

УДК 662.66.001.5

Сравнение термодинамической эффективности систем энергоснабжения с раздельной и совмещенной генерацией произведенных энергоносителей*

А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин, П.Н. Борисова, Г.А. Романов

*Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»*

E-mail: agababovvs@yandex.ru

Рассматриваются вопросы повышения термодинамической эффективности генерации произведенных энергоносителей, таких, например, как холод, водород, сжатый воздух. В основе предлагаемой технологии, получившей название «мультигенерация», лежит создание энергетических комплексов, состоящих из объектов генерации и потребителей. В задачу объектов генерации наряду с производством традиционных энергоносителей, таких как электроэнергия и тепло, входит также производство других произведенных энергоносителей и иных полезных продуктов, которые при раздельном производстве генерировались либо у потребителей, либо на специально для этой цели предназначенных предприятиях. Показаны преимущества реализации технологии мультигенерации как для отдельных объектов генерации и потребителей, так и для систем энергоснабжения в целом. В качестве критерия оценки термодинамической эффективности для отдельного объекта генерации принято изменение удельного расхода топлива на производство электроэнергии и тепла, а для системы энергоснабжения — абсолютное и относительное изменения эксергетического КПД генерации всех произведенных энергоносителей. Приводятся полученные в ходе проводимого исследования формулы для сравнительных расчетов эффективности при совмещенной и раздельной генерации произведенных энергоносителей при принятых критериях оценки. Также приводятся принятые условия и результаты расчетов изменения эффективности генерации произведенных энергоносителей при переходе от раздельной к совмещенной генерации для энергетического комплекса в составе паротурбинной установки Т-100-130 в сочетании с парокompрессионным и абсорбционным термотрансформаторами, работающими в режиме холодильной машины.

Ключевые слова: мультигенерация, совмещенная и раздельная генерации, термодинамическая эффективность, произведенные энергоносители, эксергетический КПД.

Введение

Существенную роль в повышении эффективности топливоиспользования в теплоэнергетике играет обеспечение работы основного оборудования объектов генерации, производящих электроэнергию (конденсационные электростанции, КЭС) либо электроэнергию и тепло (теплофикационные электростанции, ТЭЦ), в оптимальных режимах, т.е.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по гос. заданию в рамках конкурсного отбора научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и научных лабораторий организаций высшего образования (номер заявки 13.3233.2017/ПЧ) и при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ в рамках получения стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам по научному проекту № СП-1141.2018.1.

в режимах с наилучшими энергетическими показателями. В существующих условиях эксплуатации это является достаточно сложной задачей из-за резких сезонных и суточных изменений потребности в электроэнергии и тепле. Так, например, потребление электроэнергии в летние месяцы года по сравнению с зимними снижается в 1,5–2 раза, а потребление тепла в этот период времени составляет в большинстве районов России 10–20 % от потребления в зимние месяцы. Суточная неравномерность потребления электроэнергии также достаточно велика: дневные электрические нагрузки на некоторых объектах генерации превосходят ночные более чем в 2 раза.

Один из возможных способов обеспечения постоянства нагрузки состоит в использовании временно свободных электрической и тепловой мощностей объекта генерации для производства дополнительных энергоносителей, а также иных полезных продуктов, необходимых потребителям. Обычно эти произведенные энергоносители (холод различных температурных параметров, водород, сжатый воздух, сжиженный газ и др.) генерируются либо непосредственно у самих потребителей, либо на предназначенных специально для этой цели предприятиях. Совмещенное одновременное производство на объекте генерации не менее двух энергоносителей из единственного первичного энергоносителя получило название «технология мультигенерации». Это направление начало рассматриваться в мировой научно-технической литературе в конце предыдущего столетия. В обзорных статьях [1–3] было проанализировано около пяти сотен англоязычных публикаций, что позволило их авторам сделать вывод о достаточно хороших перспективах развития технологии мультигенерации. К сожалению, число публикаций отечественных авторов по этой проблеме невелико, к ним относятся, например, работы [4–9].

В табл. 1 показаны преимущества и недостатки совмещенной и раздельной генераций. Разумеется, окончательный ответ на вопрос о целесообразности использования той или иной генерации в каждом конкретном случае дает технико-экономический анализ, однако в настоящей статье уделять внимание этим вопросам не планируется, авторы предполагают рассмотреть их в последующих публикациях. Вместе с тем, сопоставление совмещенной и раздельной генераций произведенных энергоносителей базируется на термодинамическом анализе, который должен показать принципиальную возможность большей именно термодинамической эффективности совмещенного производства ряда энергоносителей по сравнению с их раздельной генерацией. Очевидно, что результаты

Таблица 1

Преимущества и недостатки использования совмещенного производства энергоносителей

Объект	Преимущества	Недостатки
Объект генерации	Увеличение тепловой экономичности, снижение удельных расходов топлива; доход от продажи дополнительных произведенных энергоносителей; удовлетворение собственных потребностей в дополнительных энергоносителях.	Необходимость финансовых вложений во вновь устанавливаемое для объекта генерации оборудование; организация эксплуатации нового оборудования; транспортировка произведенных энергоносителей потребителям; возможное аккумулирование произведенных энергоносителей.
Потребитель	Уменьшение закупок электроэнергии и тепла; отказ от собственного производства необходимых для организации технологических процессов энергоносителей, упрощение организации работы предприятия и повышение надежности выпуска основной продукции.	Изменение системы потребления произведенных энергоносителей; необходимость оплаты централизованно поставляемых дополнительных (кроме электроэнергии и тепла) энергоносителей; возможное появление необходимости аккумулирования некоторых из централизованно полученных произведенных энергоносителей.
Система энергоснабжения	Суммарное уменьшение расхода топлива на генерацию произведенных энергоносителей.	Организационные трудности, связанные с определенной реорганизацией систем энергоснабжения.

