

Исследование экономической эффективности применения системы отопления на базе водяных ИК-излучателей*

* Данная статья является третьей (завершающей) из ранее запланированных трёх научных публикаций, посвящённых изучению теплового режима помещений, оборудованных энергоэффективными инновационными системами лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей.

Рецензия эксперта на статью получена 05.04.2021 [The expert review on the article received on April 5, 2021].

Отопление крупнообъёмных помещений (складов, цехов и пр.) в основном осуществляется традиционными системами отопления: конвективными и воздушными [1]. В свою очередь, применение таких систем отопления несёт за собой ряд недостатков, таких как излишняя подвижность воздушных масс, повышенная запылённость, неравномерность нагрева в рабочей зоне помещения, большой градиент температуры воздуха по высоте помещения и т.д.

Применение систем лучистого отопления решает ряд вышеописанных проблем. Системы лучистого отопления:

- не провоцируют излишней подвижности воздуха, в отличие от системы воздушного отопления;
- позволяют обеспечить более равномерный нагрев рабочей зоны, в отличие от системы конвективного отопления, построенной на базе радиаторов или гладкотрубных регистров;
- обеспечивают меньший градиент температуры воздуха по высоте помещения, чем любой из видов конвективного или воздушного отопления.

Немаловажным аспектом применения систем отопления на базе инфракрасных излучателей (ИИ) является их высокая энергоэффективность. Проблема высокой энергоёмкости российской промышленности отражена в ряде нормативных актов [2, 3]. Системы лучистого отопления позволяют снизить затраты тепловой энергии на величину до 40 % [4, 5], что позволяет говорить о перспективности их применения в качестве мероприятия по повышению энергоэффективности производства.

Снижение потребления теплоты достигается за счёт ряда особенностей систем лучистого отопления, таких как: низкая тепловая инерция; снижение трансмиссионных тепловых потерь через покрытие здания из-за небольшого градиента температуры воздуха по высоте

помещения; снижение температуры воздуха рабочей зоны на зоны на величину до 4°C по сравнению с нормативными значениями, предусмотренными при проектировании конвективных систем отопления [6, 7], что становится возможным за счёт большей плотности потока теплового излучения в помещениях с системой отопления на базе ИИ.

Также стоит отметить, что применение таких систем и значительное сокращение затрат теплоты достигается без снижения уровня теплового комфорта.

Системы лучистого отопления не провоцируют излишней подвижности воздуха, позволяют создать более равномерный нагрев рабочей зоны, а также обеспечивают меньший градиент температуры воздуха по высоте помещения

С точки зрения энергоэффективности самым привлекательным является отопление на базе газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) [13, 14]. В данных системах отсутствует промежуточный теплоноситель, и теплота в помещение подаётся напрямую от первичного энергоносителя — природного газа. Однако применение лучистых систем отопления на базе газовых инфракрасных излучателей строго ограничено. Также стоит учесть, что подключение газа во многих регионах Российской Федерации связано со значительными финансовыми затратами.

Ввиду вышеописанных особенностей ГИИ стоит рассмотреть другой энергоэффективный вид лучистого отопления — отопление на базе водяных инфракрасных излучателей (ВИИ). В качестве отопительных приборов в данных системах используются излучающие панели (рис. 1) или профили (рис. 2).

УДК 697.7. Научная специальность: 05.23.03.

Исследование экономической эффективности применения системы отопления на базе водяных инфракрасных излучателей

М. В. Бодров, д.т.н., заведующий кафедрой; **В. П. Болдин**, к.ф.-м.н., доцент; **А. А. Смыков**, ассистент, кафедра отопления и вентиляции (ОиВ), Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ, г. Нижний Новгород)

Исследование посвящено обоснованию энергетической эффективности применения систем лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей с помощью расчёта нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления в отопительный период, а также изучению теплового режима наружных ограждающих конструкций в отапливаемом помещении.

Ключевые слова: теплофизика, лучистое отопление, водяное отопление, инфракрасное излучение, излучатель, энергоэффективность.

UDC 697.7. Scientific specialty number: 05.23.03.

