

## Вариант реконструкции системы централизованного теплоснабжения

*Н.В. КОЛЕСНИЧЕНКО, С.М. САФЬЯНЦ, Г.Е. КОНСТАНТИНОВ*

Донецкий национальный технический университет

Происходящая в настоящее время реорганизация системы централизованного теплоснабжения является стихийной и не всегда оптимальной. В работе предлагается вариант реконструкции системы централизованного теплоснабжения, предусматривающий установку в котельной газовых когенерационных агрегатов и воздушных тепловых насосов у потребителя. Показано преимущество газовых поршневых двигателей над газовыми турбинами для оборудования мини-ТЭС. Вопреки распространенному мнению, в предлагаемой схеме применение воздушных тепловых насосов эффективно при тепловом коэффициенте не менее 1,45. Годовая экономия топлива в сравнении альтернативной схемой децентрализованного теплоснабжения составит для климатических условий г. Киева не менее 33%.

Реорганізація системи централізованого теплопостачання, що відбувається в теперішній час, є стихійною і не завжди оптимальною. У роботі пропонується варіант реконструкції системи централізованого теплопостачання, що передбачає установку в котельні газових когенераційних агрегатів і повітряних теплових насосів у споживача. Показано перевагу газових поршневих двигунів над газовими турбінами для устаткування міні-ТЕС. Усупереч поширеній думці, у пропонованій схемі застосування повітряних теплових насосів ефективно при тепловому коефіцієнті не менш 1,45. Річна економія палива в порівнянні альтернативною схемою децентрализованого теплопостачання складе для кліматичних умов м. Києва не менш 33%.

Modern reorganisation of centralized space heating system is rather spontaneous and not always optimal. In this paper we offer the version of such system including gas-burning co-generation units in the boiler room and air heat pumps at the customer site. It is proved that Internal Combustion Engine has substantial advantages in comparison with Gas Turbine as prime mover of the Co-generation unit. In spite of wide-spread opinion, using of the air heat pumps in the offered scheme is effective under coefficient of performance not less than 1,45. Annual saving of the fuel in comparison with alternative decentralised scheme of space heating for climate conditions of Kiev is not less than 33 %.

Существующая система централизованного теплоснабжения жилых и общественных зданий не соответствует современным требованиям по энергоэффективности и надежности, а потому в настоящее время остро стоит задача ее коренной реконструкции. Этот процесс уже идет, но развивается в основном стихийно, и принимаемые решения далеко не всегда являются оптимальными.

Основными направлениями реконструкции системы теплоснабжения в Украине являются:

- установка индивидуальных котлов на отдельные здания или их части;
- внедрение когенерации на действующих котельных;
- внедрение систем утилизации низкопотенциального тепла с использованием тепловых насосов.

Децентрализация теплоснабжения дает энерго-сберегающий эффект за счет применения современных котлов с коэффициент полезного действия не менее 90%, ликвидации протяженных тепловых сетей, и обеспечивает возможности осуществления более точного регулирования тепловой нагрузки. Однако при этом повышается концентрация вредных веществ в приземном слое атмосферы.

Совместная выработка тепловой и электрической энергии (когенерация) при условии минимизации тепловых потерь в сетях и применения автоматизации тепловых пунктов дает эффект по сравнению с существующими источниками теплоснабжения – центральными котельными. Однако выработка электроэнергии практически ограничивается потребностями на собственные нужды котельной. Это связано с тем, что при присоединении электрической нагрузки она является приоритетной, и пиковое потребление тепловой и электрической энергии будут не совпадать. Неизбежные потери могут существенно снизить эффективность ко-

генерации. С точки зрения экологии, когенерация обладает существенным преимуществом перед децентрализацией теплоснабжения.

Значительным потенциалом энергосбережения обладает внедрение теплонасосных установок (ТНУ) [1], которые могут обеспечить возможность использования в теплоснабжении низкопотенциальной тепловой энергии от различных источников: атмосферного воздуха, грунта, сточных вод и т.д. Количество получаемой при этом тепловой энергии с достаточным потенциалом может превышать расход электроэнергии в 3-4 раза. Поскольку типичный к.п.д. существующих конденсационных электростанций составляет не более 40%, использование ТНУ считается экономически оправданным при коэффициенте трансформации не менее 2,5. В то же время следует отметить, что отношение стоимостей единицы тепловой энергии, полученной из электрической, и полученной с применением природного газа, составляет менее 2,5, так как в Украине значительная часть электроэнергии вырабатывается с использованием более дешевого твердого топлива и атомной энергии.

