

Экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий

*Аспирант О.В. Аверьянова**

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: кондиционирование; отопление; тепловой насос; водяная петля с тепловыми насосами; альтернативные источники энергии; низкопотенциальные источники тепла; коэффициент преобразования теплоты; чистый дисконтированный доход

Решение задач энергосбережения и повышения энергоэффективности – одно из приоритетных направлений развития Российской Федерации. Поиск и реализация решений, которые позволят значительно экономить энергетические ресурсы, является наиболее актуальной задачей на сегодняшний момент в соответствии с «Энергетической стратегией России на период до 2030 года» и Федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» от 23 ноября 2009 года № 261 [1].

В предыдущих публикациях [2-7] нами была показана техническая реализуемость мероприятий по повышению энергоэффективности систем поддержания оптимальных параметров микроклимата зданий офисного назначения путем применения кольцевой водяной системы с тепловыми насосами (она же WLHPS - water loop heat pump system). Многие здания имеют светопрозрачные проемы на разных фасадах, получающие различные количества солнечной радиации в течение года. Вследствие этого в одних помещениях начинают преобладать теплопритоки, и для поддержания оптимальных климатических параметров в них требуется охлаждение помещения, в то время как в других помещениях потребность в отоплении остается. Объединение в единую систему дает возможность предусмотреть утилизацию теплоты удаляемого воздуха, а также утилизацию тепла других источников низкопотенциальной теплоты, например, хозяйственно-бытовых или производственных стоков.

В настоящее время использование тепловых насосов в системах теплоснабжения и отопления рассмотрены достаточно широко. Васильевым Г.Н с участием Хрустачева Л.В., Розина А.Г., Абуева И.М., Горнова В.Ф., Орлова В.О., Воробьева Н.В. было разработано «Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии» [8], а также велись исследования энергоэффективного экспериментального жилого дома [9]. Дацюк Т.А., Полушкин В.И., Васильев В.Ф. занимаются разработкой обеспечения энергоэффективности зданий, в том числе и при помощи усовершенствованных систем теплоснабжения и отопления с применением тепловых насосов [10, 11]. Повышению эффективности работы теплового насоса в системах теплоснабжения за счет модернизации конденсатора посвящены работы Петракова Г.Н. [12].

За рубежом кольцевые водяные системы с тепловыми насосами (WLHPS) начали применяться с 1960 года. Работы по улучшению конструкции водяной петли в таких системах проводил Joseph A. Pietsch в 1980-1990 гг. Также среди зарубежных исследователей стоит отметить работы R.H. Howell, J.H. Zaidi, E.A. Kush, W.S. Cooper, H.I. Henderson, S.W. Carlson, M.K. Khattar. Большой объем работ проведен на территории КНР и Южной Кореи. Наиболее значимые принадлежат Zhiwei Lian, S.W. Lang, W. Xu, T.S. Feng, F. Wang, Z.L. Ma, Y. Cao, Y.Q. Lu. Они занимались моделированием и анализом WLHPS. M. Zaheer-Uddin и J.C.Y. Wang разрабатывали функциональные схемы автоматического регулирования кольцевых водяных систем с тепловыми насосами [13,14,15].

В настоящей статье излагается подход к оценке экономической эффективности таких инженерных систем.

Подход демонстрируется на примере здания офисного назначения, типовой план этажа, фасад и разрез которого представлены на рис. 1-3. Общая высота здания 13,5 м, высота технического этажа (подвала) 2,8 м, высота типового этажа 3 м. Здание обращено главным фасадом на юго-восток. Конструктивная схема здания – монолитный железобетонный каркас. Покрытие здания выполнено в виде монолитной железобетонной плиты, утепленной минераловатными плитами. Светопрозрачные заполнения (окна, витражи) выполнены из переплетов из алюминиевых сплавов с заполнением двухкамерными стеклопакетами. Общая площадь здания 1900 м². Площадь помещений, в которых требуется поддержание температурных параметров, составляет 1100 м². Площадь остекления – 450 м² при площади наружных ограждений 1065 м². Количество сотрудников, постоянно находящихся на рабочих местах, в этом здании составляет 170 чел. Воздухообмен принимается из расчета 60 м³ на 1 человека.