определения термодинамической эффективности необходимы при определении и технико-экономической эффективности использования установок, генерирующих энергию. Стоит отметить, что в имеющейся литературе авторам не удалось обнаружить сколь-нибудь убедительного подобного анализа.

При реализации технологии мультигенерации кроме энергоносителей могут генерироваться также и иные продукты, использование которых в качестве произведенных энергоносителей изначально не предусматривается (например, химические удобрения). В таких случаях термодинамический анализ имеет ограниченное значение, и для определения эффективности применения технологии мультигенерации должны быть использованы экономические критерии.

Задачей настоящего исследования является определение условий, при которых централизованное (совмещенное) производство необходимых потребителю энергоносителей оказывается термодинамически более эффективным, чем при их раздельной генерации при условии полного удовлетворения потребителей. Возможно рассмотрение трех случаев изменения эффективности работы оборудования при реализации технологии мультигенерации: для отдельно взятого объекта генерации; для отдельно взятого потребителя; для системы энергоснабжения в целом.

Объект генерации

Для определения термодинамической эффективности отдельно взятого объекта генерации в качестве критерия принимаются затраты первичного энергоносителя на выработку электроэнергии и тепла, что определяется изменением удельных расходов топлива на выработку электроэнергии Δb_N и тепла Δb_Q по сравнению с теми же показателями при работе до внедрения рассматриваемой технологии, т.е. при раздельной генерации произведенных энергоносителей. Сравнение удельных расходов топлива на выработку электроэнергии $b_{исхN}$ и тепла $b_{исхQ}$ проводится при исходных режимах работы основного оборудования объектов генерации с пониженными электрической $N_{исх}$ и тепловой $Q_{исх}$ нагрузками и при значениях этих показателей $b_{номN}$ и $b_{номQ}$ при работе в режиме с номинальными электрической $N_{ном}$ и тепловой $Q_{ном}$ мощностями:

$$\Delta b_N = b_{исхN} - b_{номN}, \quad (1)$$

$$\Delta b_Q = b_{исхQ} - b_{номQ}. \quad (2)$$

При этом уменьшение потребления топлива за счет снижения его удельных расходов на выработку электроэнергии и тепла определяются из зависимостей:

— снижение потребления топлива на выработку электроэнергии за период времени τ :

$$\Delta B_N = N_{ср} \Delta b_N \tau, \quad (3)$$

— снижение потребления топлива на выработку тепла за период времени τ :

$$\Delta B_Q = Q_{ср} \Delta b_Q \tau, \quad (4)$$

где $N_{ср}$ и $Q_{ср}$ — средние за период времени τ электрическая и тепловая мощности объекта генерации соответственно.

Суммарное снижение расхода топлива ΔB_τ на выработку электрической энергии и тепла за период времени τ записывается как

$$\Delta B_\tau = (\Delta B_N + \Delta B_Q) \tau. \quad (5)$$

В качестве периода времени может рассматриваться календарный месяц.

Годовое снижение расхода топлива на выработку электрической энергии и тепла определяется выражением

$$\Delta B_{год} = \sum_1^{12} \Delta B_\tau. \quad (6)$$

Таким образом, для определения годового снижения расхода топлива на выработку электрической энергии и тепла на объекте генерации после внедрения технологии мультигенерации необходима следующая исходная для расчетов информация: среднемесячные в течение календарного года электрическая $N_{\text{ср}}$ и тепловая $Q_{\text{ср}}$ мощности объекта генерации; среднемесячные в течение календарного года удельные расходы топлива на выработку электроэнергии $b_{\text{исх}N}$ и тепла $b_{\text{исх}Q}$; удельные расходы топлива на выработку электроэнергии $b_{\text{ном}N}$ и тепла $b_{\text{ном}Q}$ при работе в номинальных режимах.

Потребитель

В связи с тем, что при реализации технологии мультигенерации у потребителей не предусмотрено использования первичных энергоносителей для генерации произведенных энергоносителей, изменение их термодинамической эффективности при переходе к технологии мультигенерации может определяться лишь различиями в энергетических затратах на поставку энергоносителей и связанных с ними изменениями расходов первичных энергоносителей (топлива) на транспортировку произведенных энергоносителей, обусловленных изменением расстояния от объекта генерации до потребителя и изменением потерь эксергии при хранении (аккумулировании). Указанные изменения могут быть учтены за счет использования соответствующих коэффициентов: $\alpha_{\text{тр}}$ — коэффициент, учитывающий изменение затрат эксергии топлива на транспорт произведенных энергоносителей при реализации технологии мультигенерации, определяемый как

$$\alpha_{\text{тр}} = E_{\text{тр.см}} / E_{\text{тр.р}}, \quad (7)$$

$\alpha_{\text{акк}}$ — коэффициент, учитывающий изменение потерь эксергии произведенных энергоносителей при хранении (аккумулировании), имеющий вид

$$\alpha_{\text{акк}} = E_{\text{акк.см}} / E_{\text{акк.р}}, \quad (8)$$

здесь $E_{\text{тр}}$ — эксергия топлива, затрачиваемого для транспортировки произведенных энергоносителей, $E_{\text{акк}}$ — потери эксергии произведенных энергоносителей при хранении; индекс «р» — раздельная генерация, индекс «см» — совмещенная генерация. Численные значения коэффициентов $\alpha_{\text{тр}}$ и $\alpha_{\text{акк}}$ определяются конкретными условиями эксплуатации при переходе к технологии мультигенерации и могут быть как больше единицы при увеличении затрат на транспорт и аккумулялирование энергоносителей, так и меньше при их сокращении.

