обеспечить заданную расчетную глубину охлаждения газа вследствие высоких температур воздуха, и поэтому ГПА работают с повышенной мощностью, затрачивая при этом больше топливного газа и электроэнергии из внешних сетей.

Показано, что внедрение интенсивных систем охлаждения компримированного газа при его транс-

порте позволяет увеличить пропускную способность газопровода на 5...8% и снизить удельные приведенные затраты на 2...3% [1]. Повышение глубины охлаждения газа до более высоких значений, чем может обеспечить АВО газа, с помощью теплоутилизирующих энергоохлаждающих установок, функционирующих на сбросной теплоте КС, открывает большие возможности в повышении производительности магистрального газопровода при сохранении мощности ГПА и расхода топливного газа. Как показали исследования, экономия мощности КС на перекачку газа в зависимости от глубины охлаждения газа в 5...6 раз превышает затраты мощности на его охлаждение [2]. Однако возможность реализации идеи охлаждения газа на линейных КС до больших глубин, чем это позволяют АВО газа, практически не исследована.

По функциональному назначению рассматриваемые типы установок для решения этих задач можно классифицировать следующим образом:

а) теплоутилизирующие энергетические установки для производства механической или электрической энергии;

б) теплоутилизирующие холодильные установки для производства холода в целях охлаждения компримируемого газа или других целей;

в) комплексные теплоутилизирующие энергоохлаждающие установки для совместного производства электрической энергии и холода с помощью холодильных машин различных типов.

Технология использования сбросной теплоты газотурбинных установок на основе парогазовых установок, где реализуется два рабочих цикла - газовый Брайтона и пароводяной Ренкина, достаточно хорошо разработана и нашла широчайшее применение при выработке электроэнергии в большой энергетике. Однако в ГТС такая технология, связанная с использованием воды в качестве рабочего тела, не нашла (и маловероятно, что найдет) распространение. В последнее время большой интерес проявляется к применению безводных технологий в реализации цикла ПГУ как наиболее приемлемых для использования в системах газового транспорта. В качестве рабочих тел особенно перспективны вещества группы предельных углеводородов. На данный момент проведены обширные расчетные исследования, посвященные вопросам выбора и оптимизации тепловых схем, оборудования и рабочих тел теплоутилизирующих энергетических и энергоохлаждающих установок с использованием низкокипящих рабочих тел (НРТ) [2...6]. Здесь в качестве примера приведены результаты расчета термодинамического цикла ТУЭУ и наиболее важных термодинамических характеристик – удельной работы цикла и эффективного КПД установки, рассмотренных на НРТ, в зависимости от начальной температуры (рис. 1).

Как уже указывалось выше, создание теплоутилизирующих энергетических установок, использующих сбросную теплоту КС, решает ряд важных задач, прежде всего в проблеме энергосбережения. Такие установки позволяют без затрат дополнительного топлива полностью обеспечить КС дешевой электроэнергией для собственных технологических нужд (от 1 до 1,5 МВт), а также производить электроэнергию на продажу во внешнюю сеть. Возможным эффективным вариантом их использования является вариант с

электроприводом нагнетателя или с прямым механическим приводом его от ТУЭУ, что позволяет заметно уменьшить расходы топливного газа на КС. Отметим также важный экологический момент связанный с применением ТУЭУ на КС – снижение уровня теплового загрязнения атмосферы.

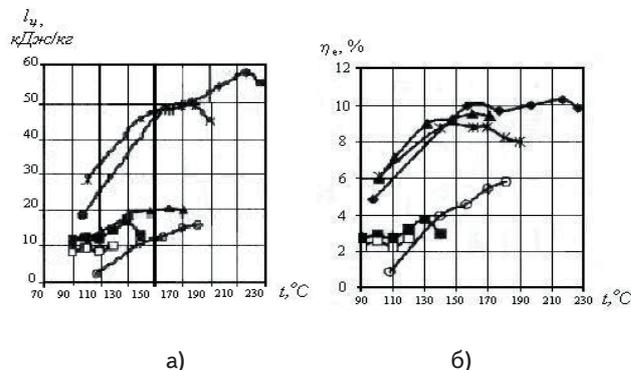


Рис. 1. Зависимости удельной работы цикла (а) и эффективного КПД (б) установки от начальной температуры НРТ: * - н-пентан, ◆ - гексан, ■ - н-бутан, □ - изобутан, о - R141b, ▲ - R123

Выбор схемных решений при утилизации сбросной теплоты зависит от конкретных особенностей КС: вида КС (линейная или тупиковая) и приводных двигателей ГПА; параметров отработанных газов двигателями; соотношения тепловых эквивалентов сбросной теплоты высокого и низкого потенциалов; возможностей использования в системах охлаждения природных водных источников; наличия свободных площадей для размещения дополнительного оборудования.

