

УДК 621.438:621.564:621.643

Р.В. СЕРГИЕНКО, Б.Д. БИЛЕКА, В.Я. КАБКОВ

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕПЛОУТИЛИЗИРУЮЩИХ УСТАНОВОК С НИЗКОКИПАЩИМИ РАБОЧИМИ ТЕЛАМИ

Учитывая огромный потенциал сбросной теплоты газотранспортных систем, утилизация этой теплоты на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов может стать серьезным фактором повышения эффективности работы КС. Как подтверждают мировые тенденции, существенные достоинства в реализации таких проектов имеют безводные технологии с использованием в качестве рабочего тела цикла Ренкина низкокипящих рабочих тел (НРТ).

В работе рассмотрены вопросы выбора НРТ и начальных параметров паросилового цикла. Проведен сравнительный анализ термодинамических характеристик и параметров рабочего цикла пентана и гексана. Исследования позволили определить влияние изменения начальных параметров на эффективность ТУЭУ.

Ключевые слова: теплоутилизующая энергетическая установка, низкокипящие рабочие тела, пентан, гексан, паросилового цикл, параметры пара, рабочее тело.

Введение

Применение низкокипящих рабочих тел (НРТ) открывает реальные возможности широкого использования огромных запасов источников низко-, а в ряде случаев и среднетемпературной теплоты промышленного и природного происхождения для производства механической или электрической энергии. Такой способ получения механической или электрической энергии от названных выше источников теплоты по сути безальтернативен.

Существует достаточно большой класс НРТ, использование которых для рассматриваемых целей возможно [1]. К низкокипящим веществам, применяемым в ТУЭУ, в настоящее время относятся: фреоны и их смеси; природные хладагенты (углеводороды, аммиак, диоксид углерода, воздух, вода); смеси фреонов с углеводородами, смеси углеводородов. Эти вещества производятся в основном для потребителей химической промышленности и нужд холодильной техники.

Однако наиболее перспективными, нашедшими наибольшее распространение, оказались органические вещества группы предельных углеводородов, а также фреоны. Область применения последних – низкотемпературные источники теплоты с температурой порядка 80-120 °С. Для первой группы характерны более высокие температуры.

Наиболее перспективными и распространенными органическими рабочими веществами являются пентан и гексан, а в некоторых случаях пропан и

изобутан. В геотермальной электроэнергетике для источников теплоты с температурой выше 120 °С чаще всего применяются пентан и изобутан [2]. Надо отметить, что НРТ этой группы могут быть использованы в качестве рабочих тел и при существенно более высокой температуре источников сбросной теплоты. Причиной этого является то, что несмотря на более высокие термодинамические свойства воды как рабочего тела при более высоких температурах, ряд теплофизических свойств этих НРТ определяют неоспоримые технологические качества в реализации паросилового цикла.

Особенности НРТ. Интерес к НРТ вызван следующим рядом объективных причин:

1) Сравнительно низкой критической и, следовательно, рабочей температурой (130-280 °С), температурой кипения (для пентана 36 °С, гексана 68,7 °С), что позволяет утилизировать теплоту в широком температурном диапазоне, а также комплексно и эффективно использовать низкотемпературную теплоту;

2) высокой температурой конденсации при атмосферном давлении (35-45 °С), благодаря чему можно использовать воздушные конденсаторы даже в тяжелых летних условиях, сохраняя при этом достаточно высокие температурные напоры в конденсаторах и выполняя их с атмосферным или близким к нему давлением, что существенно упрощает и удешевляет конструкцию;

3) низкая температура замерзания (от -70 до -80 °С), что является важным улучшающим обстоя-

тельством для эксплуатации установки;

4) высокая, существенно больше чем паров воды, плотность паров НРТ, что позволяет выполнять паровые турбины, паропроводы с заметно лучшими высокогабаритными характеристиками;

5) низкие скорости звука в парах НРТ, что упрощает конструкции, проектирование и изготовление турбин;

6) возможность использования НРТ и для производства холода;

7) возможность работы ТУЭУ в автоматизированном, автономном режиме.