Система энергоснабжения

Показатели термодинамической эффективности системы энергоснабжения необходимо определять, сопоставляя совмещенное производство электроэнергии, тепла и дополнительных произведенных энергоносителей на объектах генерации, входящих во вновь создаваемый для этого энергетический комплекс, с раздельным их производством: электроэнергии и тепла на объектах генерации, а дополнительных энергоносителей и иных полезных продуктов — на специализированных предприятиях либо у производителей.

Под энергетическим комплексом в настоящей работе понимается объединение объектов генерации, снабжающих потребителей электроэнергией и теплом, а также всеми необходимыми иными произведенными энергоносителями и полезными продуктами, использование которых в качестве энергоносителей не предусматривается, и предприятий, потребляющих эти энергоносители. В качестве объектов генерации рассматриваются электростанции с основным оборудованием различных типов, относящиеся как к «большой», так и к малой энергетике, в качестве потребителей — предприятия различной направленности (промышленные предприятия, объекты социальной сферы). Объекты генерации и потребители в энергетическом комплексе связаны линиями передачи всех произведенных энергоносителей. Возможна также передача находящихся в жидком

или газообразном состоянии произведенных энергоносителей в баллонах. Произведенные энергоносители могут передаваться также и в твердом состоянии (углекислота).

При раздельном производстве потребители получают электроэнергию и тепло из общих электрических и тепловых сетей. При рассматриваемом здесь варианте совмещенного производства входящие в энергетический комплекс потребители получают электроэнергию и тепло из сетей, связанных лишь с объектами генерации, входящими в энергетический комплекс. При этом произведенные на объектах генерации электроэнергия и тепло полагаются достаточными для потребителей, входящих в энергетический комплекс. Излишки электроэнергии и тепла объекты генерации передаются (продаются) во внешние электрические и тепловые сети.

С учетом того, что генерируемые энергоносители обычно относятся к разным видам энергии [10], в качестве критерия определения термодинамической эффективности системы энергоснабжения следует использовать эксергетический КПД. Эффективность перехода к совмещенной генерации будем определять по изменению эксергетического КПД $\eta_{\text{есм}}$ при использовании мультигенерации по сравнению с изначальным вариантом $\eta_{\text{ер}}$ при раздельной генерации. Это можно делать либо по абсолютной разности $\Delta\eta_e$:

$$\Delta\eta_e = \eta_{\text{есм}} - \eta_{\text{ер}}, \quad (9)$$

либо по относительной разности $\delta\eta_e$:

$$\delta\eta_e = \Delta\eta_e / \eta_{\text{ер}}. \quad (10)$$

Учитывая многообразие возможностей создания мультигенерационных комплексов, примем следующие условия.

1. Рассматриваются системы энергоснабжения с совмещенной (рис. 1) и раздельной (рис. 2) генерациями электроэнергии, тепла и иных произведенных энергоносителей.

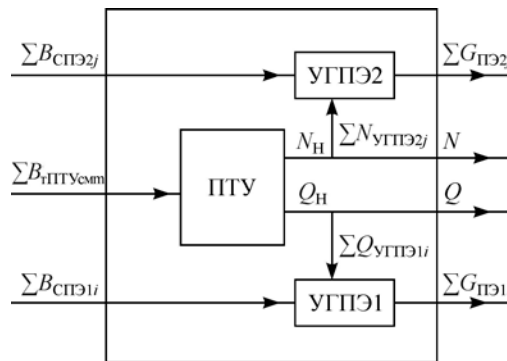


Рис. 1. Схема системы энергоснабжения при совмещенной генерации электроэнергии, тепла и произведенных энергоносителей.

ПТУ — паротурбинные установки теплофикационного и конденсационного типов, УГПЭ1 — комплекс установок для генерации дополнительных произведенных энергоносителей за счет тепла (комплекс 1),

УГПЭ2 — комплекс установок для генерации дополнительных произведенных энергоносителей за счет электроэнергии (комплекс 2), Q_H — суммарная тепловая мощность ПТУ при работе в номинальном режиме,

N_H — суммарная электрическая мощность ПТУ при работе в номинальном режиме,

Q — суммарная тепловая мощность, передаваемая от ПТУ потребителям, N — суммарная электрическая мощность, передаваемая потребителям; $\Sigma G_{ПЭ1i}$ и $\Sigma G_{ПЭ2j}$ — производительности (мощности) установок для генерации произведенных энергоносителей за счет подведенного тепла и электроэнергии соответственно,

$\Sigma Q_{УГПЭ1i}$ — суммарная тепловая мощность, направляемая на установки УГПЭ1

для производства энергоносителей, $\Sigma N_{УГПЭ2j}$ — суммарная электрическая мощность, направляемая на УГПЭ2 для производства энергоносителей, $\Sigma B_{гПТУсмм}$ — суммарный расход топлива на паротурбинные установки для производства электроэнергии и тепла при совмещенной генерации,

$\Sigma B_{СПЭ1i}$ и $\Sigma B_{СПЭ2j}$ — суммарные расходы сырья для генерации произведенных энергоносителей за счет тепла и электроэнергии соответственно.

