

Эффективность использования тепловых насосов для теплоснабжения малоэтажной застройки

Филиппов С.П., чл.-корр. РАН, Дильман М.Д., канд. техн. наук, Ионов М.С., инж.

Институт энергетических исследований РАН¹

Приводятся результаты технико-экономического сопоставления конкурирующих схем теплоснабжения малоэтажной застройки для разных регионов России. Анализируются ограничения на использование тепловых насосов для этих целей.

Жилищное хозяйство — один из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в стране [1]. В 2009 г. на нужды централизованного теплоснабжения жилищного фонда было израсходовано около 2116 млн ГДж тепловой энергии и более 70 млн т у.т. различных видов топлива, в основном природного газа (52 млн т у.т.) для отопления и горячего водоснабжения (ГВС) малоэтажной застройки.

В связи с прогнозируемой интенсификацией жилищного строительства можно ожидать дальнейшего увеличения потребностей населения в топливе и энергии. При этом следует обратить внимание на две важные тенденции: рост объемов малоэтажного строительства и повышение требований населения к условиям жизни. Объемы ввода в эксплуатацию жилых зданий малой этажности за период 1995—2009 гг. выросли с 9 до 28 млн м² в год. Доля малоэтажной застройки в общем объеме вводимого в эксплуатацию жилья в последние годы колебалась в диапазоне 40...47 % и имела тенденцию к росту. Курс на дальнейшее увеличение объемов малоэтажного строительства активно поддерживается Правительством Российской Федерации. При выполнении программы жилищного строительства ежегодный прирост малоэтажного жилищного фонда в стране может к 2020 г. возрасти до 50...60 млн м².

Неуклонно повышается в стране уровень благоустройства жилищного фонда. Так, обеспеченность его горячим водоснабжением за период с 1990 по 2009 г. увеличилась с 51,2 до 64,6 %, в том числе городского — с 67 до 79,9 %, а сельского — с 8,9 до 24,7 %. За этот же период уровень обеспеченности жилищного фонда центральным отоплением повысился с 64,9 до 82,6 %, в том числе в городах — с 83,9 до 91,7 %, в сельской местности — с 18,5 до 58,9 % [2].

Ожидаемое в ближайшие годы существенное повышение в стране цен на природный газ и электроэнергию может резко обострить уже существующую проблему высокой стоимости обеспечения теплом малоэтажного жилищного фонда с автономным теплоснабжением. В то же время в данном секторе имеется до-

вольно много конкурирующих технологий, базирующихся на использовании различных видов ТЭР. Поэтому задача выбора наиболее экономичных из них на перспективу становится все более актуальной.

Среди технологий обеспечения теплом малоэтажной застройки выделяются тепловые насосы, позволяющие полезно использовать природные источники низкопотенциального тепла (грунта, подземных вод, поверхностных водоемов, атмосферного воздуха) и таким образом экономить дорожающие органическое топливо и электроэнергию. С помощью теплонасосной установки (ТНУ) производится отбор тепловой энергии от источника низкопотенциального тепла и передача ее (посредством рабочего тела) с более высокой температурой потребителю. Затрачивая 1 кВт электрической (механической) мощности на привод насоса, можно получить 3...4, а при определенных условиях и до 5...6 кВт тепловой мощности у потребителя. Необходимо отметить, что в ТНУ электроэнергия расходуется не на выработку тепла, как в электронагревателе, а на сжатие рабочего тела и его циркуляцию. Конечно, в реальном процессе сжатия часть электроэнергии идет на нагрев теплоносителя. Тем не менее, основная часть доставляемого потребителю тепла (65...80 %) передается («перекачивается») от низкопотенциального источника.

Помимо экономии покупной энергии ТНУ имеют и другие привлекательные потребительские свойства. Эти установки являются экологически чистыми, взрыво- и пожаробезопасными, могут эксплуатироваться в полностью автоматическом режиме, а их обслуживание заключается в сезонном техническом осмотре и периодическом контроле режима работы. Срок службы ТНУ до капитального ремонта достигает 20—25 лет [3]. Главным недостатком ТНУ, пожалуй, является их высокая стоимость.

За рубежом теплонасосная техника уже более 30 лет находит широкое применение для теплоснабжения жилых и офисных зданий. Толчком для ее массового применения стал энергетический кризис 70-х годов прошлого века. Уже в 2003 г. количество тепловых насосов, использующих тепло грунта, достигло в мире 1,1 млн шт., их суммарная установленная тепловая мощность составила 12 ГВт, а ежегодное производство тепловой энергии — 72 тыс. ГДж (20 тыс. ГВт · ч) [4].

¹111786, Москва, Нагорная ул., д. 31, корп. 2. ИНЭИ РАН.

Ежегодные приросты вводов ТНУ достигали 10 %. Лидерами по установке ТНУ данного типа стали США (600 тыс. шт., 6,3 МВт) и Швеция (230 тыс. шт., 2,3 ГВт). Большое количество их эксплуатируется в Японии, Германии, Швейцарии. В последние годы грунтовые ТНУ начали активно внедряться и в Китае. Рост цен на энергию продолжает стимулировать внедрение на мировом рынке тепловых насосов. В настоящее время в США ежегодно вводится в действие около 50 тыс. ТНУ различных типов и сроки их окупаемости составляют 5—10 лет [3].