Study of the economic efficiency of the use of a heating system based on water infrared emitters

M. V. Bodrov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department; **V. P. Boldin**, PhD-M.Sc., Associate Professor; **Al. An. Smykov**, assistant, the Department of Heating and Ventilation, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU, Nizhny Novgorod city)

The study is devoted to the justification of the energy efficiency of the use of radiant heating systems based on water infrared emitters by calculating the standard consumption of thermal energy for heating needs during the heating period, as well as the study of the thermal regime of external enclosing structures in a heated room.

Key words: thermal physics, radiant heating, water heating, infrared radiation, emitter, energy efficiency.

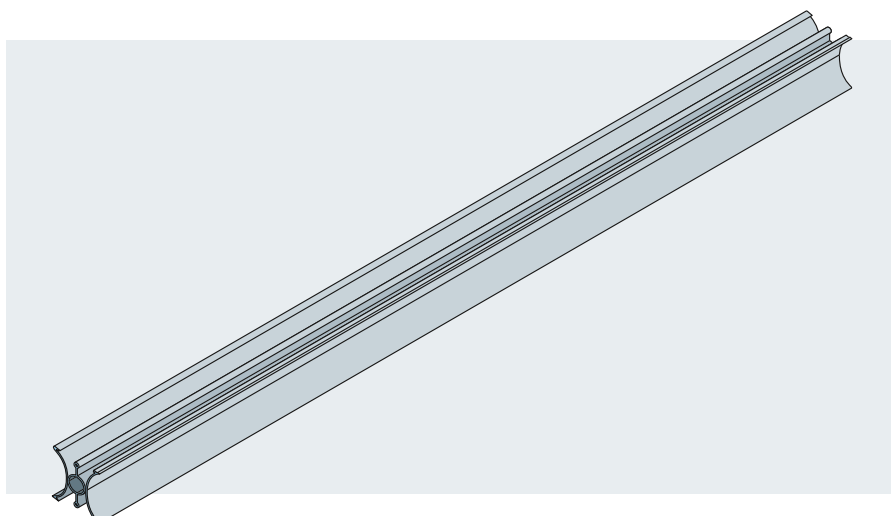


❖ Рис. 1. Водяной инфракрасный излучатель — излучающая панель

Стоит также отметить, что наиболее перспективным ВИИ является именно излучающий профиль, ввиду его меньшей металлоёмкости и большей удельной теплоотдачи. Теплоносителем в таких системах является горячая вода (40–150 °С).

Принцип работы лучистых систем отопления на базе ВИИ основан на передаче теплоты от теплоносителя к отопительному прибору, который, в свою очередь, отдаёт её в объём обслуживаемого помещения преимущественно посредством электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне. Воздух является прозрачной средой для инфракрасного излучения, поэтому нагрев воздуха осуществляется за счёт теплопередачи от нагретых (облучённых) поверхностей помещения. Применение лучистых систем отопления на базе ВИИ в крупнообъёмных помещениях является эффективным и экономически обоснованным [4, 8, 9].

Обоснование экономической эффективности применения систем лучистого отопления на базе ВИИ в течение отопительного сезона можно провести с помощью общепринятой методики [10]. Данную методику используют представители ресурсоснабжающих организаций для расчёта нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления, а значит данный расчёт может являться обоснованием для заключения энергосервисного контракта. В качестве примера было взято здание цеха металлообработки компании «Флайт+Хоммель», расположенного в городе Заволжье ($t_n = -32^\circ\text{C}$ [11]). Основные характеристики объекта исследований: длина — 126 м, ширина от 24 до 33 м (с пристройками), высота по стене — 9 м, высота в коньке — 10 м, площадь цеха — 3456 м², объём по наружному обмеру — 41 472 м³, пол — бетонный монолит, стены — сэндвич-панели.



❖ Рис. 2. Водяной инфракрасный излучатель — излучающий профиль марки Helios 750

Температуру воздуха рабочей зоны $t_{в,р}$ принимаем по нормативной документации. Категория работ по уровню энергозатрат — Пб, следовательно, $t_{в,р} = 17-19^\circ\text{C}$, принимаем $t_{в,р} = 18^\circ\text{C}$. Как уже было сказано, при применении лучистого отопления в рабочей зоне производственных помещений допускается снижение величины $t_{в,р}$ до 4°C по сравнению со значениями, предусмотренными нормативными документами. Для расчёта мощности лучистой системы отопления принимаем температуру $t'_{в,р} = 14^\circ\text{C}$.

