

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96

УДК 622.276

О некоторых особенностях энергоснабжения жилых зданий в отопительный период

С. Н. Осипов¹⁾, В. М. Пилипенко¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Большой удельный вес потребления различных видов энергии жилым сектором, особенно в отопительный период, делает уже недостаточным для реальной экономии энергоресурсов повышение энергоэффективности только зданий без учета потерь топлива при существенном уменьшении почасовой нагрузки на электрогенераторы, особенно ночью. Поэтому в Беларуси с целью привлечения потребителей тарифы на электроэнергию для отопления в ночное время (с 23:00 до 6:00 ч) в три раза дешевле, чем в остальное. Значительно увеличить потребление электроэнергии в ночное время можно путем использования аккумуляторов теплоты для отопления и горячего водоснабжения жилого сектора. Особенно эффективны аккумуляторы теплоты на воде и напольного отопления, что позволяет использовать теплоноситель с температурой 40 °С и увеличивает полезный запас теплоты. Применение аккумуляторов теплоты для суточного отопления, вентиляции и горячего водоснабжения зданий существенно снижает стоимость создания инфраструктуры территории под застройку благодаря отмене необходимости прокладки распределительной сети теплоты или газоснабжения. Необходимостью использования аккумуляторов теплоты является повышение средневзвешенной по времени температуры наружного воздуха, которое для г. Минска в отопительный период составляет в среднем около 0,1 °С в год и за последние 20 лет привело к уменьшению необходимой тепловой нагрузки помещений примерно на 10 %. Для успешного применения аккумуляторов теплоты следует провести научные и проектные работы по выбору наиболее эффективных вариантов их обустройства и использования в зданиях различного назначения. При этом строителям, энергетикам и эксплуатационникам необходимо совместно определить временные, технические и экономические условия зарядки и использования аккумуляторов теплоты.

Ключевые слова: отопление, горячее водоснабжение, аккумулятор теплоты, генератор электроэнергии, ночной режим, тепловой насос, технико-экономическая эффективность

Для цитирования: Осипов, С. Н. О некоторых особенностях энергоснабжения жилых зданий в отопительный период / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 1. С. 77–96. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС
имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15б,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing – NIPTIS
named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Some Features of the Power Supply of Residential Buildings during the Heating Season

S. N. Osipov¹⁾, V. M. Pilipenko¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A large proportion of consumption of different types of energy by the residential sector, especially in the heating period, makes the energy efficiency of buildings without considering the loss of fuel with a significant reduction in hourly load on the generators, especially at night, already insufficient for real energy savings. Therefore in Belarus, in order to attract the consumer, electricity tariff for heating at night hours (from 11 p.m. to 6.00 a.m.) is three times cheaper than at any other time. Significant increase of the electricity consumption of at night could be achieved by using heat accumulators for heating and hot water supply to the residential sector. Particularly effective are water accumulators of heat and accumulators of underfloor heating that enable to use a coolant with a temperature of 40 °C and to increase the useful supply of heat. The use of heat accumulators for daily heating, ventilation and hot water supply of buildings significantly reduces the cost of creating the infrastructure of the territory under construction by eliminating the necessity of running the distribution network of heat or gas supply. The use of the heat accumulators is necessary due to the increase of the time-weighted average outdoor temperature. The mentioned increase in the City of Minsk in the heating season is of about 0.1 °C per year in average, and as for the last 20 years, the increase has led to a reduction of the required heat load on the premises by about 10 %. Research and project work on choosing the most effective options for the arrangement and use the heat accumulators in buildings of the various functions ought to be fulfilled in order to make the application of heat accumulators successful. In this respect civil and power engineers as well as operators should work together so to determine the chronological, technical and economic conditions of charging and use of heat accumulators.

Keywords: heating, hot water supply, heat accumulator, power generator, night mode, heat pumps, techno-economic efficiency

For citation: Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2017) Some Features of the Power Supply of Residential Buildings during the Heating Season. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (1), 77–96. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96 (in Russian)

Известно несколько способов поддержания заданного теплового режима воздушной среды помещения внутри строения посредством регулирования параметров систем отопления и горячего водоснабжения здания [1, 2]. Общим недостатком этих способов является учет только текущих значений температур воздуха внутри и снаружи здания, а также неравномерности потребляемой горячей воды.

Известен способ [3] совместного регулирования систем отопления и горячего водоснабжения с учетом применения балансового коэффициента ($\chi = 1,2$) к среднему уровню расхода теплоты на горячее водоснабжение, основная часть которого должна компенсироваться за счет тепловой инерции зданий. Однако такая компенсация неравномерности, характеризуемая коэффициентом $K_n = 2-3$, применима для жилых зданий старой постройки с массивными стенами и перекрытиями из кирпича и железобетонных плит при небольшом термическом сопротивлении ограждающих конструкций ($R \approx 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$). Для новых зданий с увеличением термического сопротивления наружных ограждений ($R \approx 2,5-3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$) за счет эффек-

тивной легкой теплоизоляции с незначительной теплоемкостью даже двух-часовой перерыв в отоплении может привести к недопустимому понижению температуры, что является недостатком. Данный способ не учитывает изменений в тепловой нагрузке зданий с изменением времени суток.

Известно регулирование подачи теплоты для здания или группы зданий, горячее водоснабжение которых обеспечивается по централизованной схеме теплоснабжения от ТЭЦ [4], характеризующейся тем, что для здания подается суммарный расчетный максимальный расход теплоты, который соответствует сумме максимального расчетного расхода теплоты на отопление, среднесуточного расхода теплоты на горячее водоснабжение и расчетного расхода теплоты на вентиляцию здания. А при превышении максимального часового расхода теплоты $Q_{г.макс}$ на горячее водоснабжение по отношению к суммарному максимальному расходу теплоты, включающему расчетный расход $Q_{от}$ на отопление в соответствии с наружной температурой, среднесуточный расход теплоты $Q_{г.в}$ на горячее водоснабжение, а также расчетный расход теплоты $Q_{в}$ на вентиляцию здания, дополнительно производят ограничение подачи общего расхода теплоты в здание на уровне $\sum Q_t$ по времени реализации максимального теплопотребления на горячее водоснабжение (в течение которого действует неравенство $Q_{г.макс} > Q_{от} + Q_{г.в} + Q_{в}$) с учетом регулирования в сторону уменьшения подачи теплоты по наружной температуре. При отсутствии отопления в теплый период года регулирование подачи теплоты производят по суточному графику потребления горячей воды. Основным недостатком этого способа является отсутствие выбора режимов работы управляемых источников теплоты для поддержания заданного теплового режима внутри здания (аккумулятор теплоты, тепловой насос, рекуператор «воздух – воздух» и др.) с учетом динамического взаимодействия всех элементов системы. Для поддержания заданного теплового режима в помещении производится выбор режимов работы всех элементов внутридомовых систем электро-, водо-, теплоснабжения, кондиционирования и вентиляции, являющихся источниками поступления теплоты в помещение, с учетом их взаимодействия с целью уменьшения потребления теплоносителя от внешней централизованной системы вплоть до полного самообеспечения с учетом уменьшения стоимости потребляемой электроэнергии в ночное время.