Широкому распространению ТНУ во многих странах мира способствовали относительно мягкий климат, позволяющий использовать низкотемпературные системы отопления, экологическое законодательство, требования энергетической политики государств по снижению выбросов парниковых газов и повышению энергоэффективности. Но, главное, рынки ТНУ за рубежом формируются, как правило, при непосредственной поддержке государственных органов. Компании, предлагающие экологически чистые установки, пользуются налоговыми льготами, а домовладельцы, приобретающие такое оборудование, получают дотации, субсидии, льготы на кредиты.

Для теплоснабжения малоэтажной застройки за рубежом все более широкое применение получают ТНУ, использующие тепло грунта. Их внешний контур — комплект петель обычно из полимерных труб с циркулирующим незамерзающим теплоносителем — представляет собой горизонтальный коллектор или вертикальный зонд. Преимущество горизонтального коллектора — относительно невысокая стоимость, однако для его размещения необходим свободный земельный участок значительной площади, который в дальнейшем почти выбывает из хозяйственного оборота, в частности на нем не следует возводить постройки, сажать деревья и кустарники. Вертикальный зонд размещается в специально пробуренной скважине, глубина которой определяется теплофизическими свойствами грунта и обычно составляет 50...100 м и более. При одинаковой тепловой мощности вертикальный зонд обходится в несколько раз дороже горизонтального коллектора. Однако в отсутствие достаточного места для размещения коллектора выбор в пользу зонда оказывается безальтернативным. В настоящее время в системах индивидуального теплоснабжения все более широкое распространение получают ТНУ с вертикальным зондом. Срок службы современных систем отбора тепла грунта: коллекторов и зондов — составляет 50 лет и более [3].

Опыт использования ТНУ для теплоснабжения в России пока мал, что обусловлено объективными причинами, как экономическими, так и техническими. Авторами исследовано влияние наиболее важных факторов на эффективность применения ТНУ для теплоснабжения малоэтажной застройки в климатических условиях России. Рассмотрены три района, климатические характеристики которых соответствуют Архангельску (север), Москве (центр) и Пятигорску (юг).

Условия применения ТНУ для теплоснабжения малоэтажной застройки

Можно выделить пять условий, которые оказывают наиболее существенное влияние на эффективность использования ТНУ для теплоснабжения малоэтажной застройки.

Ограничения по температуре теплоносителя на выходе из теплового насоса. Максимальная температура нагреваемого теплоносителя, которую может обеспечить тепловой насос, определяется прежде всего теплофизическими свойствами используемого в нем рабочего тела и обычно составляет 55 °C, у отдельных моделей — 60...65 °C. В то же время в России наибольшее распространение получили системы водяного отопления жилых зданий с температурным графиком 95/70 °C и единственным источником тепла, обеспечивающим покрытие максимальной тепловой нагрузки. В этих системах реализуется качественный метод регулирования тепловой нагрузки (как наиболее простой) и используются высокие параметры теплоносителя (для экономии на отопительных приборах). В таких системах температура воды в прямом и обратном трубопроводах зависит от температуры наружного воздуха (t_h) и при максимальной нагрузке оставляет 95 и 70 °C соответственно (рис. 1).

Для условий Москвы [5, 6] при поддержании температуры воздуха в отапливаемом помещении на нормативном уровне (20...22 °C) при $t_h \leq -12$ °C температура воды в обратном трубопроводе будет выше максимальной температуры воды, которую может обеспечить тепловой насос (см. рис. 1). Это означает его фактическое выключение из схемы теплоснабжения и переход на покрытие всей отопительной нагрузки от дополнительного источника тепла. Таким образом, ограничения по температуре обратной воды определяют условия отключения ТНУ.

Рабочий диапазон автономной (без подключения пикового теплоисточника) эксплуатации ТНУ в систе-

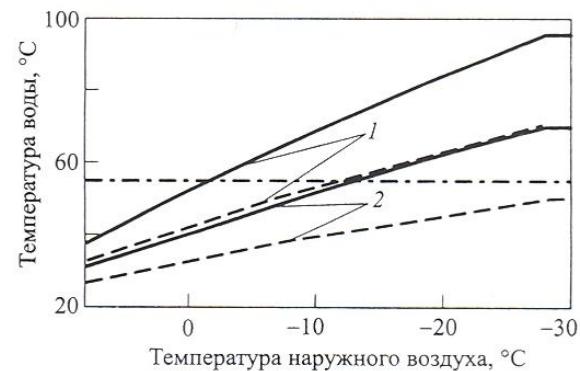


Рис. 1. Зависимость температуры прямой и обратной воды в системе отопления от температуры наружного воздуха (для условий Москвы).

1 — высокотемпературная система (95/70 °C), 2 — низкотемпературная система (70/50 °C); — прямая вода; — обратная вода; — максимальная температура воды на выходе из ТНУ

Таблица 1. Пределы использования ТНУ для покрытия отопительной нагрузки по регионам России

Показатель	Север	Центр	Юг
Расчетная температура наружного воздуха для проектирования систем отопления, °C	-31	-28	-20
Средняя температура отопительного периода, °C	-4,4	-3,1	0,9
Продолжительность отопительного периода, ч/год	6072	5136	4200
Предельная температура наружного воздуха для использования ТНУ (по температуре обратной воды), °C	$\frac{-14}{<-31}$	$\frac{-12}{<-28}$	$\frac{-7}{<-20}$
Предельная продолжительность использования ТНУ (по температуре обратной воды), ч/год	$\frac{4900}{6072}$	$\frac{4365}{5136}$	$\frac{3595}{4200}$
То же, в % продолжительности отопительного периода	$\frac{81}{100}$	$\frac{85}{100}$	$\frac{86}{100}$
Минимальная температура наружного воздуха для автономной эксплуатации ТНУ, °C	$\frac{-3}{-15}$	$\frac{-2}{-13}$	$\frac{1}{-9}$
Продолжительность использования ТНУ в автономном режиме, ч/год	$\frac{2785}{5010}$	$\frac{2570}{4480}$	$\frac{1928}{3805}$
То же, в % продолжительности отопительного периода	$\frac{46}{83}$	$\frac{50}{87}$	$\frac{46}{91}$

Примечание. В числителе значения для температурного графика 95/70 °C, в знаменателе — для графика 70/50 °C.

