

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Мацко И.И.

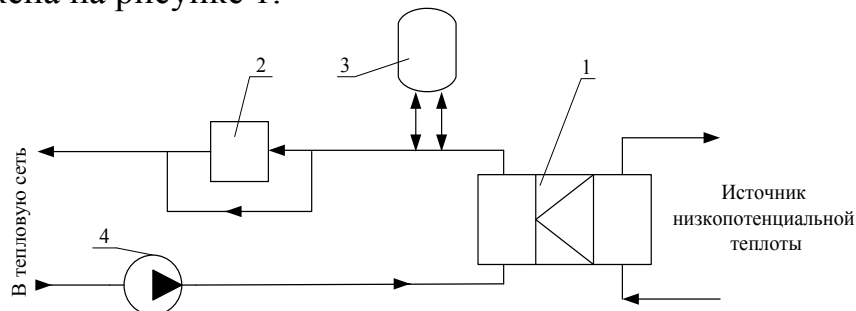
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, РБ, i-matsko@yandex.ru

Among heat sources that have good prospects for the Republic of Belarus are large combination thermocompressor plants including vapor compression water-to-water ther-mocompressor units, hot water boilers and accumulation tanks. This is connected with high degree of heat supply centralization and the existence of concentrated flows of dis-charge heat. To study power efficiency of the combination thermocompressor plant as a source of heat of centralized heat supply it is necessary to select optimum parameters of operation and work out a heat circuit. The methods are developed for analyzing power ef-ficiency of the combination thermocompressor plants use allowing for specific features of seasonal heat consumption depending on the temperature chart of the heat supply system, low-grade heat source temperature and climatological parameters of the region.

Введение

В системах теплоснабжения требуется теплота с небольшим значением эксергии [1]. При этом приходится сжигать топливо, химическая энергия которого практически целиком представляет собой эксергию. Получение эксергетически менее ценного тепла для систем теплоснабжения возможно с помощью тепловых насосов.

Для РБ, в связи с высокой степенью централизации теплоснабжения и наличия концентрированных потоков отходящей теплоты, наиболее перспективными являются крупные комбинированные теплонасосные станции (КТС), состоящие из парокомпрессионных теплонасосных установок (ТН), водогрейных котлов (ВК) и баков-аккумуляторов. Назначение водогрейных котлов – обеспечить идентичные с ТЭЦ и районными котельными параметры сетевой воды. Назначение баков-аккумуляторов тепловой энергии – обеспечить возможность работы КТС не только по свободному, но и по принудительному графику энергопотребления: в часы провалов суточных графиков электрической нагрузки энергосистем. Принципиальная схема КТС для закрытой системы теплоснабжения изображена на рисунке 1.



1 – тепловой насос, 2 – водогрейный котёл, 3 – бак-аккумулятор тепловой энергии,
4 – сетевой насос

Рисунок 1 - Схема комбинированной теплонасосной станции для закрытой системы теплоснабжения

Разработка методики расчёта энергетической эффективности

Для обеспечения единообразия систем теплоснабжения и возможности включения КТС в действующие системы температура воды, подаваемой от них в тепловые сети, должна соответствовать температурному графику. Каждая КТС характеризуется суммарной тепловой мощностью установленных ТН и ВК, коэффициентом преобразования ТН $\mu_{\text{ТН}}$, коэффициентом полезного действия ВК $\eta_{\text{К}}$. Данные параметры, кроме $\eta_{\text{К}}$, зависят от температур теплоприёмника и источника теплоты.

Для исследования энергетической эффективности КТС в качестве теплоисточника централизованного теплоснабжения необходимо выбрать оптимальные параметры и разработать тепловую схему. Определение оптимальных параметров КТС производится с помощью интегрального графика тепловой нагрузки в безразмерных координатах. Этим графиком удобно пользоваться в том случае, когда тепловая нагрузка обеспечивается теплотой из различных источников, для определения степени их участия в покрытии годового расхода теплоты. Интегральный график $\alpha_{\text{ГОД}} = f(\alpha_{\text{С}})$ строится на основе графика продолжительности тепловой нагрузки. Здесь $\alpha_{\text{С}} = Q/Q_{\text{Р}}$ - отношение тепловой нагрузки источника Q к расчётной нагрузке района $Q_{\text{Р}}$; $\alpha_{\text{ГОД}} = Q^{\text{ГОД}}/Q_{\text{Р}}^{\text{ГОД}}$ - отношение количества теплоты, отпускаемой за отопительный сезон источником $Q^{\text{ГОД}}$, имеющим расчётную производительность Q , к суммарному расходу теплоты за сезон $Q_{\text{Р}}^{\text{ГОД}}$.

