

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ, проф., д.т.н., зав. лабораторией пористых сред,
 Л.Е. КАНОНЧИК, к.т.н., с.н.с. лаборатории пористых сред,
 А.А. АНТУХ, н.с. лаборатории пористых сред,
 ГНУ ИТМО НАН Беларуси

Современные термодинамические циклы в энергетике — способ уменьшения выбросов углекислого газа в атмосферу и повышение КПД электростанций

Важнейшей задачей рационального развития энергетики является эффективное использование топливно-энергетических ресурсов наряду с полным обеспечением защиты атмосферы Земли от глобального потепления (протокол, подписанный в Киото). Тепловые электрические станции — один из объектов, усовершенствование которых имеет большое народнохозяйственное значение. Основные тепловые станции Республики Беларусь работают на природном газе (метане), поступающем из России. Поэтому при анализе возможности применения газовых и паровых турбин, тепловых насосов с газовым/электрическим приводом с целью повысить КПД станций следует принимать во внимание особенности их работы на природном газе. Одновременное получение тепла и холода, реализация дополнительных низкотемпературных газовых и паровых циклов (Брайтона и Ренкина) способствуют увеличению КПД электрических станций согласно первому и второму законам термодинамики.

Идея комбинированного использования тепла и энергии достаточно проста: в тепловых конденсационных электрических станциях приблизительно 40% первичной энергии тратится на выработку электроэнергии и 60% выбрасывается в окружающую среду отработанной водой и дымовыми газами. В масштабе страны выработка электроэнергии и тепла составляет приблизительно 2/3 от общего потребления энергии. Однако электричество производится локально на конкретных электрических станциях и распространяется по электросетям, а тепло производится непосредственно у потребителя. Безусловно, для получения тепла необходимо иметь топливо (природный газ, мазут, уголь и т.д.), которое также распространяется по трубам либо доставляется с помощью транспорта.

Тепловая станция — прежде всего объект крупного промышленного тепловыделения в результате сжигания топлива, сопровождаемого получением вторичного продукта — электричества. Хотя теплофикационные электрические станции (ТЭЦ) вырабатывают совместно электричество и полезную теплоту (когенерация), сложно осуществлять эти процессы таким образом, чтобы они были максимально эффективны. Всегда что-то производится в ущерб чему-то. Например, пик потребления электричества часто не совпадает с пиком потребления теплоты из-за имеющей место разбежки по времени между максимальным использованием теплоты и электричества у потребителя. На КЭС 50-60% бросового тепла потенциально можно использовать для дополнительного получения электроэнергии (низкотемпературные циклы на органических теплоносителях) либо получения высокотемпературной теплоты и холода (тепловые насосы, тепловые трансформаторы). В частности, бросовую тепловую энергию КЭС можно применять в системах отопления, кондиционирования, для нужд сельского хозяйства и промышленности (овощехранилища, районные промышленные холодильники и т.д.).

Возникает вопрос, каково будет влияние тепловых электрических станций на окружающую среду, если они начнут работать на комбинированных термодинамических циклах (выработка теплоты и электроэнергии или теплоты, холода и электроэнергии). Будет ли это лучше или хуже с точки зрения охраны окружающей среды?

С точки зрения термодинамики, системы комбинированного получения теплоты, холода и электричества имеют более высокую эффективность по сравнению с системой выработки только электроэнергии. Подробно данный вопрос изучен в работах [1, 2].

Рассмотрим схему работы тепловой электрической станции с паровыми и газовыми турбинами. В зимнее время отработанный пар, подаваемый в градирню, может успешно использоваться для повышения температуры природного газа, поступающего на вход турбодетандеров газовых турбин. Достижение этой цели возможно с помощью реверсивного абсорбционного теплового насоса, высокотемпературным источником энергии которого являются газовые горелки, а низкотемпературным источником энергии служит отработанный пар паровых турбин. Абсорбционный тепловой насос (через теплообменник) увеличивает температуру метана на входе в турбодетандер до 333-343°K, что необходимо для работы последнего в штатном режиме. Абсорбционный тепловой насос повышает эффективность станции и более пригоден для получения высокотемпературного тепла, чем парокомпрессионное устройство. Коэффициент эффективности такого теплового насоса $COA = Q_{us}/Q$,

где Q_{us} — полезная теплота (теплота, выделяемая газовыми горелками + теплота части отработанного пара);

Q — теплота, расходуемая на теплофикацию.