Чтобы обеспечить поддержание необходимого теплового режима, определяют все источники поступления теплоты в помещение, все имеющиеся каналы потерь теплоты в помещении, устанавливают количество поступающей теплоты по каждому ее источнику и количество потерь теплоты по каждому каналу и составляют выражение теплового баланса за определенный промежуток времени Δt для данного помещения, приводя сумму установленных количеств поступающей за промежуток времени Δt в помещение теплоты и потерь теплоты из помещения к 0. Далее обеспечивают режимы работы управляемых элементов внутридомовой системы теплоснабжения с учетом динамического взаимодействия всех элементов

и тепловой энергии системы в соответствии с составленным выражением теплового (энергетического) баланса в виде

$$g_1(\Delta\tau) + g_2(\Delta\tau) + g_3(\Delta\tau) + g_4(\Delta\tau) + g_5(\Delta\tau) + g_6(\Delta\tau) - g_7(\Delta\tau) - g_8(\Delta\tau) \pm \dots \pm g_i(\Delta\tau) = 0, \quad (1)$$

где $g_1(\Delta\tau)$ – поток теплоты из централизованной внешней системы теплоснабжения здания в систему теплоснабжения помещения за промежуток времени $\Delta\tau$, Вт; $g_2(\Delta\tau)$ – то же в помещение из теплового насоса системы теплоснабжения здания за промежуток времени $\Delta\tau$, Вт; $g_3(\Delta\tau)$ – бытовое и техногенное выделение теплоты во внутреннюю атмосферу помещения за промежуток времени $\Delta\tau$, Вт; $g_4(\Delta\tau)$ – поток теплоты в помещение за промежуток времени $\Delta\tau$ от рекуперативного теплообменника «воздух – воздух» или от теплообменника «теплые стоки – холодная вода» при температуре наружного воздуха $t_b > -8$ °С, Вт; $g_5(\Delta\tau)$ – расход теплоты за промежуток времени $\Delta\tau$ на предварительный подогрев наружного воздуха, поступающего в рекуператор, при температуре наружного воздуха t_b менее минус (6–8) °С, Вт; $g_6(\Delta\tau)$ – приход (+) или расход (–) теплоты на тепловом аккумуляторе за промежуток времени $\Delta\tau$, Вт; $g_7(\Delta\tau)$ – потери теплоты в пространство (окружающее помещение) за промежуток времени $\Delta\tau$, Вт; $g_8(\Delta\tau)$ – расход теплоты на подогрев горячей воды за промежуток времени $\Delta\tau$, Вт; $g_i(\Delta\tau)$ – потоки теплоты для помещения из других (или в другие), кроме перечисленных ранее, источников или потребителей энергии в здании, Вт, которые в общем виде при конвективном теплообмене в помещении определяются из выражения

$$g_i(\Delta\tau) = \psi c_{pi} \rho_i (t_{i1} - t_{i2}) q_i(\Delta\tau) \Delta\tau, \quad (2)$$

$g_i(\Delta\tau)$ – поток теплоносителя за промежуток времени $\Delta\tau$, м³/ч; ψ – переводной коэффициент (для кДж и Вт), учитывающий особенности теплопередачи и размерностей входящих величин; $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i+1}$ (τ_i, τ_{i+1} – начальное и конечное значения промежутка $\Delta\tau$ текущего времени, ч); c_{pi} – удельная теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); ρ_i – плотность теплоносителя, кг/м³; t_{i1}, t_{i2} – температура прямого и обратного потоков теплоносителя, °С.

Приведенное решение задачи базируется на схеме взаимодействия источников поступления теплоты в помещение, составляющих систему поддержания заданного теплового режима помещения внутри здания. Каждое из слагаемых (1) – сложная функция различных теплотехнических показателей, тем более с учетом нестационарности всех процессов. В качестве характерного примера можно использовать физико-математическую модель помещения здания [5].

Необходимо также учитывать возможные различия в тарифах на электроэнергию в дневное и ночное время, что существенно влияет на режим работы, например тепловых насосов и аккумуляторов теплоты. Учитывая

значительное облегчение ограждающих конструкций строящихся в настоящее время зданий и связанное с этим резкое снижение тепловой инерции, а также высокую суточную неравномерность теплотребления, например горячей воды в жилых зданиях, становятся необходимыми учет нестационарности и прогноз теплотребления в течение наиболее холодных суток в году в соответствии с климатическими характеристиками региона. Даже размеры земельного отвода для здания могут оказать влияние на схему теплоснабжения, так как от этого зависит возможное количество используемых теплонасосных установок и режимов их работы.

Особый интерес представляет обеспечение жилых зданий горячей водой, потребление которой в течение суток крайне неравномерно, что видно из графика относительного расхода горячей воды по часам суток (рис. 1) [1, рис. 3.3]. При таких условиях режим работы теплового аккумулятора во многом определяется расходом горячей воды по часам суток.

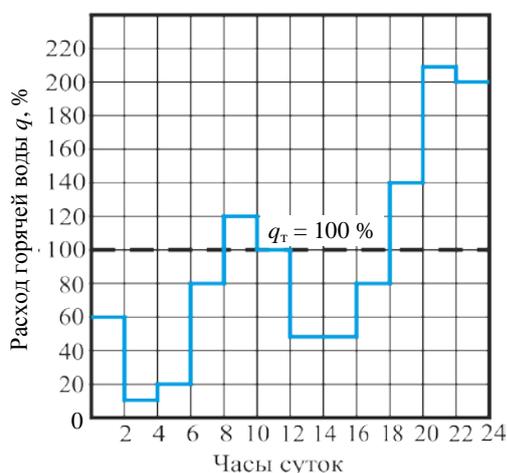


Рис. 1. График относительного расхода горячей воды по часам суток для 36-квартирного жилого дома при 120 потребителях

Fig. 1. Graph of relative hot water consumption per hours of the day for a 36-apartment house with 120 consumers

Большие колебания потребления электроэнергии, особенно в нынешнее время, когда многие предприятия работают в одну смену, в немалой степени зависят от жилого сектора, режим потребления электричества в котором во многом напоминает потребление горячей воды (рис. 1) [1]. Если в жилом секторе нет энергоемких производств, то режим потребления электроэнергии зависит от общепринятого временного уклада жизни и световой продолжительности дня, что определяет необходимость утреннего и вечернего электрического освещения, особенно в зимний период времени [6].

С учетом изложенных обстоятельств в определенные, особенно ночные часы суток, потребление электроэнергии может сильно уменьшаться (в несколько раз) по сравнению с дневным пиком нагрузки. Однако необходи-

мость почасового изменения производительности электроагрегатов на КЭС, АЭС и даже ТЭЦ приводит к существенному понижению КПД. Для оценки этих процессов особый интерес представляет монография А. С. Горшкова, в которой подробно анализируется зависимость КПД электрогенераторов КЭС и ТЭЦ от нагрузки [6, с. 69, табл. 5.1; с. 96, табл. 5.14; с. 94, табл. 5.12; с. 122, табл. 7.2]. Согласно этим исследованиям, снижение электрической нагрузки на генератор менее оптимальной всегда приводит к понижению КПД производства электроэнергии. Так, снижение электрической нагрузки в четыре раза уменьшает КПД примерно на 20 %, в три раза – примерно на 15 %, в два раза – примерно на 10 %. Однако реально даже сильно уменьшенное количество вырабатываемой с пониженным КПД электроэнергии необходимо кому-то продавать, а это иногда бывает проблематично. Поэтому при достаточно длительных (в течение 5–7 ч) провалах нагрузки некоторые агрегаты приходится переводить на холостой ход или даже останавливать [7, с. 95, пример 5.10].