Следующим шагом при исследовании энергетической эффективности КТС в качестве теплоисточника централизованного теплоснабжения является определение максимальной температуры воды после конденсатора теплового насоса $\tau_{\text{ТНУ}_{\text{МАХ}}}$. Главным образом значение $\tau_{\text{ТНУ}_{\text{МАХ}}}$ зависит от термодинамических свойств рабочего тела, конструкции ТН и температурного уровня источника низкопотенциальной теплоты. При дальнейшем рассмотрении используются энергетические характеристики ТН производства ЗАО «Энергия» (Новосибирск, Россия), так как эта продукция наиболее качественно адаптирована для применения в отечественных системах теплоснабжения и способна обеспечить $\tau_{\text{ТНУ}_{\text{МАХ}}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Температура низкопотенциального источника теплоты $t_{\text{НПТ}}$, используемого ТН, в ходе эксплуатации может колебаться в широких пределах (от 5 до 40 $^{\circ}\text{C}$), что необходимо учитывать при расчёте тепловой схемы КТС. Рассмотрим в качестве источника низкопотенциальной теплоты воду станции аэрации с $t_{\text{НПТ}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При выборе максимальной температуры воды после конденсатора ТН $\tau_{\text{ТН}_{\text{МАХ}}}$ необходимо отслеживать соответствующее этой температуре значение коэффициента преобразования ТН $\mu_{\text{ТН}}$ для конкретного температурного уровня источника низкопотенциальной теплоты. Величина коэффициента преобразования ТН $\mu_{\text{ТН}}$ в этом случае не должна быть меньше значения, обеспечивающего равенство расходов первичной энергии на производство тепловой энергии от КТС станции и традиционного источника.

При сопоставлении с районной котельной:

1. Удельный расход первичной энергии на производство единицы тепловой энергии для районной котельной:

$$q_k = \frac{1}{\eta_k}. \quad (1)$$

Для высокоэффективных котлов η_k достигает 92 %.

2. Удельный расход первичной энергии на производство единицы тепловой энергии для теплового насоса:

$$q_{\text{ТНУ}} = \frac{p}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}}} = \frac{1}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \mu_{\text{ТН}}}, \quad (2)$$

где

p - удельный расход электроэнергии на получение тепловой энергии от ТН;

$\eta_{\text{КЭС}} = 0,4$ - коэффициент полезного действия замыкающей КЭС, %;

$\eta_{\text{ЛЭП}} = 0,92$ - коэффициент полезного действия электрической сети, %.

Приравнивая правые части выражений (1) и (2), определяем минимальный допустимый коэффициент преобразования теплового насоса $\mu_{\text{ТН}_{\text{мин}}}$:

$$\mu_{\text{ТН}_{\text{мин}}} = \frac{\eta_k}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}}} = \frac{0,92}{0,40 \cdot 0,92} = 2,5. \quad (3)$$

В случае, если в качестве замыкающей КЭС рассматривать блок ПГУ Минской ТЭЦ-5 электрической мощностью 450 МВт, вводимый в эксплуатацию в ближайшее время [3], значение минимально допустимого коэффициента преобразования ТН $\mu_{\text{ТН}_{\text{мин}}}$ составит порядка 1,7. Таким образом, меры, направленные именно на удешевление производства электрической энергии определяют условия экономичности внедрения парокомпрессионных ТН. В нашем случае, при $t_{\text{НПТ}} = 15$ °С значение $\mu_{\text{ТН}_{\text{мин}}} = 2,5$ согласно [2] достигается при $\tau_{\text{ТНУ}_{\text{MAX}}} = 70$ °С; при $\mu_{\text{ТН}_{\text{мин}}} = 1,7$ - $\tau_{\text{ТНУ}_{\text{MAX}}}$ превышает 80 °С.