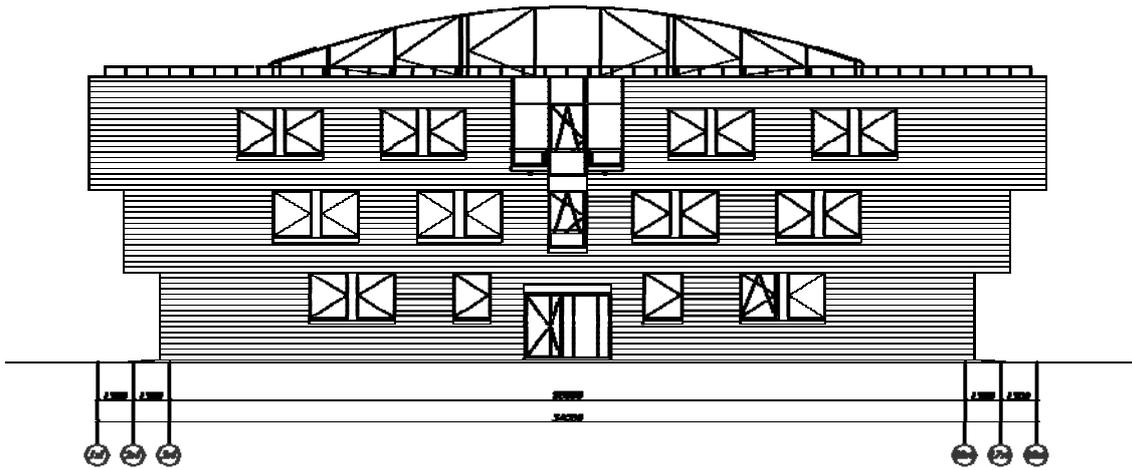


Рисунок 1. Фасад здания

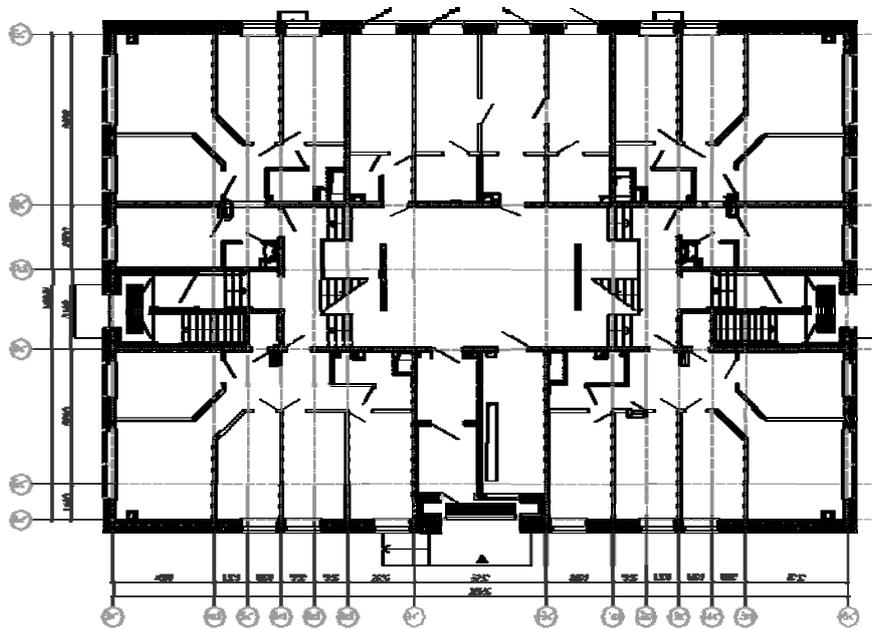


Рисунок 2. План этажа

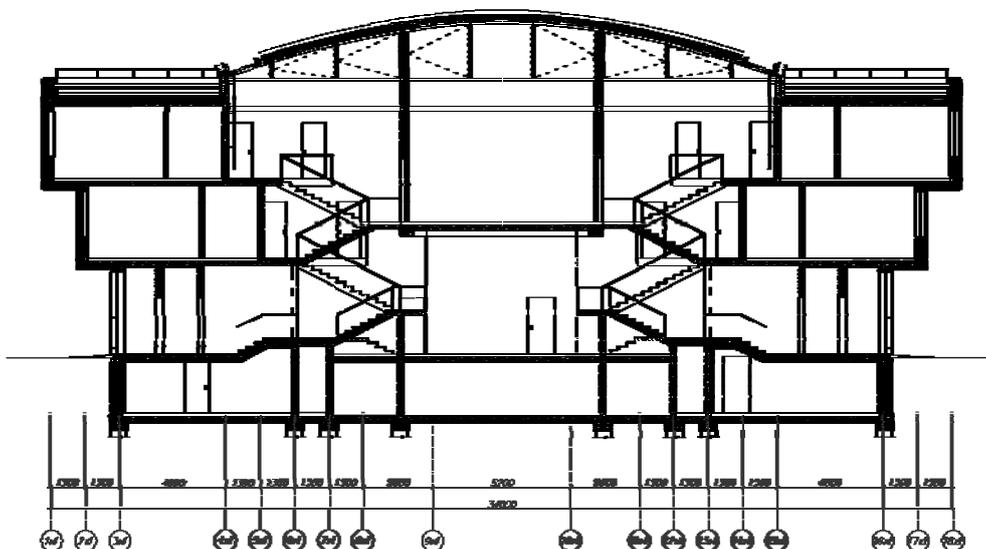


Рисунок 3. Разрез здания

Проект включает решения по кондиционированию и отоплению, а также электроснабжению в части подключения к электросетям. Для достижения заданных параметров внутреннего воздуха в помещение подается приточный воздух определенного состояния и в определенном количестве и вода, несущая тепло или холод. Такая схема предполагает независимую обработку рециркуляционного воздуха в местном агрегате и наружного воздуха в центральном кондиционере. Для этого в теплообменнике местного агрегата охлаждается или нагревается в зависимости от периода года рециркуляционный (внутренний) воздух. Приточный воздух в размере минимально необходимого расхода наружного воздуха обрабатывается в ЦК и поступает в помещение через воздухораспределительные устройства. Смешение двух потоков происходит непосредственно в самом помещении. Поддержание температуры в каждом помещении осуществляется при помощи системы управления, которая в соответствии с setpoint (уставкой) посылает сигналы на исполнительные механизмы оборудования.

Первый вариант (далее вариант №1) представляет собой базовый, основанный на широко применяемых и отработанных схемных решениях по вентиляции и кондиционированию при помощи фанкойлов, установленных в качестве местных агрегатов в обслуживаемых помещениях, теплоснабжению здания от центральных тепловых сетей, электроснабжению с однотарифным учетом электроэнергии.

Второй вариант (далее вариант №2) системы по поддержанию оптимальных параметров микроклимата должен быть выполнен на базе местно-центральной системы с тепловыми насосами, работающими в едином водяном кольцевом контуре в качестве местных агрегатов, устанавливаемых в каждом обслуживаемом помещении.

Такое комплексное решение позволяет снизить энергопотребление инженерными системами здания. Оно реализует в единой системе функции отопления, охлаждения, горячего водоснабжения, объединяет одним контуром источники теплоты и холода в здании.

Теплоснабжение здания должно быть выполнено при помощи теплонасосной установки, использующей теплоту грунта в качестве низкопотенциального источника тепла. Для уменьшения затрат на электроэнергию должны быть предусмотрены накопители (аккумулирующие емкости) для теплоносителя. Принципиальная схема представлена на рис. 4. Решения по электроснабжению с двухтарифным учетом электроэнергии.