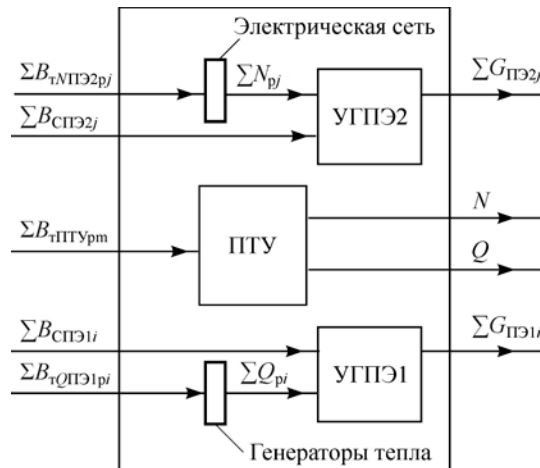


Рис. 2. Схема системы энергоснабжения при раздельной генерации электроэнергии, тепла и произведенных энергоносителей.

ПТУ — паротурбинные установки теплофикационного и конденсационного типов,
 УГПЭ1 — установки для генерации дополнительных произведенных энергоносителей за счет тепла (комплекс 1),
 УГПЭ2 — установки для генерации дополнительных произведенных энергоносителей за счет электроэнергии (комплекс 2), Q — суммарная тепловая мощность, передаваемая от ПТУ потребителям, N — суммарная электрическая мощность, передаваемая потребителям, $\Sigma Q_{рi}$ — суммарная тепловая мощность, подаваемая на УГПЭ1 при раздельном производстве от генераторов тепла либо от тепловых сетей,
 $\Sigma N_{рj}$ — суммарная электрическая мощность, направляемая на УГПЭ2 от электрической сети при раздельном производстве; $\Sigma G_{ПЭ1i}$ и $\Sigma G_{ПЭ2j}$ — суммарные производительности (мощности) установок для генерации произведенных энергоносителей за счет подведенного тепла и электроэнергии соответственно, $\Sigma B_{тПТУрм}$ — суммарный расход топлива на паротурбинные установки для производства электроэнергии и тепла при раздельной генерации, $\Sigma B_{тQПЭ1рi}$ — суммарный расход топлива в единицу времени на генераторы тепла, используемого для организации производства энергоносителя в УГПЭ1 при раздельной генерации, $\Sigma B_{тНПЭ2рj}$ — суммарный расход топлива в единицу времени для генерации электроэнергии из электросети, используемой для производства энергоносителя в УГПЭ2 при раздельной генерации, $\Sigma B_{СПЭ1i}$ и $\Sigma B_{СПЭ2j}$ — суммарные расходы сырья для генерации первого и второго произведенных энергоносителей соответственно.

- В качестве объектов генерации в обоих случаях предполагаются паротурбинные установки с турбинами как конденсационного (КЭС), так и теплофикационного (ТЭЦ) типов, которые могут относиться как к большой, так и к малой энергетике.
- Передаваемые потребителям электрические мощности при совмещенной и раздельной генерациях одинаковы и равны N .
- Передаваемые потребителям тепловые мощности при совмещенной и раздельной генерациях одинаковы и равны Q .
- В обоих случаях наряду с электроэнергией и теплом генерируются одинаковые по составу, параметрам и количеству произведенные энергоносители. При этом для генерации произведенных энергоносителей первого комплекса $\Sigma G_{ПЭ1i}$ используется тепло, для произведенных энергоносителей второго комплекса $\Sigma G_{ПЭ2j}$ — электроэнергия.
- Суммарная тепловая мощность $\Sigma Q_{УГПЭ1i}$, используемая для генерации произведенных энергоносителей комплекса 1, в обоих случаях равна разности тепловой мощности Q_H при работе объектов генерации в номинальном либо в текущем режиме и тепловой мощности Q , передаваемой потребителям:

$$\Sigma Q_{УГПЭ1i} = Q_H - Q. \quad (11)$$

- Суммарная электрическая мощность $\Sigma N_{УГПЭ2j}$, используемая для генерации дополнительных произведенных энергоносителей комплекса 2, в обоих случаях равна разности

электрической мощности N_H при работе объектов генерации в номинальном либо текущем режиме и электрической мощности N , передаваемой потребителям:

$$\sum N_{УГПЭ2j} = N_H - N. \quad (12)$$

8. Тепло уходящих газов паротурбинной установки (ПТУ) при совмещенном и раздельном производстве для генерации произведенных энергоносителей не используется.
9. При совмещенном производстве на объектах генерации используются те же виды топлива, что и при раздельном.
10. Соответствующие установки для генерации произведенных энергоносителей одинаковы при совмещенной и раздельной генерациях.
11. Невостребованные потребителем суммарные тепловая $\sum Q_{УГПЭ1i}$ и электрическая $\sum N_{УГПЭ2j}$ мощности при совмещенном производстве полностью передаются для генерации произведенных энергоносителей на УГПЭ1 и УГПЭ2 соответственно.
12. При раздельной генерации на установки для производства энергоносителей УГПЭ1 поступает тепло $\sum Q_{pi}$, произведенное с удельными расходами топлива $b_{tQ_{генi}}$ от используемых для этого генераторов тепла либо от тепловых сетей.
13. При раздельной генерации на установки для производства энергоносителей УГПЭ2 поступает электроэнергия из электрических сетей, произведенная с удельными расходами топлива $b_{tN_{сетиj}}$ для электрических сетей в рассматриваемый момент времени.
14. При совмещенном производстве для генерации электроэнергии, тепла, произведенных энергоносителей первой (УГПЭ1), а также второй (УГПЭ2) групп, на электростанции направляется общий расход топлива $B_{тсм}$, равный суммарному расходу $\sum B_{тПТУсм}$ топлива на ПТУ, который условно разделяется на расходы на производство электроэнергии и тепла:

$$B_{тсм} = \sum B_{тПТУсм} = \sum B_{тПТУNсм} + \sum B_{тПТУQсм}. \quad (13)$$

Распределение топлива между генерацией электроэнергии и тепла следует проводить в соответствии с установленной на время проведения расчетов методикой.