Пусковые потери топлива в зависимости от длительности простоя энергоблока сильно изменяются [7, с. 113]. Так, если принять за 100 % потери при пуске после простоя 50 ч, то потери после простоя 15 ч составляют 75 %, а после кратковременного простоя в 5 ч – 50 % (рис. 2). Поэтому остановка блока, связанная со значительной потерей топлива, может быть оправдана сокращением потерь на холостой ход во время снижения нагрузки.

Коэффициенты полезного действия современных турбоагрегатов на КЭС и АЭС обычно не менее 30 %, а на ТЭЦ при отборе части теплоты на теплофикацию могут снижаться до 24 % [7, с. 122, табл. 7.2]. При этом КПД теплофикационной части достигает 97,7 %. В процессе выработки электроэнергии на АЭС КПД примерно такой же, как на КЭС, т. е. 30 %. При проектировании магнетогидродинамического генератора авторы проекта [8] считали возможным достичь КПД = 55 %. Современные газопоршневые электрогенерирующие установки могут достигать КПД = 40–44 % [9].

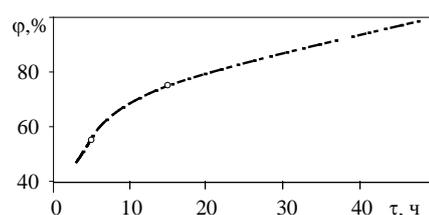


Рис. 2. Влияние простоя турбоагрегата на относительную величину дополнительного расхода топлива: точками обозначены данные из [7, с. 113]

Fig. 2. The impact of downtime of the turbine on the relative value of additional fuel consumption: dots are the data taken from [7, p. 113]

Атомные электростанции по ряду технических причин нуждаются в постоянном режиме работы [10], что определяет необходимость покрытия переменной части графика электрической нагрузки за счет существенного

увеличения потребления какими-то потребителями. Поэтому применение аккумуляторов теплоты, нагреваемых электроэнергией с 23:00 до 6:00 ч каждые сутки для обеспечения суточного режима отопления, вентиляции и горячего водоснабжения жилого сектора, является весьма удобным вариантом в стабилизации режима работы АЭС.

Расчет слагаемых, составляющих уравнение (1), основывается на данных о видах теплоносителя и соответствующих им характеристиках устройств – источников поступления теплоты в помещение, а также имеющихся каналов потерь теплоты в помещении. Такой расчет производится в соответствии с известными рекомендациями и методиками, изложенными, например, в [1]. Мощность теплового потока для $g_3(\Delta\tau)$ зависит как от вида используемых источников бытового и техногенного излучения, так и от их конструкции. Зная их технические характеристики, можно посчитать $g_3(\Delta\tau)$. В частности, поступление теплоты в помещение от искусственного освещения зависит от его эффективности, которая определяется светоотдачей ламп и выражается в люменах на 1 Вт потребляемой мощности (лм/Вт). Например, лампы накаливания мощностью 100 Вт отдают 3 лм/Вт, эффективность светодиодов – 150 лм/Вт. Известна также теплоотдача утюгов, электро- и газоплит и другой техники. При учете суммируемых тепловыделений от источников бытового и техногенного излучения за промежуток времени $\Delta\tau$ считают энергию, переходящую в теплоту $g_3(\Delta\tau)$, поступающую от них в воздух помещения. Касательно искусственного освещения принято считать, что вся энергия, затрачиваемая на его обеспечение, переходит в теплоту, поступающую в воздух помещения.

В качестве примера приведем расчет количества теплоты $g_4(\Delta\tau)$ (Вт) за промежуток времени $\Delta\tau = 3$ ч в помещение от рекуперативного теплообменника «воздух – воздух», установленного в двухкомнатной квартире, при расходе удаляемого воздуха $q_4 = 140$ м³/ч, температура которого $t_1 = 20$ °С, и подаваемого наружного воздуха температурой $t_2 = 0$ °С. Критерием выбора промежутка времени $\Delta\tau = 3$ ч определяем временной период, когда температура наружного воздуха была неизменна и составляла 0 °С. Расчет производили по формуле

$$Q_{4\Delta\tau} = 0,28\eta c_p \rho (t_1 - t_2) q_4 \Delta\tau, \quad (3)$$

где 0,28 – переводной коэффициент (для кДж и Вт); $\eta \approx 0,8$ – коэффициент теплопередачи; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, равная 1 кДж/(кг·град.); $\rho \approx 1,25$ кг/м³ – средняя плотность воздуха.

Тогда $Q_{4\Delta\tau} \approx 2352$ Вт. Однако в этом примере рассмотрен лишь частный случай применения рекуперативного теплообменника «воздух – воздух». Более интересным и новым является использование теплового аккумулятора на обычном теплоносителе – воде, циркулирующей в системе отопления и нагревания горячей воды двухсекционного жилого здания, расчет тепловой нагрузки помещений которого при температуре наружного воздуха $t_n = -25$ °С без необходимой корректировки приведен в [1, с. 19, табл. 1.3].

Такая корректировка необходима ввиду более высоких современных требований к термическому сопротивлению наружных стен ($R_{nc} \geq 3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ вместо $R_{nc} \geq 2,3 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) [1, с. 12, табл. 1.2] и другим строительным элементам. Поэтому основные и добавочные суммарные потери теплоты через отдельные ограждающие конструкции помещений составляют около $\Sigma Q \approx 27000 \text{ Вт}$ вместо $\Sigma Q \approx 35220 \text{ Вт}$ [1, с. 19, табл. 1.3]. При расчете расхода теплоты на нагревание наружного воздуха, подаваемого в жилые и вспомогательные помещения ($Q_i \approx 20570 \text{ Вт}$), не учитывается работа теплообменника «воздух – воздух» с коэффициентом эффективности, по крайней мере, около 0,7, что уменьшает общий необходимый расход теплоты до $Q_i \approx 6200 \text{ Вт}$. В этом случае общая тепловая нагрузка помещений по всему жилому дому вместо $Q_4 = 53540 \text{ Вт}$ составила $Q_4 \approx 35400 \text{ Вт}$, или для одной секции $Q_c = 17700 \text{ Вт}$, что соответствует удельной тепловой нагрузке $q \approx 17700/320 \approx 55 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Общая площадь помещений в одной секции расчетного трехэтажного жилого дома составляла $S_c \approx 320 \text{ м}^2$.

Использование аккумуляторов теплоты для отопления жилищ имеет многовековую историю (особенно у славян), выразившуюся в создании русской печи [11, с. 141–147]. Русская печь – универсальный тепловой прибор для отопления и различных хозяйственных целей, а также для обеспечения хорошей вентиляции помещения. Комбинированная русская печь при одной топке в сутки дает теплоотдачу около $4650 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ ($4000 \text{ ккал}/\text{ч}$) [11, с. 143, табл. 42], что обеспечивает отопление жилой площади в $30\text{--}40 \text{ м}^2$. При этом конструкция комбинированной русской печи позволяет в летнее время топить только плиту, предотвращая перегрев помещения. Русская печь «Теплушка-2» [12] может работать на любом топливе, в том числе и каменном угле. Наиболее мощными и удобными были угловые русские печи [13] с массой $G \approx 3800 \text{ кг}$ и объемом около $3,5 \text{ м}^3$. Интересно отметить, что средняя плотность угловой русской печи, являющейся суточным аккумулятором теплоты, примерно соответствует воде. Однако такой русской печи присущи два главных недостатка: относительно большая занимаемая площадь (около 2 м^2) и существенная неравномерность ($\pm 3 \text{ °C}$ и более) нагревания комнатной атмосферы в течение суток. Этих недостатков лишены системы напольного отопления с жидким теплоносителем и с расположением водяного аккумулятора теплоты в подвале.