При $\tau_1 > \tau_{\text{ТН}_{\text{MAX}}}$ в тепловом насосе поддерживается $\tau_{\text{ТН}} = \tau_{\text{ТН}_{\text{MAX}}} = \text{const}$, при $\tau_1 < \tau_{\text{ТН}_{\text{MAX}}}$ - $\tau_{\text{ТН}} = \tau_1 = \text{var}$. Со снижением температуры наружного воздуха $t_{\text{НВ}}$ растёт τ_2 и уменьшается разность между $\tau_{\text{ТН}_{\text{MAX}}}$ и τ_2 . Поэтому доля тепловой энергии, производимой ТН в общей теплопроизводительности, КТС падает.

Для климатических условий Гомеля значения $\bar{Q}_{\text{от}_\text{ТН}}$ при работе систем теплоснабжения по характерным температурным графикам приведены в таблице.

Таблица - Доля расчётной отопительной нагрузки, покрываемая работой тепловых насосов $\bar{Q}_{\text{от}_\text{ТН}}$ в зависимости от температурного графика и $\tau_{\text{ТНУ}_{\text{MAX}}}$.

Температурный график	$\tau_{\text{ТНУ}_{\text{MAX}}}$, °С	
	70	80
150/70 °С	0,35	0,43
130/70 °С	0,42	0,51
95/70 °С	0,62	0,77

Как видно из таблицы, на долю расчётной отопительной тепловой нагрузки, покрываемую работой ТН \bar{Q}_{OT_TH} , существенно влияет температурный график системы теплоснабжения. Снижение расчётных температур теплоносителя в сети увеличивает долю \bar{Q}_{OT_TH} . При относительной отопительной нагрузке $\bar{Q}_{OT} > \bar{Q}_{OT_TH}$ совместно с ТН функционируют ВК. Данный режим работы приводит к наибольшей экономии топлива за отопительный сезон.

Используя интегральный график тепловой нагрузки для Гомеля, построенный по данным [4], определим степень участия ТН в покрытии годового расхода теплоты. Полученные данные (рис. 2) позволяют предположить, что ТН мощностью значительно меньше расчётной тепловой нагрузки, работающие в базовом режиме эксплуатации, способны покрыть значительную часть годовой отопительной нагрузки. Например, при $\tau_{THY_MAX} = 70$ °С и температурном графике 95/70 °С 81 % годового потребления тепловой энергии системами отопления будет обеспечен ТН установленной мощностью $0,62 \cdot Q_p$ ($\alpha_c = 62$ % от расчётной отопительной нагрузки).