15. При раздельном производстве общий расход топлива $B_{тр}$ равен сумме расходов на ПТУ $\sum B_{тПТУрп}$, на установке генерации первой группы произведенных энергоносителей (УГПЭ1) он равен $\sum B_{тQПЭ1pi}$ и на установке генерации второй группы произведенных энергоносителей (УГПЭ2) — $\sum B_{тNПЭ2pj}$, при этом общие расходы на ПТУ должны быть как и в предыдущем случае условно разделены на две составляющие — на расходы на генерацию электроэнергии $\sum B_{тПТУNр}$ и тепла $\sum B_{тПТУQр}$:

$$B_{тр} = \sum B_{тПТУрп} + \sum B_{тQПЭ1pi} + \sum B_{тNПЭ2pj} = \sum B_{тПТУNр} + \sum B_{тПТУQр} + \sum B_{тQПЭ1pi} + \sum B_{тNПЭ2pj} \quad (14)$$

Эксергетические КПД, в соответствии с [10], определяются следующими выражениями:

— при совмещенной генерации

$$\eta_{есм} = \frac{E_N + E_Q + \sum E_{ПЭ1i} + \sum E_{ПЭ2j}}{E_{тсм} + \sum E_{СПЭ1i} + \sum E_{СПЭ2j}}; \quad (15)$$

— при раздельной генерации

$$\eta_{ер} = \frac{E_N + E_Q + \sum E_{ПЭ1i} + \sum E_{ПЭ2j}}{E_{тр} + \sum E_{СПЭ1i} + \sum E_{СПЭ2j}}, \quad (16)$$

здесь E_N — суммарная эксергия передаваемых потребителям электрических мощностей как при совмещенной, так и при раздельной генерации, E_Q — суммарная эксергия передаваемых потребителям тепловых мощностей как при совмещенной, так и при раздельной генерации, $\sum E_{ПЭ1i}$ и $\sum E_{ПЭ2j}$ — суммарные эксергии произведенных энергоносителей,

полученных на установках УГПЭ1 и УГПЭ2 за счет подведенного тепла и электроэнергии соответственно, $E_{\text{тсм}}$ — суммарная эксергия топлива, используемого при совмещенной генерации, $E_{\text{тр}}$ — суммарная эксергия топлива, используемого при раздельной генерации, $\sum E_{\text{СПЭ1}i}$ и $\sum E_{\text{СПЭ2}j}$ — суммарные эксергии сырья для генерации произведенных энергоносителей первой и второй групп.

В соответствии с принятыми выше условиями значения эксергий, входящих в выражения для КПД (15), (16), определяются следующим образом: эксергия $E_{\text{тсм}}$ используемого при совмещенной генерации топлива принимается равной эксергии $E_{\text{тПТУсм}}$ топлива, направляемого на ПТУ объектов генерации; эксергия $E_{\text{тПТУсм}}$ топлива, направляемого на ПТУ объектов генерации, разделяется на эксергии на производство электроэнергии $E_{\text{тПТУ}N_{\text{см}}}$ и производство тепла $E_{\text{тПТУ}Q_{\text{см}}}$:

$$E_{\text{тПТУсм}} = E_{\text{тПТУ}N_{\text{см}}} + E_{\text{тПТУ}Q_{\text{см}}}; \quad (17)$$

эксергия $E_{\text{тр}}$ топлива, используемого при раздельном производстве, равна сумме эксергий топлива, направляемого на ПТУ $E_{\text{тПТУр}}$, эксергий топлив, используемых для генерации произведенных энергоносителей в УГПЭ1 $\sum E_{\text{тПЭ1}pi}$ и эксергий топлив, используемых для генерации произведенных энергоносителей в УГПЭ2 $\sum E_{\text{тПЭ2}pj}$:

$$E_{\text{тр}} = E_{\text{тПТУр}} + \sum E_{\text{тПЭ1}pi} + \sum E_{\text{тПЭ2}pj},$$

или, с учетом разделения эксергии топлива, поступающего на ПТУ, на используемое для генерации электроэнергии $E_{\text{тПТУ}N_{\text{р}}}$ и тепла $E_{\text{тПТУ}Q_{\text{р}}}$:

$$E_{\text{тр}} = E_{\text{тПТУ}N_{\text{р}}} + E_{\text{тПТУ}Q_{\text{р}}} + \sum E_{\text{тПЭ1}pi} + \sum E_{\text{тПЭ2}pj}. \quad (18)$$

Разность эксергетических КПД определится выражением

$$\Delta\eta_e = \frac{E_N + E_Q + \sum E_{\text{ПЭ1}i} + \sum E_{\text{ПЭ2}j}}{E_{\text{тсм}} + \sum E_{\text{СПЭ1}i} + \sum E_{\text{СПЭ2}j}} - \frac{E_N + E_Q + \sum E_{\text{ПЭ1}i} + \sum E_{\text{ПЭ2}j}}{E_{\text{тр}} + \sum E_{\text{СПЭ1}i} + \sum E_{\text{СПЭ2}j}}. \quad (19)$$

