

Повышение эффективности газопоршневых ТЭЦ при комбинированном энергоснабжении потребителей с развитой системой кондиционирования воздуха

Баженов А. И., канд. техн. наук, Михеева Е. В., аспирант

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.

Приведены результаты исследования эффективности газопоршневых ТЭЦ в системах автономного энергоснабжения потребителей с развитой системой кондиционирования воздуха на базе компрессионных и/или абсорбционных чиллеров. Рассмотрены случаи автономной работы газопоршневой ТЭЦ и совместной работы с энергосистемой. Отдельное внимание уделено эксплуатации газопоршневой ТЭЦ в автономных системах при максимуме электропотребления, приходящемся на летнее время. На основе полученных данных представлены рекомендации по повышению эффективности работы газопоршневой ТЭЦ при комбинированном энергоснабжении потребителей с развитой системой кондиционирования воздуха.

Ключевые слова: газопоршневая ТЭЦ, система кондиционирования воздуха, чиллеры, энергосистема.

В последнее время расширяется применение газопоршневых ТЭЦ с целью комбинированной выработки электроэнергии, теплоты и холода для систем кондиционирования воздуха (СКВ). На долю оборудования СКВ в торгово-развлекательных центрах (ТРЦ) приходится 20 % электропотребления, в жилищном секторе — до 27 % [1]. Для отдельных промышленных потребителей эта доля еще больше. Применение такого оборудования влияет на конфигурацию графика электропотребления. У ряда объектов возникает пик электропотребления в летний период.

Комбинированное производство электрической энергии, теплоты и холода для потребителей с развитой СКВ с помощью газопоршневой установки (ГПУ) может осуществляться при использовании в системе как компрессионных (КХМ), так и абсорбционных (АБХМ) холодильных машин (чиллеров). Компрессионные машины получили более широкое применение из-за меньшей по сравнению с абсорбционными стоимости, однако для КХМ характерно большее потребление электроэнергии. При достаточной загрузке СКВ применение АБХМ более выгодно. Работа АБХМ совместно с газопоршневой ТЭЦ (ГП ТЭЦ) позволит дополнительно повысить ее эффективность за счет использования утилизируемой от ГПУ теплоты без дополнительных затрат топлива. Учитывая значительные затраты электроэнергии в СКВ, важно рассмотреть влияние режимов электропотребления СКВ на эффективность работы ГП ТЭЦ.

При анализе факторов, оказывающих влияние на электроснабжение потребителей,

учитывали энергоемкость применяемого оборудования СКВ, время его работы, а также влияние на график энергопотребления в целом, особенно сильно проявляющееся при максимуме электропотребления, приходящемся на летнее время. Кроме того, были рассмотрены особенности совместной работы газопоршневой ТЭЦ и внешней электрической сети (автономной с покрытием собственной нагрузки или параллельной с энергосистемой с продажей излишков электроэнергии), поскольку при снижении энергопотребления в СКВ появляется возможность или сбыта электроэнергии во внешнюю энергосистему, или снижения установленной мощности и капитальных затрат в ГПУ и экономии топлива на ГП ТЭЦ.

При анализе системы комбинированного энергоснабжения потребителей рассмотрены следующие варианты работы ГП ТЭЦ при наличии развитой СКВ: 1) на базе КХМ; 2) на базе АБХМ; 3) на базе как КХМ, так и АБХМ. В первом варианте при установке для производства холода КХМ электрическая нагрузка объекта увеличивается на $\dot{E}_{СКВ}^{КХМ}$, что в случае автономной работы приводит к дополнительному расходу топлива на ГП ТЭЦ, а при параллельной работе ГП ТЭЦ с энергосистемой — к уменьшению выручки от продажи электроэнергии \dot{E}_{prod} . Остальное потребление электроэнергии \dot{E}_{pr} приходится на прочие электропотребляющие устройства: насосные установки, лифты, осветительные и другие электроприборы. Для данного варианта на рис. 1 представлены графики электрической нагрузки по продолжительности при-