Принцип работы лучистых систем отопления на базе ВИИ основан на передаче теплоты от теплоносителя к отопительному прибору, который, в свою очередь, отдаёт её в объём обслуживаемого помещения преимущественно посредством электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне

Тепловой поток на отопление здания может быть определён по формуле укрупнённых расчётов:

$$Q_{\text{оmax}} = a q_o V_n (t_{в} - t_o) k_{\text{пт}} 10^{-6} \text{ МВт}, \quad (1)$$

где a — поправочный коэффициент, учитывающий район строительства здания [10]; q_o — удельная отопительная характеристика здания, Вт/(м³·°С) [10]; V_n — объём здания по наружному обмеру выше отметки $\pm 0,000$ (надземная часть), м³; $k_{\text{пт}}$ — повышающий коэффициент для учёта потерь теплоты теплопроводами, проложенными в неотапливаемых помещениях [10]; $t_{в}$ — средняя расчётная температура внутреннего воздуха, °С; t_o — расчётная температура наружного воздуха для проектирования отопления, °С.

Для конвективной системы отопления:

$$Q_{\text{оmax}}^k = 0,98 \times 0,44 \times 41\,472 \times [18 - (-32)] \times 1,05 = 938\,843 \text{ Вт}.$$

Для лучистой системы отопления:

$$Q_{\text{оmax}}^l = 0,98 \times 0,44 \times 41\,472 \times [14 - (-32)] \times 1,05 = 863\,736 \text{ Вт}.$$

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

$$Q_o = Q_{\text{оmax}} \frac{t_{в} - t_{\text{ср.ф}}}{t_{в} - t_o} z 24, \quad (2)$$

где $t_{\text{ср.ф}}$ — средняя температура наружного воздуха за расчётный период, °С; z — продолжительность работы системы отопления за расчётный период, сут.; 24 — продолжительность работы системы отопления в сутки [ч], которая в случае расчёта нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления для системы с несколькими режимами работы принимается равной продолжительности режима работы в целом.

Для начала делаем расчёт нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления по месяцам со средней суточной температурой наружного воздуха не более +8°C [11], после чего проводим расчёт отдельно для рабочего, дежурного и переходного режимов. Результаты расчёта приведены в табл. 1 и 2.

Для проведения комплекса исследований тепловых режимов помещений с системой отопления на базе водяных инфракрасных излучателей была создана Лаборатория лучистого отопления (рис. 3) при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ). В основу Лаборатории лучистого отопления легла экспериментальная установка, позволяющая производить широкий спектр исследований теплотехнических характеристик водяных инфракрасных излучателей [4].

В качестве отопительных приборов в данном исследовании применялись излучающие профили марки Flower 125, разработанные в сотрудничестве с компанией «Флайг+Хоммель» (рис. 4).

Объектом исследования теплового режима стала вертикальная наружная ограждающая конструкция — стена Лаборатории лучистого отопления ННГАСУ. Данная стена является также частью лабораторной установки и оборудована системой, позволяющей варьировать толщину утеплителя. В момент проведения эксперимента были установлены панели из утеплителя марки «Пеноплэкс Основа» [коэффициент теплопроводности $\lambda_B = 0,032$ Вт/(м·°C)] толщиной $\delta = 0,05$ м.

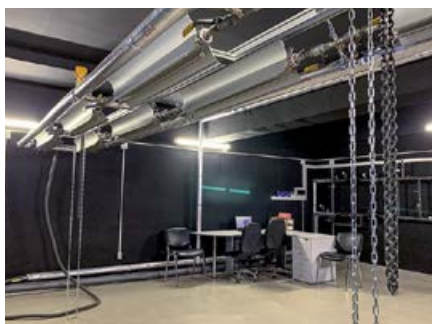


Рис. 3. Лаборатория лучистого отопления

Продолжительность режимов работы системы отопления

табл. 1

Режим	Примечание	Продолжительность работы в сутки, ч	$t_{в}, ^\circ\text{C}$
Рабочий режим	Лучистая система	10	14
	Конвекционная система	10	18
Дежурный режим	Лучистая система	13	10
	Конвекционная система	11	14
Переходный режим	Лучистая система	1	14
	Конвекционная система	3	18