К отрицательным свойствам НРТ следует отнести такие:

1) взрывопожароопасность ряда НРТ;

2) невысокие транспортные свойства в передаче теплоты вследствие низкой теплопроводности, что приводит к необходимости существенно развивать поверхности теплообмена и, следовательно, габариты и массу теплообменных аппаратов;

3) сравнительно низкая температура самовоспламенения, что вынуждает применять либо двухконтурные схемы установок с промежуточным высокотемпературным теплоносителем, либо искусственно снижать температуру греющих сред (в основном отработанных газов огнетехнических устройств) до температур ниже самовоспламенения.

Одним из наиболее ярких и убедительных примеров может служить случай использования сбросной теплоты на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов, где в качестве греющей среды используются выхлопные газы приводных газовых турбин с температурой от 350 до 560 °С.

В работах [3, 4] рассматривались вопросы выбора рабочих веществ и параметров рабочего цикла Ренкина для ряда НРТ. В качестве основного был исследован и выбран *n*-пентан. Однако рабочие паросиловые циклы были рассмотрены преимущественно в докритической области состояния пара. Вместе с тем некоторые данные, полученные по гексану, также свидетельствуют о возможности использования его в качестве рабочего тела в цикле Ренкина.

Цель работы: исследовать и сравнить термодинамические характеристики пентана и гексана – прежде всего удельной работы и эффективного КПД – в областях состояния паров пентана и гексана от докритического до критического и сверхкритического состояния.

По результатам проведенного анализа термодинамических и теплофизических свойств органических веществ [1] в качестве рабочего тела были выбраны *n*-пентан и гексан. Для персонала и окружающей среды они нетоксичны и озонобезопасны, не приводят к коррозии проточной части, имея при

этом хорошую текучесть. Гексан, имея в определенном температурном диапазоне лучшие термодинамические свойства (удельную работу цикла, эффективный КПД, удельную работу сжатия), уступает по такому важному показателю как температура самовоспламенения (для пентана она составляет 554 К, гексана 534 К). Но это не мешает использовать его в двухконтурных схемах теплоутилизирующих энергоустановок, где отсутствует прямой контакт НРТ с выхлопными газами.

Результаты и анализ расчетов

При реализации цикла Ренкина возможно использование трех состояний 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 на гексане в $\ln(p)$ - I диаграмме при начале цикла из названных областей.

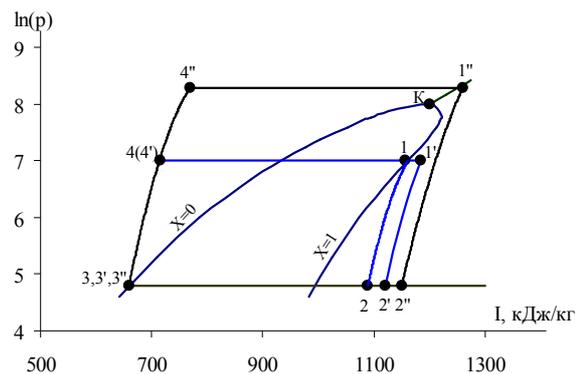


Рис. 1. Термодинамические циклы Ренкина теплоутилизирующей энергоустановки при различных начальных температурах

Реализация цикла осуществляется по такой схеме: 1) 1-2 – адиабатический процесс расширения в турбине; 2) 2-3 – изобарное охлаждение и конденсация НРТ; 3) 3-4 – сжатие гексана; 4) 4-1 – изобарное испарение и перегрев рабочего тела в парогенераторе.

Учитывая возможную потерю тепла на участке от парогенератора до турбины, желателен небольшой перегрев рабочего тела на 3-5 К. На рис. 1 этому соответствует цикл 1'-2'-3'-4' – докритический режим с незначительным перегревом. Особенностью сверхкритического режима (1''-2''-3''-4'') есть то, что процесс парообразования происходит скачкообразно, поэтому не наблюдается явного участка парообразования.

Методика расчетов.

С помощью разработанной методики в расчетах определялись все показатели, характеризующие рабочий цикл. Это полезная работа турбины, расход рабочего тела, работы на сжатие и охлаждение и т.д. Термодинамические расчеты, которые проводились в широком диапазоне начальных температур цикла из различных областей начального состояния пентана и гексана, определили характеристики этих НРТ и позволили сделать рациональный выбор целесообразной области их работы. В соответствии с рабочей программой исследований рассчитывались циклы с различными вариантами изменения рабочих параметров. На рис. 2 для докритических режимов приведены некоторые характеристики упомянутых рабочих тел.

