

## Литература

1. Шилин, А. А. Методика определения координат установки датчиков аварийных режимов / А. А. Шилин, О. И. Доронина // *Электрика*. – 2013. – № 5. – С. 42–45.
2. Левченко, И. И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах / И. И. Левченко. – М. : Издат. дом МЭИ, 2007. – 494 с.
3. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Михеев. – М. : Маршрут, 2003. – 416 с.
4. Моделирование зависимости ветрового напора на пластически обжатые сталеалюминиевые неизолированные провода АСВП СТО 71915393-ТУ 120-2012 с площадью сечения алюминиевых проволок 371–461 мм<sup>2</sup> : отчет о НИР / Волгоград. гос. техн. ун-т ; рук. темы Л. М. Гуревич. – Волгоград, 2017. – 57 с. – Режим доступа: [http://energoserwise.com/files/vetrovoe\\_vozdeistvie\\_na\\_ASVP\\_ASVT.pdf](http://energoserwise.com/files/vetrovoe_vozdeistvie_na_ASVP_ASVT.pdf).

**СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА И ТЕПЛОНАСОСНЫХ  
УСТАНОВОК ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА**

**Е. Б. Бобров**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель А. В. Овсянник

Альтернативой установки электродкотлов на ТЭЦ и котельных является внедрение систем электроотопления и электробойлеров непосредственно у потребителей.

При этом установка систем электроотопления и электробойлеров взамен электродкотлов на районных котельных однозначно принесет экономический эффект за счет:

- ликвидации потерь в теплотрассах;
- снижения расхода электроэнергии на привод сетевых насосов.

В то же время в последнее десятилетие в нашей стране наблюдается значительный интерес к тепловым насосам (ТН). Наибольшее распространение получили ТН парокомпрессионного типа с приводом от электродвигателя. Они отличаются компактностью, простотой, пожаробезопасностью, низким уровнем шума и повышенной надежностью. Для индивидуального теплоснабжения жилого дома с использованием электроэнергии ТН парокомпрессионного типа является оптимальным источником теплоты.

Для систем теплоснабжения, использующих ТН, традиционные радиаторы не подходят, так как они рассчитаны на температуру горячей воды 95–105 °С. При температуре горячей воды 40–50 °С предпочтительно применение систем панельно-лучистого отопления (теплые полы), которые обеспечивают в современных условиях наивысший тепловой комфорт за счет эффекта саморегулирования, который тем действеннее, чем меньше разница между температурой теплоотдающей поверхности и реальной температурой воздуха регулируемой среды [1].

С точки зрения потребителя большой интерес представляет не экономия энергоресурсов, а экономия денежных средств и повышение качества микроклимата. Таким образом, необходимо произвести сравнение различных систем отопления с точки зрения экономического эффекта. При этом система отопления «теплый пол» при сравнительно одинаковых экономических затратах выглядит более предпочтительной в связи с более комфортным распределением температуры в помещении.

Для сравнения различных схем индивидуального теплоснабжения с использованием тепловой энергии выберем объект для исследования. Примем в качестве объекта для исследования жилой дом размерами 10 × 10 м, высотой потолка 2,8 м.

Сопротивления теплопередачи не менее нормативных. Площадь остекления 20 %. В доме проживает семья из четырех человек.

Характеристики ограждающих конструкций:

– стены из газосиликатных блоков плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> и толщиной 0,3 м с утеплением минватой плотностью 100 кг/м<sup>3</sup> и толщиной 0,05 м. Внутренняя поверхность оштукатурена и окрашена, наружный фасад – легкая штукатурка;

– чердачные перекрытия выполнены деревянными балками сечением 100 × 200 мм с шагом 60 см, утеплитель между лагами минвата плотностью 20–35 кг/м<sup>3</sup>, сверху по лагам дополнительное утепление 5 см. Потолок черновой из доски толщиной 25 мм, чистовой из гипсокартона толщиной 12,5 мм. Чердак холодный, вентилируемый;

– полы железобетонные по грунту толщиной 10 см, и утепленные экструдированным пенополистиролом толщиной 5 см. Мостики холода ликвидированы путем перекрытия стен и утеплителя пола;

– остекление – энергосберегающий стеклопакет с сопротивлением теплопередаче 1,0 м<sup>2</sup> · град/Вт.