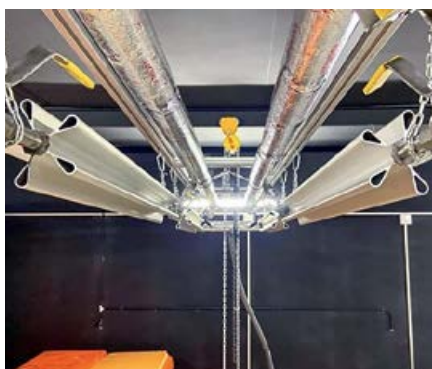


Рис. 4. Профили Flower 125, разработанные в сотрудничестве с «Флайг+Хоммель»

В качестве измерительного оборудования был использован измеритель теплового потока марки «Теплогрф», который включает в себя модуль № 02 и датчики, позволяющие измерять температуру поверхностей и окружающей среды. Измерения проводились в соответствии с МДС 23-1.2007 [12]. Схема эксперимента приведена на рис. 5.

Эксперименты проводились в два этапа: на первом этапе для отопления помещения использовалась подвесная уста-

новка с шестью водяными инфракрасными излучателями марки Flower 125 длиной по 1 п.м.; на втором этапе помещение отапливалось двумя биметаллическими радиаторами марки Calidor 500 по 12 секций каждый.

В ходе экспериментов были выбраны два дня, сходные по климатическим условиям, кроме того, были уравнены температура подачи теплоносителя, а также мощности лучистой и конвективной систем отопления.

Результаты исследований представлены на рис. 6.

Расчёт нормативного потребления тепловой энергии на нужды отопления в отопительный период

табл. 2

Параметр	Примечание	Янв	Фев	Мар	Апр	Окт	Ноя	Дек	Год
$t_{ср.ф}$	Волжская ГМО	-8,5	-4,1	-0,4	6,5	7,7	-0,3	-1,6	—
Q_o , Гкал	Лучистая система	270,27	196,38	172,97	87,18	75,68	166,23	187,39	1156,10
	Конвекционная система	318,32	239,78	221,02	133,68	123,72	212,73	235,44	1484,69
$z_{р.р}$, ч	Лучистая система	170	200	200	220	230	200	220	1440
	Конвекционная система	170	200	200	220	230	200	220	1440
$z_{д.р}$, ч	Лучистая система	523	412	484	434	445	460	458	3216
	Конвекционная система	557	452	524	478	491	500	502	3504
$z_{п.р}$, ч	Лучистая система	51	60	60	66	69	60	66	432
	Конвекционная система	17	20	20	22	23	20	22	144
$Q_{ор.р}$, Гкал	Лучистая система	61,76	58,45	46,50	26,64	23,39	46,18	55,41	318,32
	Конвекционная система	72,73	71,36	59,41	40,85	38,25	59,09	69,62	411,31
$Q_{од.р}$, Гкал	Лучистая система	166,37	102,90	87,98	27,01	18,23	83,15	94,02	579,66
	Конвекционная система	189,99	120,40	112,53	52,55	45,26	106,20	115,35	742,28
$Q_{оп.р}$, Гкал	Лучистая система	6,18	5,84	4,65	2,66	2,34	4,62	5,54	31,83
	Конвекционная система	21,82	21,41	17,82	12,25	11,47	17,73	20,89	123,39
$Q_{о.смеш}$, Гкал	Лучистая система	234,30	167,19	139,13	56,31	43,97	133,94	154,97	929,81
	Конвекционная система	284,54	213,17	189,76	105,65	94,99	183,02	205,86	1276,99

* Примечание: $z_{р.р}$ — продолжительность в рабочем режиме, ч; $z_{д.р}$ — продолжительность дежурного режима, ч; $z_{п.р}$ — продолжительность переходного режима, ч; $Q_{ор.р}$ — потребление тепловой энергии в рабочем режиме, Гкал; $Q_{од.р}$ — потребление тепловой энергии в дежурном режиме, Гкал; $Q_{оп.р}$ — потребление тепловой энергии в переходном режиме, Гкал; $Q_{о.смеш}$ — потребление тепловой энергии в смешанном режиме, Гкал.

