

УДК 621.438:621.564:621.643

Б.Д. Билека, В.Я. Кабков, Р.В. Сергиенко*Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина*

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗВОДНОГО ЦИКЛА РЕНКИНА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, УТИЛИЗИРУЮЩИХ СБРОСНУЮ ТЕПЛОТУ ПРИВОДНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

Энергетическая утилизация сбросной теплоты компрессорных станций (КС) газопароводов, учитывая огромный потенциал такой теплоты, может стать серьезным фактором повышения эффективности работы КС. Существенные достоинства в реализации таких проектов имеют безводные технологии с использованием в качестве рабочего тела цикла Ренкина низкокипящих рабочих тел (НРТ), в частности пентана.

Проведенные расчетные исследования паросилового цикла Ренкина теплоутилизующей энергетической установки (ТУЭУ) на пентане позволили определить влияние изменения начальных параметров НРТ при начале процесса истечения пара в турбине из разных областей состояния пара – с граничной линии сухого насыщенного пара, из области перегретого пара и из сверхкритической области на эффективность ТУЭУ.

Ключевые слова: сбросная теплота, компрессорная станция, низкокипящие рабочие тела, пентан, цикл Ренкина, параметры пара, теплоутилизующая энергетическая установка.

Введение

В последнее время все больший интерес проявляется к использованию низкокипящих рабочих тел (НРТ) в реализации парогазового цикла вообще, но особенно в газотранспортных системах при утилизации сбросной теплоты компрессорных станций (КС). Несмотря на термодинамические преимущества цикла ПГУ с пароводяным рабочим телом применение цикла с НРТ имеет серьезные технологические преимущества. Именно благодаря этому примерно за последние 10 лет на КС в ГТС США и Канады построено и принято в эксплуатацию 16 теплоутилизующих энергоустановок (ТУЭУ) с единичной мощностью 67 МВт с использованием в качестве рабочего тела в паросиловой части цикла пентана.

Число публикаций, посвященных особенностям выбора области состояния начальных параметров паросилового цикла при использовании в качестве рабочего тела пентана, крайне ограничено [1].

Цель работы: определение в паросиловой части цикла ПГУ рациональной области состояния начальных параметров НРТ при заданной ограниченной тепловой мощности источника сбросной теплоты, которым в нашем случае является теплота выхлопных газов приводных газотурбинных установок.

В проведенных расчетах одноконтурной схемы в качестве рабочего тела рассматривался пентан.

Расчеты и исследования доказали его преимущества по теплофизическим и технологическим свойствам [2]. Среди них такие: низкая температура кипения, высокая температура конденсации, низкая температура замерзания, высокая плотность пара. Кроме того пентан нетоксичный, озонобезопасный, имеет близкий к нулю потенциал глобального потепления, не приводит к коррозии проточной части.

Существует три состояния начальных параметров рабочего тела: 1) линия сухого насыщенного пара; 2) область перегретого пара; 3) сверхкритическая область.

На рис. 1 в системе координат давление–энтальпия изображен термодинамический цикл Ренкина в P - i диаграмме при начале цикла из 3-х областей. Особенностью расширения пентанового пара из значительной части докритической и сверхкритической областей является то, что весь процесс от начала расширения до конца происходит в области сухого перегретого пара. Одним из важных требований к начальной температуре является необходимость обеспечения такой температуры греющей среды на входе в парогенератор пентана, чтобы она была на 5-7 К ниже температуры самовоспламенения пентана (554 К). Достичь необходимой температуры греющей среды можно двумя способами: выполнить смешение отработанного газа с воздухом или использовать в качестве греющей среды от-

рабочий газ ГТУ регенеративного цикла или ПГУ. Для докритической области рекомендуется небольшой перегрев (35 К), учитывающий потерю тепла во внешнюю среду на участке тракта до турбины.

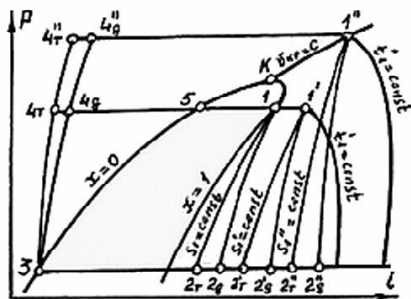


Рис. 1. Термодинамические циклы Ренкина теплоутилизирующей энергоустановки на пентане при различных начальных температурах

Процесс в сверхкритической области (точка 1'') начинается в критической точке, которая характеризуется двумя параметрами — температурой и давлением. Понижение либо температуры, либо давления ниже критического выводит вещество из сверхкритического состояния. Для этого состояния существует еще один критический параметр — удельный объем. Свойства вещества в сверхкритическом состоянии промежуточные между его свойствами в газовой и жидкой фазе. Эта область дает повышение работы турбины, но в то же время возрастают площади теплообменников и их масса, возрастает работа сжатия и охлаждения.