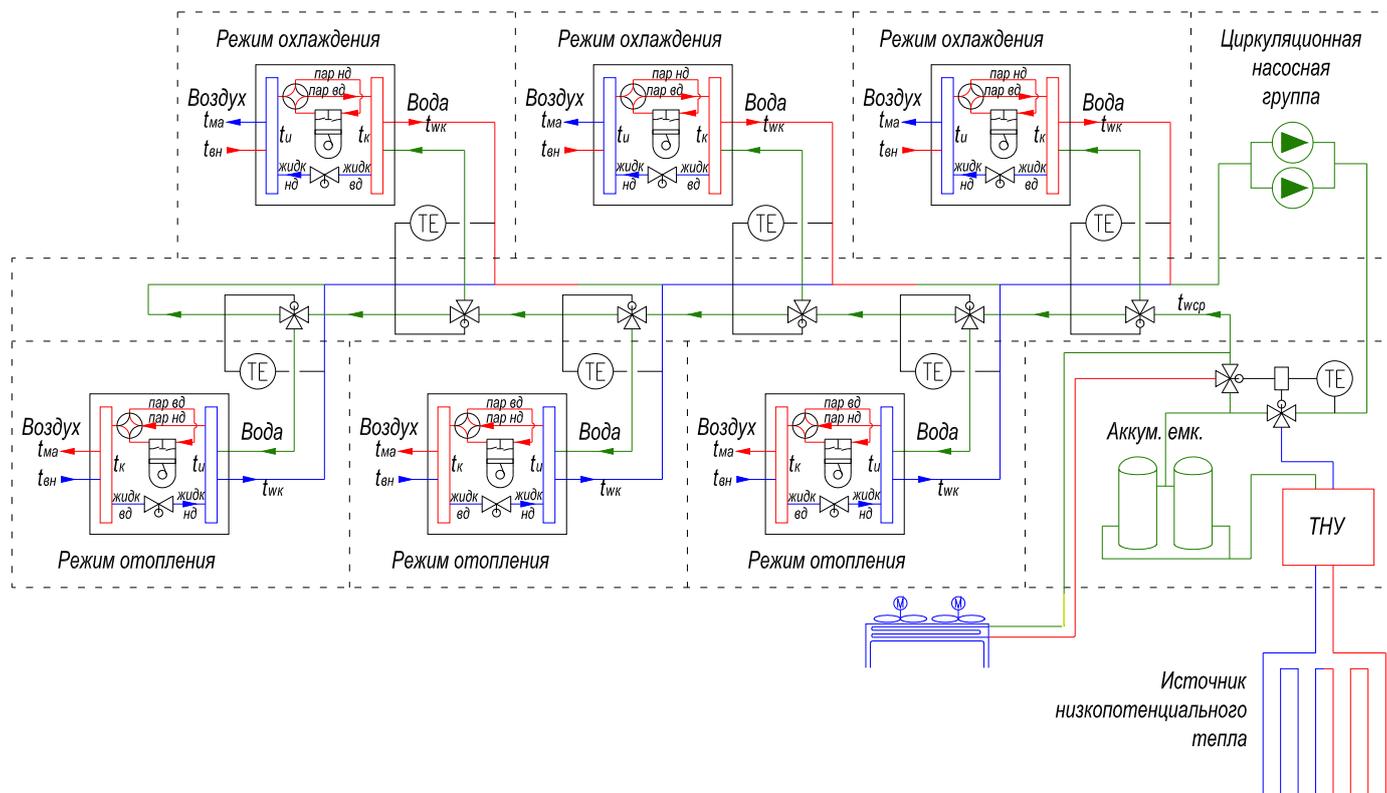


Рисунок 4. Принципиальная схема системы тепло- и холодоснабжения здания

Продолжительность строительной стадии по обоим проектам одинакова и составляет 1 год. Предполагаемая продолжительность стадии функционирования до первого капитального ремонта основных узлов 6 лет. Необходимо рассчитать все издержки для каждой из альтернатив, дисконтировать (привести к настоящему моменту) и выбрать по наименьшим затратам лучший вариант.

Сравнение различных инвестиционных проектов и выбор лучшего будем проводить с использованием следующих показателей:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект;
- индекс доходности (ИД).

