

УДК 621.9

Энергоэффективность перехода на автономное теплоснабжение от воздушных теплонасосных установок в климатических условиях России

И. В. Яковлев, А. М. Исхакова, И. В. Парехина

Сведения об авторах

Яковлев Игорь Васильевич — кандидат технических наук, профессор кафедры Тепломассообменных процессов и установок МЭИ, e-mail: YakovlevIV@mpei.ru

Исхакова Анна Михайловна — студент кафедры Тепломассообменных процессов и установок МЭИ

Парехина Ирина Владимировна — аспирант кафедры Тепломассообменных процессов и установок МЭИ

Рассмотрены вопросы энергетической и экономической эффективности перехода на автономное теплоснабжение от воздушных тепловых насосов в климатических условиях России.

Проанализированы причины, по которым воздушные тепловые насосы не нашли в России широкого применения: ограничение эффективной работы тепловых насосов по температуре наружного воздуха, существенная зависимость коэффициента трансформации теплоты от климатических условий и значительное различие в тарифах на электрическую и тепловую энергии.

Исследована автономная последовательная схема теплоснабжения от теплового насоса и электрического котла. Предложена расчетная модель, учитывающая фактические климатические условия регионов страны и фактические тарифы на электрическую и тепловую энергии. Показано, что создание запаса по номинальной теплопроизводительности теплового насоса позволяет экономить потребление электрической энергии. Снижение энергопотребления достигается за счет большей части отопительной нагрузки, восполняемой тепловым насосом, и снижения потребления энергии электрическим котлом.

Результаты модельных расчетов показали, что для регионов, расчетная температура наружного воздуха в которых близка к температуре точки бивалентности, применение воздушных тепловых насосов энергетически эффективно по критерию минимума затрат условного топлива на производство потребляемой электрической энергии. При этом финансовая целесообразность применения тепловых насосов определяется соотношением тарифов на тепловую и электрическую энергии.

Выделена группа потребителей теплоты, расположенных в регионах с расчетной температурой наружного воздуха от -22 до -33 °С, которая существенно ниже температуры в точке бивалентности. Потребление условного топлива, сопоставимое с потреблением условного топлива при централизованном теплоснабжении, достигается при номинальной тепловой мощности теплового насоса, превышающей расчетную отопительную нагрузку примерно на 20%. При этом финансовые затраты по оплате потребляемой электрической энергии превышают затраты по оплате тепловой энергии на 10 — 40% в зависимости от соотношения тарифов на энергоносители.

Ключевые слова: воздушные тепловые насосы, автономное теплоснабжение, точка бивалентности.

Energy efficiency of the transition to autonomous heat supply from air heat pump units under the climatic conditions of Russia

I. V. Yakovlev, A. M. Iskhakova, I. V. Parekhina

Information about authors

Yakovlev Igor V. — Ph.D. (Techn.), Professor of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI, e-mail: YakovlevIV@mpei.ru

Iskhakova Anna M. — Student of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI

Parekhina Irina V. — Ph.D.-student of of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI

The article addresses matters concerned with the energy and economic efficiency of the transition to the use of autonomous heat supply from air heat pumps under in the climatic conditions of Russia.

The reasons why air heat pumps have not found wide use in Russia are analyzed. They include: limitation of efficient heat pump operation as restricted by the outdoor temperature range, a substantial dependence of the heat transformation ratio on the climatic conditions, and a significant difference in the tariffs for electricity and heat.

The autonomous series-connected heat supply arrangement from a heat pump and electric boiler is studied. A computational model is proposed, which takes into account the actual climatic conditions in the regions of Russia and the actual tariffs for electricity and heat. It

is shown that smaller consumption of electricity can be achieved by providing a margin in the heat pump's nominal heat output. Smaller consumption of electricity is achieved due a larger part of heat load covered by the heat pump and due to a lower amount of energy consumed by the electric boiler.

The results of model calculations have shown that, for the regions the estimated outdoor temperature in which is close to the bivalence point temperature, the use of air heat pumps is energy-efficient according to the criterion of achieving the minimal expenditures of standard fuel for generating the consumed electric energy. As regards the financial feasibility of using heat pumps, it is determined by the ratio of tariffs for heat and electricity.

The group of heat consumers located in regions with the estimated outdoor temperature ranging from -22 to -33°C (which is significantly lower than the temperature at the bivalence point) is separated. For this group, the consumption of standard fuel commensurable with the consumption of standard fuel in district heating systems is achieved at the heat pump's rated heat output exceeding the estimated heating load by about 20%. In this case, the amount of money to be paid for the consumed electricity is by 10--40% more than that for thermal energy, depending on the ratio of tariffs for energy carriers.

Key words: air heat pumps, autonomous heat supply systems, bivalence point.

Введение

Одним из аспектов энергосбережения является активное использование возобновляемых источников: энергии солнца, теплоты воды естественных и искусственных водоемов, теплоты воздуха и грунта. Сегодня этой теме уделяется повышенное внимание во многих странах, в том числе в странах северной Европы, Индии, Китае, России. Считается, что при использовании возобновляемых источников энергии выбросы вредных веществ снижаются, по сравнению с использованием таких традиционных видов топлив, как нефть, природный газ. Существует большое множество установок, работающих с возобновляемыми источниками энергии. Их применение зависит от климатических, географических, экономических и других условий в стране. В настоящее время широкое распространение получили теплонасосные установки (ТНУ), использующие для целей теплоснабжения низкопотенциальную теплоту воздуха (воздушные ТНУ) или грунта (геотермальные ТНУ).