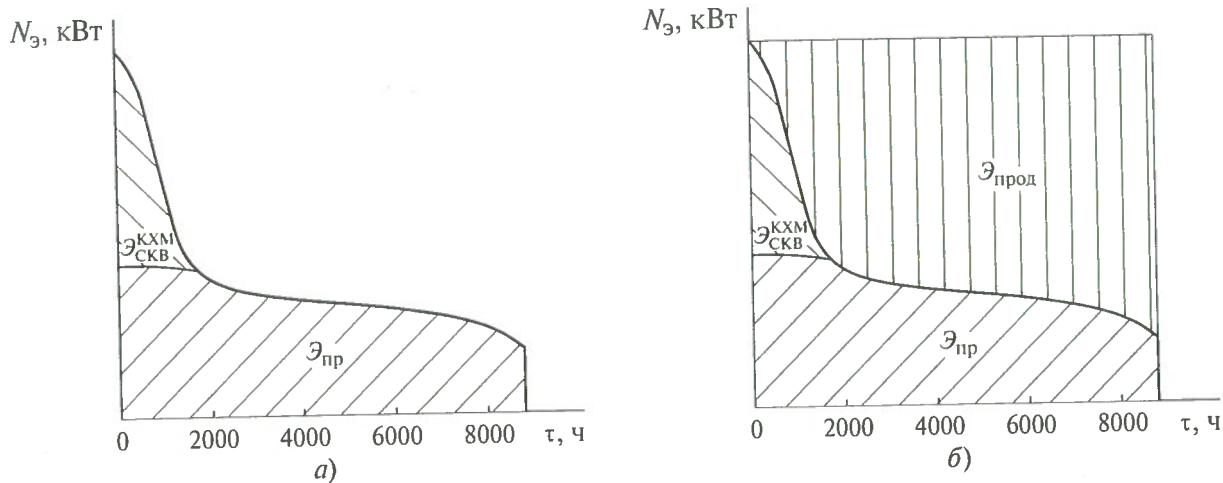


Рис. 1. Графики электрической нагрузки ТРЦ с СКВ на базе КХМ в случае годового максимума электропотребления, приходящегося на лето, при работе ГП ТЭЦ в автономном режиме (а) и совместной работе с энергосистемой (б)

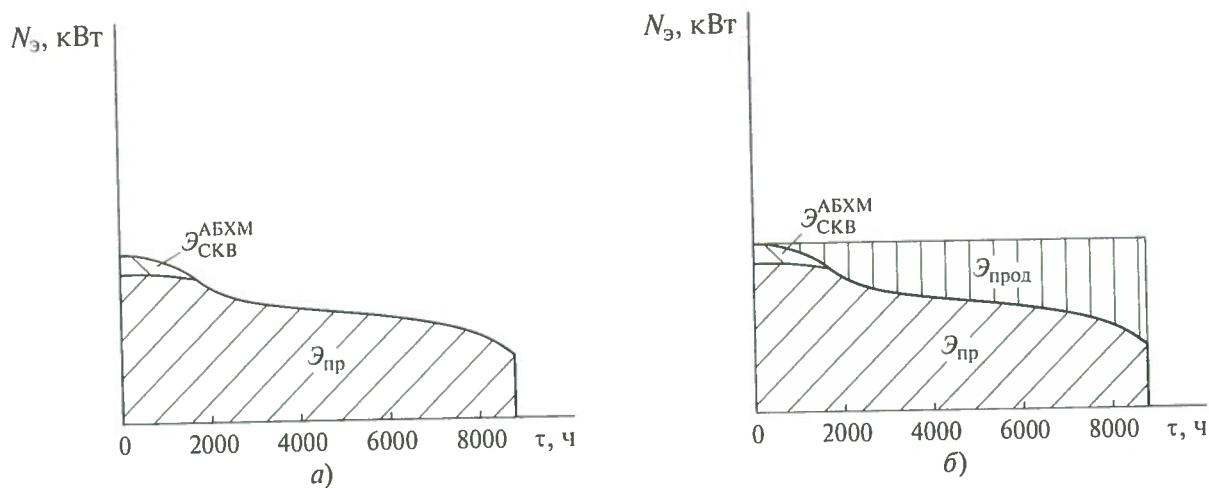


Рис. 2. Графики электрической нагрузки потребителей при работе ГП ТЭЦ совместно с АБХМ в автономном режиме (а) и совместно с энергосистемой (б)