Норма дисконта E приравнивается к ставке рефинансирования с учетом темпа инфляции и составит:

$$E = \frac{1 + E_{\text{реф}}}{1 + i} - 1,$$

где $E_{\text{реф}}$ - ставка рефинансирования Центробанка РФ;
 i – темп инфляции.

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t^+) \frac{1}{(1 + E)^t} - K,$$

где R_t - результаты, достигаемые на t -м шаге;

Z_t^+ - затраты на t -м шаге при условии, что в них не входят капиталовложения;

T – горизонт расчета, равный номеру шага расчета;

$\frac{1}{(1 + E)^t}$ - коэффициент дисконтирования;

$(R_t - Z_t^+)$ - эффект, достигаемый на t -м шаге;

E – норма дисконта (в относительных единицах);

K – сумма дисконтированных капиталовложений, определяемая по формуле:

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \frac{1}{(1 + E)^t}.$$

Индекс доходности (ИД) представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине капиталовложений:

$$\text{ИД} = \frac{1}{K} \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t^+) \frac{1}{(1 + E)^t}.$$

Он строится из тех же элементов и его значение связано со значением ЧДД: если ЧДД положителен, то ИД > 1, и наоборот. Если ИД > 1, то проект эффективен; при ИД < 1 проект неэффективен.

Количество денежных средств, которое будет израсходовано на приобретение и реализацию оборудования для проекта, представлено в табл. 1.

Таблица 1. Спецификация приобретаемого оборудования

Статья затрат (капитальные вложения)	Вариант №1 (фанкойлы)		Вариант №2 (WLHPS)	
	Количество	Стоимость, руб.	Количество	Стоимость, руб.
Основное оборудование	Фанкойлы серии 42N (Carrier) – 67 шт./430 евро/шт.	1 152 400	Тепловой насос Aquazone 50 KQE 007-019 (Carrier) – 67 шт./1800 евро/шт.	4 824 000
Насосное оборудование, руб.	Насос для контура «чиллер– фанкойл» и контура «тепл.сеть– фанкойл» серии TR(GRUNDFOSS) 175 595 руб./шт.	351 190	Насос для контура WLHPS – серии TR(GRUNDFOSS) 175 595 руб./шт.	175 595
Оборудование для теплоснабжения	-	-	Тепловой насос NIBE Модель 23кВт/12715 евро/шт. и 17кВт/15905 евро/шт.	1 144800
Оборудование для холодоснабжения	Холодильная машина модель 30RB182(Carrier) – 1 шт. / 96600 евро/шт.	3 864 000	Посредством оборудования для теплоснабжения	-
Подключение к электросетям (из расчета 10 000руб. за 1кВт)	Необходимая мощность 153 кВт	1 530 000	Необходимая мощность 180 кВт	1 800 000
Всего:		6 897 590		7 944 395

Аверьянова О.В. Экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий

Эксплуатационные затраты в течение года для двух вариантов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Потребляемая энергия и эксплуатационные затраты

Статья затрат	Вариант №1 (фанкойлы)	Вариант №2 (WLHPS)	Тариф	
Потребляемая тепловая энергия, кВт	107,98	0	1300	руб/1Гкал
Электропотребление чиллера или теплового насоса NIBE, кВт*ч	26 294,38013	11 172,2 (производство тепла) +857,52 (производство холода) (день) +9,2 (производство тепла) (ночь) <i>Для экономии затрат тепло или холод будет вырабатываться в ночной зоне</i>	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Электропотребление насосного оборудования, кВт*ч	18 145,02	10 740 (день) +5 356(ночь)	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Электропотребление приводов компрессоров WLHPS, кВт*ч	0	20 494,569	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Общее электропотребление, кВт*ч	44 439,40	48 629,48	Одноставочный тариф 2,80 Дневная зона 2,81 Ночная зона 1,71	руб/1кВт*ч
Эксплуатационные затраты, руб/год	264 804,32р.	108 364,79р.		