После несложных преобразований с учетом принятых условий может быть получена формула для определения абсолютной разности эксергетических КПД при совмещенной и раздельной генерации:

$$\begin{aligned} \Delta\eta_e = & \frac{E_N + E_Q + \sum E_{\text{ПЭ1}i} + \sum E_{\text{ПЭ2}j}}{(E_{\text{тсм}} + \sum E_{\text{СПЭ1}i} + \sum E_{\text{СПЭ2}j})(E_{\text{тр}} + \sum E_{\text{СПЭ1}i} + \sum E_{\text{СПЭ2}j})} \times \\ & \times \left[1,04Q_{\text{н}}^{\text{р}} + (h_{\text{т}} - h_0) - T_0(s_{\text{т}} - s_0) \right] \times \left[(b_{\text{тПТУ}N_{\text{р}}} - b_{\text{тПТУ}N_{\text{см}}})N + \right. \\ & + (b_{\text{тПТУ}Q_{\text{р}}} - b_{\text{тПТУ}Q_{\text{см}}})Q + \sum \alpha_{\text{т}pi} \alpha_{\text{акк}i} (b_{\text{тПЭ1}pi} - b_{\text{тПТУ}Q_{\text{см}}})Q_{pi} + \\ & \left. + \sum \alpha_{\text{т}pj} \alpha_{\text{акк}j} (b_{\text{тПЭ2}pj} - b_{\text{тПТУ}N_{\text{см}}})N_{pj} \right], \end{aligned} \quad (20)$$

здесь Q_{pi} — тепловая мощность, направляемая на УГПЭ1 для генерации i -го произведенного энергоносителя из комплекса 1 при раздельной генерации, МВт; $b_{\text{тПТУ}N_{\text{см}}}$ — удельный расход топлива на выработку электроэнергии при номинальной нагрузке энергоблока при совмещенной генерации, N_{pj} — электрическая мощность, направляемая на УГПЭ2 для генерации j -го произведенного энергоносителя из комплекса 2 при раздельной генерации, $b_{\text{тПТУ}N_{\text{р}j}}$ — удельный расход топлива на выработку электроэнергии при заданной нагрузке энергоблока при раздельной генерации, $b_{\text{тПТУ}Q_{\text{см}}}$ — удельный расход топлива на выработку тепла при номинальной нагрузке энергоблока при совмещенной генерации, $b_{\text{тПТУ}Q_{\text{р}}}$ — удельный расход топлива на выработку тепла при заданной нагрузке энергоблока при раздельной генерации, $b_{\text{тПЭ1}pi}$ — удельный расход топлива

на выработку тепловой мощности, направляемой на УГПЭ1 для генерации i -го произведенного энергоносителя из комплекса 1 при раздельной генерации, $b_{тПЭ2pj}$ — удельный расход топлива на выработку электрической мощности, направляемой на УГПЭ2 для генерации j -го произведенного энергоносителя из комплекса 2 при раздельной генерации. При выводе формулы (20) были использованы следующие зависимости:

— выражение для определения эксергии топлива [10]

$$E_T = B_T \left[1,04Q_H^p + (h_T - h_0) - T_0(s_T - s_0) \right]; \quad (21)$$

— формулы для определения затрат топлива $B_{тN}$ и $B_{тQ}$ на выработку электрической N и тепловой Q мощностей при удельных расходах топлива на выработку электрической $b_{тN}$ и тепловой $b_{тQ}$ мощностей

$$B_{тN} = b_{тN} N, \quad (22)$$

$$B_{тQ} = b_{тQ} Q, \quad (23)$$

где $b_{тN}$ и $b_{тQ}$ — общие обозначения удельных расходов топлива на выработку электрической и тепловой мощностей соответственно.

В качестве удельных расходов топлива на выработку электрической и тепловой мощностей в общем случае могут быть приняты их средневзвешенные значения:

— при совмещенной генерации

$$b_{тПТУNсм} = b_{Nсм}^{св} = \frac{N_1 b_{N1см} + N_2 b_{N2см} + \dots + N_m b_{Nmсм}}{N_1 + N_2 + \dots + N_m}, \quad (24)$$

$$b_{тПТУQсм} = b_{Qсм}^{св} = \frac{Q_1 b_{Q1см} + Q_2 b_{Q2см} + \dots + Q_m b_{Qmсм}}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_m}; \quad (25)$$

— при раздельной генерации

$$b_{тПТУNp} = b_{Np}^{св} = \frac{N_1 b_{N1p} + N_2 b_{N2p} + \dots + N_m b_{Nmp}}{N_1 + N_2 + \dots + N_m}, \quad (26)$$

$$b_{тПТУQp} = b_{Qp}^{св} = \frac{Q_1 b_{Q1p} + Q_2 b_{Q2p} + \dots + Q_m b_{Qmp}}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_m}. \quad (27)$$

В уравнениях (24)–(27) индексы от 1 до m относятся к входящим в энергетический комплекс объектам генерации; $b_{N1см}$, $b_{N2см} \dots b_{Nmсм}$ и $b_{Q1см}$, $b_{Q2см} \dots b_{Qmсм}$ — удельные расходы топлива на выработку электрической и тепловой мощностей соответственно на входящих в энергетический комплекс объектах генерации при совмещенном производстве, b_{N1p} , $b_{N2p} \dots b_{Nmp}$ и b_{Q1p} , $b_{Q2p} \dots b_{Qmp}$ — те же показатели эффективности при раздельном производстве.