годовом максимуме электропотребления, приходящемся на летнее время, в случаях автономной и совместной с энергосистемой работы ГП ТЭЦ. Как видно, объем электропотребления СКВ с КХМ достаточно существен и оказывает влияние на конфигурацию графика электрической нагрузки.

При выработке холода с помощью АБХМ (второй вариант) суммарная электрическая нагрузка потребителей ($\mathcal{E}_{\text{CKB}}^{\text{ABXM}} + \mathcal{E}_{\text{пр}}$) возрастает незначительно по сравнению с увеличением суммарной нагрузки в результате применения КХМ ($\mathcal{E}_{\text{CKB}}^{\text{KXM}} + \mathcal{E}_{\text{пр}}$), а поскольку для производства холода в АБХМ используется утилизированная от ГПУ теплота, дополнительного расхода топлива (как в случае использования КХМ) не требуется. При пике годового электропотребления, приходящемся на летнее время, возможно снижение уста-

новленной мощности ГПУ (по сравнению с первым вариантом) как при автономной работе, так и при параллельной работе с энергосистемой. Однако следует учесть, что стоимость АБХМ превышает стоимость КХМ, поэтому применение АБХМ не всегда экономически обоснованно.

На рис. 2 приведены графики для второго варианта работы ГП ТЭЦ (СКВ с АБХМ) при пике годового электропотребления, приходящемся на летнее время, в случаях автономной и совместной с энергосистемой работы ГП ТЭЦ. Как видно, электропотребление СКВ при работе с АБХМ оказывает существенно меньшее влияние на график электропотребления, чем при работе СКВ с КХМ.

Третий вариант сочетает в себе преимущества использования АБХМ и КХМ и позволяет в некоторых случаях достичь наибольшей эффективности использования ГП

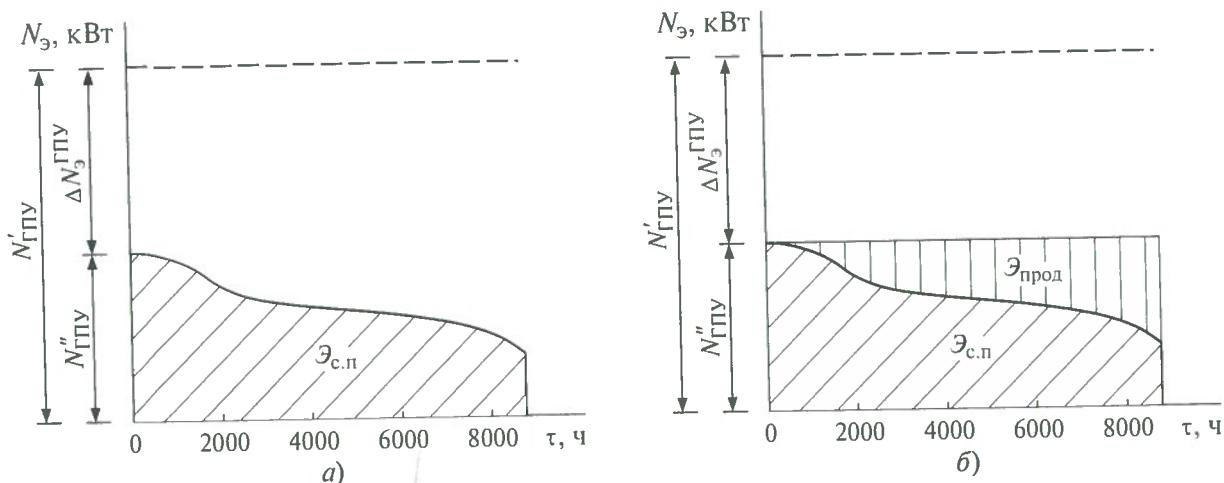


Рис. 3. Графики электрической нагрузки потребителей при работе СКВ с АБХМ в случае годового максимума электропотребления, приходящегося на летнее время, при автономной работе (а) и совместно с энергосистемой (б)