В жилом секторе наиболее опасными для людей круглогодичными, приходящими извне, энергоносителями являются горючий газ и электричество, которые при аварийных ситуациях могут вызвать пожары, взрывы, отравления и смерть людей. Свидетельство этого – отравление шести человек в городе Борисове в конце января 2015 г. Особенно следует избегать возможных непосредственных контактов людей, которые могут быть в различном состоянии, с источниками воспламенения и травматизма.

С данной точки зрения отопление на основе водяного теплоносителя является предпочтительнее электрического при подводе электроэнергии к квартирным отопительным приборам (электробатареям, нагреваемым

полам и т. п.). Это также относится и к газоиспользующим приборам (бытовым плитам и духовкам для приготовления пищи, водоподогревателям и квартирным отопителям). Поэтому при использовании нагреваемых полов для отопления желательнее применение водяного теплоносителя с невысокой температурой, протечка которого сразу видна без каких-либо приборов и не представляет опасности для жизни человека.

Большим преимуществом применения греющих полов при использовании аккумуляторов теплоты с электрическим нагревом и тепловых насосов является возможность эффективного применения воды с температурой 30–40 °С [1, с. 34], что позволяет получать не менее 50 % запаса теплоты при нагревании теплоносителя в аккумуляторе до 90–95 °С. При постоянном пребывании людей среднюю температуру поверхности подогреваемого пола помещений следует принимать не выше 26 °С [1, с. 34].

В 60-е гг. XX в. применение нашли системы отопления с греющими панелями [1, с. 216–252], которые могли располагаться в любом ограждении – в полу, потолке, во внутренних и наружных стенах. Плоские панели, расположенные в горизонтальных (межэтажных) перекрытиях, могут одновременно являться греющими полом и потолком [14, с. 239–245]. Применение в помещении плоских греющих поверхностей, отдающих значительное количество теплоты излучением, создает более благоприятный микроклимат по сравнению с обогревом помещений чисто конвективными приборами. Поэтому при отоплении помещения греющими панелями достаточно комфортная температура может быть примерно на 1 °С ниже нормативной расчетной температуры внутреннего воздуха для конвективных систем отопления [14, с. 218–219], что создает дополнительный запас необходимой мощности отопления.

Оценка эффективности обогрева помещения при различных нагревательных приборах может быть приближенно дана по распределению температуры по высоте помещения [15, с. 304, рис. VI.7]. Здесь наилучшим является обогрев при равномерном распределении температуры по высоте помещения, которому соответствуют напольные отопительные панели. Поэтому при тепловом расчете напольного отопления с паркетом или с ковровым покрытием нормативную температуру воздуха в помещении принимали $t_b = 18$ °С, а температуру воды на выходе из контура напольного отопления – по выражению, полученному из [1, с. 66, формула (1.39)] в виде

$$t_x = 2(\Delta t_{cp} + t_b) - t_r, \quad (4)$$

где Δt_{cp} – средняя разность температур на входе (t_r) и выходе (t_x) воды контура напольного отопления, °С, определяемая для пола с паркетом или с ковровым покрытием по номограмме на рис. 3 [1, с. 67, рис. 1.22в] при различном шаге укладки труб отопления (в м).

Тогда при $q = 55$ Вт/м², $\Delta t_{cp} = 17$ °С (пунктирные линии на рис. 3) и $t_r = 40$ °С

$$t_x = 2 \cdot (17 + 18) - 40 \approx 30 \text{ °С}. \quad (5)$$

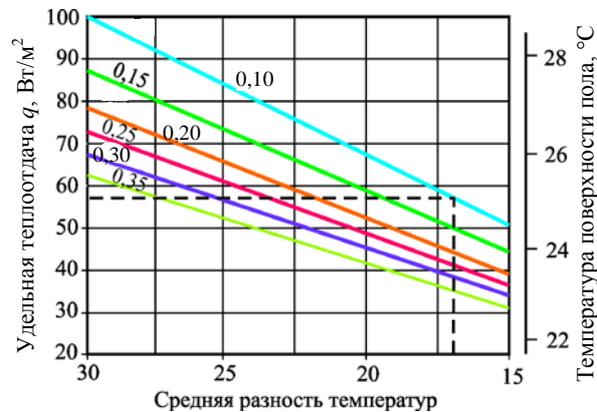


Рис. 3. Номограмма для определения удельной теплоотдачи q напольного отопления в зависимости от средней разности температур $\Delta t_{\text{ср}}$ для различного шага укладки, м: 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35

Fig. 3. Nomogram for the determination of the specific heat transfer q of the underfloor heating depending on the average temperature difference $\Delta t_{\text{ср}}$ for different steps of laying, m: 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35

Таким образом, при укладке труб системы напольного отопления с шагом 0,10 м по всей площади квартиры можно обеспечить нормативные температурные условия даже при расчетной предельной температуре наружного воздуха $t_{\text{н}} = -25$ °С. Однако необходимую площадь напольного отопления можно существенно уменьшить путем передачи части теплоты на нагрев поверхности потолка, как это описано в [14, с. 239–245].

После строительства в СССР мощных ГЭС, ТЭС и ТЭЦ обострилась проблема значительного изменения производства электроэнергии в течение суток, и особенно ночью, когда многие предприятия перестают работать, а люди спят. В настоящее время, особенно в Беларуси, расположенной практически в одном часовом поясе, упомянутая проблема стоит особенно остро. Поэтому у нас в стране тариф на электроэнергию для нужд отопления и горячего водоснабжения с присоединенной (суммарной) мощностью оборудования более 5 кВт в период минимальных нагрузок (с 23.00 до 6.00) с 01.01.2015 установлен в размере 942,5 бел. руб. за 1 кВт·ч, в остальное время суток – 2827,5 бел. руб., т. е. в три раза больше [16]. Следовательно, для нагревания теплоносителя в аккумуляторе теплоты наиболее благоприятны 7 ч в сутки.

Необходимый расход теплоты на отопление одной секции упомянутого выше трехэтажного дома в течение 1 ч составляет $Q_{\text{с}} = 17700$ кВт·ч, а в течение $24 - 7 = 17$ ч – примерно $Q_{\text{а}} = 17,7$ кВт · 17 ч = 300,9 кВт·ч. При нагревании 1 м³ воды на 50 °С ее теплосодержание увеличивается примерно на 58 кВт·ч. Следовательно, необходимая рабочая емкость аккумулятора теплоты на 17 ч с учетом 10%-го запаса на потери должна составлять $Q_{\text{а,р}} = 1,1 \cdot (300,9/58) \approx 5,7$ м³, что равно примерно 0,018 м³ на 1,000 м² отапливаемой площади и почти в пять раз (0,088/0,018) меньше по сравнению с самой мощной русской печью.

