



УДК 697.7:628.8

М. В. БОДРОВ, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой отопления и вентиляции;
М. С. МОРОЗОВ, ст. преп. кафедры отопления и вентиляции;
А. А. СМЫКОВ, канд. техн. наук, ст. преп. кафедры отопления и вентиляции

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АКТИВНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-85;
эл. почта: tes84@inbox.ru

Ключевые слова: отопление; лучистое отопление; водяное отопление; инфракрасное излучение; излучатель; энергоэффективность; энергосбережение; экономическое обоснование.

Проведен анализ определения параметров энергоэффективности активных систем обеспечения параметров микроклимата на примере применения систем лучистого отопления в крупнообъемном производственном здании.

В связи с тем, что тарифы на тепловую энергию неуклонно растут, а в нормативном поле все чаще появляются нормативные документы, призывающие к применению энергоэффективных технологий, задачей, обладающей высокой актуальностью, является снижение энергозатрат при обеспечении теплотой производственных зданий. Традиционные схемы водяного и воздушного отопления зачастую оказываются чрезмерно затратными, применение таких типов отопления для крупнообъемных производственных зданий не является экономически обоснованным технологическим решением. Благодаря широкому спектру научных исследований в области теплотехники каждый год на рынке появляются все более совершенные технологии, устройства и системы устройств. Одним из наиболее репрезентативных примеров внедрения современных технологий можно назвать системы лучистого отопления. Проведя анализ практики применения подобных систем, можно сделать вывод о ряде их преимуществ по сравнению с традиционными системами отопления (конвективными, воздушными и др.) [1]. Во многих случаях использование лучистых систем отопления является более энергоэффективным решением для отопления крупнообъемных производственных помещений. Однако следует отметить, что действующие нормативные документы в области отопления не учитывают особенности работы таких систем – они получили недостаточно широкое распространение на данный момент.

Для подробного исследования методов обоснования энергоэффективности активных систем обеспечения параметров микроклимата производственных помещений был проведен анализ определения параметров энергоэффективности на примере склада сухого хранения с административно-бытовой частью ООО «Флайг+Хоммель» в г. Заволжье Нижегородской области [2]. Система отопления данного здания выполнена на базе водяных инфракрасных излучателей марок *Helios 750* и *Flower 125*, представленных на рис. 1, и сконструирована на



основании методик, разработанных коллективом авторов. Общий вид вновь возведенного здания приведен в [1, 2].

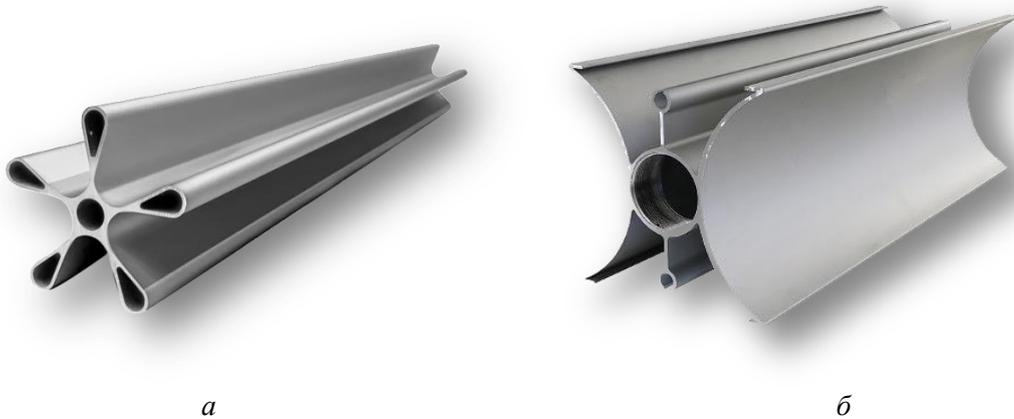


Рис. 1. Общий вид профилей *Flower 125* (а) и *Helios 750* (б)

Температура воздуха в рабочей зоне $t_{в,р}$, °С принимается согласно требованиям ГОСТ [3]. Категория работ по уровню энергозатрат – Пб, следовательно, температура внутреннего воздуха в рабочей зоне принимается в диапазоне $t_{в,р} = 17–19$ °С. Для расчета мощности конвективной системы отопления принимаем $t_{в,р} = 18$ °С. В рабочей зоне производственных помещений, которые оборудованы системой отопления на базе инфракрасных излучателей, допускается понижение температуры внутреннего воздуха $t_{в,р}$ на величину до 4 °С по сравнению со значениями, предусмотренными СП 60.13330.2020 [4]. При определении мощности лучистой системы отопления принимаем $t'_{в,р} = 14$ °С.