ТЭЦ при комбинированном энергоснабжении потребителей с развитой СКВ. Поскольку первые два варианта являются частными случаями третьего, рассмотрим его более подробно.

Учитывая, что подаваемая потребителям холодильная мощность $Q_x^{\text{СКВ}}$ определяется соотношением холодопроизводительности компрессионных $Q_x^{\text{KХМ}}$ и абсорбционных $Q_x^{\text{АБХМ}}$ холодильных машин, можно записать следующее равенство:

$$Q_x^{\text{СКВ}} = Q_x^{\text{KХМ}} + Q_x^{\text{АБХМ}} = \text{const},$$

т.е.

$$\frac{Q_x^{\text{KХМ}}}{Q_x^{\text{СКВ}}} + \frac{Q_x^{\text{АБХМ}}}{Q_x^{\text{СКВ}}} = \bar{Q}_x^{\text{KХМ}} + \bar{Q}_x^{\text{АБХМ}} = 1. \quad (1)$$

Вместе с тем затраты электрической мощности на производство холода для СКВ будут уменьшаться с увеличением доли АБХМ в выработке холода:

$$N_3^{\text{СКВ}} = N_3^{\text{KХМ}} + N_3^{\text{АБХМ}} = \text{var}. \quad (2)$$

Холодильный коэффициент компрессионной холодильной установки равен отношению вырабатываемой холодильной мощности КХМ $Q_x^{\text{KХМ}}$ к ее электрической мощности $N_3^{\text{KХМ}}$ (с учетом вспомогательного оборудования):

$$k_3^{\text{KХМ}} = \frac{Q_x^{\text{KХМ}}}{N_3^{\text{KХМ}}}. \quad (3)$$

Для АБХМ этот коэффициент равен соотношению холодильной мощности абсорбцион-

ного чиллера $Q_x^{\text{АБХМ}}$ к электрической мощности оборудования для производства холода $N_3^{\text{АБХМ}}$:

$$k_3^{\text{АБХМ}} = \frac{Q_x^{\text{АБХМ}}}{N_3^{\text{АБХМ}}}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в равенство (1), с учетом формулы (2) получаем зависимость электрической мощности СКВ от доли АБХМ в общей выработке холода:

$$\begin{aligned} N_3^{\text{СКВ}} &= \frac{Q_x^{\text{KХМ}}}{k_3^{\text{KХМ}}} + \frac{Q_x^{\text{АБХМ}}}{k_3^{\text{АБХМ}}} = \\ &= Q_x^{\text{СКВ}} \left(\frac{1 - \bar{Q}_x^{\text{АБХМ}}}{k_3^{\text{KХМ}}} + \frac{\bar{Q}_x^{\text{АБХМ}}}{k_3^{\text{АБХМ}}} \right). \end{aligned}$$

При годовом пике электропотребления, приходящемся на летнее время, использование АБХМ (за счет меньшего электропотребления по сравнению с КХМ) позволит применить ГПУ с меньшей ($\Delta N_3^{\text{ГПУ}}$) установленной мощностью (рис. 3, а):

$$\Delta N_3^{\text{ГПУ}} = N_3^{\text{KХМ}} - N_3^{\text{АБХМ}} = N'_3 - N''_3,$$

где $N_3^{\text{KХМ}}$ и $N_3^{\text{АБХМ}}$ — электрические мощности КХМ и АБХМ со вспомогательным оборудованием, кВт; N'_3 и N''_3 — электрические мощности ГПУ, используемых для энергоснабжения потребителей с развитой СКВ, на базе соответственно КХМ и АБХМ.