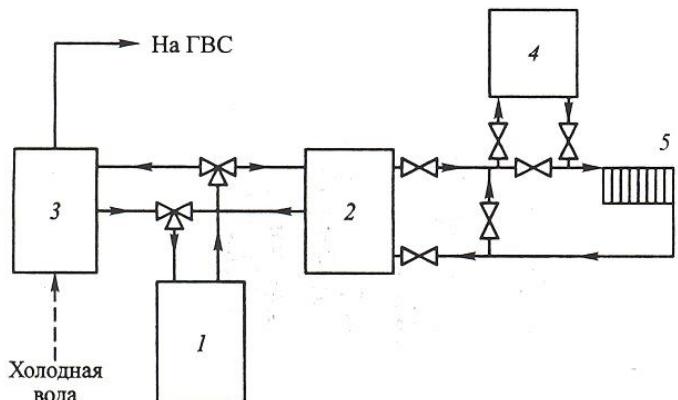
макс теплоснабжения определяется ограничениями по температуре прямой воды. В условиях Москвы минимальная температура наружного воздуха (t_h^{\min}), при которой температура прямой воды сравняется с максимальной температурой, обеспечиваемой ТНУ, составляет -2°C для системы теплоснабжения с температурным графиком 95/70 °C (см. рис. 1). При этом тепловая мощность ТНУ достигнет максимального значения. Для рассмотренных районов t_h^{\min} для покрытия отопительной нагрузки только с помощью ТНУ составляет от +1 на юге, до -3°C на севере, что существенно выше расчетной температуры наружного воздуха для проектирования систем отопления (табл. 1). Поэтому ТНУ могут полностью покрывать тепловую нагрузку потребителя только на 46...50 % продолжительности отопительного периода. В остальное время, при более низких температурах наружного воздуха, потребуется задействовать пиковый или дублирующий источник тепла (газовый котел, электрообогреватель и т.п.). На нагрузку ГВС тепловой насос может работать круглогодично, поскольку нормативную температуру горячей воды (55°C) он обеспечивает.

Для того чтобы увеличить эффективность использования мощности теплового насоса и расширить температурный диапазон (по t_h) его автономной эксплуатации, необходимо переходить на низкотемпературные системы отопления. При температурном графике 70/50 °C полное покрытие тепловой нагрузки с помощью ТНУ возможно в течение 83...91 % продолжительности отопительного периода в зависимости от региона (см. табл. 1). Однако при этом потребуется увеличить площадь отопительных приборов в здании (из-за снижения температурного перепада на них), что повлечет за собой дополнительные затраты. В системе с графиком 70/50 °C минимальная t_h для покрытия нагрузки только с помощью ТНУ снижается и составляет от -9 на юге, до -15°C на севере.

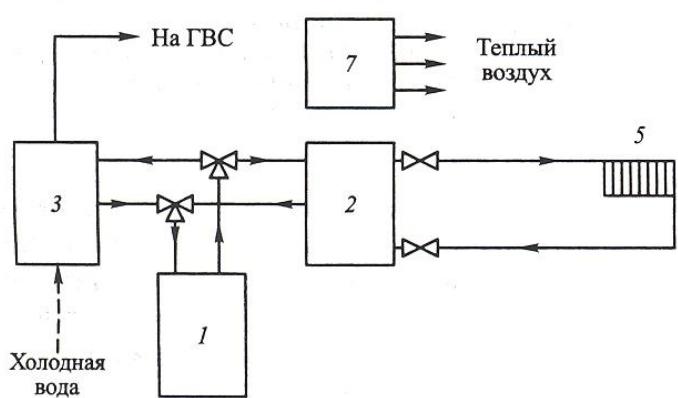
Схемные решения по использованию ТНУ. Возможные схемы теплоснабжения малоэтажной застройки с ТНУ по порядку включения теплового насоса и пикового источника тепла можно разделить на последовательные и параллельные.

При последовательной схеме включения теплоисточников в традиционную систему отопления здания с радиаторами (рис. 2, а) тепловой насос находится в автономной работе до возникновения ограничения по температуре прямой воды. При этом мощность ТНУ достигает максимума. При более холодной погоде в работу вводится пиковый источник тепла; мощность ТНУ начинает снижаться (из-за повышения температуры обратной воды). При достижении ограничения по обратной воде ТНУ вынужденно отключается от системы отопления, и в работе остается только пиковый (по сути, дублирующий) теплоисточник. Поэтому пиковый теплоисточник вынужденно проектируется на максимальную отопительную нагрузку потребителя. Достоинством данной схемы является возможность врезки теплового насоса в существующую систему отопления здания, а главным недостатком — снижение эффективности эксплуатации ТНУ. На покрытие нагрузки ГВС тепловой насос может быть задействован круглый год. Это справедливо и для параллельной схемы включения ТНУ.