Сравнительный анализ конвективной и лучистой систем отопления проведен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика конвективной и лучистой систем отопления

Номер параметра	Сравниваемый параметр	Конвективная система отопления	Лучистая система отопления
1	Температура воздуха рабочей зоны $t_{в,р}$, °С	18	14
2	Требуемое сопротивление теплопередаче стены $R_0^{тр ст}$, м ² ·°С/Вт	1,915	1,748
3	Требуемое сопротивление теплопередаче покрытия $R_0^{тр покр}$, м ² ·°С/Вт	2,644	2,435
4	Сопротивление теплопередаче дверей и ворот $R_0^{тр дв}$, м ² ·°С/Вт	0,473	0,433
5	Требуемая мощность системы отопления, $Q_{от}$, Вт	271559	261942



Затраты теплоизоляции $K_{ут}$, руб., вычисляются по формуле [3]:

$$K_{ут} = C_{ут} V_{ут}, \text{ руб.}, \quad (1)$$

где $C_{ут}$ – удельная стоимость тепловой изоляции с работами по его установке (в деле), руб./м³.

Ее значения на стадии разработки ТЭО или бизнес-плана проекта принимаются по справочным данным; $V_{ут}$ – суммарный объем тепловой изоляции в ограждающих конструкциях здания, м³. Его можно определить по выражению [5]:

$$V_{ти} \approx 0,8 \sum (\lambda_{ут} R_i A_i / r_i), \text{ руб.} \quad (2)$$

где $\lambda_{ут}$ – теплопроводность используемой тепловой изоляции, Вт/(м·°C), принимается по данным производителя;

r_i – коэффициент теплотехнической однородности соответствующего ограждения; A_i и R_i – площадь, м² и сопротивление теплопередаче, м²·°C/Вт, ограждающих конструкций, подлежащих тепловой изоляции: наружных стен, перекрытия над неотапливаемым подвалом или техническим подпольем, пола по грунту, чердачного перекрытия или покрытия и др.

Значения A_i , принимаются по архитектурно-строительным чертежам, R_i – по нормативным документам.

Результаты расчета капитальных затрат на обустройство тепловой изоляции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Капитальные затраты на устройство теплоизоляции для помещения, оборудованного конвективной и лучистой системами отопления

Тип утепляемого ограждения	$\lambda_{ут}$, Вт/(м·°C)	R_i , (м ² ·°C)/Вт	δ_i , м	A_i , м ²	r_i	$V_{ут}$, м ³	$C_{ут}$, руб./м ³	$K_{ут}$, руб.
Конвективное отопление								
Стены	0,041	1,915	0,079	2484	0,70	222,89	8 000	5 086 809
Покрытие	0,046	2,644	0,122	4032	0,95	412,96		
$\Sigma V_{ти}$, м ³						635,85		
Лучистое отопление								
Стены	0,041	1,748	0,072	2484	0,70	203,46	8 000	4 670 163
Покрытие	0,046	2,435	0,112	4032	0,95	380,32		
$\Sigma V_{ти}$, м ³						583,77		

На стадии технико-экономического обоснования (ТЭО) затраты тепловой энергии в отопительный период при известной мощности системы отопления $\Sigma Q_{от}$, кВт, определяются по зависимости [5]:

$$\mathcal{E}_{т.от} = 0,0864 \cdot \frac{\Sigma Q_{от}}{4,19 \cdot (t_{в} - t_{н})} \cdot \text{ГСОП} \cdot C_{т}, \text{ руб./год}, \quad (3)$$

где $0,0864 = 86\,400 \cdot 10^{-6}$, 86 400 – число секунд в сутках;



C_T – стоимость тепловой энергии, руб./Гкал; для г. Заволжье принято значение 1467,3 руб./Гкал (без НДС).