Необходимая мощность электрического нагревателя для аккумулируемой воды с учетом КПД = 0,95 составляет

$$M_3 = 17,7 \cdot 24 \cdot 1,2 / (0,95 \cdot 7) = 76,7 \text{ кВт}, \quad (6)$$

что значительно больше 5 кВт [16].

Однако кроме отопления и вентиляции существенный расход теплоты необходимо затратить на подогрев горячей воды, без которой современное жилье не считается комфортным. При этом надо учесть возможность возврата около 50 % расходуемой теплоты в систему подогрева [17], но за сутки наибольшего водопотребления – 120 л/сут на одного человека. В одной секции расчетного дома проживает примерно $320/26 \approx 12$ человек, где 26 (м²) – примерная общая площадь на одного человека. Общий суточный расход горячей воды составляет около 2500 л/сут. Необходимый подогрев воды на 25–30 °С после первичного нагрева до 30 °С [17] требует затрат около 88 кВт·ч электроэнергии, для чего необходима мощность нагревателя $88/7 = 12,6$ кВт.

Таким образом, суммарная мощность нагревателя должна составлять 90–100 кВт. Общий рабочий объем воды в аккумуляторе теплоты для обеспечения суточного отопления, вентиляции и горячего водоснабжения одной секции расчетного дома должен составлять примерно $5,7 + 2,5 = 8,2$ м³. Примерно такой же рабочий объем (5–10 м³) теплоносителя аккумулятора теплоты за счет электрической энергии может обеспечить многочисленные ныне двух-, трехэтажные коттеджи отоплением, вентиляцией и горячим водоснабжением при отсутствии подвода распределительных сетей теплогазоснабжения, для прокладки которых необходимо затратить весьма значительные средства. Например, 1 пог. м ПИ-трубы стоит 100 у. е. и более.

Альтернативой использования аккумулятора теплоты является тепловой насос, который широко применяется в Скандинавских странах. Однако при наружной температуре минус 25 °С тепловой насос должен работать круглые сутки, что не всегда возможно по условиям теплообмена с источником теплоты. Кроме того, при необходимости получения горячей воды с температурой 55 °С коэффициент преобразования составляет около 3,0, что эксплуатационно уравнивает описанные аккумуляторы теплоты с тепловыми насосами. При этом использование аккумуляторов теплоты проще и надежнее.

Применение аккумуляторов теплоты для отопления небольших зданий особенно выгодно для КЭС и АЭС, которые испытывают серьезные трудности с почасовым регулированием нагрузки. Однако суточная нагрузка может колебаться при резком изменении наружной температуры. Сезонное изменение потребления электроэнергии на отопление и вентиляцию меняется от максимума при $t_n = -25$ °С до 0 при окончании отопительного сезона. Однако расход электроэнергии на приготовление горячей воды изменяется мало.

При расчете необходимой тепловой нагрузки и годового удельного расхода теплоты в жилых помещениях решающее значение имеют температуры наружного атмосферного воздуха и продолжительности стояния этих температур. При этом основные и добавочные потери теплоты помещения определяются суммой потерь теплоты через отдельные ограждающие конструкции в соответствии с выражением [1, с. 10]

$$Q = kA(t_p - t_{ext})(1 + \sum \beta)n, \quad (7)$$

где Q – потери теплоты через ограждающую конструкцию, Вт; $k = 1/R$ – коэффициент теплопередачи ограждающей конструкции, Вт/(м²·°C); R – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции (сопротивление теплопередаче конструкции следует определять по [18] (кроме полов на грунте; для полов на грунте $R = R_c$ – для неутепленных полов и $R = R_h$ – для утепленных), м²·°C/Вт; A – расчетная площадь ограждающей конструкции, м²; t_p – расчетная температура воздуха в помещении с учетом повышения ее в зависимости от высоты для помещений высотой более 4 м, °C; t_n – то же наружного воздуха для холодного периода года (параметр Б) [19] – при расчете потерь теплоты через наружные ограждения, или температура воздуха более холодного помещения – при расчете потерь теплоты через внутренние ограждения, °C; n – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху [20, табл. 5.3]; β – добавочные потери теплоты в долях от основных потерь.

Как видно из (7), потеря теплоты через ограждающую конструкцию прямо пропорциональна разности температур расчетных значений температур воздуха в помещении (для жилых помещений $t_p = 18$ °C) и наружного воздуха. Поэтому для оценки величин расчетных тепловых нагрузок для отопления жилых помещений необходимо проанализировать климатологические особенности местности (города), для которой производятся расчеты.

При проектировании любых зданий в зависимости от их назначения и особенностей окружающей среды обязательно учитываются климатологические факторы, к основным из которых относятся температуры наружного атмосферного воздуха и время стояния (общей продолжительности) этих температур (часов). При оценке расходов теплоты на отопление в соответствии с действующими нормами необходимо учитывать температуру наружного атмосферного воздуха при $t_n \leq 6$ °C.

Следует отметить, что в связи с изменением климата в конце XX и начале XXI в. нормы строительной климатологии для Республики Беларусь претерпели существенные изменения [21, 22] по сравнению с действующими в СССР [19]. Так, последнее справочное пособие к СНиП СССР по строительной климатологии было издано в 1990 г., в котором приведена таблица [19, табл. 3] средней продолжительности температуры воздуха различных

градаций (ч) для всех характерных по климату заметных городов СССР, в том числе Бреста и Минска Белорусской ССР. После образования Республики Беларусь в 2001 г. были изданы СНБ 2.04.02–2000 «Строительная климатология» [21], в которых не упомянута таблица средней продолжительности температуры воздуха различных градаций. И только в изменении № 1, изданном в 2007 г., такая таблица появилась для Витебска, Минска, Гродно, Могилева, Бреста и Гомеля [22, с. 23]. Анализ приведенных в этой таблице данных для города Минска показал существенные изменения времени стояния и средних температур наружного воздуха в течение отопительного периода по сравнению с 1990 г., что видно из приведенных в табл. 1 сравнительных результатов расчетов.

Таблица 1

Изменение расчетных климатологических параметров наружного воздуха в отопительный период для определения основных потерь теплоты помещений через ограждающие конструкции для г. Минска

The change in the estimated climatological parameters of the outdoor air during the heating season taken into consideration to determine major heat loss areas through the building envelope for the city of Minsk

Страна, год	Нормативный показатель				
	Продолжительность и нагрузка отопительного сезона			Средний показатель отопительного сезона	
	Общая, $\frac{\text{ч}}{\%}$	Общая, $\frac{\text{°C} \cdot \text{ч}}{\%}$	При $t_n > -6 \text{ °C}$, $\frac{\text{ч}}{\%}$	Температура, °C	Эффективность обменника, $\frac{\text{°C} \cdot \text{ч}}{\%}$
СССР, 1990 г.	$\frac{4857}{100}$	$\frac{101197}{100}$	$\frac{3419}{70,4}$	–2,8	$\frac{62093}{61,4}$
Беларусь, 2007 г.	$\frac{4323}{89}$	$\frac{82804}{81,8}$	$\frac{3569}{82,6}$	–1,2	$\frac{54219}{71,5}$

В табл. 1 приведены общие продолжительности отопительного сезона и стояния температур менее минус 6 °C, при которых происходит замораживание ныне применяемых высокоэффективных и относительно простых прямоточных рекуперативных теплообменников-утилизаторов «воздух – воздух» для утилизации теплоты удаляемого из жилых помещений теплого воздуха, а также средневзвешенные по времени стояния температуры наружного воздуха и возможные эффективности утилизаторов теплого воздуха. Оказалось, что за прошедшие годы (примерно за 15 лет) продолжительность отопительного сезона в Минске сократилась почти на 20 % (с 101197 до 82804 ч), а средневзвешенная по времени стояния температура поднялась с минус 2,8 до минус 1,2 °C, что уменьшает среднегодовой расход теплоты на отопление примерно на 8 %. При этом общая эффективность теплообменников без опасности замораживания за весь отопительный период увеличилась с 61,4 до 71,5 %. В остальной период (при $t_n < -6 \text{ °C}$)

необходимо использовать различные способы предотвращения обмерзания теплообменных поверхностей.