Применение геотермальных тепловых насосов в России и других странах требует существенных капиталовложений, что является сдерживающим фактором их применения [1]. Наибольшее распространение получили воздушные ТНУ, которые позволяют использовать низкопотенциальную теплоту наружного воздуха для отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования зданий в летний период.

Постановка задачи

Известно много успешных примеров использования воздушных ТНУ в северной Европе [2, 3]. Однако, несмотря на преимущества, у ТНУ есть некоторые недостатки [1 — 3].

Эффективность ТНУ определяется так называемым коэффициентом преобразования или (далее по тексту) коэффициентом трансформации теплоты, численно равным отношению теплопроизводительности теплового насоса к мощности компрессора. Коэффициента трансформации теплоты установок зависит от температуры наружного воздуха, являющегося источником низкопотенциальной теплоты для воздушного тепло-

вого насоса. В рабочих условиях при температурах наружного воздуха до $+10^{\circ}\text{C}$ коэффициент трансформации теплоты высок: на 1 Вт электрической мощности компрессора получают от 2 до 4 Вт тепловой. При снижении температуры наружного воздуха до 15°C , коэффициент трансформации падает в два раза и более. При снижении температуры окружающей среды до температуры испарения рабочего агента цикла теплонасосной установки теплопроизводительность теплового насоса падает до значения мощности компрессора [1]. Это означает, что практически вся потребляемая компрессором электрическая мощность преобразуется в тепло в соотношении один к одному. На рис. 1 для примера приведены зависимости коэффициента трансформации теплоты от температуры наружного воздуха для ряда низкотемпературных ТНУ зарубежных производителей. На рис. 2 представлены данные по изменению коэффициента трансформации теплоты в зависимости от разности температур конденсации и испарения, полученные по результатам испытания теплового насоса в составе установки утилизации теплоты вытяжного воздуха из бассейна [4]. Это послужило одним из основных факторов, ограничивающих применение воздушных ТНУ в условиях климата России.

Вопрос о целесообразности, финансовой и технической, применения воздушных тепловых насосов в климатических условиях России актуален по нескольким причинам. Первая причина — работоспособность тепловых насосов, даже самых низкотемпературных, ограничена температурой наружного воздуха не ниже $-15 \dots 20^{\circ}\text{C}$. В случае перехода на автономное теплоснабжение от ТНУ при более низких температурах требуемую тепловую нагрузку приходится возмещать от электрических котлов. С понижением температуры наружного воздуха падает тепловая мощность, подводимая к испарителю ТНУ, следовательно, падает и мощность, отводимая внешнему потребителю в конденсаторе. Чтобы мощность, подводимая потребителю, оставалась неизменной, необходимо увеличивать теплопроизводительность и, следовательно, электрическую мощность, потребляемую тепловым насосом, либо переходить на теплоснабжение от электрического котла.

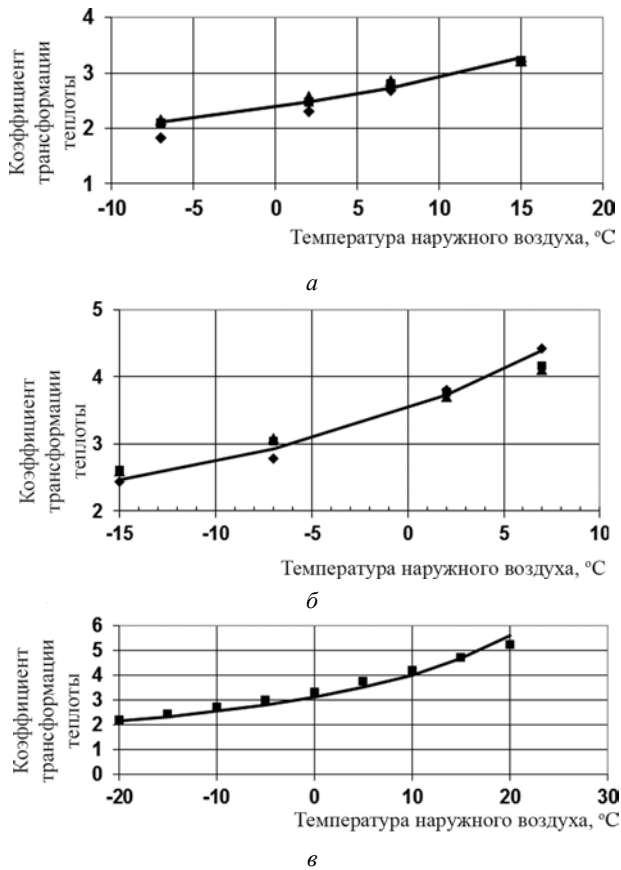


Рис. 1. Зависимости коэффициента трансформации теплоты от температуры наружного воздуха для низкотемпературных тепловых насосов зарубежных производителей Nibe (а, б) и Polaris (в):