При этом электрическая энергия $\mathcal{E}_{\text{с.п.}}$, выработанная ГПУ меньшей мощности (N''_3), будет направлена на собственное электропо-

требление объекта. В случае совместной работы с энергосистемой снижение установленной мощности ГПУ приведет к уменьшению количества продаваемой электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{прод}}$ (рис. 3, б).

Возможна также совместная работа ГП ТЭЦ с энергосистемой без снижения установленной мощности ГПУ.

В третьем варианте абсорбционные чиллеры применяются для покрытия базовой части нагрузки СКВ, а компрессионные — пиковой. Оценку экономической эффективности совместного применения КХМ и АБХМ, а также выбор оптимальной доли АБХМ в графике покрытия холодильной нагрузки проводили согласно [2] при условии, что ГП ТЭЦ находится в собственности потребителей.

Прирост чистого дисконтируемого дохода ($\Delta \text{ЧДД}$), полученный за счет увеличения доли АБХМ в графике покрытия холодильной нагрузки, может быть определен по следующей формуле:

$$\Delta \text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Delta D_t - \Delta Z_t) \alpha_t - \Delta Z_k,$$

где ΔD_t — увеличение доходов, полученных от продажи в t -й год электроэнергии, выработанной ГПУ мощностью $\Delta N_3^{\text{ГПУ}}$, руб.; ΔZ_t и ΔZ_k — снижение (экономия) ежегодных и капитальных затрат в t -й год в ГП ТЭЦ в результате уменьшения доли КХМ в графике покрытия холодильной нагрузки, руб.; T — расчетный период, год; $\alpha_t = 1/(1+E)^t$ — коэффициент дисконтирования ($E = 0,2$ — норма дисконта, t — шаг расчета).

Увеличение дохода, полученного от продажи электрической энергии, вычисляли по формуле

$$\Delta D_t = (\mathcal{E}_t^{\text{КХМ}} - \mathcal{E}_t^{\text{АБХМ}}) C_{\text{с.в.}},$$

где $\mathcal{E}_t^{\text{КХМ}}$ и $\mathcal{E}_t^{\text{АБХМ}}$ — количество электрической энергии, затрачиваемой СКВ с КХМ и АБХМ, кВт; $C_{\text{с.в.}}$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии собственной выработки в t -й год, руб.

Снижение (экономия) ежегодных затрат

$$\Delta Z_t = \Delta A_t^{\text{ГПУ}} + \Delta A_t^{\text{КХМ}} - \Delta A_t^{\text{АБХМ}} + \Delta Z_t^{\text{газ}} C_{\text{газ}},$$

где $\Delta A_t^{\text{ГПУ}}$ — снижение амортизационных отчислений за счет уменьшения установленной мощности ГПУ на $\Delta N_3^{\text{ГПУ}}$, руб.; $\Delta A_t^{\text{КХМ}}$ — снижение амортизационных отчислений за счет уменьшения доли КХМ в графике по-

крытия холодильной нагрузки, руб.; $\Delta A_t^{\text{АБХМ}}$ — увеличение амортизационных отчислений за счет увеличения доли АБХМ в графике покрытия холодильной нагрузки, руб.; $\Delta Z_t^{\text{газ}}$ — уменьшение денежных средств, расходуемых на приобретение природного газа для ГПУ, руб.; $C_{\text{газ}}$ — стоимость 1 м³ газа в t -й год, руб.