Распределение времени стояния температур наружного воздуха в течение отопительного периода для г. Минска графически показано на рис. 4, где даже визуально видно заметное потепление за период с 1990 по 2007 г.

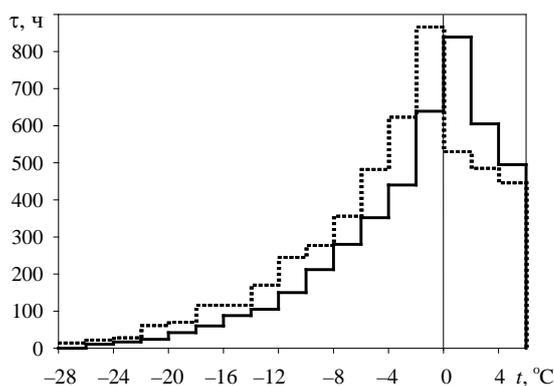


Рис. 4. Продолжительность стояния наружных температур в отопительном сезоне при $t_n < 6 ^\circ\text{C}$ по г. Минску: сплошная линия – по [22]; пунктирная – по [19]

Fig. 4. Duration of sustenance of outdoor temperature values during the heating season when $t_n < 6 ^\circ\text{C}$ in Minsk: the solid line – according to [22]; the dashed one – according to [19]

Как свидетельствуют данные ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Беларуси, среднегодовая температура в Беларуси за первое десятилетие XX в. выросла на $1,2 ^\circ\text{C}$, т. е. примерно на $0,1 ^\circ\text{C}$ в год, что совпадает с приведенными выше расчетами.

Для девятиэтажных современных жилых зданий с термическими сопротивлениями ограждающих конструкций, аналогичными приведенным выше для трехэтажных жилых домов, использование водяных аккумуляторов теплоты для электрического теплоснабжения также может оказаться выгодным. При этом необходимо учитывать некоторые особенности отопления девятиэтажных зданий по сравнению с трехэтажными.

Так, расчетная тепловая нагрузка помещений 1-го и 3-го этажей (крайних в вертикальном направлении) составляет по $Q_r = 19060 \text{ Вт}$ [1, с. 19, табл. 1.3], а 2-го этажа (промежуточного) $Q_r = 15300 \text{ Вт}$, что примерно на 20 % меньше. В девятиэтажном жилом здании – при двух крайних семь промежуточных этажей, что существенно уменьшает удельную тепловую нагрузку крайних по длине ленточного здания секций с $q_3 \approx 35400/620 \approx 57 \text{ Вт/м}^2$ до $q_9 \approx 49 \text{ Вт/м}^2$. Поэтому общую и среднюю поквартирную жилые площади девятиэтажного здания даже для крайних секций можно соответственно увеличить при тепловой нагрузке трехэтажного дома с $S_3 \approx 52 \text{ м}^2$ до $S_9 \approx 61 \text{ м}^2$, что больше соответствует современным понятиям комфорта.

При количестве секций (подъездов) более двух в средних секциях уже только половина вертикальных ограждающих конструкций, а не $3/4$, как в крайних секциях, взаимодействует в процессе теплообмена с наружными атмосферными условиями (температура, ветер, солнечное облучение и др.), что также уменьшает необходимую тепловую нагрузку этих помещений примерно на 15–20 %. Поэтому расчетную удельную тепловую нагрузку для рассматриваемых ориентировочных расчетов можно взять как $q_9 \approx 40\text{--}45 \text{ Вт/м}^2$.

Принимая общую отапливаемую площадь одной секции девятиэтажного здания в размере примерно $S_c \approx 2300 \text{ м}^2$ при наружной температуре $t_n = -25 \text{ }^\circ\text{C}$, аналогично приведенному выше расчету, легко получить необходимое на 17 ч количество теплоносителя (воды) в аккумуляторе объемом $V_a \approx 30 \text{ м}^3$. Для приготовления горячей воды необходимой температуры (50–55 $^\circ\text{C}$) в течение 17 ч/сут для жителей одной секции девятиэтажного дома в соответствии с графиком расхода теплоты на приготовление горячей воды по часам суток (рис. 1) [1, с. 302, рис. 3.4] необходимо нагреть объем воды $V_{г.в} \approx 20 \text{ м}^3$. Однако этот объем можно уменьшить примерно на 25 % ($\sim 5 \text{ м}^3$), если приготовление текущего расхода горячей воды с 20:00 до 23:00 ч производить за счет электроэнергии по дневному тарифу.

Таким образом, при использовании на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение в промежутке с 6:00 до 23:00 ч запаса теплоты в аккумуляторе его полезный объем должен составлять $V_a \approx 45\text{--}50 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$ для одной секции девятиэтажного жилого дома. При этом необходимая мощность электрического нагревателя для аккумулируемой воды составляет примерно 500 кВт и еще около 200 кВт – на текущее теплоснабжение во время семичасового периода нагрева аккумулятора, что требует серьезных подводков, трансформации и систем управления используемой электроэнергией. При средней численности в одной секции жителей до 100 человек необходимая установочная мощность электронагрева содержимого аккумулятора теплоты составляет около 5 кВт на одного жителя, что примерно соответствует нынешнему предельному потреблению в квартире (электропредохранители автоматически отключают квартирное электроснабжение при потреблении более 5 кВт), в которой проживают два–четыре человека.

Для уменьшения необходимой полезной емкости аккумулятора теплоты следует просто в промежутке времени с 6:00 до 23:00 ч забирать часть необходимой электроэнергии из внешней сети. В этом случае расчет нужного полезного объема аккумулятора теплоты весьма простой: какую часть необходимой энергии с 6:00 до 23:00 ч забрали, на такую часть можно сократить полезный объем аккумулятора теплоты.

Если вблизи КЭС или АЭС жилые дома со 100 тысячами жителей перевести на электрическое теплоснабжение, то этим в ночное время можно обеспечить более 0,5 млн кВт потребления электроэнергии. Однако та-

кое потребление электрической мощности возможно в среднем около 9 ч в год [22, с. 23], а в остальные 4314 ч стояния температура наружного воздуха составляет $(-24)^\circ\text{C} < t_{\text{в}} < 6^\circ\text{C}$. Поэтому основной путь уменьшения необходимого объема аккумулятора теплоты – осуществление запаса для определенной величины наружной атмосферной температуры. Так, для сокращения необходимого полезного объема аккумулятора теплоты примерно на 32 % предельная наружная температура должна составлять $t_{\text{в}} > -13^\circ\text{C}$. При этом время стояния $t_{\text{в}} < 6^\circ\text{C}$ и $t_{\text{в}} > -13^\circ\text{C}$ составляет 2412 ч, или около 81 % от общего времени стояния при $t_{\text{в}} < 6^\circ\text{C}$ [22, с. 23]. В случае $t_{\text{в}} \leq -13^\circ\text{C}$ необходимо догреть систему аккумулятора теплоты по время дневного тарифа.