По итогам анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы:

- отсутствие облучения наружной стены сказалось на показаниях температурных датчиков, расположенных на ней (полученные значения снизились);
- температурный напор и, как следствие, тепловой поток в ходе первого этапа эксперимента были выше, чем в ходе второго этапа;
- температурный напор между температурой наружной поверхности и температурой внутреннего воздуха в ходе первого этапа эксперимента был выше, чем в ходе второго этапа, что говорит о более высокой относительной температуре наружной поверхности ограждения.

Выводы

1. Анализ годового нормативного потребления тепловой энергии показал, что при использовании лучистого отопления можно добиться величины энергосбережения в 22,13 %, а при использовании дежурного режима в нерабочее время эффект от применения системы лучистого отопления достигнет 27,19 %. Максимальная разница между постоянным режимом работы конвективного отопления и режимом работы лучистого отопления с использованием перехода в дежурный режим составит 37,37 %.

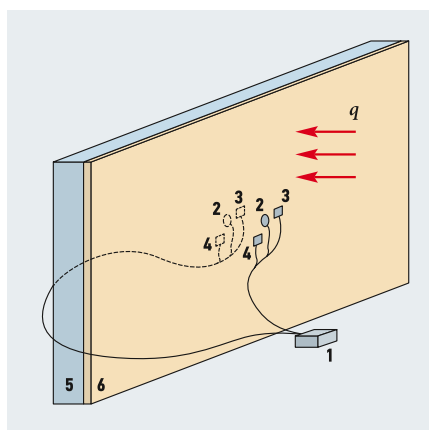


Рис. 5. Испытательная установка (1 — прибор «Теплограф»; 2 — датчики плотности теплового потока; 3 — датчики температуры поверхности; 4 — датчики температуры воздуха; 5 — стена из силикатного кирпича; 6 — утеплитель «Пеноплекс Основа»)

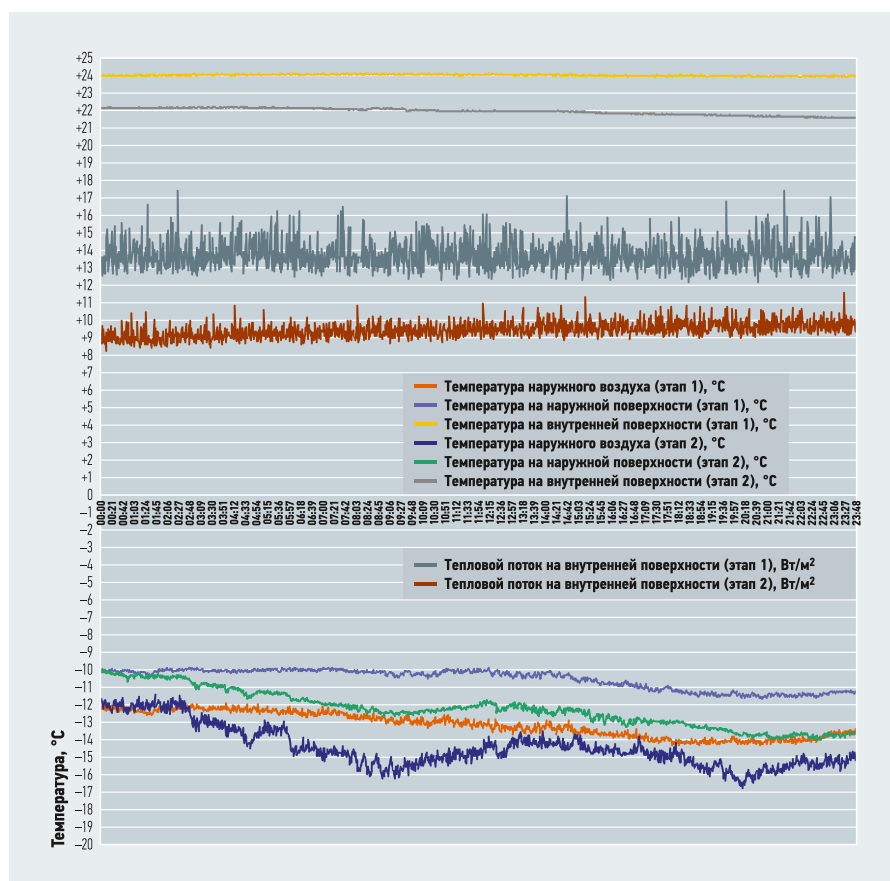
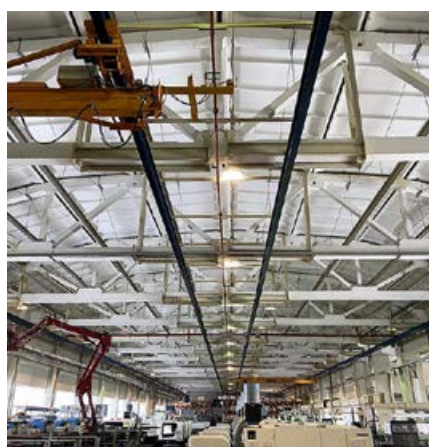