Для создания энергоэффективной системы теплоснабжения необходим комплексный подход, поскольку совместное использование энергосберегающих мероприятий способно давать дополнительный эффект.

Рассмотрим реконструкцию системы теплоснабжения путем преобразования центральной котельной в мини-ТЭС на базе газовых поршневых машин с установкой у потребителей тепловых насосов. Мощность когенерационных установок выбираем так, чтобы вырабатываемая электроэнергия покрывала потребности тепловых насосов и собственные нужды. Коэффициенты полезного действия таких когенерационных установок следующие [2]: электрический 35-45%, тепловой 47-53%, суммарный 84 - 93%. Таким образом, на 1кВт вырабатываемой электроэнергии приходится 1,3 -

1,5 кВт тепловой, пригодной для нужд теплоснабжения. В связи с этим очевидна необходимость установки у потребителя после ТНУ теплообменника для дополнительного нагрева воды отопительного контура.

Определим, при каком минимальном тепловом коэффициенте  $\mu$  теплонасосной установки, указанная схема будет иметь энергоэффективность равную альтернативному варианту системы децентрализованного теплоснабжения.

Принимаем, следующие показатели: устанавливаемая газопоршневая машина имеет электрический КПД  $\eta_{эл} = 0,36$ , тепловой  $\eta_t = 0,48$ , суммарный  $\eta_{\Sigma} = 0,84$ . Эффективность передачи тепловой и электрической энергии от мини-ТЭС к потребителю с учетом собственных нужд принимаем равной  $\eta_c = 0,9$ . Для сравнения данной схемы с альтернативной системой децентрализованного теплоснабжения принимаем эффективность последней  $\eta_a = 0,9$ .

Расход топлива для реконструированной системы теплоснабжения можно определить из выражения:

$$B_p = Q_t / ((\eta_{эл} \cdot \mu + \eta_t) \cdot \eta_c \cdot Q_p^H)$$

где  $Q_t$  – тепловая мощность системы теплоснабжения, кВт;  $Q_p^H$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>.

Расход топлива альтернативной системой:

$$B_a = Q_t / (\eta_a \cdot Q_p^H)$$

При равенстве  $B_p = B_a$  получаем:

$$(\eta_{эл} \cdot \mu + \eta_t) \cdot \eta_c = \eta_a$$

откуда тепловой коэффициент:

$$\mu = (\eta_a / \eta_c - \eta_t) / \eta_{эл} = (0,9 / 0,9 - 0,48) / 0,36 = 1,45.$$

Если мини-ТЭС создается на базе газотурбинных двигателей (ГТУ), то ее характеристики будут следующими [3]:  $\eta_{эл} = 0,30$ ,  $\eta_t = 0,54$ ,  $\eta_{\Sigma} = 0,84$ .

В этом случае получим следующее значение минимального теплового коэффициента:

$$\mu = (\eta_a / \eta_c - \eta_t) / \eta_{эл} = (0,9 / 0,9 - 0,54) / 0,30 = 1,8.$$

Таким образом, энергетическая целесообразность применения тепловых насосов в теплоснабжении ограни-

чивается достаточно низким тепловым коэффициентом. Причем применение газовых поршневых машин имеет преимущества перед ГТУ. Этот факт открывает широкие возможности в применении тепловых насосов, использующих в качестве источника низкопотенциального тепла атмосферный воздух. Такие ТНУ не требуют наличия сбросного технологического тепла, установки грунтовых теплообменников и в климатических условиях Украины могут применяться повсеместно.

Итак, для нашей реконструкции используем воздушную ТНУ. Недостатком данного вида тепловых насосов, предлагаемых на рынке, является ограничение минимальной температуры атмосферного воздуха, при которой работает ТНУ величиной  $-14^{\circ}\text{C}$ . Отсутствие ТНУ работающих при более низких температурах атмосферного воздуха возможно связано с тем, что такие насосы будут намного дороже, поскольку будут иметь более развитую теплообменную поверхность испарителя и более мощный компрессор, а также сложную систему оттаивания испарителя. А потому спрос на такие теплонасосные установки в настоящее время отсутствует. Так как расчетные температуры систем отопления для городов Украины существенно ниже приведенной, то очевидна необходимость наличия на мини-ТЭС пиковых котлов. А для того, чтобы мощность пиковых котлов не равнялась установленной мощности центральной котельной до реконструкции, электрическая энергия, вырабатываемая когенерационными установками должна использоваться для прямого получения тепловой энергии в электродкотлах. Электродкотлы могут быть установлены как в здании мини-ТЭС, так и у потребителя. Однако установка их у потребителей существенно повышает надежность теплоснабжения, поскольку может предусматривать использование резервного питания электрических котлов от других источников, а их мощность должна обеспечивать защиту внутренней системы отопления от разморзания. Таким образом, схема реконструируемой системы теплоснабжения будет иметь вид, показанный на рисунке 1.