а — температура нагреваемой воды 55 °С, номинальная мощность 10 (▲), 6 (◆), 8 (■) кВт; б — температура нагреваемой воды 35 °С, номинальная мощность 10 (▲), 6 (◆), 8 (■) кВт; в — температура нагреваемой воды 45 °С, номинальная мощность 17,5 (■) кВт

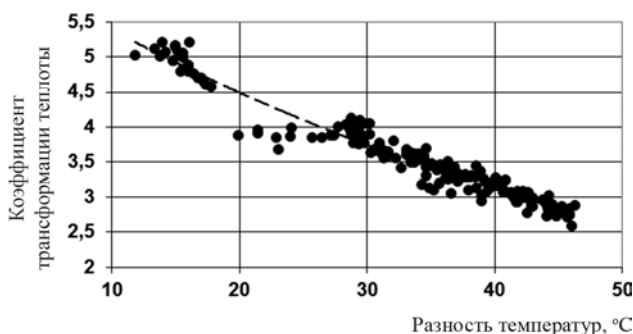


Рис. 2. Зависимость коэффициента трансформации теплоты от разности температур конденсации и испарения по результатам испытания теплового насоса Nibe F1330-60

Вторая причина — экономическая целесообразность полного замещения относительно дешевой тепловой энергии из тепловой сети на более дорогую электрическую энергию. Например, на сегодня для потребителей Московской области стоимость электроэнергии превышает стоимость тепла в 2,7 раза.

По действующим тарифам потребление 103 кВт·ч электроэнергии обходится потребителю в 4010 руб. (по одноставочному тарифу), а потребление 103 кВт·ч тепловой энергии — в 1486 руб. По другим регионам превышение стоимости одинакового количества электрической и тепловой энергии изменятся от 1,2 до 7 [5, 6]. Эксплуатационные затраты в случае применения теплонасосных установок, могут существенно превышать затраты по оплате потребляемого тепла из сети централизованного теплоснабжения. Существующее положение в области тарифной политики представляется сдерживающим фактором применения тепловых насосов в России. Поэтому любой проект должен содержать оценки энергетического и экономического эффекта от применения теплонасосных установок.

Третья причина — отсутствие в России поощрительных программ, предусматривающих, например, возмещение затрат на установку и эксплуатацию тепловых насосов. Во многих европейских странах, в частности в Швеции, Швейцарии, Австрии и Нидерландах пользователи воздушных теплонасосных установок получают пользу от поощрительных программ, которые предусматривают частичное возмещение затрат, налоговые льготы, пониженные тарифы на электроэнергию и более низкий процент на ипотеку.

В России в силу приведенных причин воздушные теплонасосные установки не нашли широкого применения. Вопрос о целесообразности их использования в условиях холодного климата России не находит однозначного ответа. В связи с этим существует проблема оценки энергетической и экономической эффективности использования ТНУ в различных регионах России при различных климатических условиях и при существующих соотношениях тарифов на электрическую и тепловую энергию.

Работа посвящена исследованию возможности и эффективности перехода на автономное теплоснабжение от воздушных теплонасосных установок в условиях климата России.

Методика исследования

Исследовалась автономная последовательная схема теплоснабжения от ТНУ и электрического котла. Рассматривалась теплонасосная установка типа «воздух – вода». Теплота отбирается от наружного воздуха и передается воде, являющейся теплоносителем в системе отопления объекта. С понижением температуры наружного воздуха потребность в тепловой мощности на нужды отопления растет, ее изменение с температурой представляется следующей зависимостью:

$$Q_o = Q_o^p \frac{t_B^p - t_H}{t_B^p - t_H^p},$$

где Q_o^p — расчетная отопительная нагрузка объекта теплоснабжения, кВт; t_B^p — расчетная температура воз-

духа в помещениях; t_n^p — расчетная температура наружного воздуха, °C, t_n — актуальная температура наружного воздуха, °C.

Напротив, с понижением температуры теплопроизводительность ТНУ падает (рис. 3). Эта ситуация иллюстрируется графиками на рис. 4., которые представляют зависимости относительной отопительной нагрузки $\bar{Q}_o = Q_o / Q_o^p = (t_b^p - t_n) / (t_b^p - t_n^p)$ и относительной теплопроизводительности ТНУ как функции температуры. Относительная теплопроизводительность теплового насоса (ЕКАС100BRLHR) $\bar{Q}_{ТНУ}$ аппроксимировалась зависимостью вида:

$$\bar{Q}_{ТНУ} = f(t_n) = \frac{Q_{ТНУ}}{Q_{ТНУ}^{ном}} = 0,46 \frac{(t_w + 3) + 273}{[(t_w + 3) - (t_n - 3) 2,82(0,0003t_n^2 - 0,008t_n + 1,0576)]},$$

где $Q_{ТНУ}^{ном}$ — номинальная теплопроизводительность ТНУ, кВт; t_w — температура воды на выходе из теплонасосной установки; t_n — текущая температура на-

ружного воздуха, °C. Номинальная теплопроизводительность равна 33 кВт.