Эксплуатационные затраты рассчитывались за каждый час каждой декады года в зависимости от показателей наружного климата для Санкт-Петербурга. Климатические параметры, такие как прямая солнечная радиация при действительных условиях облачности за каждый месяц, рассеянная и отраженная солнечная радиация при действительных условиях облачности за каждый месяц, альbedo деятельной поверхности за каждый месяц, средняя декадная температура воздуха, повторяемость сочетаний температуры воздуха и относительной влажности по месяцам, принимались по «Научно-прикладному справочнику по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Часть 1-6» [16].

Общие показатели по двум вариантам проекта сведены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели по проектам

	Вариант № 1 (фанкойлы)	Вариант № 2 (WLHPS)
Исходные инвестиции, р.	6 897 590	7 944 395
Годовые денежные затраты на покупку энергии, р/год.	264 804,32	108 364,79
Ежегодная сумма амортизационных отчислений, руб. в год	536 759	614 439,5
Остаточная стоимость через 6 лет оборудования, р.	2 683 795	3 072 197,5
Время проекта	6 лет	6 лет

В связи с тем что вариант №1 является базовым и годовые денежные затраты по этому варианту равны 264 804,32 руб., а для варианта №2 – 108 364,79 руб., то считаем, что для варианта №2 результат, достигаемый на t-м шаге:

$$R_t = 264\,804,32 \text{ р.} - 108\,364,79 \text{ р.} = 156\,439,53 \text{ р.},$$

а для варианта №1 результат, достигаемый на t-м шаге, $R_t = 0$ р.

При ставке рефинансирования Центрального банка РФ 8,25% и темпе инфляции 8,5% норма дисконта будет равна:

$$E = \frac{1 + 8,25}{1 + 8,5} - 1 = -0,027.$$

Расчет показателей для варианта №2:

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t^+) \frac{1}{(1 + E)^t} - K = \sum_{t=0}^6 \frac{156439,5}{(1 - 0,027)^t} - 1046805 = 186648,5 \text{ руб.};$$

$$ИД = \frac{1}{K} \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t^+) \frac{1}{(1 + E)^t} = \frac{1}{1046805} \sum_{t=0}^6 \frac{156439,5}{(1 - 0,027)^t} = 1,17.$$

Расчет дисконтированных издержек по варианту №1 представлен в табл. 4.

Таблица 4. Дисконтированные издержки для варианта №1

	Годы	Денежный поток	Настоящее значение
Исходные инвестиции, р.	базовый	-6 897 590	-6 897 590
Годовая стоимость эксплуатации, р.	1 – 6	264 804,32	-1 750 474,37
Остаточная стоимость, р.	6	+2 683 795	+2 683 795
Настоящее значение денежных потерь, р.			-5 964 269,37

Расчет дисконтированных издержек по варианту № 2 представлен в табл. 5.

Таблица 5. Дисконтированные издержки для варианта №2

	Годы	Денежный поток	Настоящее значение
Исходные инвестиции, р.	базовый	-7 944 395	-7 944 395
Годовая стоимость эксплуатации, р.	1 – 6	108 364,79	-716 339,48
Остаточная стоимость, р.	6	+2 683 795	+3 072 197,5
Настоящее значение денежных потерь, р.			-5 588 536,98

Все рассчитанные показатели свидетельствуют об экономической эффективности комплексного проекта внутренних инженерных систем по варианту №2. Срок окупаемости данного проекта составит 6 лет.

Конечно, нужно отметить, что для альтернативного решения с кольцевой водяной системой с тепловыми насосами (WLHPS - water loop heat pump system) величина исходных инвестиций достаточно высока. И ожидаемый эффект от использования только одной этой системы не слишком велик. Но при комплексном подходе к решению задачи по увеличению энергосбережения, применяя, в частности, альтернативные низкопотенциальные источники тепла вместо традиционного центрального теплоснабжения, можно придать проекту достаточную инвестиционную привлекательность. Таким образом, комплексный подход и применение разумных решений по энергосбережению приведут к энергетической эффективности.

Полученные результаты расчета эксплуатационных затрат и экономической оценки эффективности двух альтернативных систем позволяют сделать следующие **выводы**.

1. Использование WLHPS в качестве местных агрегатов по сравнению с фанкойлами более целесообразно.