Рис. 6. Показания датчиков в ходе первого и второго этапов эксперимента

2. Системы водяного лучистого отопления за счёт большого коэффициента лучистой теплоотдачи имеют высокую плотность инфракрасного излучения, которое, в свою очередь, нагревает поверхности как внутренних, так и наружных ограждений, что повышает их температуру и позволяет защитить помещения от выпадения конденсата, но, в то же время, провоцирует большие тепловые потери через облучённые ограждающие конструкции здания или сооружения.

3. Энергоэффективность применения лучистых систем отопления на базе водяных инфракрасных излучателей достигается за счёт:

- меньшего температурного градиента по высоте помещения и отсутствия тепловой подушки, что снижает потери теплоты через покрытие помещения;
- снижения температуры воздуха рабочей зоны без снижения уровня комфорта за счёт более высокой радиационной температуры, что также снижает трансмиссионные теплотери;
- меньшей тепловой инерции, что позволяет увеличить время дежурного режима работы системы отопления и снизить длительность переходного режима.

1. Отопление и вентиляция: Учебн. для вузов. В 2-х ч. Ч. I: Отопление. Изд. 3-е, перераб. и доп. / П.Н. Каменев, А.Н. Сканави, В.Н. Богословский и др. — М.: Стройиздат, 1975. 483 с.
2. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики: Указ Президента РФ от 04.06.2008 № 889.
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Фед. закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ.
4. Бодров В.И., Бодров М.В., Смыков А.А. Исследование теплотехнических характеристик низкотемпературных инфракрасных излучателей // Журнал СОК, 2019. № 10. С. 32–36.
5. Jia H., Pang X., Haves P. Experimentally-determined characteristics of radiant systems for office buildings. Applied Energy. 2018. Vol. 221. Pp. 41–54.
6. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
7. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализ. ред. СНиП 23-02-2003. Дата введ.: 01.07.2013.
8. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I. Verification of conjugate heat transfer models in a closed volume with radiative heat source. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 72.
9. Kuznetsov G.V., Kurilenko N.I., Nee A.E. Mathematical modelling of conjugate heat transfer and fluid flow inside a domain with a radiant heating system. International Journal of Thermal Sciences. 2018. Vol. 131. Pp. 27–39.
10. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий (4-е изд.). — М.: АКХ им. К.Д. Памфилова; Госкомитет РФ по строительству и ЖКК, 2002. 127 с.
11. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Дата введ.: 29.05.2019. — М.: Стандартинформ, 2019.
12. МДС 23-1.2007. Методические рекомендации по комплексному теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионной техники. — М.: ФГУП «НИИ «Строительство»; ФГУП «ЦПП», 2007. 20 с.

References — see page 78.

Study of the economic efficiency of the use of a heating system based on water infrared emitters. Pp. 38–41.