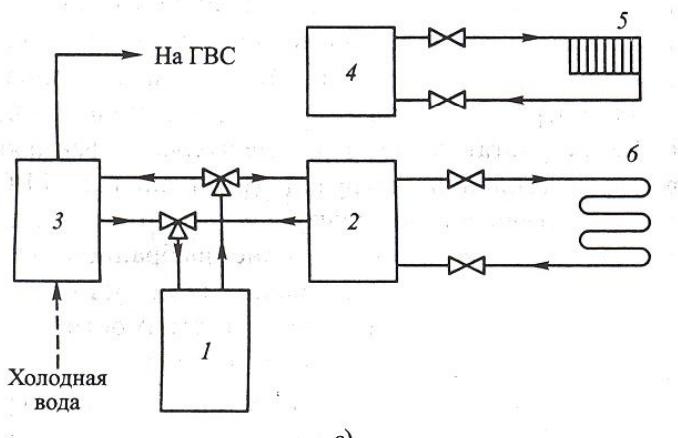
При параллельной схеме включения источников тепла (рис. 2, б, в) тепловой насос эксплуатируется в системе отопления в течение всего отопительного периода. При этом до температуры наружного воздуха, определяющей ограничение по прямой воде (-2°C в Москве для графика 95/70 °C), он работает в автономном режиме и при достижении данной температуры выходит на максимальную мощность (рис. 3). При более низких температурах наружного воздуха тепловой насос остается работать на максимальной мощности, а недостающее тепло для поддержания нормативной температуры воздуха в отапливаемых помещениях генерируется с помощью пикового теплоисточника, в качестве которого могут использоваться котел на газовом, жидкокомпрессионном или твердом топливе, электрокотел (ЭК), электронагреватели конвективного или инфракрасного типа.



a)



b)



c)

Рис. 2. Схемы теплоснабжения индивидуального дома с ТНУ.

a — последовательная с электрокотлом; *б* — параллельная с радиаторами и конвектором; *в* — параллельная с системой «теплый пол» и электрокотлом;

1 — тепловой насос; 2 — буферная емкость; 3 — накопительный водонагреватель ГВС; 4 — электрокотел; 5 — радиаторная система отопления; 6 — система отопления «теплый пол»; 7 — электрические конвекторы

Были рассмотрены две параллельные схемы включения ТНУ:

с водяной системой отопления на параметры 55/40 °C с радиаторами увеличенной площади и пиковым электрическим конвектором (см. рис. 2, *б*);

с системой «теплый пол» и пиковым электрокотлом с собственным водяным контуром (с графиком 95/70 °C) и обычными радиаторами (см. рис. 2, *в*).

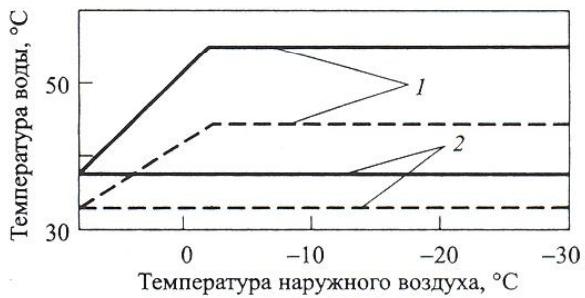


Рис. 3. Температура прямой и обратной воды в параллельных схемах отопления с ТНУ (для условий Москвы).

1 — система с радиаторами; 2 — система «теплый пол»;
— прямая вода; - - - обратная вода

Следует отметить, что во второй схеме в условиях холодного климата появляется дополнительное ограничение — значение полезной тепловой мощности, которую можно получить от системы «теплый пол».

Низкотемпературная система отопления «теплый пол» дает тепловой поток 50...150 Вт/м² при температуре теплоносителя 35...55 °C. Значение теплового потока зависит от конструктивного исполнения системы: диаметра и шага укладки труб, толщины и теплопроводности стяжки и напольного покрытия. При этом наблюдаются ограничения, накладываемые на элементы интерьера: не рекомендуется применение ковровых покрытий, нежелательно изменение исходного плана расстановки мебели. Согласно СНиП [7] средняя температура для полов помещений с постоянным пребыванием людей не должна превышать 26 °C. Поэтому ТНУ с системой «теплый пол» в течение всего отопительного периода будет эксплуатироваться в условиях практически постоянной температуры прямой и обратной воды (рис. 3). Суммарная мощность системы напольного отопления определяется удельным тепловым потоком и площадью укладки труб. При создании «теплого пола» необходимо выдерживать дистанцию между стенами и границей укладки труб. Поэтому в общем случае максимальная площадь «теплого пола» составляет 60...70 % отапливаемой площади. Также следует отметить, что в условиях холодного климата России большая инерционность системы напольного отопления не позволяет оперативно регулировать отпуск тепла при резком понижении температуры наружного воздуха на 10...15 °C. Поэтому при применении системы отопления «теплый пол» приветствуется дополнительное утепление ограждающих конструкций здания, что, естественно, потребует значительных финансовых затрат.

Принципиальные различия в эффективности использования ТНУ при разных схемах их включения иллюстрируются рис. 4. При последовательном соединении ТНУ работает на отопление только в зоне 2. Отопительные нагрузки в зонах 3 и 4 покрываются дублирующим теплоисточником. При параллельном соединении область работы ТНУ распространяется на зоны 2 и 3. Пиковый теплоисточник работает только в зоне 4.