Графики пересекаются в некоторой точке, так называемой точке бивалентности [1], параметры которой зависят от климатических условий региона и характеристики ТНУ. Режим покрытия нагрузки от двух источников (ТНУ и электрического котла) называют бивалентным [1]. В точке бивалентности дополнительно к ТНУ вступает в работу электрический котел (рис. 4). На рис. 4 точке пересечения графиков соответствует температура $-9,1$ °C и относительная нагрузка равная 0,64. Правее точки бивалентности отопительная нагрузка восполняется ТНУ, левее — совместной работой ТНУ и электрического котла. Потребление электрической энергии ТНУ и электрическим котлом можно снизить, если сдвинуть точку бивалентности в сторону более низких температур. Один из способов понижения бивалентной температуры — увеличение номинальной теплопроизводительности ТНУ. Введем коэффициент обеспеченности отопительной нагрузки:

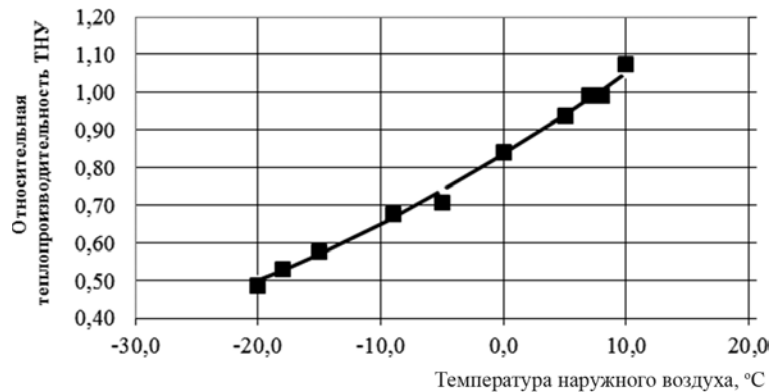


Рис. 3. Относительная теплопроизводительность теплового насоса ЕКАС100BRLHR в зависимости от температуры наружного воздуха

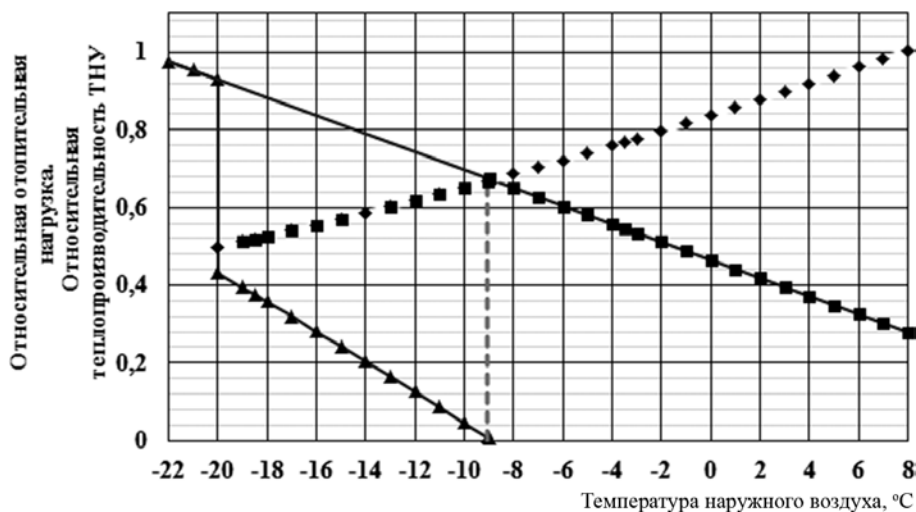


Рис. 4. Относительная отопительная нагрузка (■) и относительная теплопроизводительность ТНУ (◆) в зависимости от температуры наружного воздуха:

■, ▲ — части отопительной нагрузки, восполняемые от ТНУ и электрического котла

$$a = Q_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} / Q_o^p.$$

Расчеты потребления электрической энергии проводились при переменном, как параметре, коэффициенте обеспеченности отопительной нагрузки от 0,7 до 1,7.

Изображенный на рис. 4 график отопительной нагрузки зависит от расчетной температуры наружного воздуха, а теплопотребление рассматриваемой системы за определенный период зависит от климатических условий региона, а именно, от графика стояния средних температур. Для получения величин суммарных энергетических и финансовых затрат за отопительный период с помощью предлагаемой модели были разработаны так называемые климатические маски, содержащие всю необходимую для решения данной задачи информацию: средние температуры наружного воздуха и продолжительность стояния данных температур. В основе климатических масок лежат фактические статистические данные о погодных условиях в рассматриваемой области РФ [7] за отопительный период 2013 — 2014 гг. Пример такой климатической маски в виде графика стояния средних температур представлен на рис. 5. График построен путем выборки температур, находящихся в заданном интервале для Приморского края (г. Владивосток), подсчетом числа часов стояния температур из заданного интервала и расчетом средневзвешенного значения температуры в заданном интервале:

$$t_{\text{нi}}^{\text{cp}} = \frac{1}{\sum n_i} \sum (t_{\text{нi}} n_i).$$

Интервалы температур, для которых проводилась выборка, задавались от -25 до $+8$ °С. По расчетам для выбранного отопительного сезона в г. Владивостоке средневзвешенная температура наружного воздуха равна $-4,5$ °С, а расчетное число суток отопительного периода — 198. Для сравнения среднестатистические значения равны $-4,8$ °С и 199 суток [8].