2. Установленные зависимости между количеством получаемой солнечной радиации, объемно-планировочными решениями, технологическими показателями использования помещений и эксплуатационными затратами для местно-центральной системы обеспечения параметров микроклимата с WLHPS в качестве местных агрегатов для современного здания офисного назначения показывают целесообразность применения таких систем.

3. Для того чтобы увеличить эффективность используемых энергетических ресурсов, необходим комплексный подход, который должен заключаться в применении схем, позволяющих не только перенаправлять потоки тепла внутри здания, но и осуществлять работу энергоснабжающего оборудования дифференцированно по зонам суток.

4. Установлено, что наиболее целесообразно использовать альтернативное оборудование по получению тепла, которое позволяет получать необходимые параметры теплоносителя в холодный период года и имеет возможность работать на охлаждение в теплый период года.

Автор выражает благодарность д.т.н. Васильеву Григорию Петровичу, руководителю Центра энергосбережения и эффективного использования нетрадиционных источников энергии в строительном комплексе, за идею этой статьи и ценные обсуждения.

А также Михаилу Петровичу Зуеву, главному энергетику ТЦ «Питер-Радуга» - за предоставленную возможность проведения исследований и оценки работы системы кондиционирования в этом торговом центре.

Литература

1. Энергосвет: Информационный электронный журнал по энергосбережению Координационного совета Президиума Генерального совета Всероссийской партии «Единая Россия» по вопросам энергосбережения и энергетической эффективности. 2011. №3(16). 78 с.
2. Аверьянова О. В. Возможности использования внутренних теплопоступлений в системах кондиционирования // Инженерно-строительный журнал. 2009. №1(3). С. 26-28.
3. Аверьянова О. В. Энергоэффективные системы кондиционирования // Еврострой. 2009. №3. С.10-13.
4. Аверьянова О. В., Ватин Н. И. Климатические системы с тепловыми насосами и водяным контуром // Инженерно-строительный журнал. 2009. №2(4). С. 19-22.
5. Аверьянова О. В. Системы кондиционирования для центра обработки данных // Еврострой. 2010. №3. С. 36-40.
6. Аверьянова О. В. Энергосберегающие технические решения для местно-центральных систем обеспечения микроклимата при использовании тепловых насосов в качестве местных агрегатов, объединенных в единый водяной контур // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1(19). С. 37-45.
7. Аверьянова О. В. О комплексном подходе к проектированию систем жизнеобеспечения с целью повышения ресурсо- и энергосбережения // Инженерные системы. 2011. №2. С. 50-55.
8. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии / Москомархитектура. М., 2001. 60 с.
9. Васильев Г. П. Энергоэффективный экспериментальный жилой дом в микрорайоне Никулино-2 // АВОК. 2002. №4. С. 10-21.
10. Дацюк Т. А., Васильев В. Ф., Дерюгин В. В., Ивлев Ю. П. Новая технология проектирования систем обеспечения микроклимата зданий // Вестник гражданских инженеров. СПб. 2005. №3(4). С. 57-63.
11. Дацюк Т. А., Леонтьева Ю. Н., Мелех Т. Х. Улучшение тепловой защиты зданий // Инженерные системы. СПб. 2007. № 3(30). С. 52-55.
12. Петраков Г. Н., Бараков А. В., Стогней В. Г., Мартынов А. В. Методы повышения эффективности конденсатора теплового насоса // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и энергоресурсосбережения : Труды науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж, 2006. Вып. 5. С. 14-20.
13. Lang S. W., Xu W., Feng T. S. Issues of design and application of the centralized air conditioning system with water source heat pump units // J. HVAC. 1996. №26(1). Pp. 15-19.
14. Wang F. Discussions on the design of the air conditioning system with water source heat pump units // Building Energy Environ. 1996. №4. Pp. 40-44.
15. Ma Z. L., Cao Y. Static state analyses on the operating energy consumption of water-loop heat pump air conditioning system // J. Harbin Inst. Technol. 1997. №6. Pp. 68-74.
16. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3: Многолетние данные. Вып. 3: Карельская АССР, Ленингр., Новгород., Псков. Калинин. и Смолен. обл. Л. : Гидрометеоздат, 1988. 447 с.