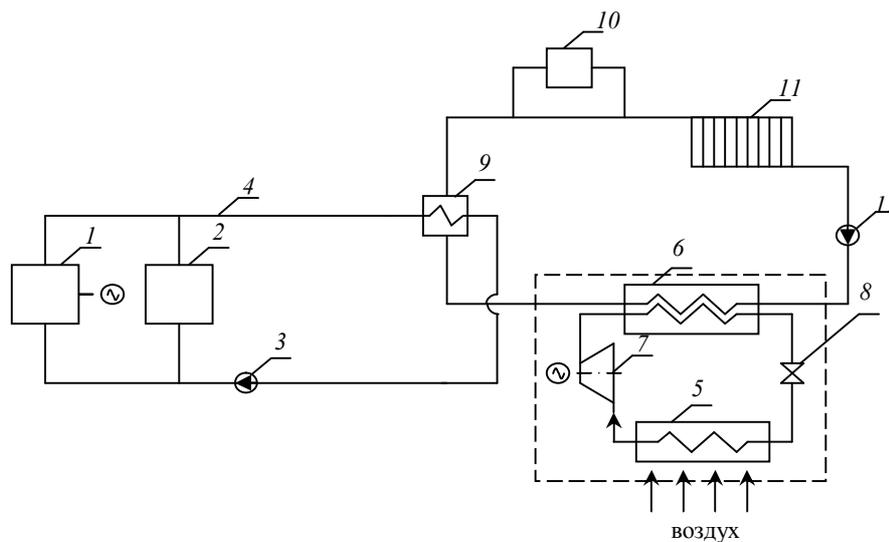


Рис. 1. Схема использования теплового насоса в системе отопления здания от мини ТЭС: 1 – когенерационная установка; 2 – пиковый котел; 3 – сетевой насос; 4 – тепловая сеть; 5 – испаритель ТНУ; 6 – конденсатор ТНУ; 7 – компрессор ТНУ; 8 – дроссель; 9 – теплообменник; 10 – электродкотел; 11 – отопительные приборы; 12 – циркуляционный насос.

Определим эффективность этой схемы, приняв для упрощения, что 100% тепловой нагрузки – отопление. Кроме этого, принимаем температурный график для отопительных приборов – 70/50. Это потребует увеличения поверхности нагрева отопительных приборов на 50%, что осуществимо. Другие исходные данные следующие: температура воздуха внутри помещений  $t_{вн} = 20^{\circ}\text{C}$ ; расчетная температура наружного воздуха  $t_{н}^p = -25^{\circ}\text{C}$ ; расчетная тепловая нагрузка отопления  $Q_o^p = 1$  МВт; электрический КПД газопоршневой установки  $\eta_{эл} = 0,34$  (с учетом работы на пониженной мощности); тепловой КПД  $\eta_r = 0,48$ , общий  $\eta_{\Sigma} = 0,82$ , КПД пикового газового котла  $\eta_k = 0,9$ ; потери в тепловых сетях и расход тепловой и электрической и тепловой энергии на собственные нужды принимаем равными 10%, а соответствующий КПД  $\eta_{сн} = 0,9$ ; КПД электрического котла  $\eta_{эк} = 0,98$ ; эффективность альтернативной системы децентрализованного теплоснабжения  $\eta_a = 0,9$ ; отопительные приборы подключены параллельно. Приведем примеры расчетов для условий работы системы теплоснабжения с пиковым котлом при расчетной температуре наружного воздуха  $t_{н}^p = -25^{\circ}\text{C}$ , и без него, при  $t_{н} = -14^{\circ}\text{C}$ .

Пример 1.  $t_{н} = -14^{\circ}\text{C}$ . Температура воды перед отопительными приборами по температурному графику  $\tau_1 = 57,8^{\circ}\text{C}$ , после отопительных приборов  $\tau_2 = 42,7^{\circ}\text{C}$ . Тепловая нагрузка отопления  $Q_o = 756$  кВт.

Принимаем температуру воды после ТНУ  $t_{тн} = 51^{\circ}\text{C}$ . Тепловой коэффициент воздушной ТНУ  $\mu = 1,7$ .