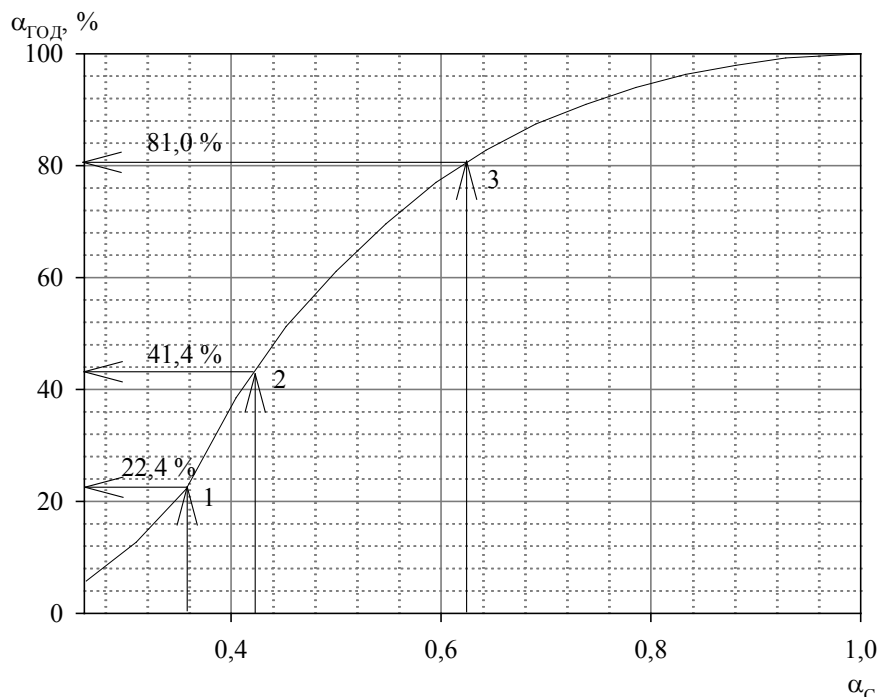


Рисунок 2 - Доля годового расхода теплоты, покрываемая тепловыми насосами комбинированной теплонасосной станции при $\tau_{THY_MAX} = 70$ °С для температурных графиков: 1 – 150/70 °С; 2 – 130/70 °С; 3 – 95/70 °С

Работа ТН в составе КТС предполагает в первую очередь максимально полное на протяжении отопительного периода использование их установленной мощности, соразмерной с возможностями утилизации для нужд отопления низкопотенциальной теплоты местных возобновляемых и вторичных источников. Описанные мероприятия позволяют с помощью ТН заместить энергию ископаемых видов топлива низкопотенциальной теплотой возобновляемых и вторичных источников.

Годовое потребление первичной энергии $W_{\text{КТНС}}$ на выработку теплоты в КТС представляет собой сумму годовых затрат первичной энергии для входящих в её состав теплоисточников:

$$W_{\text{КТНС}} = W_{\text{К}} + W_{\text{ТН}}, \quad (4)$$

где

$W_{\text{К}}$ - годовой расход первичной энергии котлами КТС;

$W_{\text{ТН}}$ - годовой расход первичной энергии на выработку электроэнергии с учётом доставки, потребляемой тепловыми насосами КТС.

С учётом затрат первичной энергии для обеспечения работы ВК и ТН выражение (4) можно представить в виде:

$$W_{\text{КТНС}} = \frac{Q_{\text{К}}}{\eta_{\text{К}}} + \frac{N_{\text{ТН}}}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}}} = \frac{Q_{\text{К}}}{\eta_{\text{К}}} + \frac{Q_{\text{ТН}}}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \mu_{\text{ТН}}^{\text{ГОД}}}, \quad (5)$$

где

$Q_{\text{К}}$ - годовая выработка теплоты водогрейными котлами;

$Q_{\text{ТН}}$ - годовая выработка теплоты тепловыми насосами;

$N_{\text{ТН}}$ - годовое потребление электроэнергии тепловыми насосами;

$\mu_{\text{ТН}}^{\text{ГОД}}$ - средневзвешенный годовой коэффициент преобразования тепловых насосов.

Сокращение расхода первичной энергии по сравнению с котельной составит:

$$\Delta W = W_{\text{ВК}} - W_{\text{КТНС}}, \quad (6)$$

где

$W_{\text{ВК}}$ - годовой расход первичной энергии на выработку теплоты в ВК.

С учётом формулы (5):

$$\Delta W = \frac{Q^{\text{ГОД}}}{\eta_{\text{К}}} - \left(\frac{Q_{\text{К}}}{\eta_{\text{К}}} + \frac{Q_{\text{ТН}}}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \mu_{\text{ТН}}^{\text{ГОД}}} \right). \quad (7)$$

Определим, например, сокращение расхода первичной энергии на единицу отпускаемой теплоты при $\tau_{\text{ТНУ}_{\text{МАХ}}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и работе системы теплоснабжения по температурному графику 95/70 $^\circ\text{C}$

$$\Delta w = \frac{\Delta W}{Q^{\text{ГОД}}} = \frac{1}{\eta_{\text{К}}} - \left(\frac{Q_{\text{К}}/Q^{\text{ГОД}}}{\eta_{\text{К}}} + \frac{Q_{\text{ТН}}/Q^{\text{ГОД}}}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \mu_{\text{ТН}}^{\text{ГОД}}} \right). \quad (8)$$