Термическое сопротивление теплопередачи наружных стен и кровли рассчитывается по формуле [2], м<sup>2</sup> · °С/Вт:

$$R_{\text{огр}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} + \sum \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{вн}}$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха к внутренней поверхности ограждения, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $\alpha_{\text{нар}}$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждения к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $\delta$  – толщина слоя ограждения, м;  $\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициент теплопередачи слоя ограждения, Вт/(м · °С).

Затраты энергии на компенсацию теплопотерь через наружные ограждения определим по формуле [2]:

$$\sum Q_{\text{огр}} = \beta \sum \frac{1}{R_{\text{огр}}} F_{\text{огр}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) N_{\text{от}}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий дополнительные теплопотери;  $F_{\text{огр}}$  – площадь наружных ограждений, м<sup>2</sup>;  $t_{\text{вн}}, t_{\text{нар}}$  – температуры внутри и снаружи здания, °С ( $t_{\text{нар}}$  согласно [3]);  $N_{\text{от}}$  – продолжительность отопительного периода, ч.

Для укрупненных расчетов не будем отдельно учитывать вентиляцию санузлов и кухни, а рассчитаем весь расход воздуха по жилой площади помещения с периодическим проветриванием. Затраты энергии на вентиляцию определим по формуле [4]:

$$\sum Q_{\text{вент}} = \frac{AF_{\text{пом}}\rho c_p (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) N_{\text{от}}}{3600}, \quad (3)$$

где  $A$  – объем воздуха на 1 м<sup>2</sup> жилых помещений в час, м<sup>3</sup>/ч [4, приложение Ф];  $F_{\text{пом}}$  – площадь жилых помещений, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С).

На 01.03.2020 г. тарифы на электроэнергию и природный газ составляют:

1) 0,0374 р./кВт · ч – для нужд отопления жилых домов, не оборудованных централизованными системами тепло- и газоснабжения, наличие отдельного прибора учета;

2) 0,0834 р./кВт · ч – для нужд отопления жилых домов с электроплитами, не оборудованных централизованными системами тепло- и газоснабжения, отсутствие отдельного прибора учета;

3) 0,1901 р./кВт · ч – тариф для населения;

4) 0,209 р./кВт · ч – тариф, обеспечивающий 100%-ю компенсацию затрат на производство и транспорт электроэнергии;

5) 0,1205 р./м<sup>3</sup> – тариф на природный газ для населения в отопительный период;

6) 0,4421 р./м<sup>3</sup> – тариф на природный газ, обеспечивающий 100%-ую компенсацию затрат.

*Вариант 1. Электрокотел и электрорадиаторы (с использованием систем рекуперации воздуха и без нее)*

С точки зрения электротехники и теплотехники энергетическая эффективность отопления при помощи водяного электрокотла и электроконвекторов одинаковая.

Однако с практической точки зрения у отопления электрорадиаторами есть ряд преимуществ:

1. Простота системы и низкие капитальные затраты (стоимость электрорадиатора и водяного радиатора сопоставима, стоимость электропроводки ниже стоимости трубной разводки, нет необходимости в насосе и котле, распределительной гребенке).

2. Отсутствие воды и, как следствие, отсутствие опасности размораживания системы, возможность периодической работы отопления.

В утепленном доме основное количество теплопотерь приходится на вентиляцию для поддержания здорового микроклимата в помещении. Следовательно, рекомендуется установка рекуператора теплоты, что позволит снизить расход тепла на нагрев воздуха на 60 %.

Расчет теплопотерь и потребления электроэнергии произведем по формулам (1)–(3), подставив соответствующие температуры ограждающих конструкций. Результаты приведем в сводной табл. 2.