Теплота топлива, необходимого для покрытия данной нагрузки без учета потерь и расходов на собственные нужды:

$$Q'_{\text{топ}} = Q_o / (\eta_{эл} \cdot \mu + \eta_r) = 756 / (0,34 \cdot 1,7 + 0,48) = 715 \text{ кВт}$$

Электрическая мощность, вырабатываемая мини-ТЭС для обеспечения работы теплонасосных установок:

$$N_{эл} = \eta_{эл} \cdot Q'_{\text{топ}} = 0,34 \cdot 715 = 243 \text{ кВт.}$$

Тепловая мощность мини-ТЭС:

$$N_r = \eta_r \cdot Q'_{\text{топ}} = 0,48 \cdot 715 = 343 \text{ кВт.}$$

Тепловая мощность ТНУ:

$$N_{тн} = \mu \cdot N_{эл} = 1,7 \cdot 243 = 413 \text{ кВт.}$$

Расчитанные значения мощностей будут предельными для когенерационной установки и ТНУ. С учетом собственных нужд и потерь энергии, электрическая мощность мини-ТЭС  $N_{эл}^p = 270$  кВт, а тепловая  $N_r^p = 381$  кВт.

Доля тепловой энергии, вырабатываемой ТНУ в общей отопительной нагрузке:

$$D = N_{тн} / Q_o = 413 / 756 = 0,546.$$

Уточняем температуру после ТНУ:

$$t_{тн} = D \cdot (\tau_1 - \tau_2) + \tau_2 = 0,546 \cdot (57,8 - 42,7) + 42,7 = 50,9^{\circ}\text{C}.$$

Теплота топлива с учетом потерь и расходов энергии на собственные нужды:

$$Q_{\text{топ}} = Q'_{\text{топ}} / \eta_{сн} = 715 / 0,9 = 794,5 \text{ кВт.}$$

Теплота топлива при альтернативном варианте теплоснабжения от индивидуальных котлов:

$$Q_{a,\text{топ}} = Q_o / \eta_a = 756 / 0,9 = 840 \text{ кВт}$$

Относительная экономия топлива по сравнению с альтернативным вариантом:

$$\Xi = 100 \cdot (1 - Q_{\text{топ}} / Q_{a,\text{топ}}) = 100 \cdot (1 - 794,5 / 840) = 5,4\%$$

Пример 2.  $t_{н} = -25^{\circ}\text{C}$ . Тепловая нагрузка отопления  $Q_o = 1000$  кВт. Определим тепловую мощность пиковой котельной.

$$Q_{\text{пик}} = (Q_o - N_r - N_{эл} \cdot \eta_{эк}) / \eta_{сн} = (1000 - 343 - 243 \cdot 0,98) / 0,9 = 466 \text{ кВт}$$

Теплота топлива:

$$Q_{\text{топ}} = Q_{\text{пик}} / \eta_k + N_{эл}^p / \eta_{эл} = 466 / 0,9 + 270 / 0,34 = 1312 \text{ кВт}$$

Теплота топлива при теплоснабжении от индивидуальных котлов:

$$Q_{a,\text{топ}} = Q_o / \eta_a = 1000 / 0,9 = 1111 \text{ кВт}$$

Относительный перерасход топлива:

$$\Pi = 100 \cdot (Q_{\text{топ}} / Q_{a,\text{топ}} - 1) = 100 \cdot (1312 / 1111 - 1) = 18\%$$

Произведем аналогичные расчеты при различных температурах наружного воздуха, а результаты сведем в таблицу 1.

Таблица 1. Показатели эффективности предлагаемого варианта реконструкции

$t_{н}, ^{\circ}\text{C}$	-25	-20	-14	-10	-5	0	8
$Q_o, \text{кВт}$	1000	889	756	667	556	444	267
$t_{тн}, ^{\circ}\text{C}$	-	-	51	48	44	39,3	32
$\mu$	-	-	1,7	2,1	2,5	2,8	4,1
$Q'_{\text{топ}}, \text{кВт}$	-	-	715	559	418	310	143
$N_{эл}^p, \text{кВт}$	270	270	243	190	142	105	49
$N_r, \text{кВт}$	381	381	343	268	201	149	69
$N_{тн}, \text{кВт}$	-	-	413	399	355	294	201
$D$	-	-	0,55	0,60	0,64	0,66	0,75
$Q_{\text{пик}}, \text{кВт}$	466	342	-	-	-	-	-
$Q_{\text{топ}}, \text{кВт}$	1312	1174	794,5	621	464,5	344,5	159
$Q_{a,\text{топ}}, \text{кВт}$	1111	988	840	741	618	493	297
$\Xi, \%$	-18	-18,8	5,4	16,2	24,8	30,1	46,5

Как видно из таблицы, экономия может быть как положительной, так и отрицательной. Поэтому необходимо определить ожидаемую годовую экономию. Для климатических условий города Киева, годовая экономия описываемой реконструкции, по сравнению с системой индивидуального теплоснабжения, составляет не менее 33%, а в натуральном выражении – 87 т.у.т. на 1МВт расчетной отопительной нагрузки. Соответственно при сравнении с существующими системами центрального теплоснабжения, годовая экономия топлива будет существенно выше.