Снижение (экономия) капитальных затрат на ГП ТЭЦ

$$\Delta Z_k = \Delta N_3^{\text{ГПУ}} \mathcal{U}_{\text{ГПУ}} - Q_{\text{АБХМ}} \mathcal{U}_{\text{АБХМ}} + \Delta Q_{\text{КХМ}} \mathcal{U}_{\text{КХМ}},$$

где $\Delta N_3^{\text{ГПУ}}$ — снижение электрической мощности ГПУ, кВт; $\mathcal{U}_{\text{ГПУ}}$ — удельная стоимость ГПУ, включая проектные и монтажные работы, руб/кВт; $\Delta Q_{\text{КХМ}}$ — снижение холодильной мощности компрессионного оборудования, кВт; $\mathcal{U}_{\text{КХМ}}$ — удельная стоимость компрессионного оборудования, включая проектные и монтажные работы, руб/кВт; $Q_{\text{АБХМ}}$ — установленная холодильная мощность АБХМ, кВт; $\mathcal{U}_{\text{АБХМ}}$ — удельная стоимость АБХМ, включая проектные и монтажные работы, руб/кВт.

Для условий годового пика электропотребления, приходящегося на летнее время, на рис. 4 приведены результаты расчетов изменения ЧДД, отнесенного к установленной мощности ГПУ, в зависимости от доли АБХМ в графике покрытия холодильной нагрузки $D_{\text{АБХМ}} = N_3^{\text{АБХМ}} / N_3^{\text{СКВ}}$. При выполнении расчетов были приняты следующие исходные данные: $\mathcal{U}_{\text{ГПУ}} = 43$ тыс. руб/кВт, $\mathcal{U}_{\text{КХМ}} = 6,5$ тыс. руб/кВт, $\mathcal{U}_{\text{АБХМ}} = 10 \div 14,5$ тыс. руб/кВт, стоимость продаваемой электроэнергии $C_{\text{с.в.}} = 2 \div 5$ руб/(кВт·ч), стоимость газа $C_{\text{газ}} = 5$ руб/м³.

Как видно из рис. 4, а, при работе ГП ТЭЦ в автономном режиме наибольший экономический эффект достигается при 100 %-ном использовании АБХМ для производства холода в СКВ. При совместной работе с энергосистемой со снижением установленной мощности ГПУ в случае низкой стоимости продаваемой в энергосистему электроэнергии от 2,4 руб/(кВт·ч) при капитальныхложениях в АБХМ 15 тыс. руб/кВт до 3,1 руб/(кВт·ч) при капитальныхложениях в АБХМ 10 тыс. руб/кВт совместная работа ГП ТЭЦ с АБХМ будет эффективной, а при большей стоимости целесообразнее использовать КХМ (см. рис. 4, б). Это объясняется тем, что снижение мощности ГПУ при увеличении доли АБХМ в графике покрытия холодильной нагрузки приводит к уменьшению объем-