Для конвективной системы отопления:

$$\mathcal{E}_{\text{т.от}}^{\text{к}} = 0,0864 \cdot \frac{271,559}{4,19 \cdot (18 - (-30))} \cdot 4577,1 \cdot 1467,3 = 783486 \text{ руб./год.}$$

Для лучистой системы отопления:

$$\mathcal{E}_{\text{т.от}}^{\text{л}} = 0,0864 \cdot \frac{261,942}{4,19 \cdot (14 - (-30))} \cdot 3741,1 \cdot 1467,3 = 673862 \text{ руб./год.}$$

Совокупные дисконтированные затраты СДЗ, приведенные к концу расчетного срока (10 лет), определяются по следующей формуле:

$$\text{СДЗ} = K \cdot (1 + p/100)^T + \sum_{i=1}^T \mathcal{E}_i \cdot (1 + p/100)^i, \text{ руб.}, \quad (4)$$

где K – капитальные единовременные затраты, руб., \mathcal{E}_i – суммарные годовые эксплуатационные затраты за i -й год, руб./год; p – норма дисконта, %.

В расчетах норму дисконта принимать на уровне не ниже ставки рефинансирования ЦБ РФ, которая на конец 2023 года равна 16 %.

Результаты расчета по формуле (4) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение технико-экономических показателей

Тип системы	$K \cdot (1 + p/100)^T$, руб.	$\sum_{i=1}^T \mathcal{E}_i \cdot (1 + p/100)^i$, руб.	СДЗ, руб.
Конвективное отопление	22 440 129	19 377 894	41 818 022
Лучистое отопление	20 602 122	16 666 562	37 268 685
		Разница, руб.	4 549 337
		Разница, %	10,88

Таким образом, можно сделать вывод, что с использованием лучистой системы отопления вместо традиционной конвективной можно получить преимущество по совокупным дисконтированным затратам за 10 лет в 4,5 млн руб. или 10,88 %, или 1137 руб./м².

Обоснование экономической эффективности использования систем лучистого отопления на основе возобновляемых источников энергии в отопительный сезон может быть проведено с использованием общепринятой методологии, утвержденной Госстроем РФ [6]. Методика используется представителями ресурсоснабжающих организаций для расчета нормативного расхода тепловой энергии на нужды отопления. Данный расчет может быть обоснованием для заключения энергосервисного контракта.

Тепловой поток на отопление здания может быть определен по формуле укрупненных расчетов [6]:

$$Q_{\text{отмах}} = a \cdot q_o \cdot V_n \cdot (t_b - t_o) \cdot k_{\text{пт}} \cdot 10^{-6}, \text{ МВт}, \quad (5)$$



где a – поправочный коэффициент, учитывающий район строительства здания [6];
 q_o – удельная отопительная характеристика здания, Вт/(м³·°С) [6];
 V_n – объем здания по наружному обмеру выше отметки ±0,000, м³;
 $k_{пт}$ – повышающий коэффициент для учета потерь теплоты теплопроводами, проложенными в неотапливаемых помещениях [6];
 t_b – средняя расчетная температура внутреннего воздуха, °С;
 t_o – расчетная температура наружного воздуха для проектирования, °С.

Для конвективной системы отопления:

$$Q_{o\max}^k = 0,98 \cdot 0,44 \cdot 36288 \cdot (18 - (-30)) \cdot 1,05 = 788628 \text{ Вт.}$$

Для лучистой системы отопления:

$$Q_{o\max}^l = 0,98 \cdot 0,44 \cdot 36288 \cdot (14 - (-30)) \cdot 1,05 = 722909 \text{ Вт.}$$

Величина нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления Q_o , Гкал, определяется по формуле [6]:

$$Q_o = Q_{o\max} \frac{(t_b - t_{cp.\phi})}{(t_b - t_o)} \cdot z \cdot 24, \text{ Гкал,} \quad (6)$$

где $t_{cp.\phi}$ – средняя температура наружного воздуха за период, °С;
 z – продолжительность работы системы отопления за период, сут.;
 24 – продолжительность работы системы отопления в сутки, ч.