В данном случае безразмерное соотношение R определяется как:

$$R_{H.P.} = \frac{WA_{el} + COAQ}{Q_p A_f} = \eta_{el} \frac{A_{el}}{A_f} + \frac{COA}{\eta_b} (\eta_g - \eta_{el}) = \frac{\eta_g}{\eta_b} COA + \eta_{el} \left[\frac{A_{el}}{A_f} - \frac{COA}{\eta_b} \right], \quad (1)$$

где $\eta_{el} = W/Q_p$ — отношение произведенной электроэнергии к энергии топлива;

$\eta_g = (W+Q)/Q_p$ — отношение произведенных электрической и тепловой энергий к энергии топлива;

η_b — эффективность газовой горелки;

$R = E_{conv}/E_{cog}$ — отношение количества CO_2 , выброшенного в атмосферу при работе КЭС к количеству CO_2 , выброшенному в атмосферу при работе ТЭЦ;

$E_{conv} = WA_{el} + (Q/\eta_b) A_f$ — эмиссия CO_2 в атмосферу при работе КЭС;

$E_{cog} = Q_p A_f$ — эмиссия CO_2 при работе обычных котлов,

Q_p — теплота сжигания топлива,

A_{el} — количество CO_2 , полученное при выработке 1 кВт электроэнергии;

A_f — эмиссия CO_2 при сжигании топлива.

Величина $R_{H.P.}$ и уменьшение выбросов CO_2 ($1-R_{H.P.}^{-1}$) в атмосферу при использовании на станции абсорбционного теплового насоса для подогрева газа в случае $A_{el}/A_f = 3$, $\eta_b = 0,9$ и $COA = 1,5$ приведены в таблице 1.

В отличие от парокompрессионного и абсорбционного тепловых насосов, тепловой насос на твердых сорбентах (адсорбционный тепловой насос) позволяет одновременно подогревать метан перед входом в турбодетандер и генерировать холод для холодильника либо овощехранилища, поскольку он обеспечивает перепад температуры 70°K и более. Стоимость адсорбционного теплового насоса существенно ниже стоимости абсорбционного теплового насоса. Эффективность применения адсорбционного теплового насоса максимальная по сравнению со всеми предыдущими вариантами, поскольку вся теплота, вырабатываемая адсорбционным тепловым насосом, расходуется на подогрев газа (без учета потерь).

$$\eta_g^{tot} = \frac{W + Q_{us} + C}{Q_p} = \frac{W + QCOA + QCOP_{ads}}{Q_p};$$

$$COP_{ads} = \frac{C}{Q}; \quad COA = \frac{Q_{us}}{Q};$$

$$R^{tot} = \eta_{el} \frac{A_{el}}{A_f} + (\eta_g - \eta_{el}) \left[\frac{COA}{\eta_b} + \beta \frac{A_{el}}{A_f} \right]. \quad (2)$$

Допустим, что COP адсорбционного теплового насоса равно 0,7 ($COP = 0,7$), а $COA = 1,5$. Сравнительная оценка эффективности внедрения такого насоса ($A_{el}/A_f = 3$, $\eta_b = 0,9$) для различных способов производства электроэнергии представлена в таблице 2.

Видно, что применение на станции адсорбционного теплового насоса с нагревательной и холодильной функциями обеспечивает заметное уменьшение выбросов CO_2 в атмосферу. Действующий тепловой насос на твердых сорбентах непосредственно на месте его установки не дает вредных выбросов. Если источник внешней энергии экологически чист, то, естественно, производство теплоты и холода является практически чистой, с экологической точки зрения, технологией.

В Республике Беларусь эмиссия CO_2 в атмосферу велика, поскольку большая часть топлива расходуется на выработку электроэнергии ($A_{el}/A_f = 3$). Предположим, что одна треть энергопотребления Республики Беларусь осуществляется с помощью систем отопления, кондиционирования и вентиляции. Считаем также, что половина энергопотребления для целей отопления осуществляется на основе систем комбинированного энергообеспечения (электричество, теплота и холод), для которых характерны величины $\eta_b = 0,9$, $\eta_g = 0,8$ и $\eta_{el} = 0,4$.