В зависимости от этих условий для выработки электроэнергии могут быть использованы следующие схемы теплоутилизирующих энергоустановок на НРТ:

а) простые – только с утилизацией высокопотенциальной теплоты отработанных газов базовой энергоустановки;

б) комплексные – с одновременной утилизацией теплоты высокого (уходящие газы) и низкого (компримируемый газ) потенциалов. При этом теплота низкого потенциала используется для подогрева НРТ после конденсатора, а высокого – для подогрева их до состояния сухого насыщенного пара в испарителе НРТ;

в) одноконтурные и двухконтурные с промежуточным высоко-температурным теплоносителем;

г) с водяным или воздушным охлаждением конденсатора НРТ;

д) с изменением температуры (необходимости подогрева или охлаждения) выхлопных газов приводных двигателей ГПА перед их подачей в теплообменники теплоутилизирующих энергоустановок.

В качестве базовых приводных двигателей ГПА рассматривались основные типы установок, применяемых в системе УКРТРАНСГАЗ: ГТУ простого цикла – ГТК-10; ГТУ с регенеративным циклом – ГТК-10Р; газопаровые установки с улавливанием впрыскиваемого пара типа «Водолей» КГПТУ-16К и КГПТУ-25, находящиеся в опытно-промышленной эксплуатации [4]. Для газотурбинной установки ГТК-10Р была рассчитана ТУЭУ при температуре уходящих газов после регенератора 275°C, а для ГТК-10 – при температуре отработанных

газов после газовой турбины 542°C . Принципиальные тепловые схемы ТУЭУ для этих типов установок, а также ГПУ типа «Водолей», представлены на рис. 2.

В ГПУ КГПТУ-16К, КГПТУ-25 для утилизации используются отработанные газы непосредственно после котла-утилизатора при температуре более 160°C . Этот уровень температур уходящих газов позволяет использовать их тепло в теплоутилизирующих энергоустановках для получения электроэнергии. Кроме того, котел-утилизатор КГПТУ-25 при необходимости поддерживает температуру отработанных газов на выходе около 200°C (для этого режима также была рассчитана ТУЭУ). Мощности теплоутилизирующих энергоустановок растут с увеличением температуры уходящих газов. С учетом этого был рассчитан режим с подмешиванием уходящих газов непосредственно после газовой турбины при температуре 454°C к уходящим газам после котла-утилизатора в КГПТУ-16К при температуре 164°C .

Для этих схем ТУЭУ были проведены тепловые, аэродинамические и гидравлические расчеты, в результате чего были определены основные характеристики и весогабаритные показатели основного тепломеханического оборудования – парогенераторов, газожидкостных охладителей компримируемого газа, паровых турбин.

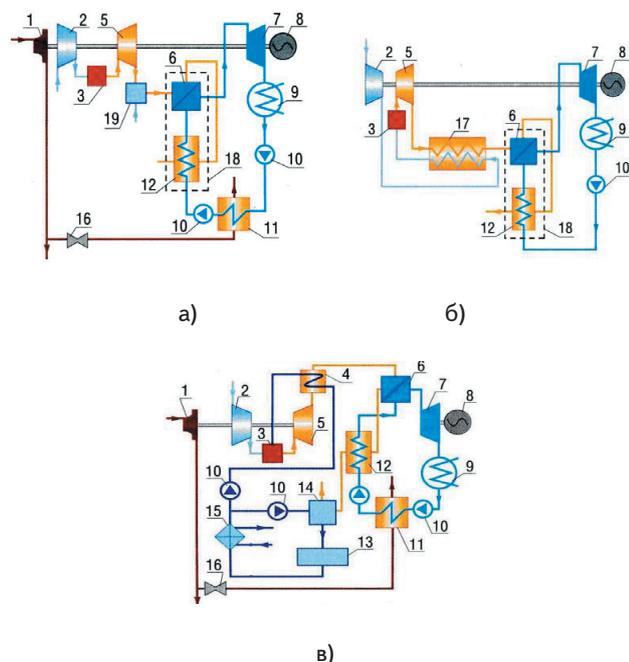


Рис. 2. Принципиальная схема комплексной ТУЭУ: а) на базе ГТУ простого цикла типа ГТК-10; б) на базе ГТУ регенеративного цикла типа ГТК-10Р; в) типа КГПТУ-16К, комбинированной, на НРТ