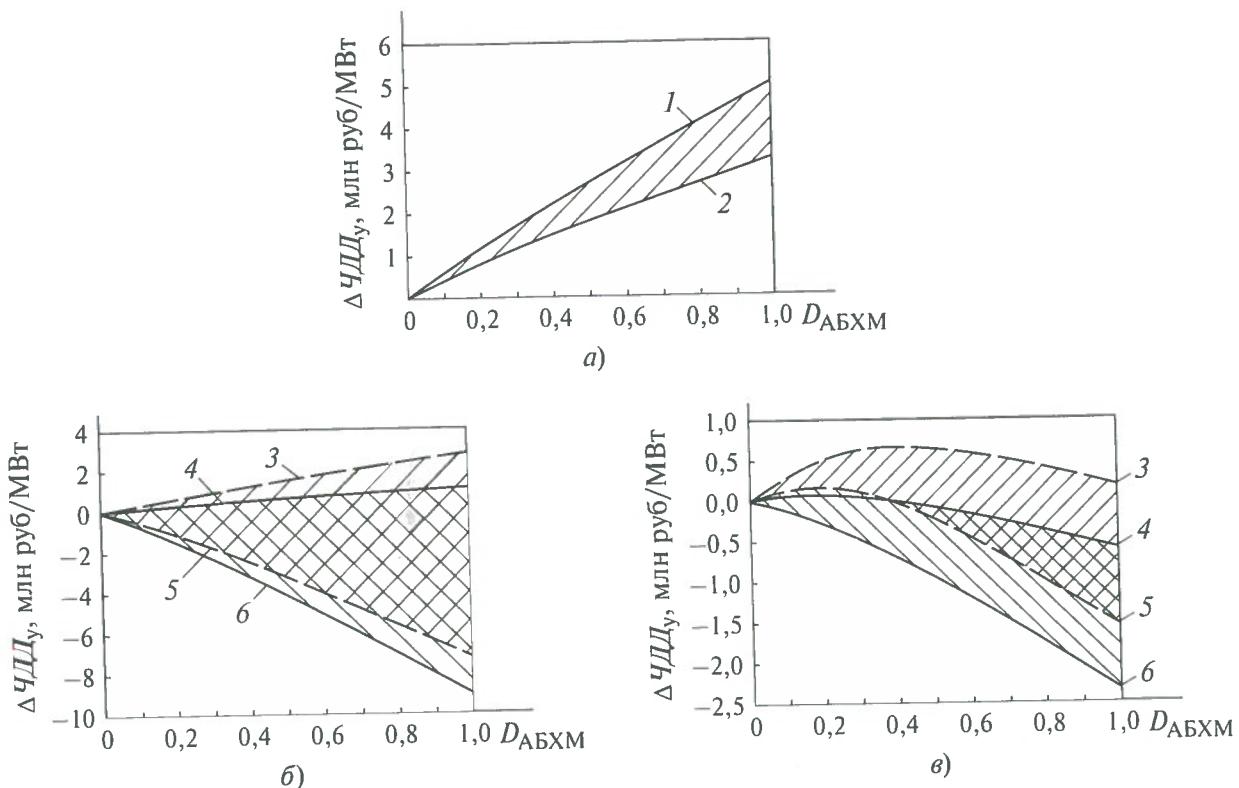


Рис. 4. Зависимость прироста ЧДД, отнесенного к установленной мощности ГПУ, от доли АБХМ в графике покрытия холодильной нагрузки и от стоимости газа и электроэнергии собственной выработки в случае летнего максимума электропотребления при автономной работе (а), при совместной работе с энергосистемой со снижением (б) и без снижения (в) установленной мощности ГПУ:

1 — $Ц_{ABXM} = 10$ тыс. руб./кВт; 2 — $Ц_{ABXM} = 15$ тыс. руб./кВт; 3 — $C_{c.B} = 2$ руб./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$), $Ц_{ABXM} = 10$ тыс. руб./кВт; 4 — $C_{c.B} = 5$ руб./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$), $Ц_{ABXM} = 10$ тыс. руб./кВт; 5 — $C_{c.B} = 2$ руб./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$), $Ц_{ABXM} = 15$ тыс. руб./кВт; 6 — $C_{c.B} = 5$ руб./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$), $Ц_{ABXM} = 15$ тыс. руб./кВт

ма продаваемой в энергосистему электрической энергии при неизменных капитальных и текущих затратах. При увеличении стоимости электроэнергии собственной выработки снижение капитальных и текущих затрат на ГПУ и холодильные машины перестает компенсировать снижение дохода из-за уменьшения продажи электроэнергии.

Для варианта совместной работы ГП ТЭЦ с энергосистемой без изменения установленной мощности ГПУ при стоимости продаваемой электроэнергии собственной выработки до 4 руб./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$) и цене АБХМ 15 тыс. руб./кВт имеет место оптимум соотношения компрессионных и абсорбционных холодильных машин, при котором достигается максимальная прибыль. Перегиб кривых 3—5 на рис. 4, в объясняется тем, что по мере увеличения доли АБХМ в графике покрытия холодильной нагрузки продажа электроэнергии в энергосистему увеличивается по нелинейной зависимости, а экономия текущих и капитальных затрат снижается практически пропорционально доле АБХМ. После достижения точки оптимального соотношения

компрессионных и абсорбционных чиллеров уменьшение экономии затрат превышает доход от продажи электроэнергии в энергосистему. На рис. 4, б перегибов не наблюдается вследствие того, что при совместной работе ГП ТЭЦ с энергосистемой со снижением установленной мощности ГПУ по мере увеличения доли абсорбционных чиллеров продажа электроэнергии в энергосистему не меняется.