К расчету принимались теплонасосные установки, работающие в регионах с существенно различающимися климатическими условиями: Приморский край (г. Владивосток), Краснодарский край (г. Геленджик), Кировская область (г. Вятка), Волгоградская область (г. Волгоград) и Республика Крым (г. Севастополь). Расчетная отопительная нагрузка для всех потребителей задавалась одинаковой и равной 33 кВт.

Согласно графику на рис. 4 выделялись три периода работы системы теплоснабжения от ТНУ и электрического котла в зависимости от соотношения средневзвешенной температуры наружного воздуха и температуры $t_{\text{н2}}$ (в точке бивалентности), при которой в эксплуатацию вступает электрический котел. В первом (I) периоде ($t_{\text{н}}^p < t_{\text{н}} < t_{\text{н2}}$) тепловая нагрузка обеспечивается полностью пиковым электрокотлом ($Q_{\text{эк}}$). Во втором (II) периоде ($t_{\text{н2}} < t_{\text{н}} < t_{\text{н1}}$) отопительная тепловая нагрузка обеспечивается совместной работой воздушной ТНУ и пиковым электрокотлом ($Q_o = Q_{\text{ТНУ}} + Q_{\text{эк}}$). В третьем (III) периоде ($t_{\text{н1}} < t_{\text{н}}$) тепловая нагрузка обеспечивается только ТНУ ($Q_o = Q_{\text{ТНУ}}$).

Для каждого из периодов расчет потребляемой электрической энергии проводился по представленным зависимостям.

Расчет электрической мощности, кВт:

$$P_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} = Q_{\text{ТНУ}} \frac{1}{a \cdot \eta} \frac{t_{\text{н}}^p - t_{\text{н}}}{t_{\text{н}}^p - t_{\text{н}}^p};$$

$$P_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} = Q_{\text{ТНУ}} \left(\frac{f(t_{\text{нi}})}{\mu(t_{\text{нi}})} + \frac{1}{a\eta} \frac{t_{\text{н}}^p - t_{\text{н}}}{t_{\text{н}}^p - t_{\text{н}}^p} - \frac{f(t_{\text{нi}})}{\eta} \right);$$

$$P_{\text{ТНУ}}^{\text{ном}} = Q_{\text{ТНУ}} \frac{1}{a\mu(t_{\text{нi}})} \frac{t_{\text{н}}^p - t_{\text{н}}}{t_{\text{н}}^p - t_{\text{н}}^p},$$

где η — коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую; μ — коэффициент трансформации

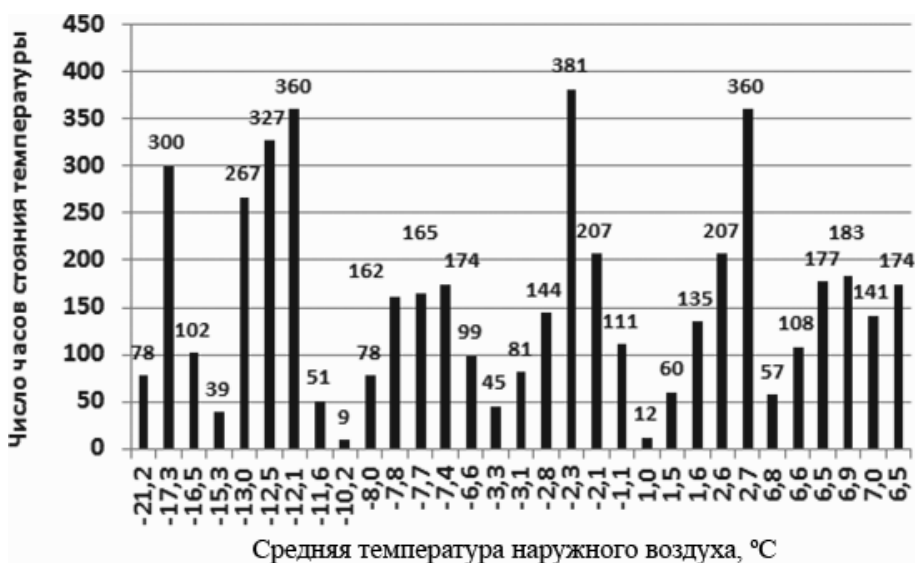


Рис. 5. Продолжительность стояния температур наружного воздуха для г. Владивостока в отопительном сезоне 2013 — 2014 гг.

ции теплоты как функция температуры наружного воздуха.

Потребленную электрическую энергию рассчитывали:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^I &= Q_{\text{ТНУ}}^{\text{НОМ}} \left(\frac{1}{a\eta} \frac{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{сп}}}{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{п}}} \sum n_i \right); \\ \mathcal{E}^{\text{II}} &= Q_{\text{ТНУ}}^{\text{НОМ}} \left(\sum \frac{f(t_{\text{н}i}) n_i}{\mu(t_{\text{н}i})} + \frac{1}{a\eta} \frac{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{сп}}}{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{п}}} \sum n_i - \frac{1}{\eta} \sum (f(t_{\text{н}i}^{\text{сп}}) n_i) \right); \\ \mathcal{E}^{\text{III}} &= Q_{\text{ТНУ}}^{\text{НОМ}} \frac{1}{a} \sum \left(\frac{1}{\mu(t_{\text{н}i})} \frac{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{п}}} n_i \right), \end{aligned}$$

где $t_{\text{н}}^{\text{сп}}$ — средневзвешенная температура наружного воздуха за отопительный период, °С; n_i — длительность интервала со средневзвешенной температурой (рис. 5).