При оценке отношения количества CO_2 , выброшенного в атмосферу КЭС, к количеству CO_2 , выброшенного от ТЭС, мы получим величину $R = E_{conv}/E_{cog} = 1,64$, т.е. уменьшение выбросов на 40%.

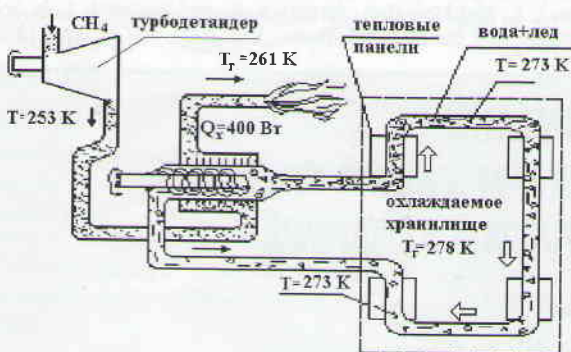


Рис. 1. Схема утилизации холода на выходе из турбодетандера: холодный газ после детандера проходит через теплообменник и отдает холод промежуточному хладагенту (ледяной воде).

Таблица 1

Уменьшение эмиссии CO_2 при использовании абсорбционного теплового насоса на КЭС

	R_{HP}	$(1-R_{HP}^{-1}) \cdot 100\%$
Паровые турбины	1,44	30%
Газовые турбины	1,56	36%
Дизель-генераторы	1,78	44%
Комбинированные циклы	2	50%

Таблица 2

Уменьшение эмиссии CO_2 при использовании всех возможных средств утилизации энергии сжигаемого топлива (адсорбционный тепловой насос)

	R_{HP}	$(1-R_{HP}^{-1}) \cdot 100\%$
Паровые турбины	1,87	46%
Газовые турбины	1,85	46%
Дизель-генераторы	2,03	50%
Комбинированные циклы	2,21	55%

От общего объема выбросов CO_2 в атмосферу при сжигании всего органического топлива эта величина составит 13%.

Эффективность работы паровых и газовых турбин на тепловых электрических станциях в течение года зависит от параметров газа. Однако практикуемое в настоящее время применение воды городской тепловой сети для подогрева газа, поступающего в турбодетандер из магистрали, и повышение нагрузки ДГУЭ до номинальной величины в теплое время года не представляется возможным из-за температурного графика систем отопления. В зимнее время нагрузка ДГУЭ ограничена низким расходом газа на выработку электроэнергии.

Повышение эффективности работы КЭС может быть достигнуто за счет использования парокompрессионных тепловых насосов с газовым либо электрическим приводом (электричество вырабатывается электрогенератором газовой турбины). Холод может генерироваться на выходе из турбодетандера газовой турбины и с помощью теплового насоса, обеспечивающего как необходимую теплоту (для подогрева газа, подаваемого на детандер), так и холод. Кардинальное решение вопроса постоянной загрузки ДГУЭ до номинальной величины круглый год обеспечивает адсорбционный тепловой насос, включенный перед ДГУЭ для подогрева газа с 268°K до 353°K (за счет утилизации низкопотенциальной энергии конденсата паровых турбин) при одновременной выработке холода (в дополнение к холоду турбодетандера).

Наиболее термодинамически выгодны сорбционные машины с газовым источником нагрева, которые дают возможность реализовать четыре варианта использования холода:

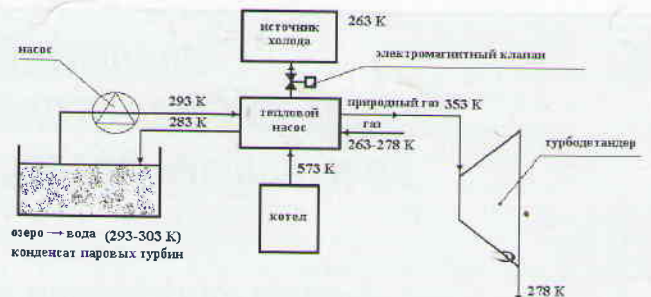


Рис. 2. Схема утилизации низкотемпературного сбросного тепла (бассейн) для подогрева природного газа на входе в турбодетандер с помощью сорбционного теплового насоса с возможной генерацией холода на выходе теплового насоса.