Изображенный на рис.1 цикл Ренкина в сверхкритической области состоит из таких составляющих: 1) процесс расширения в турбине 1''-2'', где учитывается внутренний КПД турбины, принятый равным 0,72; 2) изобарное охлаждение и конденсация в воздушном конденсаторе, 2''-3; 3) сжатие пентана 3-4'', при механическом КПД насоса 0,92 и тепловом 0,85; 4) подвод тепла в парогенераторе 4''-1'' (подогрев, испарение и перегрев).

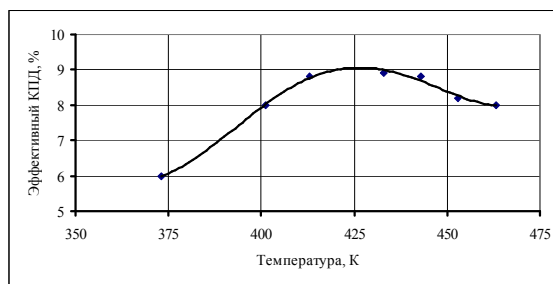
Расчетно-аналитическая часть

В расчетах определялась работа турбины, работы, затрачиваемые на охлаждение и сжатие пентана. Разработанная методика расчета рабочего цикла паросиловой части позволяет определить разность температур между греющим теплоносителем и нагреваемым по всему тракту. Для докритических параметров необходимо наличие в тракте парообразования нагреваемого теплоносителя участка, где парообразование происходит при постоянной температуре равной температуре насыщения.

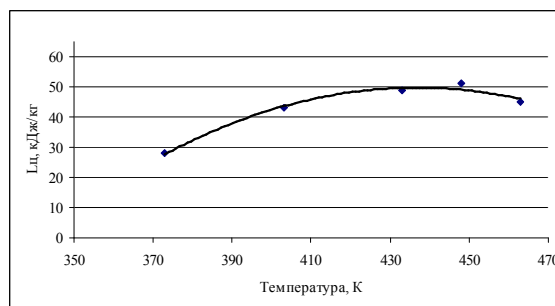
В случае сверхкритического режима парообразования явного участка парообразования при постоянной температуре нет. В этом случае для оценки разности температур между нагревающим

и нагреваемым теплоносителем выполняется последовательный расчет, используя разработанную балансную зависимость по ходу течения нагревающего теплоносителя и пентана.

Эта методика позволяет определить ограничения по мощности теплового источника и показывает осуществимость процесса. Она использована в программе при расчете температуры греющей среды и разности температур пентана и греющей среды по ходу течения этих сред, на основании которых принимается решение об осуществимости процесса.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости эффективного КПД (а) цикла и удельной работы (б) от начальной температуры пентана в цикле для докритических областей

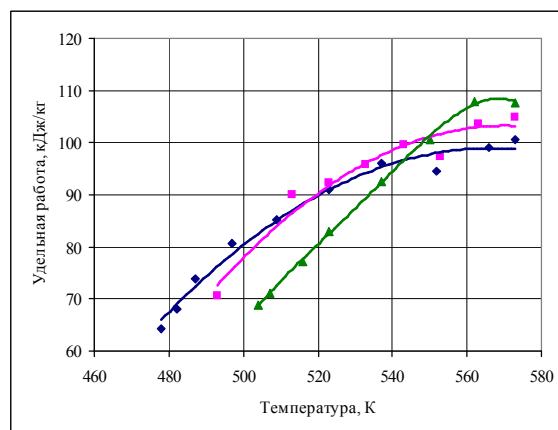


Рис. 3. Зависимость удельной работы пентановой турбины от начальной температуры пентана при различных давлениях: ◆ - 3,7 МПа; ■ - 4,8 МПа; ▲ - 6,5 МПа

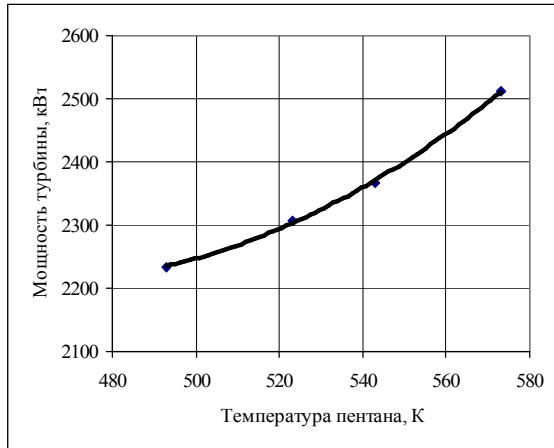


Рис. 4. Зависимость полезной мощности пентановой турбины от начальной температуры пентана при критическом удельном объеме.