В связи с различным временем стояния разных температур наружного воздуха расходы теплоты на отопление в разные сутки могут существенно различаться, но в течение одних суток с 6:00 до 23:00 ч можно избежать необходимости резкого изменения нагрузки на КЭС или АЭС. При необходимости изменение нагрузки на КЭС или АЭС можно производить достаточно плавно в течение суток и более.

Современная электроника и теория управления позволяют разработать и произвести все необходимые элементы системы «интеллектуального здания» [5, с. 172–174], использование которой обеспечит необходимое сочетание всех параметров оптимальной тепловой нагрузки в сочетании с аккумулярованием теплоты. Если использование электроэнергии для работы тепловых насосов в ночное время (с 23:00 до 6:00 ч) дешевле в три раза дневного тарифа, то получаемая ночью теплота может оказаться значительно дешевле поставляемой распределительной системой теплоснабжения. Поэтому возможны различные варианты применения электроэнергии, аккумуляторов теплоты и тепловых насосов для обеспечения комфортных параметров отопления, вентиляции и горячего водоснабжения.

Однако возможные мощности тепловых насосов достаточно ограничены как конструктивными возможностями для условий крупного жилого дома, так и возможностями извлечения теплоты из жидких отходов в самом жилом доме и примыкающей относительно небольшой в условиях города площади земельного участка. При этом существенную роль играют величины характерной постоянной температуры (для г. Минска – около $7\text{--}8^\circ\text{C}$ [23]) почвы и динамика подземных вод. Поэтому с помощью тепловых насосов можно только частично возместить необходимую тепловую нагрузку помещений и горячего водоснабжения. Также следует учесть достаточно высокую стоимость 1 кВт мощности теплового насоса по сравнению с электронагревателем (электрическим котлом).

Постоянное или переменное во времени использование теплового насоса для теплоснабжения каждой секции девятиэтажного жилого здания с замещением какой-то части необходимой тепловой емкости аккумулятора в определенных условиях может оказаться вполне приемлемым. При этом оставшуюся после замещения работой теплового насоса или из других ис-

точников часть полезной емкости аккумулятора теплоты удобно сначала определить отдельно для отопления и горячего водоснабжения в соответствии со следующими выражениями:

- для отопления и вентиляции

$$\Delta Q_{o.v} = \left(1 - \frac{\sum q_{\text{нас}} \tau_{\text{нас}}}{\sum q_o \tau_o} \right) Q_{o.v}; \quad (8)$$

- для горячего водоснабжения

$$\Delta Q_{г.в} = \left(1 - \frac{\sum q_{\text{нас}} \tau_{\text{нас}}}{\sum q_{г.в} \tau_{г.в}} \right) Q_{г.в}, \quad (9)$$

где $\Delta Q_{o.v}$ – оставшаяся после замещения работой теплового насоса или из других источников необходимая полезная емкость аккумулятора теплоты для отопления и вентиляции помещений, м^3 ; $\Delta Q_{г.в}$ – то же для обеспечения горячего водоснабжения, м^3 ; $q_{\text{нас}}$ – тепловая производительность теплового насоса с 6:00 до 23:00 ч в расчетные сутки, ч; q_o – часовой расход теплоты на отопление и вентиляцию, кВт; $q_{г.в}$ – расчетный средний расход теплоты на горячее водоснабжение с 6:00 до 23:00 ч, кВт; $\tau_{\text{нас}}$ – продолжительность работы теплового насоса с 6:00 до 23:00 ч в расчетные сутки, ч; τ_o – то же для отопления и вентиляции, ч; $\tau_{г.в}$ – то же для горячего водоснабжения, ч; $Q_{o.v}$ – полная необходимая полезная емкость аккумулятора теплоты для отопления и вентиляции помещений, м^3 ; $Q_{г.в}$ – то же для обеспечения горячего водоснабжения, м^3 ; Σ – суммарная величина произведенной теплоты при переменных в разные часы мощностях генераторов.

Для существенного уменьшения необходимого объема аккумулятора теплоты следует сокращать промежутки времени между зарядками аккумуляторов или необходимого времени его непрерывной работы, что может быть осуществимо при корректировке периодов пониженных тарифных ставок на электроэнергию. Последнее, безусловно, связано с режимом электропотребления другими потребителями, кроме жилого сектора.

Как известно, многие организации, учебные заведения и промышленные предприятия работают с 7:00–8:00 ч утра до 17:00–18:00 ч вечера, что позволяет вне этого периода хотя бы часть электроэнергии отпускать жилому сектору для отопления и горячего водоснабжения по пониженным тарифам. В этом случае период использования аккумуляторов теплоты может сократиться с 17 до 10–12 ч, что позволяет уменьшить необходимую полезную емкость аккумуляторов теплоты примерно в 1,5 раза.

Устройство тепловой изоляции аккумуляторов теплоты при современных материалах не представляет особых трудностей. Кроме этого, размещение аккумуляторов теплоты внутри контуров жилых зданий позволяет полезно использовать большую часть утечек теплоты.

ВЫВОДЫ

1. Существенное повышение термического сопротивления ограждающих конструкций современных жилых домов, применение вторичных тепловых ресурсов отработанных воздуха и стоков использованной воды позволяют вернуться к аккумуляторам теплоты для суточного теплоснабжения жилых зданий. Использование напольного отопления повысит эффективность аккумуляции теплоты благодаря возможности понижения рабочей температуры теплоносителя до 40 °С. Возможность применения тепловых насосов для зарядки аккумуляторов теплоты и сочетание их работы следует проверить путем технико-экономических расчетов для природно-климатических и экономических условий Беларуси.

2. Использование аккумуляторов теплоты для суточного отопления, вентиляции и горячего водоснабжения зданий позволит существенно снизить стоимость создания инфраструктуры территории под застройку благодаря отсутствию необходимости прокладки распределительной системы тепло- или газоснабжения.

3. Для выбора наиболее удобных и эффективных вариантов использования аккумуляторов теплоты для зданий различного назначения необходимо провести научные и проектные работы. При этом строителям, энергетикам и эксплуатационникам следует совместно разработать методики согласования режимов массовой зарядки аккумуляторов теплоты с режимами работы генераторов энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталеv, Б. М. Теплоснабжение и вентиляция / Б. М. Хрусталеv, Ю. А. Кувшинов, В. М. Копко. М.: Изд-во ассоциации строительных вузов, 2007. 764 с.
2. Инженерное оборудование зданий и сооружений: энциклопедия / В. С. Алексеев [и др.]; под ред. С. В. Яковлева. М.: Стройиздат, 1994. 512 с.
3. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. М.: Энергоиздат, 1982. 360 с.
4. Способ регулирования подачи теплоты в здание или группу зданий: пат. 16152 Респ. Беларусь: МПК F24D 10/00, F24D 3/00 / В. М. Пилипенко, С. Н. Осипов; дата публ.: 30.03.2012.
5. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
6. Системы электрооборудования жилых и общественных зданий: ТКП 45-4.04-149-2009. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 78 с.
7. Горшков, А. С. Техничко-экономические показатели тепловых электростанций / А. С. Горшков. М.: Энергия, 1974. 240 с.
8. Саликов, А. П. Магнитогидродинамический способ получения электроэнергии / А. П. Саликов. М.: Промтеплоэнергетика, 1960. С. 22-29.
9. Что выбрать? Газопоршневые или газотурбинные установки? [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.manbw.ru/analitvcs/which_is_bener_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html. Дата доступа 21.09.2016.
10. Атомная электростанция [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_plant. Дата доступа 21.09.2016.