Наиболее эффективно задача повышения глубины охлаждения компримируемого газа решается с помощью применения холодильных машин, работающих последовательно с аппаратами воздушного охлаждения газа. Нами были рассмотрены возможности применения наиболее распространенных типов таких машин, а именно парожеткорных, абсорбционных, пароконпрессорных, а также с помощью эффектов, получаемых в турбодетандерных установках и холодильных установках, использующих эффект дроссе-

лирования газов или воздуха [2, 5, 6]. При решении этой задачи было поставлено условие не только не повышать энергопотребление КС, но по возможности снизить его, удовлетворяя прежде всего собственные нужды КС в электроэнергии также за счет сбросной теплоты ГПА с помощью ТУЭУ.

Из названных выше типов холодильных машин, машины с дросселированием газов, обладая конструктивной простотой и надежностью, имеют наименьшую удельную холодопроизводительность, не обеспечивающую решение поставленной задачи [2, 7]. Турбодетандерные холодильные машины обеспечивают получение более высоких удельных холодопроизводительностей, однако они требуют значительных механических или электрических мощностей извне для привода компрессора, сжимающего рабочее тело перед подачей его в турбодетандер. Для получения такой мощности можно использовать ТУЭУ, работающие на сбросной теплоте КС. Таким образом эту установку следует отнести к классу комплексных теплоутилизирующих энергохолодильных установок.

Практически близкой к турбодетандерной по основным характеристикам – холодильному коэффициенту, коэффициенту теплоиспользования, - является парожеткорная холодильная машина. По соображениям термодинамической эффективности в качестве рабочего тела принят н-бутан. Расчеты показали, что при этом может быть достигнута глубина охлаждения газа порядка $10..15$ град. При совместном использовании холодильной машины и АВО газа можно существенно снизить температуру компримируемого газа и заметно повысить производительность газопровода, особенно в летнее время.

Был также рассмотрен вариант использования парожеткорной холодильной машины в составе комплексной теплоутилизирующей энергохолодильной установки. Тепловая мощность, отводимая в холодильную машину, определяется как разность мощностей сбросной теплоты ГПА и теплоты, отводимой на покрытие собственных нужд всей установки. Глубина охлаждения компримируемого газа в этой холодильной машине несколько выше, чем в турбодетандерной, и составляет $5,6..8,5$ град.

Абсорбционные холодильные машины, хотя и обладают лучшими холодильными характеристиками, для условий работы КС дороги, слишком сложны в конструкции и в эксплуатации, и поэтому не рассматривались здесь. Наиболее эффективной по своим холодильным характеристикам является турбопароконпрессорная холодильная машина, холодильные коэффициенты и коэффициенты теплоиспользования которой практически в 3 раза выше, чем у всех рассмотренных выше машин. Полученные глубины охлаждения газа по установкам с различными ГТУ находятся на уровне $16,6..25$ град., что существенно (в 3...5 раз) превышает аналогичные величины в рассмотренных установках и свидетельствует о перспективности их применения в ГТС. Принципиальная тепловая схема теплоутилизирующей энергохолодильной установки с турбокомпрессорной холодильной машиной и энергетической паросиловой установкой в составе основного оборудования КС приведена на рис. 3.

Предложенные безводные технологии позволяют решить ряд важных задач в области энергоснабжения,

а именно, сокращения расхода топливного газа и повышения производительности перекачки газа в газотранспортных системах.

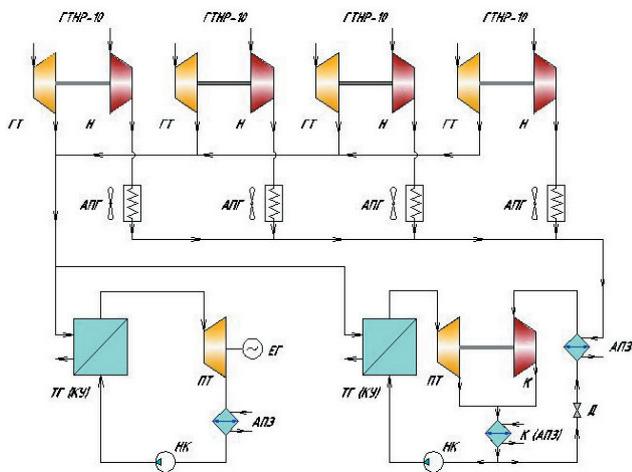


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема теплоутилизующей энерго-холодильной установки в составе КС

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Комплексная ТУЭУ на базе ГТУ простого цикла имеет наилучшие показатели по полученной мощности. Возможно дополнительно вырабатывать от 30 до 45 % механической или электрической мощности от базовой мощности ГТУ, что позволяет не только обеспечивать собственные нужды КС в электроэнергии, но и передавать ее избыток в сеть. Возможен также наиболее выгодный по экономической эффективности вариант использования этой энергии на привод дополнительного нагнетателя (или нагнетателей). Часть электрической мощности, вырабатываемой установкой за счет теплоты компримируемого газа, равна 9%. Использование НРТ для охлаждения компримируемого газа позволит на 48% уменьшить число АВО газу и тем самым уменьшить электрическую мощность их вентиляторов.