- 1) кондиционирование и охлаждение (268°K - 283°K) — овощехранилища;
- 2) холодильники пищевых продуктов (258°K - 268°K);
- 3) морозильники (248°K - 213°K);
- 4) ледовая дорожка.

На рис. 1-4 указаны различные способы применения турбодетандера газовой турбины с целью утилизации холода и повышения технико-экономических показателей станции.

В зависимости от времени года температура газа на входе в газораспределительную станцию меняется от 263°K до 293°K, а давление, соответственно, от 4 до 8 МПа. Давление газа перед горелочными устройствами котла составляет 0,12-0,3 МПа. Если газ перед детандером не подогревать, то после расширения его температура может понизиться до 173°K, что чревато большими проблемами с детандером, турбиной и регулирующей аппаратурой турбины. Подогревать метан необходимо до такой температуры, чтобы на выходе из детандера она была не ниже нуля градусов.

Обычно подогрев метана на детандер-газотурбинной установке осуществляется за счет сжигания органического топлива. Избавиться от указанного недостатка можно, применяя для подогрева газа перед детандером тепловой насос, что повышает КПД турбины. Вращение компрессора теплового насоса может обеспечить перепад давления газа (газовый привод) либо электрическая энергия, вырабатываемая газовой турбиной (электрический привод). Низкотемпературная часть теплового насоса служит для генерации холода в холодильнике (овощехранилище и т.д.). Тепловой насос повышает уровень температуры метана перед его поступлением в детандер, откуда газ после расширения направляется к газовым горелкам. При этом механическая работа, полученная в детандере, преобразуется в электрическую энергию в электрогенераторе. Применение детандер-генераторных установок в сочетании с тепловыми насосами позволяет получать значительную дополнительную электроэнергию и одновременно ис-



пользовать холод теплового насоса и детандера для организации хранения продуктов питания.

Все вышеуказанные системы производства холода совместимы с адсорбционными и абсорбционными аккумуляторами холода и холодильными машинами.

Сорбционные холодильные системы могут взаимодействовать с низкотемпературными энергетическими установками, работающими по циклу Ренкина (на органических теплоносителях) или на эффекте Джоуля-Томсона.

Заключение

1. Использование в Республике Беларусь комбинированных циклов выработки электроэнергии, теплоты и холода на тепловых электрических станциях даст возможность повысить эффективность их работы и уменьшить эмиссию углекислого газа в атмосферу. Комбинированные циклы особенно выгодны для тепловых станций, где имеет место большой объем вредных выбросов CO₂.

2. На тепловых электрических станциях, работающих на природном газе, целесообразно использование комбинированных циклов (паровые и газовые турбины) наряду с применением абсорбционных или адсорбционных насосов для утилизации бросового тепла паровых турбин с целью предварительного нагрева природного газа на входе в турбодетандеры и повышения параметров газовых турбин. Одновременно адсорбционные тепловые насосы могут обеспечивать генерацию холода для нужд сельского хозяйства и пищевой промышленности.

3. Холод, генерируемый в хвостовой части турбодетандеров, также может быть использован (дополнительно к тепловым насосам) для нужд сельского хозяйства (районные и областные овощехранилища, холодильники).

Литература

1. Meunier F. Co-and-trigeneration contribution to climate change control//Appl. Therm. Eng. 2002. Vol. 22. Pp. 703-718.
2. Vasiliev L. L., Mishkinis D. A., Antukh A. A., and Vasiliev L. L. Jr. Solar-gas solid sorption heat pump//Appl. Therm. Eng. 2001. Vol. 21. Pp. 573-583.

«ПОЛОЖЕНИЕ О НОРМИРОВАНИИ РАСХОДА ТОПЛИВА, ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

можно приобрести в УП «Белэнергосбережение»
в количестве от 10 экземпляров.

220037, г. Минск, ул. Долгобродская, 12/2. Тел./факс: (017) 235-82-61