В первую очередь проводится расчет нормативного потребления теплоты на нужды отопления по месяцам со средней суточной температурой наружного воздуха менее +8 °С [7]. Во вторую очередь проводится расчет отдельно для рабочего, дежурного и переходного режимов. Результаты расчетов приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Продолжительность режимов работы системы отопления

Режим	Примечание	Продолжительность работы в сутки, ч	t_b , °С
Рабочий режим	Лучистое отопление	10	14
	Конвективное отопление	10	18
Дежурный режим	Лучистое отопление	13	10
	Конвективное отопление	11	14
Переходный режим	Лучистое отопление	1	14
	Конвективное отопление	3	18

Анализ годового нормативного потребления тепловой энергии показал, что при использовании лучистого отопления можно достичь значения энергосбережения 22,13 %, при использовании режима ожидания в нерабочее время эффект от использования системы лучистого отопления достигнет 27,19 %, а максимальная разница между постоянным режимом работы конвективного отопления и режима работы лучистого отопления с использованием перехода в режим ожидания составит 37,37 %.

В качестве вывода отметим, что на основании проведенного сравнительного анализа по двум различным методикам была доказана экономическая эффективность применения лучистых систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей. По методике определения совокупных



дисконтированных капитальных и эксплуатационных затрат общий эффект от применения лучистой системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей составил 10,88 %. При расчете по методике определения годовых потоков теплоты рассчитанный эффект составил 37,37 %.

Таблица 5

Расчет нормативного потребления теплоты на нужды отопления в отопительный период

Наименование	Примечание	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Окт.	Ноя.	Дек.	Год	Эффект, %
$t_{ср,ф}, ^\circ\text{C}$	Волжская ГМО*	-8,5	-4,1	-0,4	6,5	7,7	-0,3	-1,6	-	-
$Q_o, \text{Гкал}$	Конвект. отопление	278,53	209,80	193,39	116,97	108,26	186,14	206,01	1299,10	-
	Лучистое отопление	236,49	171,83	151,35	76,29	66,22	145,45	163,96	1011,59	22,13
$z_{р,р}, \text{ч}$	Конвект. отопление	170	200	200	220	230	200	220	1440	-
	Лучистое отопление	170	200	200	220	230	200	220	1440	
$z_{д,р}, \text{ч}$	Конвект. отопление	557	452	524	478	491	500	502	3504	-
	Лучистое отопление	523	412	484	434	445	460	458	3216	
$z_{п,р}, \text{ч}$	Конвект. отопление	17	20	20	22	23	20	22	144	-
	Лучистое отопление	51	60	60	66	69	60	66	432	
$Q_{о\ р,р}, \text{Гкал}$	Конвект. отопление	63,64	62,44	51,99	35,74	33,47	51,70	60,92	359,90	22,61
	Лучистое отопление	54,04	51,14	40,69	23,31	20,47	40,40	48,48	278,53	
$Q_{о\ д,р}, \text{Гкал}$	Конвект. отопление	166,24	105,35	98,46	45,98	39,61	92,93	100,93	649,50	21,91
	Лучистое отопление	145,57	90,03	76,99	23,63	15,95	72,75	82,26	507,20	
$Q_{о\ п,р}, \text{Гкал}$	Конвект. отопление	19,09	18,73	15,60	10,72	10,04	15,51	18,27	107,97	74,21
	Лучистое отопление	5,40	5,11	4,07	2,33	2,05	4,04	4,85	27,85	
$Q_{о\ смеш}, \text{Гкал}$	Конвект. отопление	248,97	186,52	166,04	92,45	83,11	160,14	180,13	1117,37	27,19
	Лучистое отопление	205,01	146,29	121,74	49,28	38,47	117,20	135,60	813,58	

Примечание: *гидрометеорологическая обсерватория, расположена в г. Городце (Нижегородская обл.); $z_{р,р}$ – продолжительность рабочего режима, ч; $z_{д,р}$ – продолжительность дежурного режима, ч; $z_{п,р}$ – продолжительность переходного режима, ч; $Q_{о\ р,р}$ – потребление тепловой энергии в рабочем режиме, Гкал; $Q_{о\ д,р}$ – потребление тепловой энергии в дежурном режиме, Гкал; $Q_{о\ п,р}$ – потребление тепловой энергии в переходном режиме, Гкал; $Q_{о\ смеш}$ – потребление тепловой энергии в смешанном режиме, Гкал