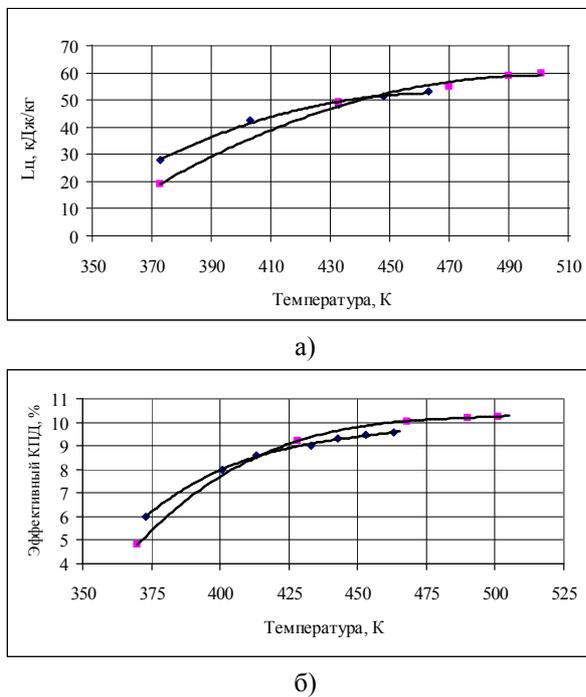


Рис. 2. Зависимости удельной работы (а) цикла и эффективного КПД (б) от начальной температуры пентана и гексана в цикле:

◆ – пентан; ■ – гексан

Одним из основных требований к выбору начальной температуры есть необходимость обеспечения температуры греющей среды на входе в парогенератор НРТ ниже на 5-7 К температуры самовоспламенения рабочего тела. Варианты реализации этого условия рассматривались в [3, 5].

Разработанная методика расчета позволяет определить разность температур между греющим теплоносителем и нагреваемым по всему тракту. Заданные их величины определяют ограничения по мощности теплового источника. Эта методика использована в программе при расчете температуры греющей среды и разности температур НРТ и грею-

щей среды по ходу течения этих сред. Исходя из расчетных данных был построен термодинамический цикл на гексане при заданной величине источника теплоты (в нашем случае рассматривался применяемый на ГТС газотурбинный двигатель ДН-70 с температурой 495 °С и расходом выхлопных газов 34,9 кг/с).

Расчет выполняется методом последовательных приближений при условии, что разница температур между греющей средой и рабочим телом (Δt) будет не ниже 8 К. Соблюдение этих условий позволяет в дальнейшем просчитывать реализуемые термодинамические циклы на НРТ и судить об осуществимости процесса. Свойства вещества в сверхкритическом состоянии промежуточны между его свойствами в газовой и жидкой фазе. Учитывая полученные результаты, а также результаты [5], можно провести сравнительный анализ пентана и гексана – рис. 3 и 4.

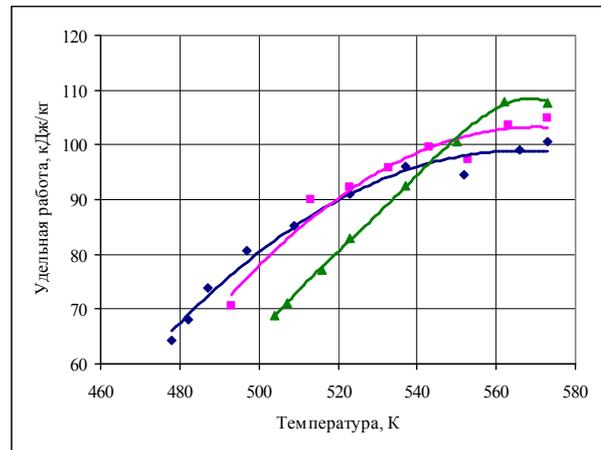


Рис. 3. Зависимость удельной работы пентановой турбины от начальной температуры пентана при различных давлениях:

◆ – 3,7 МПа; ■ – 4,8 МПа; ▲ – 6,5 МПа

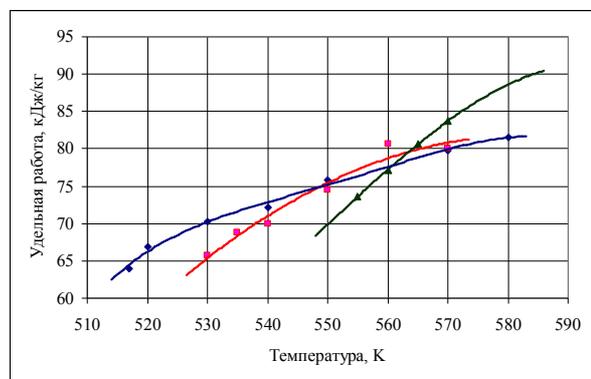


Рис. 4. Зависимость удельной работы гексановой турбины от начальной температуры гексана при различных давлениях:

◆ – 3,2 МПа; ■ – 4,0 МПа; ▲ – 5,0 МПа

Как вариант, рассматривались сверхкритические начальные параметры цикла по линии критического удельного объема (на рис. 1 от точки К до 1''). Здесь наблюдается явное преимущество пентана (рис.5), но не хватает заданной мощности сбросной теплоты и условие разницы температур греющей и нагреваемой среды не соблюдается, т.е. источник сбросной теплоты не ограничен.

При увеличении температуры рабочего тела тенденция роста удельной работы сохраняется при реализации цикла по линии критической изохоры, но это происходит только в условиях неограниченного источника тепловой мощности.

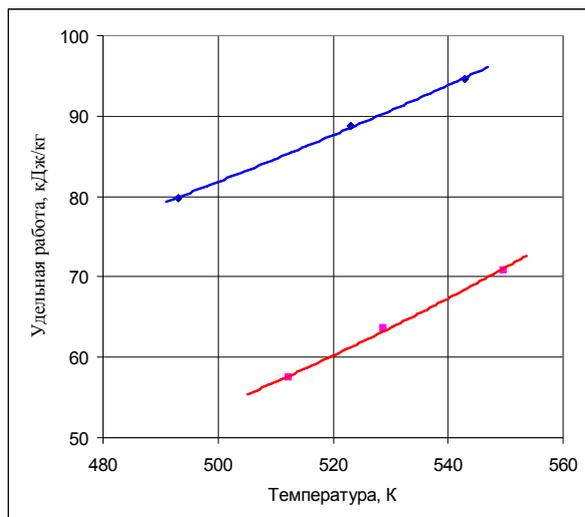


Рис. 5. Зависимость удельной работы турбины от начальной температуры рабочего тела при критическом удельном объеме:

◆ — пентан; ■ — гексан

Выводы

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. 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 удельные работы, получаемые в ТУЭУ, из-за роста работы охлаждения будут возрастать незначительно (4-5%). Поэтому нельзя признать однозначным вывод о целесообразности применения перегрева пара и необходимо рассмотрение каждого конкретного случая. Учитывая возможные потери теплоты при транспорте пара от парогенератора к паровой турбине целесообразно идти на небольшой перегрев пара (на 3-5 градусов).

2. При сравнении термодинамических параметров и характеристик НРТ на докритических режи-

мах следует иметь ввиду, что наклон правой пограничной кривой (линии насыщения) гексана более крутой, чем у пентана, что увеличивает работу охлаждения рабочего тела при одинаковом изменении в них начального давления и температуры. Относительная удельная работа охлаждения для пентана ощутимо ниже, чем у гексана. Транспортные и теплоаккумулирующие качества по передаче теплоты, характеризующиеся величинами коэффициентов теплопроводности и теплоемкости, у гексана несколько выше (примерно на 10 и 20% соответственно).

3. Исследования показали, что термодинамические показатели гексана в диапазоне начальных температур от 425 до 495 К несколько выше, чем у пентана (по КПД на 7,3%, по удельной работе до 11%). Однако при более высоких температурах эти показатели у пентана выше. Учитывая режимы работы ТУЭУ на НРТ в условиях КС, а именно изменение нагрузок и температур в широком диапазоне работы, а также то, что температура самовоспламенения гексана на 20 градусов ниже, чем у пентана, последний более эффективен.

4. Перевод режима работы установок на пентане и гексане на критические и сверхкритические параметры по сравнению с докритическими с началом рабочего цикла с линии насыщения, в зависимости от давления, при росте удельной работы практически в 2 раза повышает внутренний эффективный КПД на 5-13% для пентана, а для гексана при росте на 50%, повышение КПД - на 8-10%. Но поскольку при этом существенно возрастает толщина стенок турбины, паро- и трубопроводов, теплообменников, и таким образом массогабаритные показатели в целом, решение о переходе к работе на таких режимах должно приниматься на базе детального технико-экономического обоснования.