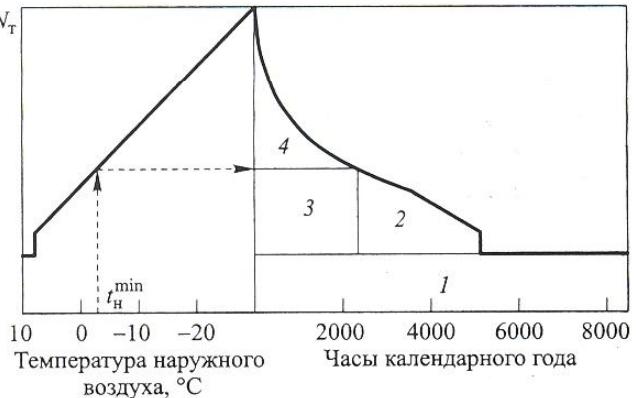


Рис. 4. Зоны работы ТНУ на графике продолжительности тепловых нагрузок

Область I представляет собой зону круглогодичного покрытия с помощью ТНУ нагрузок ГВС.

Таким образом, в условиях России при любой схеме включения ТНУ для теплоснабжения малоэтажной застройки потребуется установка пикового источника тепла и дополнительных поверхностей теплообмена, тип и мощность которых определяются для каждого конкретного случая оптимизационными расчетами с учетом климатических и ценовых факторов.

Высокие удельные капитальные вложения в ТНУ. Рынок теплонасосной техники в России еще только формируется. В основном на нем представлены тепловые насосы зарубежного производства (Германия, Австрия, США), и они довольно дороги. Кроме высокой стоимости основного оборудования, его монтажа и наладки для ТНУ с вертикальным зондом требуются весьма дорогостоящие буровые работы. Для условий центральных регионов страны они оцениваются в 1800...3000 руб. за 1 м погонной длины скважины и зависят от геологических характеристик местности и глубины бурения.

Авторами получены оценки удельных капиталовложений в устройство «под ключ» конкурирующих систем теплоснабжения малоэтажного домовладения (рис. 5). Расчетные исследования выполнены применительно к поселку из 200 домов жилой площадью 200 м² каждый, оборудованных индивидуальными системами теплоснабжения, включающими отопление и ГВС. Численность постоянного населения поселка составляет 800 чел. Тепловые характеристики зданий соответствуют требованиям [8]. К каждому из домов примыкает земельный участок площадью 1000 м². Общая площадь территории поселка равняется 0,2 км². Удаленность поселка от ближайшей подстанции (35 кВ) электроэнергетической системы составляет 10 км, от газопровода на 1,2 МПа — 10 км.

Рассмотрены шесть вариантов системы теплоснабжения здания: четыре варианта с ТНУ (с вертикальным зондом) и два — с традиционными источниками индивидуального теплоснабжения — газовыми и электрокотлами. В расчетах учитывались затраты на общую для поселка энергетическую инфраструктуру

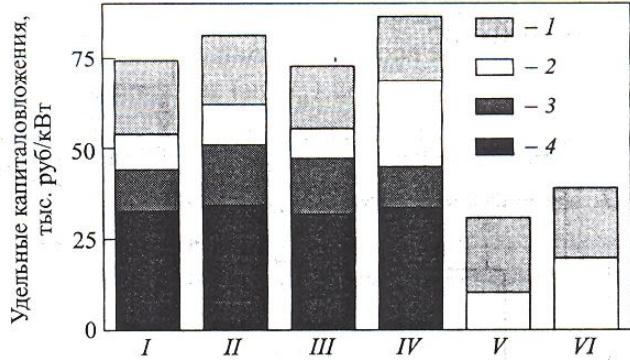


Рис. 5. Удельные капиталовложения в альтернативные варианты теплоснабжения (для условий Москвы).

I — ТНУ с дублирующим ЭК (график 90/70 °C); II — ТНУ с дублирующим ЭК (график 70/50 °C); III — ТНУ с пиковым конвектором; IV — ТНУ с системой «теплый пол» и пиковым ЭК; V — один ЭК; VI — один газовый котел; 1 — подстанция, ГРП; 2 — электро- или газовый котел и радиаторы; 3 — бурение; 4 — ТНУ с установкой

[электрические подстанции, газовый распределительный пункт (ГРП), подводящие ЛЭП и газопровод]. Из рис. 5 видно, что все варианты с применением ТНУ дороже традиционной системы с газовым котлом в 2,4—2,8 раза. Самым капиталоемким оказался вариант ТНУ с системой «теплый пол».

Из-за высоких удельных капиталовложений ТНУ целесообразно устанавливать на базовую часть расчетной отопительной нагрузки, а остальную часть нагрузки покрывать с помощью более дешевого пикового нагревателя. Определение доли ТНУ в общей тепловой нагрузке потребителя является оптимизационной задачей. Ее результат зависит от нескольких факторов: структуры тепловой нагрузки (отопления и ГВС), плотности графика продолжительности стояния температур наружного воздуха в регионе, выбранной схемы теплоснабжения дома, соотношения стоимости теплового насоса и пикового нагревателя, стоимости электроэнергии, газа и других топлив в регионе.