Данная схема не является оптимальной, поэтому приведем некоторые очевидные пути повышения ее эффективности:

- применение систем воздушного отопления, теплых полов приведут к снижению температуры воды

после ТНУ, а значит и к повышению ее теплового коэффициента;

- все мероприятия, повышающие коэффициент  $\mu$  теплонасосной установки, а также тепловое сопротивление зданий ведут к снижению капитальных затрат как на тепловой насос, так и на когенерационные установки;

- поскольку электрический КПД мини-ТЭС зависит от электрической нагрузки, то количество устанавливаемых газопоршневых машин должно быть таким, чтобы минимальная нагрузка на машину была не ниже 60%, а средняя была выше 75%;

- данная схема предусматривает частичное покрытие электрических нагрузок потребителей, однако, такую возможность надо рассчитывать для конкретных условий.

#### Выводы

1. Показана принципиальная возможность экономии топлива в системах центрального теплоснабжения с использованием воздушных тепловых насосов при температурах наружного воздуха до  $-14^{\circ}\text{C}$  и низким тепловым коэффициентом  $\mu = 1,7$ .
2. Годовая экономия топливных ресурсов по сравнению с альтернативной системой децентрализованного теплоснабжения от индивидуальных котлов составляет не менее 33%.

3. Разработанная схема повышает надежность системы центрального теплоснабжения, поскольку в случае аварии на мини-ТЭС, возможно использовании электрической энергии от резервного источника как для привода компрессора ТНУ, так и для электрокотла, установленного в тепловом пункте здания.
4. Системный подход при реализации данной реконструкции позволит значительно снизить срок окупаемости мероприятий, направленных на снижение тепловых потерь зданиями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андрущенко А.И. Сравнительная эффективность применения тепловых насосов для централизованного теплоснабжения // Промышленная энергетика. 1997. №6. с. 2-4.
2. Андрущенко А.И. Методика термодинамического анализа циклов мини ТЭС с поршневыми двигателями. // Известия вузов. Энергетика. 1992. №11,12.
3. Смирнов И.А., Молодюк В.В. Определение экономической эффективности применения газотурбинных теплофикационных установок средней и малой мощности. // Теплоэнергетика. 1994. №12.

пост. 19.12.06.

## Конвективный прямоточный нагрев термомассивных тел базовой формы

*Ю.С. ПОСТОЛЬНИК<sup>1</sup>, В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ<sup>2</sup>, О.А. КОНДРАШЕВА<sup>1</sup>*

Днепропетровский государственный технический университет, Украина<sup>1</sup>  
Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>

При помощи метода эквивалентных источников однозначно решена обратная задача теплопроводности в условиях прямоточного нагрева. Решение может быть использовано для расчетов соответствующих процессов в проходных печах скоростного нагрева металла.

За допомогою методу еквівалентних джерел однозначно вирішена зворотна задача теплопровідності в умовах прямоточного нагрівання. Рішення може бути використане для розрахунків відповідних процесів у прохідних печах швидкісного нагрівання металу.

Reverse heat conductivity task is decided by means of equivalent sources method taking into account direct heating. Decision can be used for proper processes calculation in connecting high-speed metal heating furnaces.

**Введение.** Как известно (например, [1]) при изучении процессов нагрева движущихся тел наибольший практический интерес представляют случаи прямоточного и противоточного теплообмена. В работе [1] при помощи преобразования Лапласа получены точные решения соответствующих краевых задач теплопроводности, дополненных условием теплового баланса, записанным в дифференциальной форме. Такие решения представлены неограниченными рядами, содержащими довольно сложные члены, включающие в себя специальные функции математической физики. Это делает решение мало пригодным для практического использо-

вания. Поэтому автор [1] для определения первого члена характеристического уравнения ограничивается первыми двумя членами ряда. Но если рассматривать массивные тела, то для исследования начальной стадии нагрева двух членов ряда явно недостаточно. Об этом говорится, например, в работах [2, 3]. Инженерные методики расчета при этом, как правило, основываются на предположении о незначительной тепловой инерции тел. Для практики желательно было бы иметь простое и достаточно точное приближенное решение, пригодное для теплового расчета тел любой массивности.