*Вариант 2. Отопление при помощи системы ТН–«теплый пол» (с использованием систем рекуперации воздуха и без нее)*

Энергетическая эффективность ПТН характеризуется коэффициентом преобразования энергии [22]:

$$\mu_{\text{птн}} = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{к}}}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{п}}$  – произведенная теплота, кВт;  $Q_{\text{к}}$  – мощность в тепловом эквиваленте, затраченная на привод компрессора, кВт.

Действительный коэффициент преобразования реального цикла можно рассчитать по формуле [22]:

$$\mu_{\text{птн}} = \mu_{\text{ид}} \varphi, \quad (5)$$

где  $\mu_{\text{ид}}$  – коэффициент преобразования идеального цикла Карно;  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий реальные процессы в ПТН.

$$\mu_{\text{ПТН}} = \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{о}}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{к}}$  и  $T_{\text{о}}$  – температура кипения и конденсации рабочего тела, К.

$$T_{\text{к}} = 273 + (t_{\text{w}2} + (5 - 10)); \quad (7)$$

$$T_{\text{о}} = 273 + (t_{\text{s}2} + (2 - 5)), \quad (8)$$

где  $t_{\text{w}2}$ ,  $t_{\text{s}2}$  – температуры горячего источника теплоты (нагреваемой воды) на выходе из конденсатора и холодного источника теплоты (наружного воздуха) на выходе из испарителя ПТН.

Практические значения  $\varphi$  составляют 0,55–0,70, для мелких тепловых насосов примем  $\varphi = 0,7$ .

Температура в подающем трубопроводе при минимальной температуре наружного воздуха 44/40 °С (перепад не должен превышать 5 °С) при температуре теплого пола 27 °С.

Произведем расчет зависимости коэффициента трансформации  $\mu$  ПТН от перепада температур между нагретой водой ( $t_{\text{w}2}$ ) и наружным воздухом ( $t_{\text{s}2}$ ), а результаты расчета приведем в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимость коэффициента преобразования  $\mu$  ПТН от температуры наружного воздуха**

Температура наружного воздуха, °С	Температура теплоносителя средняя, °С	Температура кипения, К	Температура конденсации, К	$\mu_{\text{ид}}$	$\mu_{\text{ПТН}}$
8	35,00	276	313	8,46	5,92
4	35,88	272	314	7,50	5,25
–1	36,97	267	315	6,57	4,60
–5	37,84	263	316	5,98	4,18
–10	38,94	258	317	5,38	3,76
–15	40,03	253	318	4,89	3,42
–20	41,13	248	319	4,49	3,14
–24	42,00	244	320	4,21	2,95

Общие результаты расчета приведенных затрат на теплоснабжение при разных тарифах, различных схемах с учетом первоначальных ориентировочных капитальных затрат при условии самостоятельного монтажа приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты расчета приведенных затрат на теплоснабжение