Влияние климатических факторов на температуру грунта. Важнейшим фактором, определяющим эффективность работы ТНУ, является температура грунта. Для поверхностных слоев грунта она формируется параметрами климата (падающей на поверхность солнечной радиацией, температурой атмосферного воздуха) и потоком радиогенного тепла из земных недр. Важны также характеристики подстилающей поверхности, прежде всего толщина и продолжительность стояния снежного покрова, а также теплофизические свойства грунта, стратифицированные по его глубине. Влияние сезонных колебаний климата [5, 6] распространяется на верхний слой грунта — на глубину 5...10 м (рис. 6). Ниже этого уровня температура грунта формируется практически только благодаря глубинному теплу и не испытывает сезонных колебаний. Температура грунта на нижней границе зоны ее колебаний примерно соответствует среднегодовой температуре поверхности грунта, превышая ее примерно

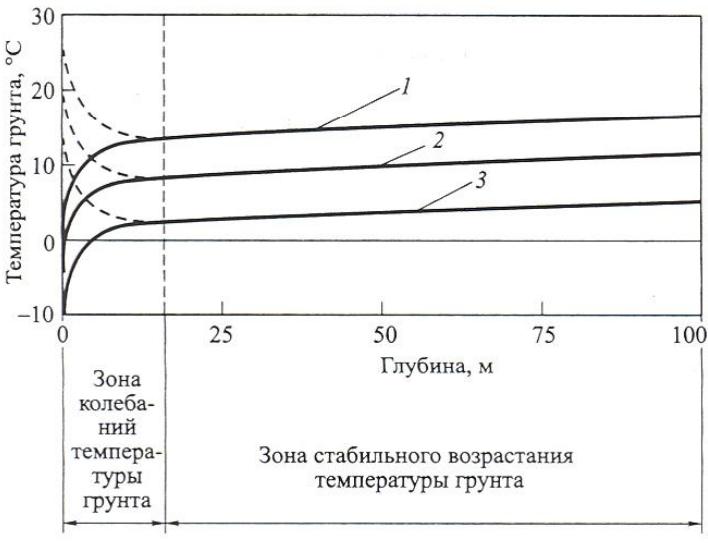


Рис. 6. Распределение температуры грунта по глубине с учетом сезонных колебаний.

1 — юг; 2 — центр; 3 — север; — — зима; — — лето

на 1...3 °C вследствие теплоизолирующих свойств подстилающей поверхности.

Сезонные колебания температуры грунта существенно ограничивают эффективность применения ТНУ с горизонтальными коллекторами в условиях России, особенно в северных регионах. Данный фактор необходимо учитывать при проектировании ТНУ для теплоснабжения малоэтажной застройки.

При прочих равных условиях (теплопроводности, плотности, теплоемкости и влажности грунта, значениях потока глубинного тепла) среднегодовые климатические показатели определяют региональные различия температуры грунта на рабочей глубине вертикального зонда ТНУ. В южных регионах температура грунта будет более высокой, чем в северных (см. рис. 6). Известно, что чем выше температура грунта, тем больше коэффициент трансформации ТНУ, вычисляемый по формуле

$$\phi = Q/N_{\text{ТНУ}} = (h_2 - h_3)/(h_2 - h_1),$$

где Q — тепловая мощность ТНУ; $N_{\text{ТНУ}}$ — электрическая мощность, потребляемая компрессором ТНУ; h_1, h_2, h_3 — энталпии рабочего тела в начале, конце процесса сжатия и по завершении процесса передачи тепла нагреваемому теплоносителю.

В табл. 2 представлены расчетные данные по среднегодовой температуре грунта на глубине 50 и 100 м для разных регионов страны, полученные при сопоставимых условиях. Здесь же приведены соответствующие им среднегодовые значения коэффициента трансформации ТНУ с глубиной зонда 100 м, рассчитанные на основе рабочих характеристик теплового насоса Vitocal 300 (Германия). Как известно, чем выше среднегодовой коэффициент трансформации, тем меньше электроэнергии расходуется в ТНУ на выработку одного и того же количества тепла. Значение удельного теп-

Таблица 2. Температура грунта и коэффициент трансформации теплового насоса

Показатель	Север	Центр	Юг
Температура грунта на глубине 50/100 м, °C	4/5	10/11	15/16
Среднегодовой коэффициент трансформации ТНУ с зондом глубиной 100 м	2,9	3,2	3,5

лосъема для вертикального зонда для всех регионов принято равным 50 Вт на 1 м погонной длины.

Охлаждение грунта при эксплуатации ТНУ. Отвод в течение отопительного сезона тепловой энергии из массива грунта вызывает понижение его температуры, особенно вблизи регистра труб системы теплоснабжения [9, 10]. За летний период тепловой потенциал грунта не успевает восстановиться. Особенно это относится к России с ее коротким летом почти на всей территории. Поэтому в следующий отопительный сезон грунт входит с пониженной температурой. На юге этот фактор выражен слабее, чем на севере. Отбор тепла от грунта в течение следующего отопительного сезона вызывает дальнейшее его охлаждение. Влияние многолетней эксплуатации ТНУ на естественный температурный режим грунта имеет экспоненциальный характер [9, 10]. Относительная стабилизация наступает примерно после 5—7 лет эксплуатации при снижении температуры грунта примерно на 1,5 °C. При проектировании систем теплоснабжения на базе ТНУ необходимо учитывать этот эффект и использовать в качестве расчетной температуру грунта, ожидаемую на 6—8-й год эксплуатации [9—11]. Наличие эффекта снижения теплового потенциала грунта уменьшает эффективность использования ТНУ в климатических условиях России.

Экономическая эффективность применения ТНУ

Поиск наиболее экономичной схемы индивидуального теплоснабжения малоэтажной застройки осуществлялся путем перебора альтернативных вариантов

$$i_{\text{опт}} = i(\min Z_i), i = 1, \dots, n,$$

где $i_{\text{опт}}$ — номер варианта теплоснабжения, являющегося наиболее эффективным; Z_i — суммарные дисконтированные затраты по i -му варианту; n — число альтернативных вариантов.