Вычисление потребления тепловой энергии за отопительный период объектом от сети централизованного теплоснабжения выполнялось по формуле:

$$Q_{\text{отп}} = Q_{\text{о}}^{\text{п}} \frac{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{сп}}}{t_{\text{в}}^{\text{п}} - t_{\text{н}}^{\text{п}}} n_{\text{отп}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{отп}}$ — длительность отопительного периода, ч;

$$t_{\text{н}}^{\text{сп}} = \frac{1}{N} \sum_i^N t_{\text{н}i}^{\text{сп}}.$$

Затраты условного топлива по покрытию отопительной нагрузки по принятой схеме проводились из условия средневзвешенных удельных расходов топлива на производство 1 Гкал теплоты в количестве

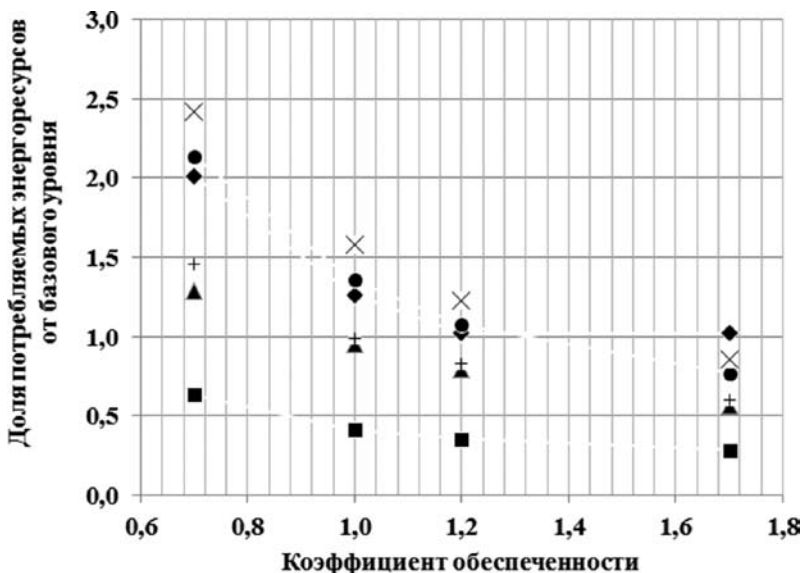


Рис. 6. Относительные эксплуатационные расходы по оплате потребленной электрической энергии при автономной последовательной схеме работы ТНУ и электрического котла по сравнению с расходом по оплате тепловой энергии:

◆ — г. Волгоград; ■ — г. Краснодар; ▲ — г. Севастополь; × — г. Вятка; + — г. Геленджик; ● — г. Владивосток

$b_{\text{Т}} = 0,1486$ т у.т./Гкал, а электрической энергии — $b_{\text{э}} = 0,3445$ т у.т./((1000 кВт·ч). Затраты условного топлива на производство потребляемых электрической ($3_{\text{э}}$) и тепловой ($3_{\text{Т}}$) энергии вычислялись следующим образом:

$$3_{\text{э}} = 10^{-3} \sum_{i=1}^{\text{III}} \mathcal{E}^i b_{\text{э}};$$

$$3_{\text{Т}} = 10^{-3} \cdot 0,86 Q_{\text{отп}} b_{\text{Т}},$$

где потребление электрической энергии рассчитывается по зависимостям (8 — 10) в кВт·ч; $Q_{\text{отп}}$ — потребление тепловой энергии (1), кВт·ч; $b_{\text{э}}$ т у.т./((1000 кВт·ч) и $b_{\text{Т}}$ т у.т./Гкал — удельные расходы условного топлива на производство электрической и тепловой энергии.

Финансовые затраты по оплате потребляемых энергоресурсов, руб. равны:

$$\Phi_{\text{э}} = \sum_{i=1}^{\text{III}} \mathcal{E}^i T_{\text{э}};$$

$$\Phi_{\text{Т}} = 10^{-3} \cdot 0,86 Q_{\text{отп}} T_{\text{Т}},$$

в которых $T_{\text{э}}$ — тариф на электрическую энергию, руб./кВт·ч; $T_{\text{Т}}$ — тариф на тепловую энергию, руб./Гкал.

Результаты

На рис. 6 приведены относительные финансовые затраты по оплате потребляемой электрической энергии в различных регионах при работе ТНУ совместно с электрическим котлом по последовательной схеме. Для сравнения с альтернативным вариантом теплоснабжения от тепловой сети затраты приводятся как доли от затрат по оплате тепловой энергии из тепловой сети по действующим тарифам при условии централизованного теплоснабжения, принимаемых за базовый уровень. Очевидно, что при различных климатических условиях и соотношениях на тепловую и электрическую энергию результаты будут качественно отличаться, что и показывают модельные расчеты.