2) Показатели по полученной мощности комплексной ТУЭУ на базе ГТУ регенеративного цикла находятся на уровне 18...24% от базовой мощности ГТУ. Но эта ТУЭУ имеет ряд технологических и конструктивных преимуществ. Так как уровень температур газа после таких установок близок к оптимальному для пентаэнового цикла, нет необходимости в охлаждении выхлопных газов. Это упрощает конструкцию, а также исключает потери электроэнергии на привод воздушных вентиляторов (возможная экономия электрической мощности 30%). Относительная часть энергии, полученной за счет использования теплоты компримируемого газа, становится 15...17%.

3) В газопаровых установках с регенерацией воды из уходящих газов можно понизить мощность на охлаждение компримируемого газа на 7...8%, а дополнительная выработка электрической мощности за счет энергоустановок на НРТ невелика – от 1,2 до 3,0% , но целесообразность их использования обоснована снижением зависимости в потреблении электроэнергии КС от внешней сети, а также эконо-

мией приблизительно 20% расхода охлаждающего конденсата и воды на охлаждение холодильника и, соответственно, уменьшением энергетических затрат на ее прокачку.

4) Теплоутилизующие энергохолодильные установки, обеспечивая собственные нужды КС в электроэнергии, позволяют увеличить глубину охлаждения компримируемого газа. Наилучшие показатели по холодопроизводительности имеет турбопарокомпрессорная установка, обеспечивающая повышение глубин охлаждения газа на 16...25 град., что в 3...5 раз превышает эффекты, получаемые при применении других рассмотренных холодильных машин. Вместе с тем не следует отвергать возможность использования в ряде случаев теплоутилизующих холодильных установок с парожеткторными холодильными установками, которые, обеспечивая более низкие глубины охлаждения газа (10...15 град.), имеют серьезные преимущества в простоте конструкции, надежности эксплуатации и стоимости.

Литература

1. Динков В.А., Грищенко А.И., Васильев Ю.Н., Мужилковский П.И. Повышение эффективности использования газа на компрессорных станциях. М.: Надра. – 1981. – 296 с.
2. Билека Б.Д., Васильев Е.П. Использование комплексных теплоутилизующих энергохолодильных установок на низкокипящих рабочих телах для повышения эффективности работы компрессорных станций // Авиационно-космическая техника и технология. - 2004, вып.7(15).- С.8-12.
3. Билека Б.Д., Васильев Е.П., Клименко В.М., Коломеев В.М., Избаш В.И., Костенко Д.А., Кривуца В.А. Комплексне використання утилізаційних енергоустановок на КС для підвищення ефективності ГПА // Нафтова і газова промисловість. - 2001, №4, с.40-43.
4. Билека Б.Д., Васильев Е.П., Кабков В.Я., Костенко Д.А., Избаш В.И., Коломеев В.Н. Утилизация сбросной теплоты ГПА в энергоустановках с низкокипящими рабочими телами // Газотурбинные технологии. - 2002, №5(20). - С.6-10.
5. Билека Б.Д., Клименко В.Н., Захаров Ю.В., Радченко Н.И., Сирота А.А. Контуры на низкокипящих рабочих телах для комплексной утилизации теплоты в газопаротурбинных установках // Холодильная техника и технологии. - 2002, вып.3.- с.15-16.
6. Билека Б.Д., Радченко Н.И., Сирота А.А. Теплоиспользующие контуры ГТУ для охлаждения компримированного газа на газоперекачивающих станциях//Промышленная теплотехника. Приложение к журналу. - 2003.- Т.25, №4.
7. Билека Б.Д., Васильев Е.П., Избаш В.И., Коломеев В.Н. Комбинированная энергосберегающая технология перекачки газа для компрессорных станций магистральных газопроводов // Компрессорная техника и пневматика в XXI веке // Труды XIII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению. - 2004, Сумы, т.II.- С.156-162.