В качестве критерия оптимизации использовался минимум суммарных дисконтированных затрат в систему теплоснабжения коттеджного поселка за расчетный период, который принимался равным 30 годам. Этот же критерий применялся в задачах определения оптимальной базовой доли нагрузки ТНУ и оптимального температурного режима для каждой из рассмотренных схем. Поскольку сравниваемые варианты теплоснабжения отличаются лишь частью расходов и до-

ходов (поступлений), то при решении оптимизационных задач во внимание принималась только изменяющаяся часть затрат. Суммарные затраты для каждого из рассматриваемых вариантов определялись путем дисконтирования всех расходов и поступлений по годам расчетного периода при фиксированном нормативе дисконтирования

$$Z_i = \sum_{t=1}^{T_p} (K_{it} + I_{it})(1 + E_d)^{-t}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где K_{it} — капиталовложения по i -му варианту в год t ; I_{it} — эксплуатационные издержки и (или) поступления в i -м варианте в год t ; E_d — норматив дисконтирования; T_p — расчетный период.

При варьировании базовой (обеспечиваемой тепловым насосом) и пиковой долей отопительной нагрузки варианты теплоснабжения имеют различную потребность в заявленной электрической мощности поселка. В связи с этим для обеспечения сопоставимости вариантов учитывались различия в затратах в электрические сети и подстанцию. Расчет капиталовложений в генерирующие и сетевые элементы производился по удельным показателям, отражающим сложившийся уровень цен на рынке оборудования (рис. 5). Были приняты следующие значения цен на электроэнергию: север — 1,79, центр — 1,69, юг — 2,00 руб/(кВт · ч); на природный газ: север — 2583, центр — 2535, юг — 2580 руб/тыс. м³.

В табл. 3 приведены суммарные расходы электроэнергии на теплоснабжение коттеджного поселка для сравниваемых вариантов. Как видно из этой таблицы, применение ТНУ обеспечивает во всех вариантах экономию электроэнергии по сравнению с электрокотлами. При этом в северных и центральных регионах страны наиболее энергоэффективной оказывается схема ТНУ с пиковым конвектором, при использовании которой вместо электроотопления расход электроэнергии снижается в 2,7—2,9 раза. В южных районах преимущество переходит к схеме ТНУ с системой «теплый пол», позволяющей снизить расход электроэнергии в 3,3 раза.

Также в схемах с ТНУ наблюдается уменьшение заявленной электрической мощности примерно на 21...26 % (см. табл. 3), что снижает нагрузку на электроэнергетическую систему и дает экономию затрат на подключение. Исключением является последовательная схема с ТНУ при температурном графике 95/70 °C из-за необходимости установки электрокотла на полную тепловую нагрузку.

При существующих тарифах на электроэнергию и уровнях удельных капиталовложений в теплоисточники применение ТНУ для теплоснабжения малоэтажной застройки оказывается экономически не оправданным. В табл. 4 представлены расчетные значения суммарных дисконтированных затрат на конкурирующие варианты теплоснабжения поселка за расчетный период (30 лет) при нормативе дисконтирования 10 % ($E_d = 0,1$) для эко-

Таблица 3. Расход электроэнергии на теплоснабжение поселка, млн кВт · ч/год (в числителе), и электрическая нагрузка системы теплоснабжения поселка, МВт (в знаменателе)

Источник тепла	Север	Центр	Юг
Электрокотел	18,7/7,6	12,9/6,6	9,5/5,6
ТНУ с дублирующим ЭК (график 95/70 °C)	11,5/7,6	7,4/6,6	5,7/5,6
ТНУ с дублирующим ЭК (график 70/50 °C)	7,5/6,8	5,4/6,0	3,2/5,0
ТНУ с пиковым конвектором*	7,0/6,0	4,4/4,9	3,0/4,7
ТНУ с системой «теплый пол» и пиковым ЭК	8,2/6,1	4,7/5,1	2,9/4,2

* При базовой доле нагрузки отопления, полученной в результате оптимизационного расчета и составляющей для севера 50 %, для центра 60 %, для юга 40 %.

Таблица 4. Суммарные дисконтированные затраты на теплоснабжение поселка за расчетный период, млн руб.

Источник тепла	Север	Центр	Юг
Газовый котел	280	245	218
Электрокотел	475	364	329
ТНУ с дублирующим ЭК (график 95/70 °C)	599	471	431
ТНУ с дублирующим ЭК (график 70/50 °C)	529	473	385
ТНУ с пиковым конвектором	483	411	363
ТНУ с системой «теплый пол» и пиковым ЭК	554	472	423

номических условий 2010 г. Из анализа результатов следует, что в газифицированных поселках ТНУ не способны конкурировать с газовыми котлами в системах отопления, они могут стать альтернативой только электроотоплению. Но и в этом случае суммарные дисконтированные затраты на систему теплоснабжения на базе ТНУ даже при оптимальном выборе схемы, температурного графика, поверхностей теплообмена оказываются более высокими, чем соответствующие затраты в систему теплоснабжения на основе электрокотлов.

Исследования показали (рис. 7), что применение ТНУ вместо электрокотлов становится экономически оправданным в следующих случаях:

при повышении тарифов на электроэнергию более чем на 10 % на севере, на 40 % в центральных районах и на 50 % на юге России (при нынешнем уровне удельных капиталовложений в ТНУ);

при снижении удельных капиталовложений в ТНУ (включая систему извлечения низкопотенциального тепла) на 40 % и более (при действующих тарифах на электроэнергию).