Схема отопления	Затраты электро-энергии, кВт · ч (м <sup>3</sup> )	Капитальные вложения, р.	Годовые затраты на электро-энергию, р.	Приведенные затраты, р./год		
				10 лет	15 лет	20 лет
Тариф 0,0374 р./кВт · ч						
Электрорадиаторы без рекуператоров	12643	1600	473	633	580	553
Электрорадиаторы с рекуператорами	9786	3260	366	692	583	529
ТП без рекуператоров	12499	2300	467	697	620	582
ТП с рекуператорами	9657	4000	361	761	628	561
ТН без рекуператоров	3590	6800	134	814	587	474
ТН с рекуператорами	2969	8800	113	993	700	553
Тариф 0,0834 р./кВт · ч						
Электрорадиаторы без рекуператоров	12643	1300	772	902	859	837
Электрорадиаторы с рекуператорами	9786	2960	534	830	731	682
ТП без рекуператоров	12499	2000	760	960	893	860
ТП с рекуператорами	9657	3700	523	893	770	708
ТН без рекуператоров	3590	6500	17	667	450	342
ТН с рекуператорами	2969	8500	-30	820	537	395
Тариф 0,1901 р./кВт · ч						
Электрорадиаторы без рекуператоров	12643	1100	2403	2513	2476	2458
Электрорадиаторы с рекуператорами	9786	2800	1860	2140	2047	2000
ТП без рекуператоров	12499	2000	2376	2576	2509	2476
ТП с рекуператорами	9657	3700	1836	2206	2083	2021
ТН без рекуператоров	3590	6500	682	1332	1115	1007
ТН с рекуператорами	2969	8500	575	1425	1142	1000
Тариф 0,209 р./кВт · ч						
Электрорадиаторы без рекуператоров	12643	1100	2642	2752	2716	2697
Электрорадиаторы с рекуператорами	9786	2800	2045	2325	2232	2185
ТП без рекуператоров	12499	2000	2612	2812	2746	2712
ТП с рекуператорами	9657	3700	2018	2388	2265	2203
ТН без рекуператоров	3590	6500	750	1400	1184	1075
ТН с рекуператорами	2969	8500	621	1471	1187	1046

Окончание табл. 2

Схема отопления	Затраты электроэнергии, кВт · ч (м <sup>3</sup> )	Капитальные вложения, р.	Годовые затраты на электроэнергию, р.	Приведенные затраты, р./год		
				10 лет	15 лет	20 лет
Газ природный						
Тариф 0,1205 р./м <sup>3</sup>						
ТП без рекуператоров	2667	5500	321	971	788	696
ТП с рекуператорами	2206	7500	266	1116	866	741
Радиаторы без рекуператоров	2042	6000	246	946	746	646
Радиаторы с рекуператорами	1580	8000	190	1090	824	690
Тариф 0,4421 р./м <sup>3</sup>						
ТП без рекуператоров	2667	5500	1179	1829	1646	1554
ТП с рекуператорами	2206	7500	975	1825	1575	1450
Радиаторы без рекуператоров	2042	6000	903	1603	1403	1303
Радиаторы с рекуператорами	1580	8000	699	1599	1332	1199

На основании вышеприведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При тарифе на электроэнергию на отопление и ГВС при условии подключения отдельного счетчика наиболее выгодной схемой на всех временных отрезках является применение электрорадиаторов без систем рекуперации воздуха. С учетом возможности снижения температуры во время отсутствия людей такая схема является самой оптимальной для потребителя, ее применение значительно дешевле даже природного газа по субсидируемому тарифу.

2. При тарифе на электроэнергию на отопление и ГВС при условии отсутствия отдельного счетчика наиболее выгодной схемой на всех временных отрезках является применение тепловых насосов без систем рекуперации воздуха. На отрезках времени в 15 и 20 лет такая схема обладает минимальными затратами.

3. Отапливаться по тарифам на общих основаниях электроэнергией не выгодно по сравнению с природным газом по субсидируемому тарифу во всех временных промежутках, однако при полной оплате за природный газ применение тепловых насосов оправдано уже на 10-летнем промежутке времени. Применение прямого электронагрева без систем интеллектуального регулирования в условиях тарифов, обеспечивающих возмещение затрат, не выгодно.

#### Литература

1. Лунева, С. К. К вопросу применения тепловых насосов / С. К. Лунева, А. С. Чистович, И. Х. Эмиров // Техн.-технол. проблемы сервиса. – 2013. – № 4 (26). – С. 45–52.
2. ТКП 45-2.04-43–2006. Строительная теплотехника (с изм.).
3. СНБ 2.04.02–2000. Строительная климатология (с изм.).
4. СНБ 4.02.01-03–2015. Отопление и вентиляция и кондиционирование воздуха.
5. Проценко, В. П. Коэффициент преобразования парокомпрессионных тепловых насосов / В. П. Проценко, В. А. Радченко // Теплоэнергетика. – 1998. – № 8. – С. 32–42.