При принятых условиях очевидны следующие равенства:

$$N_1 + N_2 + \dots + N_m = N, \quad (28)$$

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_m = Q. \quad (29)$$

При рассматриваемом методическом подходе при сравнении эффективности совмещенного и раздельного производства энергоносителей электрические либо электрические и тепловые мощности агрегатов на объектах генерации при совмещенном производстве не обязательно должны быть оптимальными, т.е. максимально возможными. Они могут отличаться от тех значений, которые были до включения этих объектов генерации в энергетический комплекс, но не достигать максимально возможных, т.е. оптимальных, величин и занимать некое промежуточное положение.

Как и следовало ожидать, ответ на вопрос, является ли совмещенная генерация по сравнению с раздельной более эффективной, определяется, в первую очередь, различиями удельных расходов топлива на производство электроэнергии, тепла и произведенных энергоносителей. Вместе с тем, проведенный анализ позволяет установить не только знак получаемого эффекта, но и насколько он велик. Присутствие в формуле (20) эксергий дополнительно полученных произведенных энергоносителей ($\sum E_{ПЭ1i}$, $\sum E_{ПЭ2j}$) и эксергий необходимого для их производства сырья ($\sum E_{СПЭ1i}$, $\sum E_{СПЭ2j}$) устанавливает, как будет зависеть получаемый эффект от типа и количества произведенных энергоносителей. Формула (20) может быть использована для частного случая генерации только электроэнергии (для КЭС), в этом случае при схеме раздельной генерации (рис. 2) Q и Q_p равны нулю. Также она справедлива для обратного случая, когда в качестве объектов генерации рассматриваются котельные, избыточная тепловая мощность которых используется для генерации произведенных энергоносителей на установках комплекса 1, и генерация электроэнергии в таких энергетических комплексах не предусмотрена.

Относительное изменение эксергетического КПД $\delta\eta_e$ при переходе от раздельного к совмещенному производству энергоносителей определяется выражением (10) после подстановки в него $\Delta\eta_e$ и $\eta_{ер}$ из уравнений (9) и (16) соответственно. После преобразований формула для определения относительного изменения эксергетического КПД принимает вид:

$$\delta\eta_e = \frac{E_{тр} - E_{тсм}}{E_{тсм} + \sum E_{СПЭ1i} + \sum E_{СПЭ2j}}. \quad (30)$$

Таким образом, относительное изменение эксергетического КПД при переходе с раздельной на совмещенную генерацию прямо пропорционально разности эксергий топлива, необходимого при раздельной и совмещенной генерациях электроэнергии, тепла и произведенных энергоносителей, и обратно пропорционально сумме эксергий топлива при совмещенной генерации и сырья, необходимого для генерации произведенных энергоносителей. Входящие в уравнение (30) эксергии $E_{тр}$ и $E_{тсм}$ могут быть выражены [10] через расходы топлива, их теплотворные способности и параметры потоков:

$$E_{тр} = B_{тр}[1,04Q_H^p + (h_t - h_0) - T_0(s_t - s_0)], \quad (31)$$

$$E_{тсм} = B_{тсм}[1,04Q_H^p + (h_t - h_0) - T_0(s_t - s_0)]. \quad (32)$$

Тогда относительное изменение эксергетического КПД при переходе от раздельной к совмещенной генерации произведенных энергоносителей определится разностью расходов топлива при раздельной и совмещенной генерациях ($B_{тр} - B_{тсм}$) в заданный период времени из выражения

$$\delta\eta_e = \frac{(B_{тр} - B_{тсм})[1,04Q_H^p + (h_t - h_0) - T_0(s_t - s_0)]}{B_{тсм}[1,04Q_H^p + (h_t - h_0) - T_0(s_t - s_0)] + \sum E_{СПЭ1i} + \sum E_{СПЭ2j}}. \quad (33)$$

Следовательно, для определения относительного изменения эксергетического КПД необходимы сведения о видах и расходах топлив, используемых при раздельной и совмещенной генерациях, а также сведения о сырье, используемом на установках для генерации произведенных энергоносителей.

Для апробации полученных зависимостей были проведены оценочные расчеты при определенных, заданных близкими к реальным, условиях. В качестве объекта генерации была принята теплофикационная паротурбинная установка типа Т-100-130 ТМЗ, работающая в исходном режиме с электрической мощностью 70 МВт и тепловой мощностью 100 Гкал/ч. В качестве произведенных энергоносителей рассматривались потоки холода, получаемые с применением термотрансформаторов парокомпрессионного (ПКТТ) и абсорбционного (АБТТ) типов, работающих в режиме холодильной машины. Под термином «сырьё» понимались потоки холода, возвращаемые на ПКТТ и АБТТ от потребителей холода.

В исходном режиме при раздельной генерации выработанные электрическая и тепловая мощности полностью передаются потребителям электроэнергии и тепла. При этом ПКТТ получает из электрической сети электрическую мощность, равную 30 МВт, АбТТ — тепловую мощность из тепловой сети, равную 50 Гкал/ч [11]. Выработанный ПКТТ поток холода передается потребителю с температурой $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и возвращается в трансформатор с температурой $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поток холода, произведенный в АбТТ, направляется потребителям холода с температурами $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для бромисто-литиевого АбТТ) и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для водно-аммиачного АбТТ). Температуры потоков холода, поступающих обратно в АбТТ от потребителей для охлаждения, составляют $+12$ и $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно.