**Олеся Валерьевна Аверьянова, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7(911)996-83-47; эл. почта: olesyaav@yandex.ru

doi: 10.5862/MCE.23.9

Economic efficiency of energy saving solutions

O.V. Averyanova,*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia,
+7(911)996-83-47; e-mail: olesyaav@yandex.ru*

Key words

conditioning; heating; heat pump; air-conditioning system; water-loop heat pump system; alternative sources of energy; low grade heat sources; conversion coefficient of heat; net present value; NPV

Abstract

One of the priorities in the development of Russian Federation is the policy of reducing energy consumption and implementation of energy efficient technologies.

The article shows the example of the solution aimed at increasing the energy efficiency of systems which maintain optimal microclimate parameters in the office buildings. The solution is based on usage of WLHPS (Water Loop Heat Pump System). Consolidation into a united system makes it possible to utilize heat of the exhaust air heat and of other low-grade heat sources.

The article shows the method of estimation the economic efficiency of these systems. The method is demonstrated on the example of office building. Comparison of various investment projects and selection the best solution was made by using economic indicators such as net present value (NPV) or the integrated effect and profitability index.

References

1. *Energosovet*. Informatsionnyy elektronnyy zhurnal po energosberezheniyu Koordinatsionnogo soveta Prezidiuma Generalnogo soveta Vserossiyskoy partii «Edinaya Rossiya» po voprosam enegosberezheniya i energeticheskoy effektivnosti. 2011. No. 3(16). 78 p.
2. Averyanova O. V. *Inzhenernye sistemy*. 2009. No. 1(38). Pp. 26-28.
3. Averyanova O. V. *Evrostroy*. 2009. No. 3. Pp. 10-13.
4. Averyanova O. V., Vatin N. I. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 2(4). Pp. 19-22.
5. Averyanova O. V. *Evrostroy*. 2010. No. 3. Pp. 36-40.
6. Averyanova O. V. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 1(19). Pp. 37-45.
7. Averyanova O. V. *Inzhenernye sistemy*. 2011. No. 2. Pp. 50-55.
8. *Rukovodstvo po primeneniyu teplovykh nasosov s ispolzovaniem vtorichnykh energeticheskikh resursov i netraditsionnykh vozobnovlyaemykh istochnikov energii* [Guide on usage the heat pumps with using waste energy and nonconventional renewable sources of energy] / Moskomarkhitektura. Moscow, 2001. 60 p.
9. Vasilev G. P. *AVOK*. 2002. No. 4. Pp. 10-21.
10. Datsyuk T. A., Vasilev V. F., Deryugin V. V., Ivlev Yu. P. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2005. No. 3(4). Pp. 57-63.
11. Datsyuk T. A., Leonteva Yu. N., Melekh T. Kh. *Inzhenernye sistemy*. 2007. No. 3(30). Pp. 52-55.
12. Petrakov G. N., Barakov A. B., Stogney V. G., Martynov A. B. *Fiziko-tekhnicheskie problemy energetiki, ekologii i energoresursosberezheniya : Trudy nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Physical and technical problems of energetic, ecology and energy and sources saving : Proceedings]. Voronezh, 2006. No. 5. Pp. 14-20.
13. Lang S. W., Xu W., Feng T. S. Issues of design and application of the centralized air conditioning system with water source heat pump units. *J. HVAC*. 1996. No. 26(1). Pp. 15-19.
14. Wang F. Discussions on the design of the air conditioning system with water source heat pump units. *Building Energy Environ*. 1996. No. 4. Pp. 40-44.
15. Ma Z. L., Cao Y. Static state analyses on the operating energy consumption of water-loop heat pump air conditioning system. *J. Harbin Inst. Technol*. 1997. No. 6. Pp. 68-74.
16. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3: Mnogoletnie dannye*. [Scientific-applied climatic manual of USSR. Long-term data]. No. 3. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1988. 447 p.

Full text of this article in Russian: pp. 53-59