11. Щекин, Р. В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции в гражданском строительстве / Р. В. Щекин, С. М. Кореневский, Г. Е. Бем. Киев: Госиздат лит. по строит. и арх. УССР, 1959. 852 с.
 12. Подгородников, И. С. Русские печи «Теплушка-2» и «Теплушка-4» / И. С. Подгородников. М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1957. 48 с.
 13. Альбом типовых деталей сельскохозяйственных построек. Вып. VIII. Отопительные печи. М.: Сельхозстройпроект, 1949. № 2207. 82 с.
 14. Андреевский, А. К. Отопление / А. К. Андреевский. Минск: Вышэйш. шк., 1974. 432 с.
 15. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. М.: Высш. шк., 1982. 416 с.
 16. Петрова, И. Тариф за час. Насколько потяжелеет жировка в 2015 году / И. Петрова // Аргументы и факты. 2015. 13 января, № 3. С. 28.
 17. Способ горячего водоснабжения жилого здания: пат. Респ. Беларусь 19474: МПК F24D 3/08, F24D 17/02 / В. М. Пилипенко, С. Н. Осипов.
 18. Строительная теплотехника: СНБ 2.04.01–97. Минск: Минстройархитектуры, 1998. 33 с.
 19. Строительная климатология: справ. пособие к СНиП / Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ). М.: Стройиздат, 1990. 89 с.
 20. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01–03. Минск: Минстройархитектуры, 2004. 48 с.
 21. Строительная климатология: СНБ 2.04.02–2000. Минск: Минстройархитектуры, 2001. 37 с.
 22. Строительные нормы Республики Беларусь. Строительная климатология: изменение № 1 СНБ 2.04.02–2000: Введ. 01.07.2007. Минск: Минстройархитектуры, 2007. 33 с.
 23. Павловская, О. А. Применение ГИС для моделирования особенностей распределения температуры в пределах «нейтрального» слоя в Минской области / О. А. Павловская, В. И. Зуй // ГИС-технологии в науках о Земле: материалы конкурса ГИС-проектов студентов и аспирантов вузов Республики Беларусь, проведенного в рамках празднования Международного дня ГИС 2011. Минск: БГУ, 2012. С. 35–39.
- Поступила 29.03.2016 Подписана в печать 01.06.2016 Опубликована онлайн 31.01.2017

REFERENCES

1. Kroustalev B. M., Kuvshinov Yu. A., Kopko V. M. (2007) *Heating and Ventilation*. Moscow, Association of Educational Civil Engineering Institutions of Construction Publ. 764 (in Russian).
2. Alekseev V. S., Alekseev L. S., Altunin D. I., Alferova L. A., Amosova A. G., Askerniia A. A., Ass G. Iu., Babenkov E. D., Barkalov B. V., Belevtsev A. N., (ed.) Iakovlev S. V. (1994) *Engineering Equipment of Buildings and Constructions. Encyclopedia*. Moscow, Strojizdat. 512 (in Russian).
3. Sokolov Ye. Ya. (1982) *District Heating and Heat Networks*. Moscow, Energoizdat. 360 (in Russian).
4. Pilipenko V. M., Osipov S. N. (2012) Method of Regulating the Supply of Heat into the Building or Group of Buildings. Patent Republic of Belarus No 16152 (in Russian).
5. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M. (2002) *Mathematical Modeling and Optimization of the Thermal Performance of Buildings*. Moscow, AVOK-PRESS Publ. 194 (in Russian).
6. TCP 45-4.04-149–2009. The Electrical System of Residential and Public Buildings. Minsk: The Ministry of Architecture and Construction. 78 (in Russian)
7. Gorshkov A. S. (1974) *Technical and Economic Indicators of Heat Power Plants*. Moscow, Energiya. 240 (in Russian).
8. Salikov A. P. (1960) *Magnetohydrodynamic Method of Generating Electricity*. Moscow, Promteploenergetika Publ. 22–29 (in Russian).
9. What to Choose? Gas-Piston or Gas-Turbine Installation? *New Generation*. Available at: http://www.manbw.ru/analytics/which_is_better_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html (Accessed 21 September 2016) (in Russian).

10. Nuclear Power Plant. *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_plant (Accessed 21 September 2016) (in Russian).
11. Shchekin R. V., Korenevsky S. M., Bem G. E. (1959) *Handbook of Heating and Ventilation Systems in Civil Engineering*. Kiev, State Publ. of the Literature on Construction and Architecture of the USSR. 852 (in Russian).
12. Podgorodnikov I. S. (1957) *Russian Stoves "Teplushka-2" ["Boxcar-2"] and "Teplushka-4" ["Boxcar-4"]*. Moscow, RSFSR MCE Publ. 48 (in Russian).
13. *Album of Typical Parts of Agricultural Buildings. Issue VIII: The Heating Furnace* (1949). Moscow, Selkhozstrojproyekt Publ., (2207). 82 (in Russian).
14. Andreyevsky A. K. (1974) *Heating*. Minsk, Vysheishaya Sckola. 432 (in Russian).
15. Bogoslovski V. N. (1982) *Civil Engineering Thermophysics*. Moscow, Vysshaya Shkola. 416 (in Russian).
16. Petrova I. (2015) Rate per Hour. How Much More Expensive Utility Bills Will be in 2015. *Argumenty i Fakty* [Arguments and Facts], 13 January (3), 28 (in Russian).
17. Pilipenko V. M., Osipov S. N. (2015) Method of Hot Water Supply of Residential Buildings. Patent for Invention of the Republic of Belarus No 19474 (in Russian).
18. Building Code 2.04.01–97. Civil Engineering Heating Equipment. Minsk: Ministry of Architecture and Construction, 1998. 33 (in Russian).
19. Research Institute for Building Physics (1990) *Building Climatology. Handbook to the SNIP*. Moscow, Stroyizdat. 89 (in Russian).
20. Building Code 4.02.01–03. Heating, Ventilation and Air Conditioning. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2004. 48 (in Russian).
21. Building Code 2.04.02–2000. Civil Engineering Climatology. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2001. 37 (in Russian).
22. Building Code of the Republic of Belarus. Civil Engineering Climatology. Alteration N 1 of Building Code 2.04.02–2000. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2007. 33 (in Russian).
23. Pavlovskaya O. A., Zui V. I. (2012) Application of Geographic Information Systems for Modeling the Specific Features of Temperature Distribution with the Borders of "Neutral" Layer of Minsk Oblast. *Geographic Information System Based Technologies in Earth Sciences: Materials of the Competition of Geographic Information System Based Projects of Students of Higher Educational Establishment of the Republic of Belarus Hold in the Framework of the International Geographic Information System Day Celebration 2011*. Minsk, BSU, 35–39 (in Russian).

Received: 29 March 2016

Accepted: 1 June 2016

Published online: 31 January 2016