На рис. 7 представлены результаты расчетов потребляемого условного топлива по покрытию отопительной нагрузки в различных регионах при работе ТНУ совместно с электрическим котлом по последовательной схеме. Для сравнения расходы условного топлива, необходимого для производства электрической энергии, приведены в виде доли от базового уровня, представляющего количество условного топлива, потребляемого на производство тепловой энергии, необходимой для обеспечения отопительной нагрузки.

Модельные расчеты подтвердили утверждение о том, что вопрос о техничес-

кой эффективности (минимум потребления условного топлива) и экономической эффективности применения ТНУ в условиях России (минимум эксплуатационных затрат) решается неоднозначно и требует детального технико-экономического исследования.

Результаты модельных расчетов показали, что для регионов, в которых расчетная температура наружного воздуха в которых близка к температуре точки бивалентности (в рассматриваемом случае — 9,1 °С), применение воздушных тепловых насосов энергетически эффективно по критерию минимума затрат условного топлива на производство потребляемой электрической энергии. При этом финансовая целесообразность применения тепловых насосов определяется соотношением тарифов на тепловую и электрическую энергию. К таким регионам относятся Республика Крым (г. Севастополь, расчетная температура наружного воздуха $t_n^p = 11$ °С), Краснодарский край (г. Геленджик — $t_n^p = 10$ °С и г. Краснодар — $t_n^p = 14$ °С). Например, из анализа полученных результатов следует, что для климатических условий г. Краснодара применение воздушных ТНУ технически обосновано, но существующее соотношение тарифов на тепловую и электрическую энергию приведет к существенным эксплуатационным затратам при переходе на автономное теплоснабжение по предлагаемой схеме.

Выделена группа потребителей теплоты, расположенных в регионах с расчетной температурой наружного воздуха от –22 до –33 °С, которая существенно ниже температуры в точке бивалентности. Потребление условного топлива, сопоставимое с потреблением условного топлива при централизованном теплоснабжении, достигается при номинальной тепловой мощности теплового насоса, превышающей расчетную отопительную нагрузку примерно на 20%. При этом финансовые затраты по оплате потребляемой электрической энергии превышают затраты по оплате тепловой энергии на 10 — 40% в зависимости от соотношения тарифов на энергоносители.

Для климатических условий и действующего соотношения на тарифы в г. Волгограде следует, что и технически и экономически переход на автономное теплоснабжение от ТНУ будет обоснован при коэффициенте обеспеченности отопительной нагрузки равном 1,7 или ниже. Здесь решающим фактором может служить срок окупаемости перехода на автономное теплоснабжение от воздушной ТНУ. По данным [3] стоимость 1 кВт номинальной теплопроизводительности ТНУ составляет примерно от 35 000 до 70 000 руб.

Для оценки эффективности теплоснабжения тепловым насосом в регионе в работе [2] предлагается

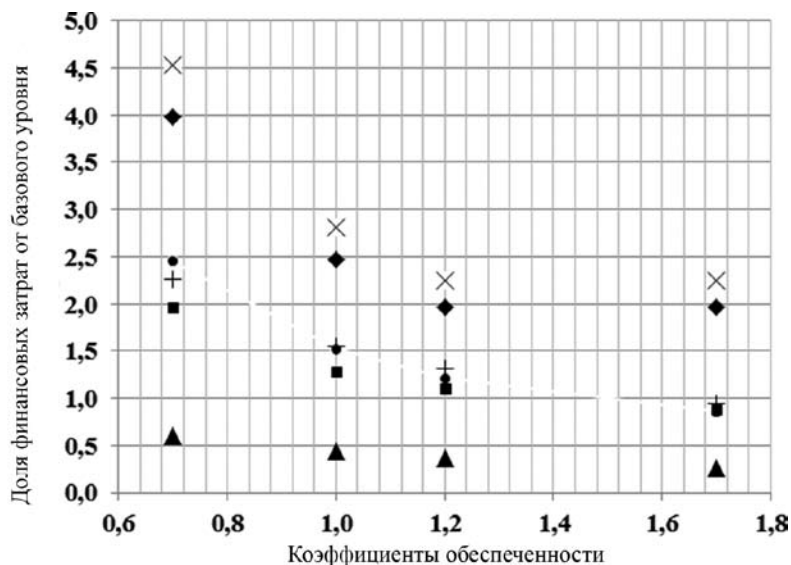


Рис. 7. Относительный расход условного топлива по обеспечению отопительной нагрузки при автономной последовательной схеме работы ТНУ и электрического котла по сравнению с расходом условного топлива при условии централизованного теплоснабжения от тепловой сети:

обозначения те же, что на рис. 6

использовать параметр, называемый сезонным коэффициентом энергоэффективности. Этот параметр представляет собой отношение количества теплоты, полученного объектом теплоснабжения за выбранный период к суммарным энергетическим затратам на получение теплоты. В нашем случае это затраты электроэнергии на привод компрессора ТНУ и получение теплоты в электрическом котле. С учетом принятых обозначений сезонный коэффициент энергоэффективности, определяемый за отопительный период, будет:

$$СКЭ = \frac{Q_{оп}}{\sum_{i=1}^m \epsilon^i}$$

Расчеты сезонного коэффициента энергоэффективности применительно к рассматриваемым регионам приведены на рис. 8 для двух значений коэффициента обеспеченности отопительной нагрузки равных 1 и 1,2. Наибольшее значение рассматриваемый критерий имеет место для регионов со средней за отопительный период температурой наружного воздуха, имеющей положительное значение (г. Краснодар и Севастополь). Запас по номинальной мощности ТНУ в 20% приводит к росту сезонного коэффициента энергоэффективности что связано со снижением потребления электрической энергии из-за смещения точки бивалентности с сторону более низкой температуры наружного воздуха.