Mikhail V. Bodrov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department; **Vladimir P. Boldin**, PhD-M.Sc., Associate Professor; **Alexander A. Smykov**, assistant, the Department of Heating and Ventilation, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU, Nizhny Novgorod city)

1. P.N. Kamenev, A.N. Skanavi, V.N. Bogoslovskij et al. *Otoplenie i ventilacija: Uchebn. dlja vuzov. V 2-h ch. Ch. I: Otoplenie* [Heating and ventilation: A textbook for universities. In two parts. Part I: Heating]. 3rd edition, rev. and exp. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of Literature on the Construction and Architecture ("Stroiizdat" Publishers)]. 1975. 483 p. [In Russian]
2. *O nekotoryh merah po povysheniju jenergeticheskoy i jekologicheskoy jeffektivnosti rossijskoj jekonomiki. Ukaz Prezidenta RF ot 04.06.2008 №889* [On some measures to improve the energy and environmental efficiency of the Russian economy. Decree of the President of the Russian Federation No. 889 of June 4, 2008]. [In Russian]
3. *Ob jenergoberezhenii i o povyshenii jenergeticheskoy jeffektivnosti, i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii: Federal'nyj zakon ot 23.11.2009 №261-FZ (red. ot 13.07.2015)* [On energy saving and on increasing energy efficiency, and on amending certain legislative acts of the Russian Federation. Federal Law of Russia No. 261 of November 23, 2009 (as Amended on July 13, 2015)]. [In Russian]
4. V.I. Bodrov, M.V. Bodrov, A.A. Smykov. *Issledovanie teplotekhnicheskikh harakteristik nizkotemperaturnykh infrakrasnykh izluchatelej* [Investigation of the thermal characteristics of low-temperature infrared emitters]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 10. Pp. 32–36. [In Russian]
5. H. Jia, X. Pang, P. Haves. Experimentally-determined characteristics of radiant systems for office buildings. *Applied Energy*. 2018. Vol. 221. Pp. 41–54.
6. *SanPiN 2.2.4.548–96. Gijenicheskie trebovanija k mikroklimatu proizvodstvennykh pomeshhenij* [Sanitary Norms and Regulations of Russia (Russian Public Health Regulations) No. 2.2.4.548–96. Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises]. [In Russian]
7. *SP 50.13330.2012. Teplovaja zashhita zdaniy. Aktualiz. red. SNiP 23-02-2003* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice) No. 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Updated edition of Building Norms & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 23-02-2003]. Data of init.: July 1, 2013. [In Russian]
8. V.I. Maksimov, T.A. Nagornova, N.I. Kurilenko. Verification of conjugate heat transfer models in a closed volume with radiative heat source. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 72.
9. G.V. Kuznetsov, N.I. Kurilenko, A.E. Nee. Mathematical modelling of conjugate heat transfer and fluid flow inside a domain with a radiant heating system. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 131. Pp. 27–39.
10. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniju rashodov topliva, jelektrojenergii i vody na vyrabotku teplo-ty otopitel'nymi kotel'nymi kommunal'nyh teplojenergeticheskikh predpriyatij (4-e izd.)* [Procedural Guidelines for the determination of consumption of fuel, electric power and water for generation of heat by heating boilers plants in public thermal energy facilities (4th edition)]. Moscow. *AKH im. K.D. Pamfilova* [Academy of Public Utilities named after K.D. Pamfilov]; *Goskomitet RF po stroitel'stvu i ZhKK* [State Committee of the Russian Federation for Construction and Housing and Communal Services]. 2002. 127 p. [In Russian]
11. *SP 131.13330.2018. Stroitel'naja klimatologija* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice) No. 131.13330.2018. Construction climatology]. Init. data: May 29, 2019. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment ("Standartinform" Publishers)]. 2019. [In Russian]
12. *MDS 23-1.2007. Metodicheskie rekomendacii po kompleksnomu teplotekhnicheskomu obsledovaniju naruzhnykh ograzhdajushhih konstrukcij s primeneniem teplovizionnoj tehniki* [Methodological documents in construction No. 23-1.2007. Guidelines for a comprehensive thermal inspection of external enclosing structures using thermal imaging equipment]. Moscow. *FGUP "NITS "Stroitel'stvo"* ["Construction" Research Center" Federal State Unitary Enterprise (FSUE)]; *FGUP "CPP"* ["Center for Design Products in Construction" FSUE]. 2007. 20 p. [In Russian]