Литература

1. Билека, Б.Д. Низкокипящие вещества для работы в качестве рабочих тел в теплоутилизирующих энергоустановках на компрессорных станциях магистральных газопроводов [Текст] / Б.Д. Билека, Е.П. Васильев // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – Вип. 42/7. – С. 33 – 35.

2. Применение двухконтурных паротурбинных энергоустановок на низкокипящих рабочих телах в условиях геотермальных месторождений Украины [Текст] / А.А. Долинский, В.Н. Клименко, Б.Д. Билека, Е.П. Васильев // *Промышленная теплотехника*. – 2000. – Т. 22. – С. 30 – 42.

3. Билека, Б.Д. Комбинированные энергохолодильные установки для повышения эффективности работы газотранспортных систем [Текст] /

Б.Д. Билека // *Промышленная теплотехника*. – 2006. – № 2. – С. 132 – 149.

4. Сапожников, М.Б. *Пределная эффективность электрических станций на низкокипящих рабочих телах [Текст] / М.Б. Сапожников, Н.И. Тимошенко // Теплоэнергетика*. – 2005. – № 4. – С. 68 – 72.

5. Билека, Б.Д. *Особенности выбора начальных параметров безводного цикла Ренкина для энергетических установок, утилизирующих сбросную теплоту приводных газотурбинных установок компрессорных станций [Текст] / Б.Д. Билека, В.Я. Кабков, Р.В. Сергиенко // Вестник двигателестроения*. – 2011. – № 2 (25)/2011. – С. 138 – 141.

Поступила в редакцию 1.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., академик НАН Украины, зав. отдела ВТТГД А.А. Халатов, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОЧОГО ЦИКЛУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗУЮЧИХ УСТАНОВОК З НИЗЬКОКИПЛЯЧИМИ РОБОЧИМИ ТІЛАМИ

Р.В. Сергієнко, Б.Д. Білека, В.Я. Кабков

Враховуючи величезний потенціал скидної теплоти газотранспортних систем, утилізація цієї теплоти на компресорних станціях (КС) магістральних газопроводів може стати серйозним фактором підвищення ефективності роботи КС. Як підтверджують світові тенденції, суттєві переваги в реалізації таких проєктів мають безводні технології з використанням в якості робочого тіла в циклі Ренкіна низькокипячих робочих тіл (НРТ). В роботі розглянуто питання вибору НРТ і початкових параметрів паросилового циклу. Проведено порівняльний аналіз термодинамічних характеристик і параметрів робочого циклу пентану і гексану. Дослідження дозволили визначити вплив зміни початкових параметрів на ефективність ТУЕУ.

Ключові слова: теплоутилізуюча енергетична установка, низькокипячі робочі тіла, пентан, гексан, паросиловий цикл, параметри пару, робоче тіло.

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE WORKING CYCLE OF HEAT UTILIZED POWER PLANTS WITH LOW-BOILING WORKING MEDIUM

R.V. Sergienko, B.D. Bileka, V.J. Kabkov

Taking into account the great potential of waste heat of gas transportation systems, utilization of this heat at the compressor stations of gas pipeline could be a major factor in increasing the efficiency of its work. As confirmed by world trends, significant advantages in implementing of these projects are using waterless technology with low boiling medium (LBM) as working medium in Rankine cycle. The issues of choice LBM and initial parameters of steam power cycle are discussed in the paper. A comparative analysis of the thermodynamic characteristics and parameters of the working cycle of pentane and hexane is made. Researches have allowed to determine the influence of changes in the initial parameters on efficiency of heat utilized power plants.

Key words: heat utilized power plant, low-boiling working media, pentane, hexane, steam power cycle, steam parameters, the working medium.

Сергиенко Роман Владимирович – аспирант, инженер I категории отдела диагностики и оптимизации в энергетике Института технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, e-mail: bilbo1@i.com.ua.

Билека Борис Дмитриевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией технологий комбинированной выработки энергии Института технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, e-mail: bilbo1@i.com.ua.

Кабков Виктор Яковлевич – научный сотрудник отдела диагностики и оптимизации в энергетике Института технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, e-mail: bilbo1@i.com.ua.