Как видно из рис. 4, в, при стоимости электроэнергии 2 руб./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$) и цене АБХМ 10 тыс. руб./кВт работа ГП ТЭЦ с АБХМ экономически более эффективна, чем только с КХМ, и при соотношении 40 % АБХМ и 60 % КХМ достигается наибольший экономический эффект. Однако при увеличении стоимости электроэнергии собственной выработки и цены абсорбционного чиллера эффект уменьшается и совместное использование АБХМ с газопоршневой ТЭЦ становится убыточным.

В рассмотренном выше примере источником холода являлась АБХМ, работающая на горячей воде. Возможно также использование АБХМ с огневым, паровым обогревом или

на выхлопных газах. Такие машины можно применять на объектах, где имеются вторичные энергоресурсы, такие, как дымовые газы, сжатый пар или горючие газообразные отходы промышленного производства. Однако, несмотря на более высокую энергетическую эффективность по сравнению с АБХМ, работающей на горячей воде, такие машины требуют больших капитальных вложений и ежегодных затрат.

Для повышения эффективности работы ГП ТЭЦ совместно с СКВ рекомендуется также применять усовершенствованные тепловые схемы энергоисточника, которые позволяют увеличить производство холода на базе утилизируемой отходящей теплоты ГПУ, улучшить характеристики источника теплоты [3] или повысить холодильную мощность АБХМ за счет усовершенствования контура охлаждения ГПУ [4].

Выводы

1. Выбор рационального варианта применения чиллеров компрессионного или абсорбционного типа совместно с ГП ТЭЦ для потребителей с развитой системой кондиционирования определяется спецификой энергопотребления объекта и особенностями работы ГП ТЭЦ с энергосистемой.
2. Технико-экономические расчеты эффективности совместного использования аб-

сорбционных и компрессионных холодильных машин показывают, что наибольшую инвестиционную привлекательность имеет вариант автономной работы ГП ТЭЦ с АБХМ при годовом максимуме электропотребления, приходящемся на лето. При совместной работе газопоршневой ТЭЦ с энергосистемой одновременное использование абсорбционных и компрессионных холодильных машин повышает эффективность использования ГП ТЭЦ и при оптимальном соотношении АБХМ и КХМ позволяет добиться наибольшей экономической эффективности.

Список литературы

1. Проектный документ от 23 марта 2010 г. № (PIMS) 3550 Минобрнауки России / ПРООН / ГЭФ "Стандарты и маркировка для продвижения энергоэффективности в России" (www.label-ee.ru).
2. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (2-я ред., испр. и доп.). Утв. Минэкономики РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. № ВК 477.
3. Баженов А. И., Михеева Е. В. Повышение эффективности совместной работы ГПУ и абсорбционных чиллеров в периоды снижения холодопотребления. — Вестник СГТУ, 2014, № 4(73).
4. Баженов А. И., Михеева Е. В. Совершенствование тепловых схем газопоршневых установок при комбинированной выработке электрической энергии, теплоты и холода. — Промышленная энергетика, 2014, № 5.

hime84@mail.ru

Enhancing the efficiency of gas piston CHP in case of combined power supply of the consumers with an advanced air conditioning system

Bazhenov A. I., Mikheeva E. V.

The results of studying the efficiency of gas piston CHP in the systems of autonomous energy consumption with an advanced air conditioning system based on compression and/or absorption chillers are presented. The cases of autonomous operation of gas-piston power plants and their joint operation in the power system are considered. Special attention is paid to operation of gas-piston CHP in autonomous systems at maximum power consumption in summer. The data obtained provided a basis for the recommendations specified to improve the efficiency of gas piston CHP at a combined power supply of the consumers with an advanced air conditioning system.

Keywords: gas piston CHP, air conditioning system, chillers, energy system.