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бодров, М. В. Исследование теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей для энергоэффективных систем лучистого отопления / М. В. Бодров, Д. А. Кузнецов, А. А. Смыков, А. Е. Руин. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 2. – С. 160–167.
2. Бодров, М. В. Повышение энергоэффективности пассивных систем обеспечения параметров микроклимата в производственных помещениях / М. В. Бодров, А. А. Смыков, А. Ф. Юланова, А. Е. Руин. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 4 (60). – С. 84-89.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.09.88 N 3388 : дата введения 1989-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 95 с. – Текст : непосредственный.
4. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. N 921/пр. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 25 с. – Текст : непосредственный.
5. Самарин, О. Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий / О. Д. Самарин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : АСВ, 2015. – 136 с. – ISBN 978-5-93093-843-2. – Текст : непосредственный.
6. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий. – Москва : АКХ им. К. Д. Памфилова, 2002. – 128 с. – Текст : непосредственный.
7. СП 131.13330.2020. Строительная климатология : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2020 г. N 859/пр : дата введения 25 июня 2021 г. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 110 с. – Текст : непосредственный.

BODROV Mikhail Valerevich, doctor of technical sciences, associate professor, holder of the chair of heating and ventilation; MOROZOV Maksim Sergeevich, senior teacher of the chair of heating and ventilation; SMYKOV Aleksandr Anatolevich, candidate of technical sciences, senior teacher of the chair of heating and ventilation

JUSTIFICATION OF ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE SYSTEMS FOR PROVIDING MICROCLIMATE PARAMETERS IN PRODUCTION PREMISES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Pjinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Тел.: + 7 (831) 430-54-85;
e-mail: tes84@inbox.ru

Key words: heating; radiant heating; water heating; infrared radiation; emitter; energy efficiency; energy saving; economic justification.

An analysis was carried out to determine the energy efficiency parameters of active systems for ensuring microclimate parameters using the example of the use of radiant heating systems in a large-scale industrial building.



REFERENCES

1. Bodrov M. V., Kuznetsov D. A., Smykov A. A., Ruin A. E. Issledovanie teplotekhnicheskikh kharakteristik vodyanykh infrakrasnykh izluchateley dlya energoeffektivnykh sistem luchistogo otopleniya [Investigation of the thermal characteristics of water infrared radiators for energy-efficient radiant heating systems] // Academia. Arkhitektura i stroitelstvo [Academia. Architecture and Construction]. – 2023. – № 2. – P. 160–167.
2. Bodrov M. V., Smykov A. A., Yulanova A. F., Ruin A. E. Povyshenie energoeffektivnosti passivnykh sistem obespecheniya parametrov mikroklimate v proizvodstvennykh pomesheniakh [Improving the energy efficiency of passive systems for providing microclimate parameters in industrial premises] // Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2021. – № 4 (60). – P. 84–89.
3. GOST 12.1.005-88. Obschie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozdukhу rabochey zony [General sanitary and hygienic requirements for the air of the working area] : utverzhd. i vved. v deystvie Postanovleniem Gos. komiteta SSSR po standartam ot 29.09.88 N 3388 : data vved. 1989-01-01. – Moskva : Standartinform, 2008. – 95 p.
4. SP 60.13330.2020 Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha [Heating, ventilation and air conditioning] : utverzhd. Prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khozyaystva RF ot 30 dekabrya 2020 g. N 921/pr. – Moskva : Standartinform, 2021. – 25 p.
5. Samarin O. D. Voprosy ekonomiki v obespechenii mikroklimate zdaniy [Economic issues in ensuring the microclimate of buildings]. 2-e izd., pererab. i dop. – Moscow : ASV, 2015. – 136 p. – ISBN 978-5-93093-843-2.
6. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu raskhodov topliva, elektroenergii i vody na vyrabotku teploty otopitelnymi kotelnymi kommunalnykh teploenergeticheskikh predpriyatii [Methodological guidelines for determining the consumption of fuel, electricity and water for heat generation by heating boilers of municipal thermal power plants]. – Moscow : AKKh im. K. D. Pamfilova, 2002. – 128 p.
7. SP 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya [Building climatology] : svod pravil : utverzhd. Prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khozyaystva RF ot 24 dekabrya 2020 g. N 859/pr : data vved. 25 iyunya 2021 g. – Moscow : Standartinform, 2021. – 110 p.

© М. В. Бодров, М. С. Морозов, А. А. Смыков, 2024

Получено: 03.04.2024 г.