Для рассматриваемого варианта, с учётом полученных значений $\alpha_{\text{ГОД}}$ (рис. 2):

$$\Delta w = \frac{1}{\eta_{\text{К}}} - \left(\frac{0,19}{\eta_{\text{К}}} + \frac{0,81}{\eta_{\text{КЭС}} \cdot \eta_{\text{ЛЭП}} \cdot \mu_{\text{ТН}}^{\text{ГОД}}} \right). \quad (9)$$

Величина средневзвешенного годового коэффициента преобразования ТН $\mu_{\text{ТН}}^{\text{ГОД}}$ зависит от температуры источника низкопотенциальной теплоты, температурного графика системы теплоснабжения и определяется с учётом продолжительности стояния температур наружного воздуха для конкретного климатического региона [4] и зависимости коэффициента преобразования ТН конкретного производителя от преодолеваемой разности температур [2].

В нашем случае, при $t_{\text{НПТ}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ и установленной мощности тепловых насосов $0,62 \cdot Q_{\text{р}}$ ($\alpha_{\text{с}} = 62 \%$) значение $\mu_{\text{ТН}}^{\text{ГОД}} = 3,7$. Тогда:

$$\Delta w = \frac{1}{0,92} - \left(\frac{0,19}{0,92} + \frac{0,81}{0,4 \cdot 0,92 \cdot 3,7} \right) = 0,285. \quad (10)$$

Определим соответствующее этому относительное сокращение расхода первичной энергии при теплоснабжении от КТС вместо водогрейной котельной:

$$\Delta = \frac{\Delta w}{1/\eta_k} = \frac{0,285}{1/0,92} = 0,262. \quad (11)$$

Таким образом, в рассматриваемом примере годовой расход топлива на нужды отопления потребителей при замене водогрейной котельной на КТС сократится на 26,2 %. Для реализуемых на практике диапазонов изменения показателей энергоэффективности теплоисточников создание КТС с применением работающих в базовом режиме эксплуатации ТН с электроприводом позволяет снизить общее потребление ископаемых видов топлива за счёт использования низкопотенциальной теплоты местных возобновляемых и вторичных источников. Это создаёт условия для оздоровления окружающей среды и повышает инвестиционную привлекательность теплонасосных технологий.

Данный расчёт был выполнен без учёта тепловой нагрузки на горячее водоснабжение, которая полностью будет покрываться за счёт работы ТН КТС. Это позволит ещё больше сократить расход топлива на нужды теплоснабжения.

Дополнительными стимулами развития комбинированных теплонасосных станций являются относительное снижение вредных выбросов в окружающую среду, применение дешёвых ночных тарифов на электроэнергию для выработки теплоты, повышение общей надёжности теплообеспечения и расширения возможностей регулирования тепловой энергии.

Выводы

1. Представленные результаты исследований дают основание наметить мероприятия, направленные на эффективное внедрение теплонасосных технологий в сфере теплоснабжения.

2. Разработана методика расчёта энергетической эффективности внедрения КТС с учётом особенностей сезонного теплопотребления в зависимости от температурного графика системы теплоснабжения, температуры источника низкопотенциальной теплоты, климатологических параметров региона.

3. Выявлена возможность экономии невозобновляемых энергоресурсов за счёт оптимального перераспределения годовой отопительной нагрузки между входящими в состав КТС теплоисточниками с максимальной загрузкой наиболее экономичных из них. При этом значительная часть годового теплопотребления обеспечивается относительно малыми по установленной мощности, но высокоэффективными ТН.

Список использованных источников

1. Бродянский, В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В.М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

2. Петин, Ю.М. Опыт производства тепловых насосов предприятием ЗАО «Энергия» / Ю.М. Петин // Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Часть 2 / Ю.М. Петин; под ред. П.П. Безруких. – М.: Амипресс, 2002 – С. 54–56.

3. О мероприятиях по выполнению в 2008 году Государственной комплексной программы модернизации основных производственных фондов Белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов на период до 2011 года: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28.02.2008 г. № 261

4. Строительная климатология: СНБ 2.04.02-2000. – Введ. 01.07.2001. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2001. – 40 с.