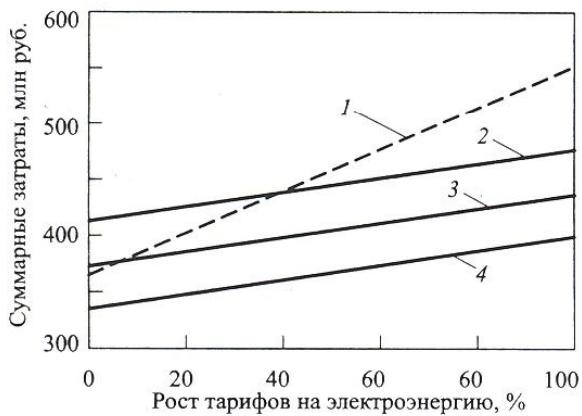


Рис. 7. Влияние роста тарифов на электроэнергию и снижения удельных капиталовложений в ТНУ (ΔK) на конкурентоспособность ТНУ с электрокотлами при теплоснабжении коттеджного поселка (центральный район).

1 — электрокотел; 2—4 — ТНУ; ΔK , %: 2 — 0; 3 — 20; 4 — 40

Таблица 5. Полные годовые расходы топлива для вариантов теплоснабжения поселка, т у.т/год

Источник тепла	Север	Центр	Юг
Газовый котел	2602	1804	1326
Электрокотел	6372	4417	3247
ТНУ с дублирующим ЭК (график 95/70 °C)	4076	2509	2006
ТНУ с дублирующим ЭК (график 70/50 °C)	2697	1853	1117
ТНУ с пиковым конвектором	2642	1496	1433
ТНУ с системой «теплый пол» и пиковым ЭК	2782	1604	1002
Максимально возможная экономия топлива при использовании ТНУ	0	308	324

Определены полные годовые расходы условного топлива для рассмотренных вариантов теплоснабжения поселка, т.е. с учетом потребления топлива на электростанциях для производства электроэнергии, используемой на нужды теплоснабжения (табл. 5). При этом удельный расход топлива на электростанции принят равным 340 г у.т/(кВт · ч). Результаты расчетов показывают, что в северных регионах ни одна из схем теплоснабжения с ТНУ не является топливосберегающей. В центральных и южных регионах России при оптимальном выборе схемы и параметров теплоснабжения с ТНУ может быть достигнута экономия топлива 17 и 24 % соответственно по сравнению с использованием котлов на газе. Применение ТНУ взамен электрокотлов сокращает расход топлива в 2,4—3,2 раза в зависимости от региона размещения ТНУ.

Выводы

1. Системы теплоснабжения малоэтажной застройки на базе тепловых насосов требуют значительно боль-

ших капитальных затрат по сравнению с традиционными системами с индивидуальными источниками тепла — котлами на газе и электрокотлами.

2. Использование тепловых насосов в системах теплоснабжения имеет ограничения, связанные с низкими потенциалом утилизируемого тепла и температурой нагреваемого теплоносителя на выходе из ТНУ. Для преодоления этих ограничений необходима разработка специальных технических и схемных решений, требующих значительных капиталовложений в дополнительные поверхности нагрева и пиковый источник тепла.

3. Эффективность применения тепловых насосов для теплоснабжения существенно зависит от климатических и иных условий региона, имеющих разную направленность. Тепловой потенциал грунта и соответственно коэффициент трансформации ТНУ растет с севера на юг. Продолжительность отопительного периода и число часов использования установленной мощности ТНУ, а значит, и реализация энергосберегающего потенциала тепловых насосов с севера на юг уменьшаются.

4. В настоящее время ТНУ не способны конкурировать с котлами на газе в системах теплоснабжения малоэтажной застройки. Экономическая ниша для ТНУ — негазифицированные районы страны, а конкурирующая технология — электрокотлы.

5. Теплоносильные установки станут экономически эффективнее электрокотлов при повышении тарифов на электроэнергию (относительно уровня 2010 г.) более чем на 10 % в северных, 40 % в центральных и 50 % в южных районах страны или в результате снижения удельных капитальных затрат на ТНУ на 40 % и более (при сохранении действующих тарифов на электроэнергию).

6. Применение ТНУ взамен электрокотлов в схемах теплоснабжения позволяет уменьшить потребности в электрической мощности на 21...26 %.

Список литературы

- Филиппов С.П. Развитие централизованного теплоснабжения в России // ТехноЭнергетика. 2009. № 12. С. 2—14.
- Жилищное хозяйство и бытовое обслуживание населения в России. 2010: Стат. сб. М.: Росстат, 2010.
- http://www.energysavers.gov/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12640
- Geothermal (ground-source) heat pumps: a world overview / J. Lund, B. Sanner, L. Rybach et. al // GHC Bull. 2004. № 9. Р. 1—10.
- СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М.: Госстрой России: ГУП ЦПП, 2003.
- Строительная климатология: Справ. пособие к СНиП 23-01-99*. М.: НИИСФ РААСН, 2006.
- СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. М.: Госстрой России, 2004.
- СНиП 23-03-2003. Тепловая защита зданий. М.: Госстрой России, 2004.
- Eugster W.J., Rybach L. Sustainable production from borehole heat exchanger systems // Proc. World Geothermal Congress. 2000. Р. 825—830.
- Rybach L., Mongillo M. Geothermal sustainability — a review with identified research needs // GRC Trans action. 2006. Vol. 30. P.1083—1090.
- Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. М.: Москкомархитектура: ГУП НИАЦ, 2001.