В соответствии с рабочей программой исследований рассчитывались циклы с различными вариантами изменения их рабочих параметров, а именно переменные температура и давление, переменная температура и постоянное давление. Результаты расчетов на сверхкритических режимах приведены на рисунках 3 и 4.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Расчетные исследования показали, что при сравнении рабочих циклов из начальных точек с граничной линии сухого насыщенного пара и из области перегретого пара при сохранении давления и повышении температуры пара до 573 К мощности, получаемые в ТУЭУ, будут возрастать. Однако этот прирост мощности невелик и для докритической области находится в пределах 4,5 % при условии заданной ограниченной тепловой мощности сбросного источника теплоты. В качестве последнего рассмотрены выхлопные газы широко применяемого в ГТС Украины газотурбинного двигателя ДН-70 (с температурой

495 °С и расходом 34,9 кг/с). Это условие и параметры определяют величины температурных напоров в парогенераторе установки, которые будут снижаться при перегреве пара, а это в свою очередь снижает интенсивность теплопередачи и будет приводить к росту площадей теплообмена. Учитывая возможные потери теплоты при транспорте пара от парогенератора к паровой турбине целесообразно идти на небольшой перегрев пара (на 3...5 градусов). Мощность установки при этом практически не изменяется.

2. При расчетах процессов в сверхкритической области принято условие, что разница температур между греющей средой (отработанным газом) и пентаном будет не ниже 8 К. При температуре паров пентана на входе в турбину от 478 до 573 К прирост полезной мощности составляет 8,3 %.

3. В сверхкритической области при повышении температуры до 573 К, давления до 9,69 МПа и сохранении удельного объема на уровне критических значений (по линии критической изохоры) прирост мощности турбины составит 13,1%. Однако при этом в цикле возрастет в 2 раза давление пентана.

4. Сверхкритические начальные параметры дают прирост мощности пентановой турбины на 8...13%, но их использование ведет к существенному повышению давления в контуре (примерно в 2 раза), что в свою очередь обуславливает возрастание массы и габаритов турбины и теплообменников. Поэтому принятие решения о выборе таких параметров пентана для ТУЭУ нужно проводить с учетом экономической целесообразности для конкретного случая.

Перечень ссылок

1. Сапожников М.Б., Тимошенко Н.И. Предельная эффективность электрических станций на низкокипящих рабочих телах // Теплоэнергетика. – 2005. - №4. – С.68-72.

2. Билека Б.Д., Васильев Е.П. Низкокипящие вещества для работы в качестве рабочих тел в теплоутилизирующих энергоустановках на компрессорных станциях магистральных газопроводов // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. – Харків: ХАІ. – 2003. – Вип.42/7, С.33-35.

Поступила в редакцию 01.06.2011

Б.Д. Білека, В.Я. Кабков, Р.В. Сергієнко. Особливості вибору початкових параметрів безводного циклу Ренкіна для енергетичних установок, що утилізують скидну теплоту привідних газотурбінних установок компресорних станцій

Енергетична утилізація скидної теплоти компресорних станцій (КС) газопроводів, враховуючи великий потенціал такої теплоти, може стати серйозним фактором підвищення ефективності роботи КС. Суттєві переваги в реалізації таких проектів мають безводні технології з використанням в якості робочого тіла в циклі Ренкіна низькокиплячих робочих тіл (НРТ), особливо пентану.

Проведені розрахункові дослідження паросилового циклу Ренкіна теплоутилізуючої енергетичної установки (ТУЕУ) на пентані дозволили визначити вплив зміни початкових параметрів НРТ при початку процесу течії пари в турбіні з різних областей стану пари — з граничної лінії сухої насиченої пари, з області перегрітої пари та із надкритичної області на ефективність ТУЕУ.

Ключові слова: скидна теплота, компресорна станція, низькокиплячі робочі тіла, пентан, цикл Ренкіна, параметри пари, теплоутилізуюча енергетична установка.

B.D. Bileka, R.V. Sergienko, V.J. Kabkov. Features of choice of initial parameters of water-free Rankine cycle for power units which utilize waste heat of compressor stations

Taking into account large potential of waste heat of compressor stations of gas-main pipeline energy utilization of this waste heat may to raise efficiency of compressor stations substantially.

Water-free technologies which use pentane as low-boiling medium for Rankine cycle have considerable advantages under realization of such projects. The results of calculation of Rankine steam-power cycle with pentane as working medium enabled to define influence of turbine steam outflow initial parameters under different areas of steam state — from boundary of dry-saturated steam, from superheated steam, from supercritical area — on efficiency of power unit.

Key words: waste heat, compressor station, low-boiling medium, Rankine cycle, steam state, power unit.