Заключение

Исследовалась автономная последовательная схема теплоснабжения от теплового насоса и электрическо-

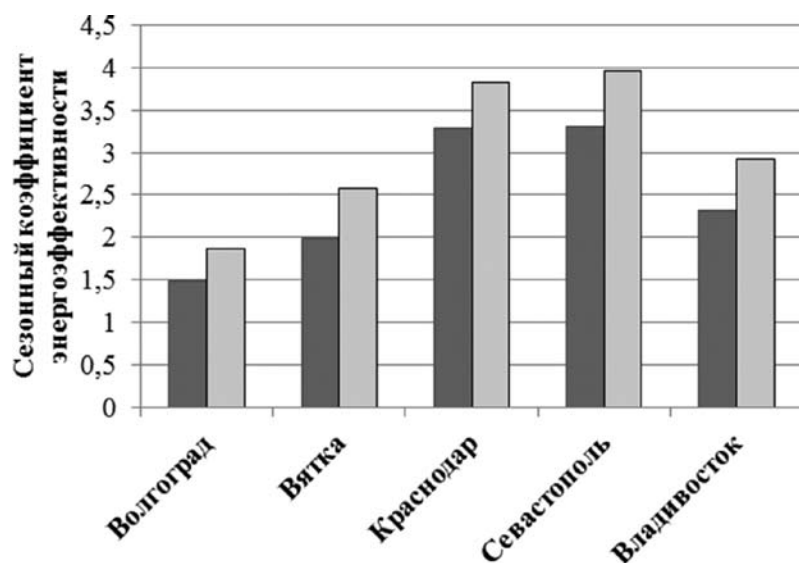


Рис. 8. Сезонный коэффициент энергетической эффективности для различных регионов России: $a = 1$ (■), $1,2$ (□)

го котла. Предложена расчетная модель, учитывающая фактические климатические условия регионов России и фактические тарифы на электрическую и тепловую энергию. Показано, что создание запаса по номинальной теплопроизводительности теплового насоса позволяет экономить потребление электрической энергии. Снижение энергопотребления достигается за счет большей части отопительной нагрузки, восполняемой тепловым насосом и снижения потребления энергии электрическим котлом.

Показано, что для регионов, расчетная температура наружного воздуха в которых близка к температуре точки бивалентности, применение воздушных тепловых насосов энергетически эффективно по критерию минимума затрат условного топлива на производство потребляемой электрической энергии. При этом финансовая целесообразность применения тепловых насосов определяется соотношением тарифов на тепловую и электрическую энергию.

Выделена группа потребителей теплоты, расположенных в регионах с расчетной температурой наружного воздуха от -22 до -33 °С, которая существенно ниже температуры в точке бивалентности.

Для потребителей, расположенных в регионах с расчетной температурой наружного воздуха от -22 до -33 °С, которая существенно ниже температуры в точке бивалентности, потребление условного топлива,

сопоставимое с потреблением условного топлива при централизованном теплоснабжении, достигается при номинальной тепловой мощности теплового насоса, превышающей расчетную отопительную нагрузку примерно на 20%. При этом финансовые затраты по оплате потребляемой электрической энергии превышают затраты по оплате тепловой энергии на 10 — 40%.

Литература

1. Филиппов С.П., Ионов М.С., Дильман М.Д. Перспективы применения тепловых насосов для теплоснабжения жилых зданий в различных климатических условиях // Теплоэнергетика. 2012. № 11. С. 11 — 18.
2. Суслов А.В. О востребованности, работоспособности и окупаемости воздушных тепловых насосов в условиях России // Холодильная техника. 2009. № 12. С. 8 — 13.
3. Суслов А.В. Проблемы маркетинга воздушных тепловых насосов в России // Холодильная техника. 2010. № 7. С. 43 — 48.
4. Яковлев И.В., Гаряев А.Б., Парехина И.В., Самойленко В.Ю. Сопоставление теоретической и реальной эффективности теплонаносной установки в системе горячего водоснабжения // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 45 — 50.
5. Приказ Федеральной службы по тарифам от 15 октября 2013 г. № 191-э/2. «Об установлении предельных максимальных уровней тарифов на тепловую энергию (мощность), поставляемую теплоснабжающими организациями потребителям, в среднем по субъектам Российской Федерации на 2014 год».
6. Приказ Федеральной службы по тарифам от 11 октября 2013 г. № 185-э/1. «О предельных уровнях тарифов на электрическую энергию (мощность) на 2014 год».
7. Погода и климат [Официальный сайт]. <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 01.10.2016).
8. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99.

Статья поступила в редакцию 18.06.2016