При реализации режима мультигенерации электрическая и тепловая мощности, генерируемые ПТУ, увеличиваются до номинальных значений (100 МВт и 150 Гкал/ч соответственно). Электро- и теплоснабжение потребителей электроэнергии и тепла остаются прежними (70 МВт и 100 Гкал/ч). Избытки электрической и тепловой мощностей, произведенных ПТУ (30 МВт и 50 Гкал/ч), используются на ПКТТ и АбТТ вместо получаемых при раздельном производстве из сети. Более подробно принятые при расчетах исходные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные, принятые при расчетах

Показатели	Раздельное производство	Совмещенное производство
Генерируемая электрическая мощность, МВт	70	100
Электрическая мощность, передаваемая потребителю, МВт	70	70
Электрическая мощность, получаемая ПКТТ от Т-100, МВт	0	30
Электрическая мощность, получаемая ПКТТ из сети, МВт	30	0
Генерируемая тепловая мощность, (Г кал/ч) / МВт	100 / 116,3	150 / 174,5
Тепловая мощность, передаваемая потребителю, (Г кал/ч) / МВт	100 / 116,3	100 / 116,3
Тепловая мощность, получаемая АбТТ от Т-100, (Г кал/ч) / МВт	0	50 / 58,15
Тепловая мощность, получаемая АбТТ из сети, (Г кал/ч) / МВт	50 / 58,15	0
Удельный расход тепла на выработку электроэнергии на Т-100 [11], ккал/кВт·ч	1450	1260
Холодильный коэффициент ПКТТ	3	
КПД компрессора ПКТТ	0,85	
Температуры хладоносителя на входе/выходе ПКТТ, $^{\circ}\text{C}$	12 / 7	
Температура охлаждающей циркуляционной воды на входе АбТТ, $^{\circ}\text{C}$	20	
Температурный перепад в генераторе АбТТ, $^{\circ}\text{C}$	10	
Температурные перепады в конденсаторе, абсорбере, испарителе АбТТ, $^{\circ}\text{C}$	5	
Температуры хладоносителя на входе/выходе АбТТ, $^{\circ}\text{C}$	-5 / -20	
Давление в верхнем теплофикационном отборе турбины Т-100, МПа	0,2	
КПД котла брутто	0,9	
КПД транспорта тепла	0,99	
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии для производства холода на ПКТТ (показатель сети), гр.у.т./кВт·ч	311,2	
Удельный расход топлива на выработку тепла для производства холода на АбТТ (показатель сети), кг у.т./Гкал	160	

При проведении оценочных расчетов при принятых исходных данных были получены следующие результаты: эксергетический КПД при раздельной генерации $\eta_{\text{ер}} = 0,257$, абсолютное изменение КПД при переходе от раздельной к совмещенной генерации при реализации технологии мультигенерации $\Delta \eta_{\text{е}} = 0,03$, относительное изменение КПД при переходе от раздельной к совмещенной генерации при реализации технологии мультигенерации $\delta \eta_{\text{е}} = 0,117$.

Таким образом, показано, что переход от раздельного к совмещенному производству в рассматриваемых условиях оказывается оправданным с точки зрения термодинамики.

Заключение

Рассмотрена термодинамическая эффективность объектов генерации, потребителей и системы энергоснабжения при организации мультигенерирующих комплексов, включающих в себя объекты генерации и потребителей. Проведен анализ совместной генерации не только централизованно поставляемых электроэнергии и тепла, но и иных произведенных энергоносителей, необходимых потребителям для организации технологических процессов на промышленных предприятиях и использования в социальной сфере. В качестве критериев оценки термодинамической эффективности приняты либо абсолютное, либо относительное изменение эксергетического КПД при переходе от раздельной к совмещенной генерации. Получены формулы для определения термодинамической эффективности систем энергоснабжения на базе технологии мультигенерации по сравнению с системами на базе раздельной генерации произведенных энергоносителей.

Список литературы

1. Chicco G., Mancarella P. Distributed multi-generation: a comprehensive view // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, Iss. 3. P. 535–551.
2. Mancarella P. MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models // Energy. 2014. Vol. 65. P. 1–17.
3. Jana K., Ray A., Majoumerd M.M., Assadi M., De S. Polygeneration as a future sustainable energy solution — a comprehensive review // Applied Energy. 2017. Vol. 202. P. 88–111.
4. Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Шацкова О.В. Оценка эффективности водородных циклов на базе внепиковой электроэнергии АЭС // Теплоэнергетика. 2009. № 11. С. 41–45.
5. Тувальбаев Б.Г. Отдаленные перспективы использования ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 4. С. 2–5.
6. Тувальбаев Б.Г., Моисеев В.И. Работа ТЭС в постоянном режиме с выработкой дополнительной продукции на неэксплуатируемой энергии // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 4. С. 24–27.
7. Тувальбаев Б.Г., Моисеев В.И. Использование кислорода спутной выработки дополнительного производства в технологическом процессе ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 4. С. 40–43.
8. Клименко А.В., Агабабов В.С., Рогова А.А., Тидеман П.А. Особенности комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода на базе парогазовой установки // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 11–15.
9. Тувальбаев Б.Г., Марченко М.Е., Марченко Е.М., Валитов Д.Ш. Концептуальные направления развития теплоэнергетики // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 3. С. 3–9.
10. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.
11. Типовая нормативная характеристика турбоагрегата Т-100-130 ТМЗ // ГТУ по эксплуатации энергосистем Минэнерго СССР. Москва, 1971.

*Статья поступила в редакцию 3 декабря 2018 г.,
после доработки — 11 февраля 2019 г.,
принята к печати 4 июня 2019 г.*